
FLUXO DE CARGA EM SISTEMAS QUE APRESENTAM LINHAS DE POTÊNCIA NATURAL ELEVADA (LPNE)

Flávio V. Gomes*

Márcio P. Vinagre*

José L. R. Pereira*

Paulo N. Garcia*

* Faculdade de Engenharia – Campus UFJF, CEP 36036-330 – Juiz de Fora MG

ABSTRACT

This work presents an accurate approach for load flow calculation in electrical power systems in which high surge-impedance loading (HSIL) lines are present. The methodology consists in the use of three-phase power flow in phase coordinates for solving a sub-system where the unbalance effect due to HSIL lines are more accentuated. The traditional positive sequence load flow is used for the rest of the system. The proposed model has been validated in test systems.

KEYWORDS: Transmission line optimization, HSIL line, new technologies, transmission line parameters, power flow.

RESUMO

Este trabalho apresenta um procedimento preciso para o cálculo de fluxo de carga em sistemas elétricos de potência nos quais estão presentes linhas de potência natural elevada (LPNE). A metodologia consiste no uso do fluxo de potência trifásico em coordenadas de fase para solução de um subsistema onde os efeitos dos desequilíbrios causados pelas linhas LPNEs são mais acentuados. Para o restante do sistema adota-se o tradicional fluxo de carga de seqüência positiva. O modelo proposto foi

validado usando-se o sistema de 57 barras do IEEE.

PALAVRAS-CHAVE: Otimização de linhas de transmissão, LPNE, novas tecnologias, parâmetros de linhas de transmissão, fluxo de potência.

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de transmissão de crescentes blocos de energia a longas distâncias através de corredores cada vez mais restritos, ditados ou por pressões ambientais ou por restrições econômicas, impõe o projeto de linhas de transmissão de grandes capacidades (Dart *et alii*, 1998; Dart *et alii*, 1999; Neto *et alii*, 1999; Régis *et alii*, 1997).

Uma das características das linhas tradicionais é a padronização dos feixes de condutores. Engenheiros soviéticos perceberam que essa padronização era um limitante para o projeto ótimo de linhas. Houve então a edição de uma série de trabalhos (Aleksandrov *et alii*, 1983; Aleksandrov, 1993a; Aleksandrov and Afanas'yev, 1993b) que apresentavam novas concepções de projeto, baseados na otimização dos feixes.

Foi criado um novo conceito de linha de transmissão o qual emprega arranjos assimétricos para os subcondutores das fases ao invés da distribuição simétrica em círculo. Uma das principais características destas linhas otimizadas é o arranjo dos condutores de todas as fases ao longo de superfícies curvilíneas (fechadas: coaxial; ou

Artigo submetido em 12/12/00

1a. Revisão em 16/05/01; 2a. revisão em 27/03/02

Aceito sob recomendação do Ed. Assoc. Prof. Denizar C. Martins

abertas: vertical, horizontal ou parabólico) de modo a otimizar a distribuição de campo elétrico (Gabaglia *et alii*, 2000; Portela e Gomes, 1999; Salari, 1993). Um exemplo de geometria com superfície aberta é ilustrado na figura 2.

Métodos tradicionais para cálculo de parâmetros da linha não podem ser aplicados às linhas com arranjos assimétricos devido às suas singularidades de configuração. Sendo assim, para o uso prático destas linhas é necessário recorrer a outros métodos (Gomes, 1995) para cálculo de seus parâmetros.

Os valores dos parâmetros de seqüência positiva, obtidos a partir dos parâmetros elétricos de seqüência abc da linha, ao serem inseridos no fluxo de potência, não conduzem a valores de fluxo reais nas linhas (Régis *et alii*, 2000) sendo, portanto, necessário obter procedimentos que possam ser adotados para aproximar os resultados calculados dos resultados reais quando no sistema encontra-se inserida um linha deste tipo.

Este trabalho sugere procedimentos que podem ser adotados para obter os resultados do fluxo de potência próximos aos valores reais medidos. A metodologia utilizada consiste na determinação de uma região de influência ou subsistema onde o fluxo de potência trifásico, utilizando o método de injeção de correntes trifásico – MICT (Garcia, 1998), é adotado.

