

FLUXO DE POTÊNCIA HARMÔNICO

Walmeran José Trindade Júnior

Centro Federal de Educação Tecnológica da Paraíba

Av. 1º de Maio, 720 - Jaguaribe

58.015-430 - João Pessoa - Paraíba - Brasil

e-mail : walmeran@zaitex.com.br

Resumo

Neste trabalho é mostrado um dos principais métodos utilizados para o cálculo do fluxo de potência harmônico em sistemas de potência, qual seja : Método da Análise Iterativa de Harmônicos. A implementação computacional desse método, com a ilustração de um sistema exemplo de cinco barras, sendo uma delas com um conversor CA/CC como carga não-linear é apresentada.

Palavras-chave: Fluxo de Potência / Harmônicos.

1. Introdução

As cargas mais comuns em sistemas de potência têm sido as de potência constante, impedância constante, corrente constante ou uma combinação delas. Nesses casos, tipicamente as formas-de-onda da tensão e da corrente são puramente senoidais.

Nos sistemas de potência modernos, cargas podem distorcer as formas-de-onda da tensão e da corrente. Exemplos de tais cargas são : Fornos a arco, retificadores, lâmpadas de descarga e dispositivos eletrônicos.

Essas cargas apesar de não serem novas, há algum tempo elas vêm aumentando consideravelmente o seu número. Assim, é prudente investigar as peculiaridades da demanda de potência dessas cargas não-lineares. Os programas computacionais para o cálculo do fluxo de potência harmônico são importantes ferramentas para tal investigação.

2. Técnica para Análise de Harmônicos

O objetivo do cálculo do fluxo de potência harmônico é a determinação de todas as tensões nodais do sistema de potência para todas as frequências harmônicas de interesse. A partir dessas tensões nodais, os fluxos de corrente e potência pelos ramos do sistema são determinados. Basicamente, esse cálculo é realizado através da solução da equação abaixo :

$$[I_h] = [Y_h][V_h] \quad (1)$$

onde : $[Y_h]$ é a matriz admitância do sistema para cada frequência harmônica h ;

$[I_h]$ é o vetor de injeção de correntes harmônicas;

$[V_h]$ é o vetor de tensões nodais a ser encontrado.

O cálculo é repetido usando-se passos discretos de frequência através da faixa de frequência de interesse e as fontes de harmônicos são consideradas fontes de corrente.

O método da análise iterativa de harmônicos é um dos métodos mais conhecidos [1][2][3] para o cálculo do fluxo de potência harmônico. Neste método, as fontes de harmônicos são modeladas como fontes de corrente dependentes da tensão, ou seja :

$$I_n = f(V_1, V_2, \dots, V_h, c) \quad n=1,2,\dots,h \quad (2)$$

onde : (V_1, V_2, \dots, V_h) são os fasores de tensões harmônicas da fonte de tensão;

c é um conjunto de variáveis de controle tais como ângulo de gatilhamento e potência de saída de um conversor.

Esta equação é inicialmente resolvida, usando-se uma estimativa para as tensões harmônicas da fonte. Os resultados são usados como as fontes de corrente na Equação (1), a partir da qual cada tensão harmônica é calculada. Para a frequência fundamental, as equações do fluxo de potência convencional podem ser utilizadas. Com as tensões harmônicas calculadas, as mesmas são usadas para calcular as correntes harmônicas pela Equação (2) com mais precisão. Este processo iterativo é repetido até que a convergência seja atingida.

Uma das principais vantagens desse método é que as fontes de harmônicos podem ser modeladas de forma desacoplada, ou seja, uma modelagem através de um processo de simulação no domínio do tempo ou de alguma outra forma pode ser utilizada.

3. Implementação Computacional

O programa computacional desenvolvido consiste de oito módulos executados sequencialmente, como mostra o fluxograma da Figura 1.

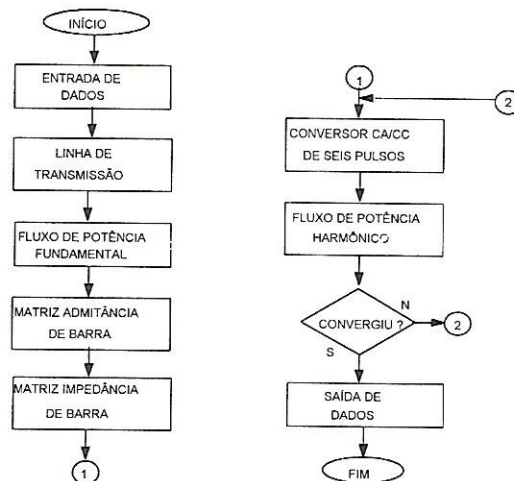


Figura 1 : Fluxograma Do Programa Computacional

3.1 Descrição dos Módulos do Programa Computacional

Os dados de entrada para o cálculo do fluxo de potência fundamental se assemelham muito com os dados utilizados no cálculo do fluxo de potência convencional, a menos dos seguintes dados adicionais : Ordem máxima das harmônicas a ser considerada, reatâncias de sequência negativa de todos os geradores na frequência fundamental, valores iniciais das tensões harmônicas nodais, dados dos conversores CA/CC (potência, ângulo de gatilhamento e reatância de dispersão do transformador), para cada linha de transmissão informar : Resistências CA e CC, reatância série, admitância shunt e comprimento e reatância dos capacitores e/ou filtros na frequência fundamental.

