



VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005

Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 01 7838

Tópico: Análise, Diagnóstico e Soluções

CÁLCULO DE PROPAGAÇÃO DE HARMÔNICOS EM ALIMENTADORES DE DISTRIBUIÇÃO ATRAVÉS DE EQUIVALENTES NORTON RECURSIVOS

CRISLUCI KARINA SOUZA
SANTOS

UFRN

JOSÉ TAVARES DE OLIVEIRA

UFRN

MANOEL FIRMINO DE
MEDEIROS JÚNIOR

UFRN

RESUMO

Apresenta-se neste trabalho um algoritmo para determinação de grandezas harmônicas em redes radiais. As fontes de distúrbio são modeladas através de injeções de correntes, enquanto que as cargas, através de resistências, indutâncias ou capacitâncias, definidas para a frequência fundamental. O algoritmo baseia-se em circuitos equivalentes de Norton, vistos por cada nó da rede, em direção às cargas. O seqüenciamento de cálculo é idêntico ao do Fluxo de Carga Soma de Potências (*Forward-Backward Sweep*). Esse algoritmo permite ainda, através do uso de programação simbólica, realizar um estudo do comportamento em frequência da rede.

PALAVRAS-CHAVE

Harmônicos, equivalentes-Norton, funções de rede, resposta em frequência.

1.0 INTRODUÇÃO

Uma das grandes preocupações atuais da Engenharia de Distribuição diz respeito à propagação de grandezas harmônicas na rede, de maneira a avaliar a influência da distorção nas formas de onda de tensão ou de corrente, produzida por um determinado consumidor, nas instalações dos demais consumidores da rede. Com esse objetivo, diversos algoritmos têm sido propostos na literatura técnica. Em sua maioria,

baseia-se em formulações tradicionais para cálculo de fluxo de carga, na frequência fundamental. Uma grande limitação desses algoritmos, em termos de desempenho computacional, decorre da necessidade de faturação repetida das matrizes de rede, para cada frequência de interesse, a fim de resolver um sistema de equações lineares. Algumas formulações usam a matriz impedância de barra [2], cujos elementos precisam ser obtidos para cada frequência. Uma formulação mais recente adota o algoritmo do somatório de correntes [1], sem que sejam necessárias faturações ou avaliações repetidas de parâmetros das matrizes de rede (Y ou Z). De acordo com esse algoritmo, percorre-se a rede radial, partindo das cargas, em direção à subestação, calculando as correntes-somas, para avaliar as quedas de tensão nos diferentes trechos do alimentador. Esse procedimento precisa ser repetido, para cada frequência de interesse, a fim de obter uma avaliação aproximada, para um espectro pré-definido. O presente trabalho propõe um algoritmo alternativo, denominado Equivalentes Norton Recursivos (ENOR). Esse algoritmo trabalha calculando os equivalentes Norton das cargas em direção à subestação, de maneira que se obtém uma impedância de carga equivalente de Norton para todos os nós.

Seu seqüenciamento se assemelha ao algoritmo do somatório de correntes ("backward-forward sweep"). Duas formulações são possíveis, a simbólica (usada no domínio de Laplace), que é facilitada pelo uso do Scilab, que oferece grande simplicidade no tratamento de álgebra polinomial,

e a formulação no domínio complexo, que usa a frequência harmônica, cujo efeito se deseja avaliar, para o cálculo das grandezas das reatâncias da rede.

Faz-se uso da transformada de Laplace para uma avaliação da resposta em frequência das funções de transferência, relativas às impedâncias em todos os nós, enquanto que a metodologia baseada no domínio complexo é utilizada para avaliação da propagação de harmônicos específicos em redes radiais.

2.0 DESENVOLVIMENTO

Apresentam-se, nesta seção, as duas formulações possíveis de serem usadas no algoritmo ENOR: a simbólica, que usa a transformada de Laplace para obtenção da resposta em frequência da rede em cada nó, através de uma função de transferência de impedância e a representação no domínio complexo, através da qual se realiza a avaliação de propagação de harmônicos, de frequências específicas, nas redes.