2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Uma linha de transmissão trifásica é um dispositivo passivo tendo como parâmetros matrizes de admitância transversal Y e de impedância longitudinal Z da forma apresentada em (1).

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$z_{aa} \neq z_{bb} \neq z_{cc} \quad z_{ab} \neq z_{ac} \neq z_{bc}$$

$$z_{ba} = z_{ab} \quad z_{ca} = z_{ac} \quad z_{cb} = z_{bc}$$

Pela equação (2) é aparente que as fases de um circuito trifásico estão mutuamente acopladas e que as correntes em qualquer condutor produzirão quedas de tensão nos condutores adjacentes. Além disso, estas quedas de tensão induzidas podem ser diferentes, inclusive para correntes balanceadas, visto que as impedâncias mútuas dependem inteiramente dos arranjos físicos dos cabos.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$V_a = z_{aa}I_a + z_{ab}I_b + z_{ac}I_c$$

As impedâncias mútuas são iguais somente quando os condutores encontram-se numa configuração de triângulo equilátero. Na prática, tal arranjo de condutores é raramente utilizado. Um dos meios de se equalizar as indutâncias mútuas é construir transposições ou rotações dos cabos da linha. Uma transposição é uma rotação física dos condutores feita de forma que cada condutor é movido para ocupar a próxima posição física de uma seqüência regular, como abc, bca, cab, etc. As impedâncias próprias dependem do raio médio geométrico, ou seja, da geometria do feixe.

Para as linhas de transmissão tradicionais completamente transpostas ou para efeito de simplificação, supõe-se que sua matriz de impedância longitudinal tem aspecto igual ao que é mostrado em (3).

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} z_s & z_m & z_m \\ z_m & z_s & z_m \\ z_m & z_m & z_s \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$z_s = \frac{z_{aa} + z_{bb} + z_{cc}}{3} \quad z_m = \frac{z_{ab} + z_{ac} + z_{bc}}{3}$$

Fazendo-se a transformação de (3) para componentes simétricas, a matriz transformada (4) será diagonal. Assim, o sistema, mesmo que as grandezas V e I sejam desequilibradas, pode ser calculado como a superposição de sistemas equilibrados desacoplados entre si.

$$Z_{012} = \begin{bmatrix} z_0 & & \\ & z_1 & \\ & & z_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Analogamente, pode-se obter a matriz de admitância transversal em componentes simétricas.

Para as LPNEs, as novas concepções de projetos de linhas baseados na otimização dos feixes conduzem a arranjos assimétricos e, conseqüentemente, as matrizes dos parâmetros elétricos calculados apresentam tanto os parâmetros próprios quanto os mútuos distintos entre si, e assim, a transformação por componentes simétricas não desacopla o sistema, originando (5).

$$Z_{012} = \begin{bmatrix} z_0 & z_{01} & z_{02} \\ z_{10} & z_1 & z_{12} \\ z_{20} & z_{21} & z_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Os fluxos de potência ativa e reativa nas linhas bem como as tensões nas barras terminais obtidos pelo cálculo do fluxo de potência de seqüência positiva, levando-se em conta os parâmetros médios da linha LPNE, são diferentes do fluxo e das tensões calculados considerando-se os parâmetros reais da linha LPNE. Assim é necessário utilizar uma metodologia diferente para a obtenção do fluxo de potência nas linhas de um sistema, quando este apresentar linhas de potência natural elevada.

3 SOLUÇÕES PARA O PROBLEMA

3.1 A solução ideal

Como foi visto no item 2, os programas de fluxo de carga devem permitir representar os parâmetros mútuos de impedância longitudinal e admitância transversal das LPNEs, os quais, se forem desconsiderados, podem causar divergências significativas entre os estudos e operação em tempo real. Desta forma, a solução ideal é utilizar o fluxo de potência trifásico (Garcia, 1998) o qual leva em conta tais parâmetros mútuos entre fases, como ferramenta para cálculo de fluxo de carga em sistemas onde se encontram inseridas linhas de potência natural elevada. Atualmente, o algoritmo utilizado para o cálculo do fluxo de carga trifásico é perfeitamente aplicável a qualquer sistema de potência, radial ou não (Garcia, 2000).

