

Fluxo de Potência Trifásico via Injeção de Corrente para a Avaliação do Efeito do Desbalanço de Carga

William C. Carvalho e Jonas R. Pesente

Laboratório de Automação e Simulação de Sistemas Elétricos – PTI - Unioeste

Brasil

RESUMEN

O aumento significativo da geração distribuída nos sistemas elétricos implica que sejam avaliados os efeitos do desequilíbrio de carga entre as fases, condição típica de sistemas de distribuição, sobre geradores síncronos conectados nas redes de distribuição. Tais análises demandam a adaptação de algoritmos e modelos que descrevem os sistemas elétricos, tal como o cálculo de fluxo de potência. Neste contexto este trabalho utiliza o cálculo do fluxo de potência trifásico via injeção de corrente, que possibilita a avaliação de casos com desbalanço de carga e linhas com impedâncias mútuas entre as fases. Foi verificado, a partir de simulações, que o algoritmo implementado apresenta soluções compatíveis com as do aplicativo ATP, em casos idênticos. Adicionalmente, tal algoritmo foi utilizado para avaliar dois sistemas sob condições de desequilíbrio de carga e com presença de impedâncias mútuas entre as fases. Os resultados obtidos sugerem que os diferentes valores de tensões e potências em cada fase podem ser significativos, tornando relevante o uso de modelos trifásicos.

PALABRAS CLAVES

Geração Distribuída, Fluxo de Potência Trifásico, Método de Injeção de Corrente, Sistemas com Desequilíbrio de Carga

1 INTRODUCCIÓN

Atualmente os sistemas elétricos de potência estão sofrendo certa reestruturação devido à necessidade da diversificação da matriz energética, em adição da desregulamentação dos sistemas elétricos [1]. Neste contexto, a modalidade da Geração Distribuída (GD), presente em numerosos países [2,3,4], vem se estabelecendo. Em termos gerais, “GD” significa a geração de energia elétrica através de geradores de pequeno porte, conectados nos patamares de distribuição ou próximo do centro consumidor dos Sistemas de Energia Elétrica (SEEs) [5], e não despachados pelo operador da rede [6].

Esta mudança no setor elétrico impacta consideravelmente a operação dos SEEs, principalmente nos patamares de distribuição, tornando necessária a atualização dos estudos e algoritmos que descrevem o modelo de tais sistemas elétricos [7]. Neste contexto, evidenciam-se os estudos de fluxo de potência, que têm como objetivo determinar como a potência se ramifica na rede e afeta as tensões nos nós de forma a atender as cargas.

Em contraste ao fluxo de potência unifilar, aplicado aos SEE de alta tensão onde é considerada a distribuição equânime de potência entre as fases, o fluxo de potência trifásico permite representar o desequilíbrio de carga e as impedâncias mútuas [8]. Nos sistemas de alta tensão tal consideração de representação por equivalente monofásico é adequada, pois simplifica substancialmente a formulação e análise. Nos Sistemas de Distribuição (SD), no entanto, o desbalanço de potência entre as fases é significativo, e a representação unifilar não é mais aplicável [8].

Nos SDs a divisão desigual de cargas entre as fases, devido à presença de cargas monofásicas e bifásicas, adicionada a linhas de transmissão assimétricas, submete os geradores o desbalanço de corrente entre as fases [9], que pode causar superaquecimento, estresse mecânico, aumento das perdas e ineficiência, dentre outros efeitos indesejados [10,11].

Adicionalmente, os sistemas de distribuição apresentam relação R/X significativamente superior à relação de sistemas de transmissão, o que pode tornar inaplicáveis os algoritmos usualmente empregados em sistemas de grande porte.

Nesse contexto a formulação via injeção de corrente se apresenta vantajosa para solução do sistema algébrico não linear de fluxo de potência em condições de esparsidade e dificuldades de inversão matricial - cômputo realizado nos métodos tradicionais [8]. Neste contexto, este trabalho utiliza a formulação do fluxo de potência trifásico via injeção de corrente para avaliar sistemas testes sob condições de desequilíbrio de carga entre as fases e a presença de impedâncias mútuas.