2.1 Resposta em frequência

O comportamento de um circuito elétrico pode ser avaliado através de técnicas desenvolvidas para o domínio do tempo, ou para o domínio da frequência. Se apenas o comportamento em regime permanente é de interesse, dois tipos de análise se apresentam como relevantes: a análise para frequência fixa, ou para uma frequência variável. O uso de frequência fixa permite a representação do circuito no domínio complexo. Entretanto, para se ter uma idéia global dos efeitos de frequências distintas, torna-se mais objetiva a adoção de um estudo de resposta em frequência, a partir de circuitos transformados (domínio da variável de Laplace).

A resposta em frequência de uma rede mostra o seu desempenho em função da frequência. Neste artigo, a resposta em frequência, através da obtenção da função de transferência de impedância do circuito analisado, é usada para visualizar os efeitos de uma injeção harmônica em um determinado nó, para uma ampla faixa de frequência, tanto no que diz respeito aos módulos, quanto às fases dos possíveis componentes harmônicos.

2.1.1 Normalização de frequência

Uma dificuldade encontrada durante a programação simbólica foi a grande diferença de

valores entre os coeficientes de um mesmo polinômio, mesmo quando se adotam valores em p.u. para os parâmetros da rede. As multiplicações de polinômios envolvidas no cálculo das impedâncias equivalentes, bem como no cálculo das correntes equivalentes de Norton, se constituem nas causas desse problema. Imprecisões numéricas podem levar à falsa avaliação dos pólos e zeros das funções de transferência. Para contornar esse problema, ou seja, para se trabalhar com números de mesma ordem decimal, foi realizada uma normalização de frequência, cuja fundamentação é mostrada a seguir:

$$\mathcal{L}[f(a \times t)] = \frac{1}{a} \times F\left(\frac{s}{a}\right)$$

$$F\left(\frac{s}{a}\right) = \mathcal{L}[a \times f(a \times t)] = G(w)$$

$$G^{-1}(w) = F^{-1}\left(\frac{s}{a}\right) = g(t)$$

$$a \times f(a \times t) = g(t)$$

$$f(a \times t) = \frac{1}{a} \times g(t)$$

$$f(t) = \frac{1}{a} \times g\left(\frac{t}{a}\right) \quad (1)$$

Sendo s a frequência original e w a nova frequência.

Exemplo:

$$Y = 10^4 + 10^2 \times s + s^2 + 10^{-2} \times s^3 + 10^{-4} \times s^4$$

$$= 10^4 (1 + 10^{-2} \times s + 10^{-4} \times s^2 + 10^{-6} \times s^3 + 10^{-8} \times s^4)$$

$$\text{fazendo, } S = 10^2 \times w, w = \frac{s}{10^2},$$

$$y = 10^4 (1 + w + w^2 + w^3 + w^4)$$

y é agora um polinômio com coeficientes de mesma ordem decimal.

2.1.2 Função de transferência

Para a análise da resposta em frequência foi obtida a função de transferência de impedância. Essa função está representada no domínio de Laplace e por isso foi necessário usar no algoritmo uma formulação simbólica. A função de transferência obtida é a razão entre a tensão em um nó e a corrente harmônica injetada em um outro nó, conforme mostra a Fig. 1.

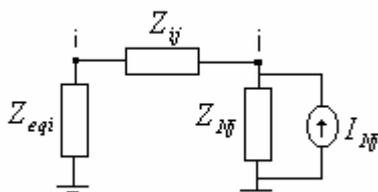


Fig. 1: Circuito usado para obtenção da função de transferência.

I_{Nj} e Z_{Nj} são a corrente e a impedância equivalente de Norton na barra j calculadas com base nos algoritmos "backward", partindo-se das cargas em direção à subestação, Z_{eqi} é a impedância equivalente vista da subestação em direção ao nó i e Z_{ij} é a impedância da linha.

Analisando o circuito acima se pode chegar às seguintes expressões:

$$\frac{V_j}{I_{Nj}} = Z_{Nj} \times \frac{(Z_{ij} + Z_{eqi})}{(Z_{ij} + Z_{eqi} + Z_{Nj})} \quad (2)$$

$$\frac{V_i}{I_{Nj}} = Z_{eqi} \times \frac{Z_{Nj}}{(Z_{Nj} + Z_{ij} + Z_{eqi})} \quad (3)$$

As equações (2) e (3) representam a função de transferência de impedância do circuito da Fig.1. Se houver injeção de harmônicos em uma barra j , a avaliação da resposta em frequência da função de transferência de impedância (V_i/I_j) ($i=1, 2, \dots, nb$, com nb = número de barras da rede) mostrará a influência, nas tensões das barras, produzida pela injeção harmônica na barra j . Para avaliação de tensões em nós após o nó de injeção, tem-se o circuito equivalente da Fig.2.