Esta solução não é muito aconselhável para grandes sistemas de potência, pois o tempo computacional gasto para o cálculo do fluxo de carga trifásico torna-se significativo com o aumento do número de barras. Além disso, a magnitude dos efeitos dos desequilíbrios causados pelas LPNEs são mais acentuados nas barras próximas a estas linhas.

3.2 A solução proposta

Uma solução eficiente para se obter o fluxo de carga quando existem LPNEs em um sistema de potência, é utilizar o fluxo trifásico somente para uma subrede, constituída pelas barras nas quais os efeitos de desequilíbrio da linha são mais acentuados, e utilizar o fluxo de potência de seqüência positiva para o resto do sistema (Gomes, 2000). Esta solução permite aliar a precisão do fluxo trifásico à rapidez do fluxo de potência de seqüência positiva.

Os resultados obtidos são aproximações dos valores reais obtidos quando se calcula o fluxo trifásico para todo o sistema, porém são bem melhores do que aqueles fornecidos apenas pelo fluxo de seqüência positiva.

4 DESCRIÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

4.1 Metodologia

Passo 1: A metodologia proposta consiste inicialmente em calcular o fluxo de carga de seqüência positiva para todas as barras do sistema.

Passo 2: Determinar o subsistema constituído pelas

barras nas quais os efeitos de desequilíbrios causados pela presença da LPNE sejam mais acentuados. Baseado em alguns testes realizados, inicialmente parte-se do conjunto constituído pelas barras de até a terceira vizinhança das barras terminais da linha de potência natural elevada (Gomes, 2000).

Passo 3: Utiliza-se (6) para a obtenção dos parâmetros das linhas do subsistema definido anteriormente, em seqüência abc, a partir dos parâmetros de seqüência positiva (Anderson, 1973).

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_s \\ z_m \end{bmatrix} \quad (6)$$

onde se assumiu: $z_0 = 3z_1$

Passo 4: As barras de fronteira do subsistema são transformadas em barras de referência, fixando os valores de tensão e ângulo utilizando os valores convergidos para estas barras pelo fluxo de seqüência positiva no passo 1.

Passo 5: Calcular o fluxo de carga trifásico para o subsistema obtido no passo 2, considerando-se os parâmetros de suas linhas em seqüência abc (passo 3) e as barras de fronteira modificadas pelo passo 4.

Passo 6: Após a convergência do fluxo de potência trifásico local, para todas as barras de fronteira verificar se a diferença máxima entre as potências calculadas pelo fluxo de carga local e pelo fluxo de seqüência positiva (passo 1) está dentro de uma tolerância especificada conforme será descrito na seção 4.2.

- Se esta diferença estiver dentro de uma tolerância pré-estabelecida, os valores dos fluxos e tensões no sistema são estes obtidos pelo fluxo trifásico para as barras e linhas do subsistema, e aqueles obtidos pelo fluxo de seqüência positiva para as barras e linhas externas ao subsistema.
- Se alguma barra não atender à tolerância anteriormente citada, deve-se expandir o subsistema englobando-se a próxima vizinhança da barra em questão. Na implementação do método esta expansão deve ser realizada automaticamente. Volta-se ao passo 2 e o processo iterativo prossegue até que a tolerância seja atendida para todas as barras de fronteira.

A metodologia apresentada nesta seção foi utilizada com sucesso em alguns sistemas teste tais como IEEE 57, 118 e 300 barras como descrito em Gomes (2000).