Este trabalho está organizado como segue: na Seção 2 são apresentados os modelos dos principais componentes em um problema de fluxo de potência, na Seção 3 apresentam-se as simulações e resultados e a Seção 4 encerra o trabalho com as conclusões.

2 MODELAGEM

Geradores, transformadores, linhas de transmissão e os centros consumidores são os principais elementos dos SEEs. Neste capítulo será descrito como cada componente será modelado no fluxo de potência trifásico.

2.1 Geradores

Os gerados têm a principal função de entregar potência ativa e reativa para o sistema. Neste presente trabalho são especificados o módulo da tensão nos terminais e a potência ativa injetada no sistema. A potência reativa é ajustada no processo iterativo do cálculo do fluxo de potência de forma a atender as necessidades da rede em estudo.

2.2 Transformadores

No problema de fluxo de potência, o transformador é modelado por seu circuito de dispersão, uma vez que as perdas resistivas não são significantes no fluxo de potência.

2.3 Linhas

O modelo utilizado para as linhas é o tradicional modelo π (PI), no qual a impedância série e as admitâncias em derivação são representadas por matrizes quadradas de terceira ordem. No caso trifásico a representação é ilustrada pela Figura 1.

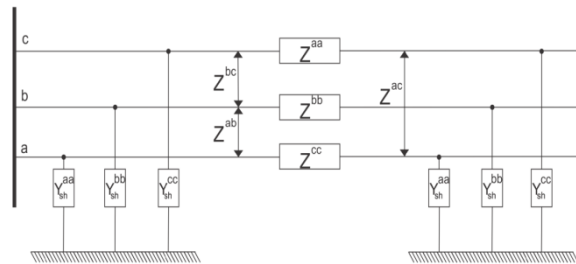


Figura 1: Modelo π Equivalente da Linha Trifásica [8]

2.4 Centros Consumidores

Os centros consumidores são representados por cargas que drenam potência ativa e reativa constante e especificada. As cargas são ligadas em estrela-aterrada, porém, quando se trata de sistemas de distribuição é comum a existência de derivações monofásicas ou bifásicas. Em tais casos, convém empregar uma impedância elevada para ramos inexistentes. A matriz (1) ilustra o uso deste artifício em uma derivação bifásica nas fases a e b.

$$[Z_{km}^{abc}] = \begin{bmatrix} Z_{km}^{aa} & Z_{km}^{ab} & 0 \\ Z_{km}^{ba} & Z_{km}^{bb} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{15} \end{bmatrix} \quad (1)$$

3 SIMULACIONES E RESULTADOS

A partir do algoritmo do fluxo de potência via injeção de corrente, foram utilizados dois sistemas para avaliação do desbalanço de carga entre as fases com a presença de impedâncias mútuas.

3.1 Sistema 1

Nesta topologia de 3 nós apresentada em [8], que tem seu diagrama unifilar representado na Figura, foi aplicado um fator de desequilíbrio de 40% entre as cargas, isto é, decrementou-se 40% da carga na fase A, manteve a carga em B e incrementou 40% de carga na fase C, mantendo assim a potência trifásica constante. Nas linhas deste mesmo sistema foram adicionadas impedâncias mútuas de 60% do valor das impedâncias próprias.

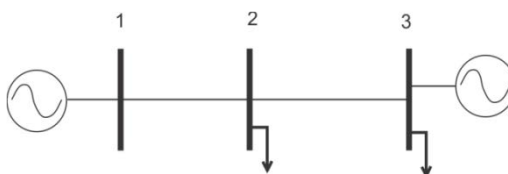


Figura 2: Diagrama Unifilar do Sistema de 3 Nós

A solução do fluxo via método injeção de corrente obteve os resultados explicitados na Tabela I e Tabela II.

Tabela I: Resultado das Tensões nos Nós em p.u.