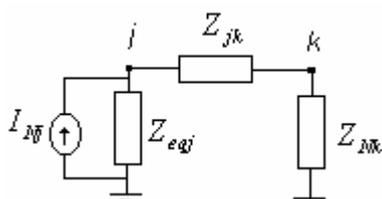


Fig. 2: Circuito usado para avaliar as tensões nos nós após o nó de injeção.

Z_{Nk} é a impedância equivalente de Norton na barra k , Z_{eqj} é a impedância equivalente vista da subestação em direção ao nó j e Z_{jk} é a impedância da linha.

A partir da análise do circuito da Fig. 2 obtém-se a equação usada para o cálculo das tensões:

$$V_k = Z_{NK} \times \frac{Z_{eqj}}{Z_{eqi} + Z_{ik} + Z_{NK}} \times I_{NJ} \quad (4)$$

2.2 Avaliação da propagação de harmônicos

Diante das dificuldades de se trabalhar com os resultados obtidos pelo algoritmo no domínio de Laplace é que se optou por trabalhar no domínio complexo. Assim, as tensões obtidas em cada nó, considerando uma injeção harmônica no sistema, foram obtidas no domínio complexo, o que tornou possível realizar uma avaliação da propagação de harmônicos na rede.

3.0 RESULTADOS

Como resultados serão apresentadas as respostas em frequência da função de transferência de impedância da rede, bem como a porcentagem harmônica nas tensões obtidas em cada nó. O sistema analisado corresponde a um sistema de distribuição real com 22 barras, cujo diagrama unifilar é apresentado na Fig.3. As figuras a seguir mostram as respostas em

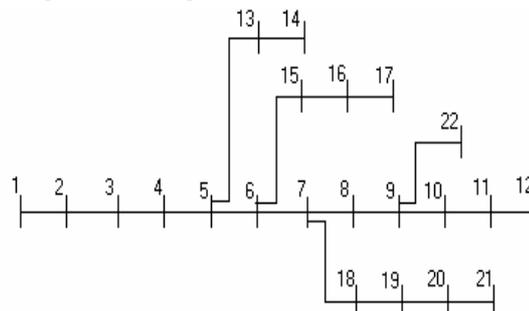


Fig. 3: Diagrama unifilar do sistema analisado.

simula-se uma injeção de corrente na barra 10.

De acordo com os gráficos da Fig. 4, avaliando a função V_4/I_{10} , ou seja, a razão entre a tensão na barra 4 e a corrente injetada na barra 10, para a frequência fundamental ($\omega=10^0$, valor em p.u.) o ganho foi de aproximadamente $-15,73$ dB e a fase $82,5^\circ$. Isso significa que a tensão resultante na barra 4 será a superposição (no domínio do tempo) da tensão obtida pelo fluxo de carga na barra 4 mais $0,1635 \angle 82,5^\circ$ (p.u):

$$V_4 = V_{4_{fc}} \angle \theta_{V_{4_{fc}}} \oplus 0,1635 \angle 82,5^\circ$$

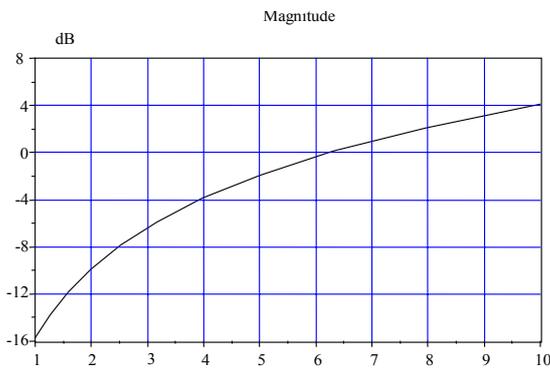
V_4 é a tensão resultante na barra 4 após a injeção de corrente na barra 10, $V_{4_{fc}} \angle \theta_{V_{4_{fc}}}$ é a tensão

obtida pelo fluxo de carga e $0,1635\angle 82,5^\circ$ é a influência da injeção da corrente na barra 10.