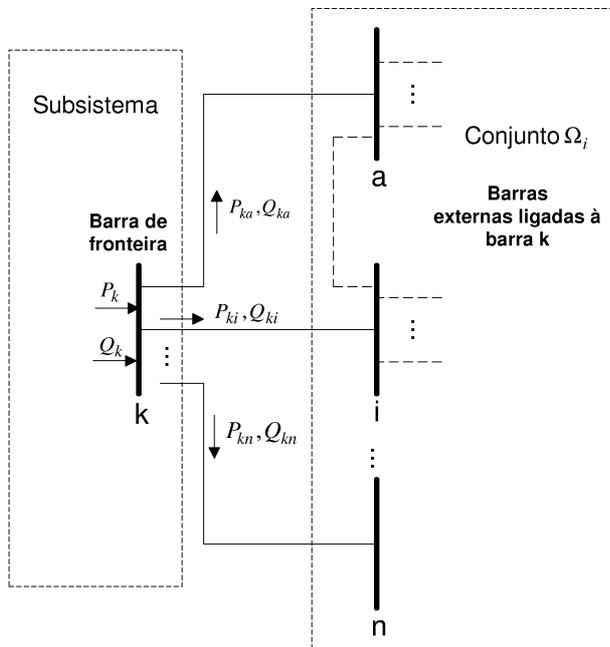


Figura 1: Fluxos através da barra de fronteira.

4.2 Diferenças de potência nas barras de fronteira entre os fluxos calculados.

Sejam:

k uma barra de fronteira do subsistema obtido conforme 4.1. passo 2;

Ω_i o conjunto de barras externas a este subsistema e ligadas à barra k ;

P_k, Q_k , as potências ativa e reativa injetadas na barra de fronteira k obtidas pelo fluxo de seqüência positiva;

P_k^*, Q_k^* , as potências ativa e reativa injetadas na barra de fronteira k obtidas pelo fluxo de potência trifásico para a subrede, conforme passo 5 de 4.1;

P_{ki}, Q_{ki} , os fluxos de potência ativa e reativa no ramo $k-i$, i pertencente a Ω_i , obtidos pelo fluxo de seqüência positiva, conforme o passo 1 de 4.1.

É necessário ressaltar que a subrede é definida como o conjunto de barras nas quais os efeitos de desequilíbrios causados pela LPNE são mais acentuados, ou seja, externamente não haverá grandes divergências entre os valores calculados pelo fluxo de seqüência positiva e os reais. O critério adotado para verificar se a subrede está adequada para representar tais efeitos de desequilíbrios consiste em avaliar a diferença entre os valores de inje-

ção de potência das barras de fronteira obtidos pelo fluxo trifásico e pelo fluxo de seqüência positiva. Tal diferença consiste numa aproximação a ser adotada, estabelecida através de uma tolerância.

Para se comparar a potência injetada na barra de fronteira k obtida pelo fluxo de seqüência positiva com o fluxo de potência trifásico é necessário que se adicione à injeção obtida na barra k pelo fluxo trifásico, o somatório das potências que fluem para as linhas externas, visto que o fluxo de carga trifásico não leva em consideração tais linhas. O somatório de potência que flui para as linhas externas é dado pela soma de todos os fluxos entre a barra de fronteira e as barras externas.

$$P_k^{\text{linhas}} = \sum_{i \in \Omega_i} P_{ki} \quad (7)$$

A equação (8) estabelece o critério acima mencionado.

$$\varepsilon_P = |P_k - (P_k^* + P_k^{\text{linhas}})| \quad (8)$$

ε_P consiste na diferença entre os valores da injeção de ativos na barra de fronteira k , calculado pelo fluxo de seqüência positiva e pelo fluxo trifásico. Considerações análogas devem ser feitas para os reativos.

$$Q_k^{\text{linhas}} = \sum_{i \in \Omega_i} Q_{ki} \quad \varepsilon_Q = |Q_k - (Q_k^* + Q_k^{\text{linhas}})|$$

Se todas as barras de fronteira tiverem ε_P e ε_Q menores que uma tolerância estabelecida, a subrede é capaz de representar corretamente os efeitos de distúrbios da LPNE, caso contrário, deve-se expandir o subsistema, até que

$$\varepsilon_P < \text{tol} \text{ e } \varepsilon_Q < \text{tol } \forall \text{ barra de fronteira}$$

O valor da tolerância depende de características da própria LT, da topologia da rede e da carga nas linhas.

4.3 Expansão do subsistema

Se for verificado que uma barra de fronteira não satisfaz à tolerância pré-estabelecida, deve-se expandir o sistema de forma que as barras imediatamente ligadas a esta sejam a nova fronteira. A antiga barra de fronteira retorna à condição inicial que possuía no sistema antes de ser transformada em barra de referência.

Cabe ressaltar que as novas barras de fronteira devem ter seus valores de tensão fixos conforme o passo 4 de 4.1 para a próxima iteração.