Nó	Tipo	Fase A	Fase B	Fase C
1	V θ	1,000 0°	1,000 -120°	1,000 120°
2	PQ	1,028 -0,75°	1,004 -121,05°	0,997 116,58°
3	PV	1,000 -0,92°	1,000 -122,88°	1,000 115,25°

Tabela II: Resultado das Potências Ativa e Reativa (P + j Q) Gerada nos Nós em p.u.

Nó	Fase A	Fase B	Fase C
1	0,0897 - j0,1553	0,1513 - j0,1911	0,2101 - j0,1074
3	0 - j0,0705	0 + j0,0958	0 + j0,1441

Esta simulación foi comparada a reposta obtida no cálculo do fluxo com o aplicativo *Alternative Transient Program (ATP)*. Tal aplicativo possibilita a representação trifásica detalhada do sistema, tornando viável o estudo considerando desbalanços de carga e com representações de impedâncias mútuas.

A partir dos resultados obtidos no fluxo, foram utilizados as tensões nos nós 1 e 3 para especificar os valores das fontes de tensões no aplicativo ATP. Em tal aplicativo foi verificado as tensões de fase no nó intermediário e as potências fornecidas/absorvidas pelos nós extremos do sistema.

A Figura 3 ilustra os valores máximos das senóides das tensões na fase A, B e C em regime, que para o caso particular avaliado, se encontram a 0,035ms, 5,60ms e 11,27ms, respectivamente, defasados em relação a referência, que em graus é equivalente ao apresentado na Tabela I.

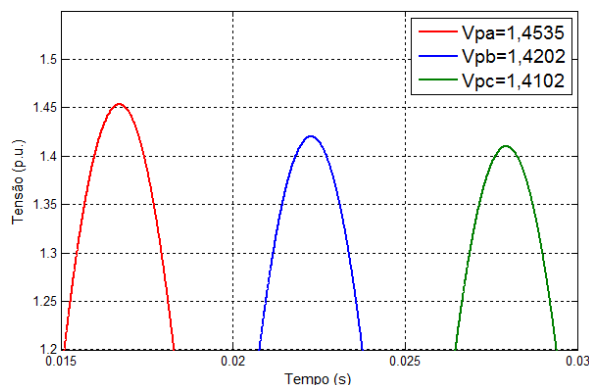


Figura 3: Tensões de Fase no Nó 2

Os valores de potências fornecidas pelos nós 1 e 3 apresentados no aplicativo ATP também coincidiram com o do fluxo de potência via injeção de corrente. A Figura 4 e Figura 5 apresentam as potências ativas e reativas fornecidas pelos nós 1 e 3 respectivamente.