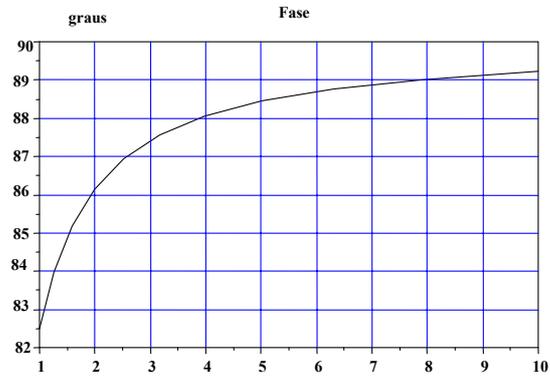
Para $h=3$ (3ª harmônica), o ganho é de aproximadamente $-6,37$ dB e a fase $87,4^\circ$, ou seja, nessa frequência a tensão resultante na barra 4 será:

$$V_4 = V_{4_fc} \times \cos(\omega t + \theta_{V_{4_fc}}) + 0,4803 \times \cos(3\omega t + 87,4^\circ)$$

ω é a frequência fundamental, h é a ordem do harmônico analisado, V_{4_fc} e $\theta_{V_{4_fc}}$ são o módulo e a fase da tensão na barra 4 obtidos pelo fluxo de carga.



(a)



(b)

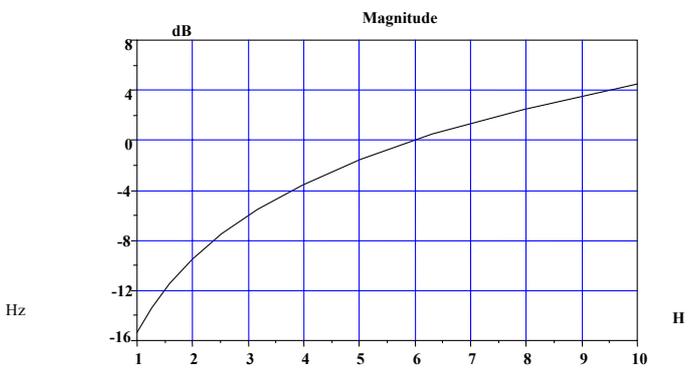
Fig. 4: Resposta em frequência da função de transferência V_4/I_{10} (a) Módulo, (b) Fase.

Analisando $h=5$ (5ª harmônica), o ganho é de aproximadamente $-1,92$ dB e a fase $88,46^\circ$, ou seja, nessa frequência a tensão resultante na barra 5 será:

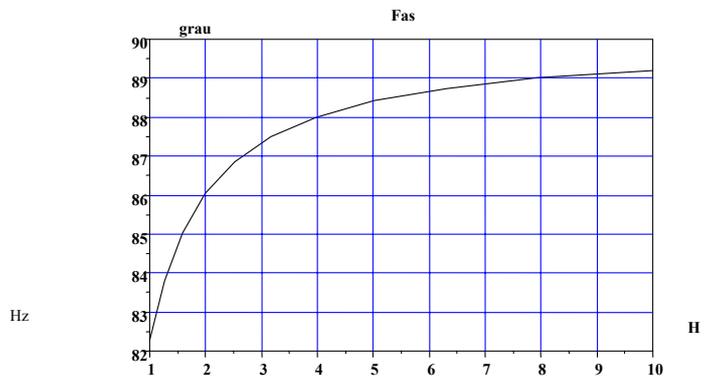
$$V_5 = V_{5_fc} \times \cos(\omega t + \theta_{V_{5_fc}}) + 0,8017 \times \cos(5\omega t + 88,46^\circ)$$

A Fig.5 mostra o gráfico obtido para a função de transferência V_8/I_{10} . Para a frequência fundamental o ganho foi de aproximadamente $-15,3$ dB e a fase $82,28^\circ$, significando que a tensão resultante na barra 8 será a superposição da tensão obtida pelo fluxo de carga na barra 8 mais $0,1718\angle 82,28^\circ$ (em p.u.):

$$V_8 = V_{8_fc} \angle \theta_{V_{8_fc}} \oplus 0,1718 \angle 82,32^\circ$$



(a)



(b)