A cada iteração, o subsistema vai se expandindo até que a tolerância seja satisfeita.

4.4 Generalização para n linhas

O método descrito anteriormente pode ser estendido para um sistema contendo qualquer número de LPNEs.

Se as LPNEs estiverem próximas umas das outras (até a 3ª vizinhança) pode-se construir apenas uma subrede englobando todas as linhas. Neste caso a solução aplicada seria conforme feito para uma única linha.

Caso as linhas estejam afastadas umas das outras (além da 3ª vizinhança), monta-se tantas subredes quantas forem necessárias e para cada uma delas tem-se um fluxo trifásico independente, com valores ε_{PEEQ} relativos a cada uma das subredes.

5 RESULTADOS COM APROXIMAÇÃO MONOFÁSICA

Considere o sistema IEEE 57 barras (Power Sytem Test Archive), tendo a linha 1 entre as barras 1 (TURNER) e 2 (KANAWHA) substituídas por uma linha LPNE trifásica, 7 condutores por fase, 2 cabos pára-raios, cuja configuração é mostrada na figura 2. Os valores dos parâmetros transversais e longitudinais da linha foram obtidos pelo programa PARAM utilizando-se a metodologia abordada em Gomes (1995).

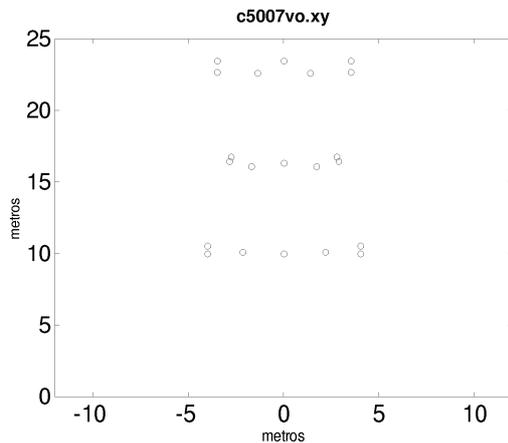


Figura 2: Configuração geométrica da LPNE utilizada.

As matrizes de parâmetros Z e Y da linha são:

$$Z = \begin{bmatrix} 0.0227 + j0.3726 & 0.0120 + j0.2413 & 0.0104 + j0.1758 \\ 0.0120 + j0.2413 & 0.0208 + j0.3690 & 0.0096 + j0.2056 \\ 0.0104 + j0.1758 & 0.0096 + j0.2056 & 0.0182 + j0.3085 \end{bmatrix} \Omega/\text{km}$$

$$Y = \begin{bmatrix} 0 + j9.5580 & 0 - j3.6121 & 0 - j1.0017 \\ 0 - j3.6121 & 0 + j9.4238 & 0 - j3.4966 \\ 0 - j1.0017 & 0 - j3.4966 & 0 + j8.9861 \end{bmatrix} \mu S/\text{km}$$

Utilizando-se as aproximações mencionadas em (3) e fazendo-se a transformação para componentes simétricos obtêm-se os valores de impedâncias e admitâncias que devem ser utilizados no cálculo do fluxo de potência de seqüência positiva.

$$R1 = 0.9893E-02 \Omega/\text{km} \quad X1 = 0.1425E+00 \Omega/\text{km} \\ G1 = 0.0000E+00 \text{ s}/\text{km} \quad B1 = 0.1203E-04 \text{ s}/\text{km}$$

Admitindo-se que o comprimento da linha seja 300 km, convertendo-se os parâmetros para p.u. utilizando-se as bases do sistema, e calculando-se o fluxo de potência de seqüência positiva, obtêm-se os resultados aproximados para os fluxos de potência ativa e reativa nas linhas e tensões nas barras.

A figura 3 mostra um subsistema constituído pelas barras próximas à LPNE onde os erros são mais acentuados. Os resultados obtidos para as tensões nas barras e fluxos nas linhas são apresentados pelas tabelas 1 e 2, respectivamente.