O modelo PI equivalente de cada linha para cada harmônica é computado no módulo linha de transmissão, levando-se em consideração o efeito pelicular e as equações para linha longa (solução de onda).

Em seguida, é formada a matriz admitância de barra preliminar, apenas com dados de linha. Com essa matriz, é calculado o fluxo de potência fundamental usando-se o método de Newton. Para as barras que apresentam cargas não-lineares (conversor CA/CC), as mesmas são tratadas como se fossem lineares fazendo-se a potência do conversor como a potência ativa da carga e a potência reativa da carga é estimada como sendo :

$$Q = P \tan \alpha \quad (3)$$

onde P é a potência do conversor e α é o seu ângulo de gatilhamento.

Essa estimativa inicial das tensões nodais na frequência fundamental serve para calcular os modelos na frequência harmônica para cargas lineares, capacitores e filtros. Esses cálculos são realizados no módulo matriz admitância.

Uma vez determinada as tensões nodais, na frequência fundamental, as admitâncias harmônicas para as barras com cargas convencionais (lineares), bem como para capacitores e filtros são calculadas, em todas as frequências de interesse.

A matriz admitância de barra final em todas as frequências de interesse é obtida e invertida no módulo matriz impedância de barra.

As tensões nodais para todas as frequências de interesse, a potência ativa P e o ângulo de gatilhamento α são fornecidos para o módulo conversor CA/CC de seis pulsos, sendo retornada às correntes harmônicas injetadas no sistema pelo conversor. A potência reativa do conversor também é calculada para efeito da atualização das tensões nodais na frequência fundamental, onde as barras que contêm conversores são consideradas como barras do tipo PQ convencionais. Uma descrição mais detalhada desse módulo é feita mais adiante.

O módulo fluxo de potência harmônico utiliza dois tipos de equações para obter a solução final, quais sejam : Balanço de potências ativa e reativa, e Solução da equação $[V]=[Z_{bus}][I]$ para atualização das tensões nodais nas frequências harmônicas.

Após a obtenção da solução do fluxo de potência harmônico, ou seja, a determinação de todas as tensões nodais em todas as frequências de interesse, são calculados os resultados para cada harmônica, que podem ser : Injeções de corrente em cada barra, correntes nas linhas de transmissão, fluxo de potência e perdas nas linhas de transmissão, correntes e perdas em impedâncias harmônicas e filtros, correntes e perdas em banco de capacitores e reatose distorção harmônica (THD).

3.2 Detalhamento do Módulo Conversor CA/CC

Existem vários modelos matemáticos para o conversor CA/CC de seis pulsos com diferentes graus de aproximação, alguns são mostrados nas referências [4][5][6]. Para o cálculo do fluxo de potência harmônico, utilizando o método da análise iterativa de harmônicos, o modelo de conversor CA/CC escolhido deve levar em consideração a interação entre o conversor e o sistema de potência.

A Figura 2 mostra o diagrama esquemático do conversor CA/CC utilizado no modelamento matemático descrito em seguida. O conversor CA/CC é uma das principais fontes de harmônicos em sistemas de potência porque a corrente alternada que flui por ele tem forma-de-onda quase quadrada [6]. Assim, o principal problema é encontrar as componentes harmônicas dessa corrente, quando a tensão aplicada no secundário do transformador é também não-senoidal.

A técnica para resolver esse problema, descrita em [6], é baseada nas seguintes considerações :

- O ângulo de comutação μ é tal que $0^\circ < \mu < 60^\circ$;
- As perdas no conversor são desprezadas;
- A corrente na saída do conversor (I_d) é livre de ripple;
- Somente harmônicas características são presentes;
- A potência ativa P suprida ao conversor e o ângulo de disparo α dos tiristores do conversor são conhecidos;
- O sistema é completamente balanceado;
- A indutância do transformador (indutância de dispersão) e a tensão do secundário são conhecidas.