Fig. 5: Resposta em frequência da função de transferência V_8/I_{10}

Para $h=3$ (3ª harmônica), o ganho é de aproximadamente -6 dB e a fase $87,32^\circ$, ou seja, nessa frequência a tensão resultante na barra 8 será:

$$V_8 = V_{8_fc} \times \cos(\omega t + \theta_{V_{8_fc}}) + 0,501 \times \cos(3\omega t + 87,32^\circ)$$

Na 5ª harmônica, $h=5$, o ganho é de aproximadamente $-1,55$ dB e a fase $88,4^\circ$, ou seja, nessa frequência a tensão resultante na barra 8 será:

$$V_8 = V_{8_{fc}} \times \cos(\omega t + \theta_{V_{8_{fc}}}) + 0,8365 \times \cos(5\omega t + 88,4^\circ).$$

Os resultados a seguir apresentam a porcentagem harmônica nas tensões de alguns dos nós do sistema. Tais resultados foram obtidos considerando-se 100% dos 3º, 5º e 11º harmônicos injetados na barra 10 da rede analisada.

Para injeção de harmônico de terceira ordem obteve-se em algumas das barras:

- Barra 8: 0,5892% de harmônico ;
- Barra 9: 0,7273% de harmônico;
- Barra 11: 0,8921% de harmônico;
- Barra 12: 0,8918% de harmônico;
- Barra 13: 0,2468% de harmônico.

Para harmônico de 5º ordem:

- Barra 8: 0,9053% de harmônico;
- Barra 9: 1,094% de harmônico;
- Barra 11: 1,3184% de harmônico;
- Barra 12: 1,3182% de harmônico;
- Barra 13: 0,3873% de harmônico.

Para harmônico de 11ª ordem:

- Barra 8: 1,9112% de harmônico;
- Barra 9: 2,2819% de harmônico;
- Barra 11: 2,7183% de harmônico;
- Barra 12: 2,7179% de harmônico;
- Barra 13: 0,8272% de harmônico.

Pode-se observar que quanto mais a barra for afastada do local no qual se foi injetado o harmônico, menor é a porcentagem harmônica encontrada na tensão dessa mesma barra.

Uma outra observação realizada é que entre as porcentagens obtidas anteriormente a 11ª harmônica foi a maior entre as analisadas.

4.0 CONCLUSÕES

O algoritmo descrito (ENOR) possibilitou a realização do estudo da resposta em frequência das funções de transferência de impedância do sistema elétrico analisado, o qual permitiu a análise da atenuação e defasamentos provocados pelos harmônicos na rede. O mesmo algoritmo ainda é usado para avaliar a propagação dos harmônicos na rede a partir de cálculos complexos. Tal avaliação possibilitou a obtenção da porcentagem de harmônicos presentes nas tensões de cada nó do sistema. Além disso, esse algoritmo também permite considerar a influência das impedâncias de todas as cargas do sistema.

5.0 BIBLIOGRAFIA

- [1] Tostes, M. E. L., Moura, C. C. M., Bezerra, U. H., Silva, R. D. S., Branco, T. M. M., "Fluxo de Carga Harmônico Trifásico Via Método Somatório de Corrente", V SBQEE, Agosto de 2003.
- [2] Oliveira, J. T.; Medeiros, M.F. Jr.; Silva, E. F.; Bezerra, G. Jr.: "Fluxo de Carga Harmônico para Operação e Planejamento de Sistemas Radiais de Distribuição através dos Métodos Soma de Potências e Montagem da Matriz Impedância de Barras"
- [3] D. Xia and G. Heydt, "Harmonic Power Flow Studies Part I – Formulation and Solution, Part II – Implementation and practical application". *IEEE Trans. on Power Apparatus and systems*, vol. PAS-101, pp. 1257-1270, June 1982.
- [4] R. Cespedes G. "New Method for the analysis of distribution Networks". *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 5, no 1, January 1990.
- [5] IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation. "Modeling and Simulation of the propagation of harmonics in electric power networks, Parts I & II," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 11, no. 1, Jan. 1996, pp. 452-474.
- [6] J. Arrillaga, D. A. Bradley and P. S. Bodger, *Power Systems Harmonics*, John Wiley & Sons, NY: 1985.
- [7] M. F. Medeiros Jr., P. S. M. Pires, J. T. Oliveira, C.K.S. Santos, "Uma Comparação Entre Métodos Numéricos Para Cálculo de Transitórios em Alimentadores de Distribuição", Transmission and Distribution Conference and Exposition, novembro 2004.