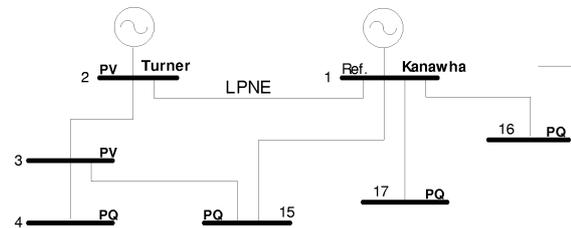


Figura 3: Barras vizinhas à LPNE.

Tabela 1: Tensões nas barras do sistema IEEE 57 próximas à LPNE, obtidas pelo fluxo de potência de seqüência positiva.

Número da Barra	Tensão em p.u.	
	V	θ
01	1.0400	0.00
02	1.0100	-6.61
03	0.9850	-8.92
04	0.9804	-10.08
15	0.9872	-8.85
16	1.0125	-9.72
17	1.0165	-5.84

Os valores reais encontrados em operação podem ser obtidos pelo fluxo de potência trifásico (Garcia, 1998), utilizando-se os parâmetros reais da linha LPNE e não suas médias.

Tabela 2: Fluxos nas linhas do sistema IEEE 57 próximas à LPNE, obtidos pelo fluxo de seqüência positiva.

Fluxos nas linhas em p.u.			
Barra De	Barra Para	Ativo	Reativo
01	02	0.5487	-0.2395
02	03	0.5141	0.0845
03	04	0.5256	-0.0495
03	15	-0.0296	-0.0590
01	15	1.8125	0.3296
01	16	0.8678	-0.0086
01	17	1.0088	0.0397

Para a obtenção dos parâmetros das linhas do sistema IEEE 57 barras em seqüência abc, que são utilizados pelo fluxo trifásico, a partir dos parâmetros de seqüência positiva utilizou-se (6).

Os resultados obtidos pelo fluxo de potência trifásico para tensões nas barras e fluxos nas linhas são apresentados pelas tabelas 3 e 4, respectivamente.

Comparando-se os valores de potência ativa e reativa nas linhas obtidos pelo fluxo de potência de seqüência positiva (Tabela 2) com os reais calculados pelo fluxo de potência trifásico (Tabela 4) observam-se diferenças significativas, mostradas nas tabelas 5 e 6.

Tabela 3: Tensões nas barras do sistema IEEE 57 próximas a LPNE, obtidas pelo fluxo de potência trifásico.

Barra	Fase A		Fase B		Fase C	
	V	θ	V	θ	V	θ
01	1.0400	0.00	1.0400	-120.00	1.0400	120.00
02	1.0100	-6.22	1.0100	-126.00	1.0100	112.71
03	0.9850	-8.72	0.9850	-128.56	0.9850	110.71
04	0.9804	-9.90	0.9805	-129.74	0.9803	109.57
15	0.9872	-8.75	0.9875	-128.64	0.9871	110.93
16	1.0126	-9.67	1.0127	-129.60	1.0123	110.16
17	1.0165	-5.81	1.0166	-125.78	1.0163	114.09

Tabela 4: Fluxos nas linhas do sistema IEEE 57 com LPNE, obtidos pelo fluxo de potência trifásico.

Fluxos reais nas linhas em p.u.			
Barra De	Barra Para	Ativo	Reativo
01	02	0.5588	-0.2410
02	03	0.5240	0.0814
03	04	0.5274	-0.0500
03	15	-0.0219	-0.0615
01	15	1.8056	0.3299
01	16	0.8662	-0.0086
01	17	1.0072	0.0397

Tabela 5: Maiores erros em p.u. nos fluxos nas linhas comparando-se o fluxo de seqüência positiva com o trifásico

Maiores erros dos fluxos nas linhas em p.u			
Barra De	Barra Para	Ativo	Reativo
01	02	0.010104	0.001536
03	02	0.009579	0.004014

Tabela 6: Maiores erros nos fluxos nas linhas em kW e kVAr, considerando-se uma base de 100 MVA, comparando-se o fluxo de seqüência positiva com o trifásico

Barra De	Barra Para	Ativo	Reativo
01	02	1010.45 kW	153.63 kVAr
03	02	957.996 kW	401.49 kVAr

É importante ressaltar que as divergências observadas se deve à não consideração pelos programas de fluxo de carga de todas as mútuas de seqüência dos parâmetros da LPNE. A magnitude dos efeitos da LPNE no sistema depende de características da própria LT, da topologia da rede e da carga nas linhas.