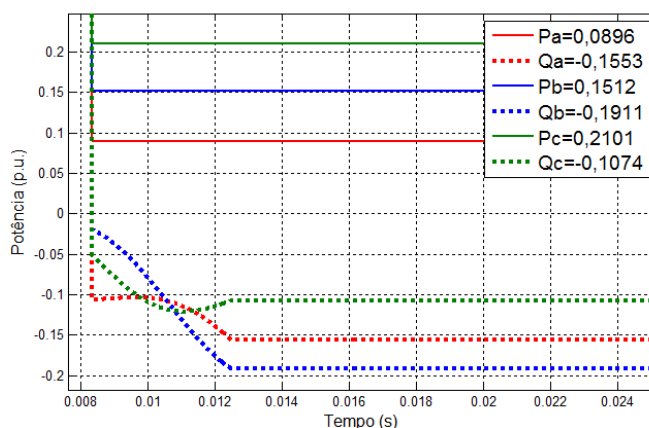


Figura 4: Potências Ativa e Reativa Gerada no Nó 1

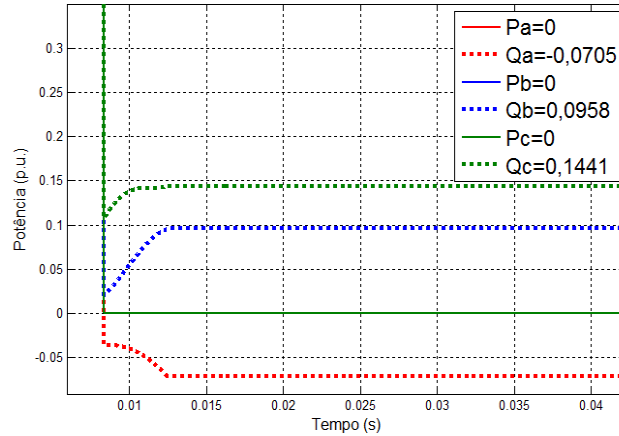


Figura 5: Potências Ativa e Reativa Gerada no Nó 3

Fica evidente na Tabela II que as potências fornecidas pelo nó V θ se adequaram ao desequilíbrio de carga mantendo assim o balanço de potência.

Da Tabela I constata-se que na fase A, onde há menor carregamento, o ângulo de carga não ultrapassa 0,92°. Em contradição, na fase C, onde há nível de carga mais elevado que a fase A, apresenta abertura angular de até 4,75°, como esperado para casos onde há maior carregamento. Vale ressaltar que as tensões no nó 2 tem uma diferença de 0,031 p.u. entre a fase A e a fase C, o que dependendo da análise pode-se tornar um valor significativo.

3.2 Sistema 2

Este sistema de distribuição real localizado no interior do estado de São Paulo, Brasil, possui um total de 32 nós e 34 linhas como representa a Figura 6, dado em [12]. Nesta simulação foi adicionado um fator de desequilíbrio de carga entre as fases de 40% e impedâncias mútuas comum valor de 60% das impedâncias próprias das linhas.

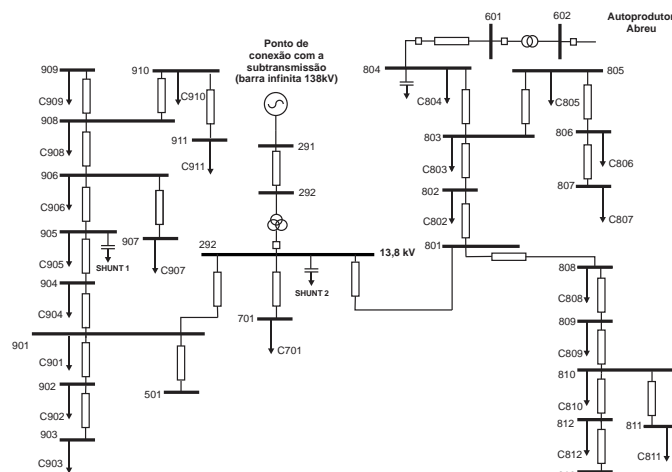


Figura 6: Diagrama Unifilar do Sistema 2

Na Tabela III e Tabela IV são apresentados os resultados de maior relevância das tensões e potências nos nós.

Tabela III: Resultado das Tensões nos Nós em p.u.

Nó	Tipo	Fase A	Fase B	Fase C
291	V θ	1,000 0°	1,000 -120°	1,000 120°
602	PV	1,020 -0,74°	1,020 -122,19°	1,020 117,17°
813	PQ	1,011 -0,04°	0,998 -120,87°	1,009 118,17°
903	PQ	1,012 -0,04°	0,996 -120,89°	1,008 118,03°
911	PQ	1,013 -0,09°	0,994 -120,81°	1,004 117,90°

Tabela IV: Resultados das Potências Ativa e Reativa (P+jQ) Gerada nos Nós em MVA

Nó	Fase A	Fase B	Fase C
291	1,0821- j0,6776	1,8525- j1,1155	2,5431- j0,6266
602	1,0000 + j0,5945	1,6667 + j1,0126	2,3333 + j0,5031

Da Tabela IV se verifica que o no nó de geração foi aplicado o fator de desequilíbrio diretamente. Diferente do nó PV, o nó de folga (291) apresenta os resultados desiguais de potências entre as fases a partir do cálculo do fluxo. Tais resultados são os valores necessários para manter o balanço de potência no sistema.