6 RESULTADOS COM A METODOLOGIA PROPOSTA

As tabelas 7 e 8 mostram respectivamente os valores de tensão e fluxos para o mesmo sistema exemplo utilizado no item 3, considerando uma tolerância de 0,004 (0,4%) para a diferença das injeções de potências nas barras de fronteira entre os fluxos trifásico e de seqüência positiva.

Tabela 7: Tensões nas barras do sistema IEEE 57 próximas a LPNE, obtidas pelo método proposto.

Barra	Fase A		Fase B		Fase C	
	V	θ	V	θ	V	θ
01	1.0400	0.00	1.0400	-120.00	1.0400	120.00
02	1.0100	-6.27	1.0100	-126.12	1.0100	112.83
03	0.9850	-8.81	0.9850	-128.74	0.9850	110.89
04	0.9803	-10.01	0.9803	-129.96	0.9804	109.79
15	0.9872	-8.82	0.9872	-128.79	0.9873	111.07
16	1.0125	-9.71	1.0125	-129.71	1.0125	110.27
17	1.0165	-5.84	1.0165	-125.84	1.0165	114.15

Comparando-se os valores de potências ativas e reativas nas linhas, obtidos pelo método proposto, com os reais calculados pelo fluxo de potência trifásico observa-se que os valores são bem melhores que aquelas obtidas pelo fluxo de potência de seqüência positiva.

Tabela 8: Fluxos nas linhas do sistema IEEE 57 próximas a LPNE, obtidos pelo método proposto.

Fluxos reais nas linhas em p.u.			
Barra De	Barra Para	Ativo	Reativo
01	02	0.5608	-0.2403
02	03	0.5260	0.0809
03	04	0.5308	-0.0506
03	15	-0.0234	-0.0608
01	15	1.8102	0.3298
01	16	0.8677	-0.0086
01	17	1.0087	0.0397

Tabela 9: Maiores erros em p.u. nos fluxos nas linhas comparando-se o método proposto com o fluxo trifásico

Maiores erros dos fluxos nas linhas em p.u			
Barra De	Barra Para	Ativo	Reativo
01	02	0.001992	0.000683
03	02	0.001878	0.000753

Tabela 10: Maiores erros nos fluxos nas linhas em kW e kVAr, considerando-se uma base de 100 MVA, comparando-se o método proposto com o trifásico.

Maiores erros dos fluxos nas linhas em kW/kVAr			
Barra De	Barra Para	Ativo	Reativo
01	02	199.27 kW	68.38 kVAr
03	02	187.79 kW	75.31 kVAr

A convergência do método acima foi alcançada para uma subrede constituída de 20 barras e 28 linhas, o que representa uma economia de apenas 37 barras para o cálculo do fluxo trifásico. Entretanto, o método proposto é aconselhável para grandes sistemas de potência nos quais os efeitos das LPNEs podem ser obtidos calculando-se o fluxo trifásico para apenas um pequeno subsistema, ao invés de todo o sistema, conseguindo-se significativa redução de tempo computacional. Caso seja necessário calcular o fluxo de carga para pequenos sistemas com LPNE, recomenda-se utilizar o fluxo de potência trifásico para todo o sistema. Para que os resultados sejam ainda mais próximos, é necessário que a tolerância utilizada pelas barras de fronteira seja menor. Em contrapartida, o sistema terá um número maior de barras, o que ocasiona um aumento no tempo de execução do fluxo trifásico.

7 CONCLUSÕES

O fluxo de potência ativa e reativa nas linhas, bem como as tensões nas barras terminais obtidos pelo cálculo do fluxo de potência de seqüência positiva levando-se em conta os parâmetros de seqüência positiva da LPNE, são diferentes dos valores de fluxo e tensões medidos em operação. Esta distorção deve-se à assimetria dos parâmetros elétricos de seqüência abc da LPNE, pois é a partir da média aritmética destes valores que são obtidos os parâmetros de seqüência positiva a serem utilizados pelo fluxo de potência monofásico.

O método proposto para se obter o fluxo de potência em um sistema quando este apresenta LPNE consiste em utilizar o fluxo trifásico somente para uma subrede, constituída pelas barras nas quais os efeitos de desequilíbrio da linha são mais acentuados, e utilizar o fluxo de seqüência positiva para o resto do sistema.

Esta solução permite aliar a precisão do fluxo trifásico à rapidez do fluxo de seqüência positiva. Os resultados obtidos são aproximações dos valores reais, porém, são bem melhores do que aqueles fornecidos apenas pelo fluxo de seqüência positiva.

A metodologia proposta resolve o fluxo de carga dentro da precisão requerida pelo estudo que se está fazendo.

Os resultados obtidos favorecem a inclusão do programa de fluxo de carga trifásico nos estudos dos sistemas elétricos.

REFERÊNCIAS

- Aleksandrov, G. N., G. A. Evdokunin and G. V. Podporokin (1983). Parameters of overhead compact transmission lines. *Elektrichestvo*, No. 4, 10-17, U.S.S.R.
- Aleksandrov, G. N. (1993a). Optimization of overhead transmission line construction with increased nominal power. *Elektrichestvo*, No. 1, 2-9, U.S.S.R.
- Aleksandrov, G. N. & A. I. Afanas'yev (1993b). Optimization of the design of extra-high-voltage transmission lines. *Elektrichestvo*, No. 8, 1-10, U.S.S.R.
- Anderson, P. M. (1973). Symmetrical Components. Analysis of Faulted Power Systems, pp. 28, 1st ed., The Iowa State University Press, U.S.A..
- Dart, F. C., L. A. Domingues, A. R. Carvalho, W. W. Ping, F. P. Salles, J. C. Salari, J. Régis, S. J. Cavalcanti, A. P. Neto, P. C. Esmeraldo e M. J. Maia (1998). The HSIL Line – A New Approach for System Planning. *VI SEPOPE*, Salvador, BA, Brasil.

- Dart, F. C., O. J. Régis, S. G. Cavalcanti, L. A. Domingues, A. P. Neto e C. R. Barbosa (1999). Validação de uma nova tecnologia para transmissão em 500 kV. *XV SNPTEE*, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil.
- Gabaglia, C. P. R., C. M. Oliveira e M. A. Sondermann. (2000). Avaliação paramétrica de feixes condutores para LPNE em 500 kV. *VII SEPOPE*, Curitiba, Brasil.
- Garcia, P. N. (1998). Fluxo de Potência em Sistemas de Distribuição: Uma formulação trifásica. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Brasil.
- Garcia, P. N.; Pereira, J.L.R.; Carneiro, S., Jr.; da Costa, V.M.; Martins, N (2000). Three-phase power flow calculations using the current injection method. *Power Systems, IEEE Transactions on*, Vol: 15 Issue: 2 , May 2000 Page(s): 508 – 514.
- Gomes, F. V. (2000). Fluxo de Potência em Sistemas que Apresentam Linhas de Potência Natural Elevada, Dissertação de mestrado, UFJF, Brasil.
- Gomes, J. S. (1995). Otimização e análise de linhas de transmissão. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Brasil.
- Neto, A. P., O. J. Régis, J. S. Sarmiento, R. L. Silva, S. J. Cavalcanti, F. C. Dart e L. A. Domingues (1999). Novos métodos para aumento de potência de LT até 230 kV: Estudos, Projeto e Implantação comercial. *XV SNPTEE*, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil.
- Portela, C. M. & J. S. Gomes (1999). Linhas não convencionais com elevada capacidade de transmissão – Análise paramétrica. *XV SNPTEE*, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil.
- Power System Test Archive:
<http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>.
- Régis, J. O, S. J. Cavalcanti, A. P. Neto e F. Dart (1997). Estudo e Aplicação do feixe expandido em LT de 500 kV. *XIV SNPTEE*, Grupo III – Linhas de Transmissão, Belém, PA, Brasil.
- Régis, J. O., A. R. Freire, J. E. Varela e F. Dart (2000). Experiência operativa com as linhas de transmissão de 230 kV recapitadas com feixe expandido. *VII SEPOPE*, Curitiba, Brasil.
- Salari, J. C. (1993). Otimização da geometria dos feixes de linhas de transmissão. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Brasil.