É possível verificar na Tabela III que o ângulo de carga na fase A pode atingir 0,04°, enquanto que na fase C, onde há um carregamento maior, a abertura angular máxima chega a 2,83°. Em relação ao módulo das tensões nos nós, encontra-se uma diferença máxima no nó de carga 911 de 0,019 p.u. entre as fases.

Nesta simulação as diferenças entre uma fase e outra foram menos significativas em relação ao Sistema 1. Essa diferença deve-se ao fato de que o Sistema 1 encontra-se relativamente mais carregado que o Sistema 2, conseqüentemente a análise dos diferentes valores encontrado entre as fases se tornam mais significativo.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi utilizada a formulação do algoritmo para solução do fluxo de potência trifásico a partir das equações de correntes injetadas nos nós, útil para análise de sistemas de distribuição, onde são evidentes a radialidade e a alta relação R/X.

Os resultados obtidos foram compatíveis com aqueles apresentados pelo aplicativo ATP, validando o algoritmo implementado.

Sobretudo, foi verificado que o desequilíbrio de carga entre as fases analisadas afetou a condição de regime do sistema de forma significativa. A partir da comparação entre o caso equilibrado e o caso desequilibrado do sistema 1 foi possível verificar uma diferença máxima do módulo de tensão no nó 2 de 0,27pu, e uma diferença máxima na fase da tensão do nó 3 de 6,93°. Para o sistema 2 foi verificado entre o caso equilibrado e desequilibrado uma diferença do o módulo da tensão no nó 911 de 0,014pu, e uma diferença no ângulo da tensão do nó 602 de 3,6°.

Por final, conclui-se que o efeito do desequilíbrio entre as fases teve maior impacto em sistemas carregados. Adicionalmente, verificou-se que tal desequilíbrio pode afetar de forma significativa as tensões nos nós, tornando necessário a utilização de modelos trifásico.

5 BIBLIOGRAFIA

- [1] N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen and G. Strbac, *Embedded Generation*. London: The Institution of Engineering and Technology, 2000, 292 p.
- [2] M. Wang and J. Zhong, “Development of Distributed Generation in China,” in *Proc. 2009 IEEE Power and Energy Society General Meeting*.
- [3] International Energy Agency, *Distributed Generation in Liberalized Electricity Markets*. Paris: OECD/IEA, 2002, 125 p.
- [4] T. Shinji, A. Yokoyama and Y. Hayashi, “Distributed Generation in Japan,” in *Proc. 2009 IEEE Power and Energy Society General Meeting*.
- [5] T. Ackermann, G. Andersson and L. Söder, “Distributed Generation: a definition,” *Electric Power Systems Research*, vol. 57, n. 3, Apr.2001, pp. 195-204.
- [6] V. V. Thong, J. Driesen and R. Belmans, “Dispersed Generation Interconnection and Its Impact on Power Loss and Protection System,” in *Proc. 2004 IEEE Young Researchers Symposium in Electrical Power Engineering*.
- [7] P. A. N. Garcia, J. L. R. Pereira and S. C. Junior, “Fluxo de Potência Trifásico Por Injeção de Corrente”, *Revista controle e automação*, 2001.
- [8] H. Q. Pereira, “Fluxo de Potência Trifásico: Um Estudo Comparativo e Uma Nova Metodologia de Solução”, *Resumo da tese de mestrado*. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2006.
- [9] W. H. Kersting, *Distribution Systems Modeling and Analysis*, Boca Raton: CRC Press, 2002, 314p.
- [10] A. Siddique, G. S. Yadava and B. Singh, “Effects of Voltage Unbalance on Induction Motors”, *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2004.
- [11] A. D. Kolagar, P. Hamedani and A. Shoulaie, “The Effects of Transformer Connection Type on Voltage and Current Unbalance Propagation”, *Iran University of Science and Technology*, 308 p.
- [12] L. V. L. de Abreu, “Dynamic Performance of Synchronous Generators Connected to Electric Power Distribution Systems,” *Master’s thesis*, State University of Campinas (UNICAMP), Campinas, SP, Brazil, June 2005.