Aplicando-se a análise utilizada em [6], pode ser mostrado que a tensão média CC (V_d) é dada por :

$$V_d = V_{d2} - \Delta V \quad (4)$$

com,

$$V_{d2} = \frac{6}{\pi} \sum_{k=1}^n \frac{V_{km}}{k} \text{sen}\left(\frac{\pi}{3} \delta_k\right) \left[\text{sen}\left\{k(\phi_2 + \alpha) + \theta_k - \frac{\pi}{3} \delta_k\right\} - \text{sen}\left\{k(\phi_1 + \alpha) + \theta_k - \frac{\pi}{3} \delta_k\right\} \right] \quad (5)$$

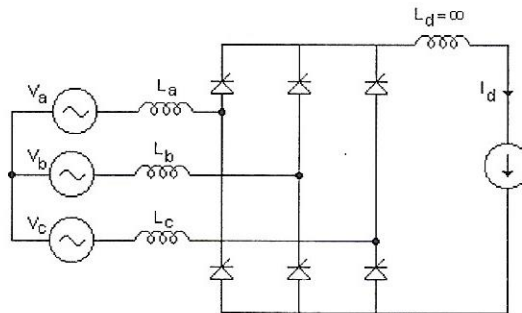


Figura 2 : Diagrama do Conversor CA/CC

$$\Delta V = \frac{3}{\pi} \sum_{k=1}^n \frac{V_{km}}{k} \text{sen}\left(\frac{\pi}{3} \delta_k\right) \left[\text{sen}\left\{k(\phi_1 + \alpha) + \theta_k + \frac{\pi}{3} \delta_k\right\} - \text{sen}\left\{k(\phi_1 + \alpha + \mu) + \theta_k + \frac{\pi}{3} \delta_k\right\} \right] \quad (6)$$

onde : - k é o número da harmônica;

- n é o número total de harmônicas;

- V_{km} amplitude da k -ésima tensão harmônica;

- $\delta_k = +1$ para sequência positiva, $k=1,7,13,\dots$

-1 para sequência negativa, $k=5,11,17,\dots$

- α é o ângulo de gatilhamento;

- Φ_1 é o ângulo em que V_a se torna maior que V_c no conversor trifásico;

- $\Phi_2 = \Phi_1 + \pi/3$;

- μ é ângulo de comutação;

- θ_k é o ângulo de fase da k -ésima tensão harmônica.

Na realidade, V_{d2} é a tensão média CC com $\mu=0$ e $\alpha \neq 0$ e ΔV representa a redução na tensão média CC devido ao intervalo de comutação dos tiristores (μ) [6].

A corrente de saída I_d é dada por :

$$I_d = \frac{\sqrt{3}}{2\omega L_c} \sum_{k=1}^n \frac{V_{km}}{k} \left[\cos\left\{k(\phi_1 + \alpha + \mu) + \theta_k + \frac{\pi}{6} \delta_k + \frac{2\pi}{3} \delta_k\right\} - \cos\left\{k(\phi_1 + \alpha) + \theta_k + \frac{\pi}{6} \delta_k + \frac{2\pi}{3} \delta_k\right\} \right] \quad (7)$$

onde : L_c é a indutância do transformador.

A forma-de-onda da corrente na fase a do lado CA do conversor (i_a) é dada por :

$$i_a = i_1 \quad \text{para} \quad (\phi_1 + \alpha) \leq \omega t \leq (\phi_1 + \alpha + \mu)$$

$$i_a = I_d \quad \text{para} \quad (\phi_1 + \alpha + \mu) \leq \omega t \leq (\phi_1 + \alpha + \frac{2\pi}{3})$$

$$i_a = I_d - i_1 \quad \text{para} \quad (\phi_1 + \alpha + \frac{2\pi}{3}) \leq \omega t \leq (\phi_1 + \alpha + \frac{2\pi}{3} + \mu)$$

$$i_a = 0 \quad \text{para} \quad (\phi_1 + \alpha + \frac{2\pi}{3} + \mu) \leq \omega t \leq (\phi_1 + \alpha + \pi) \quad (8)$$

com,

$$i_1 = \frac{\sqrt{3}}{2\omega L_c} \sum_{k=1}^n \frac{V_{km}}{k} [\cos(k\omega t + \theta_k + \frac{\pi}{6}\delta_k + \frac{2\pi}{3}\delta_k) - \cos\{k(\phi_1 + \alpha) + \theta_k + \frac{\pi}{6}\delta_k + \frac{2\pi}{3}\delta_k\}] \quad (9)$$

$$i(\omega t) = i_1(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (10)$$

Baseado nas Equações (4) a (10), um algoritmo computacional para determinar as componentes harmônicas da corrente e a potência reativa do conversor é desenvolvido abaixo :

- i. Fazer $\mu=60^\circ$;
- ii. $\mu=\mu-1^\circ$;
- iii. Calcular V_d e I_d usando as Equações (4) e (7);
- iv. Se $V_d I_d > P$, então ir para o passo ii;
- v. Usando os passos ii até iv, determinar μ de modo que $V_d I_d = P$, com uma tolerância assumida;
- vi. Usando a Equação (8), obter as componentes de Fourier de i_a tal que :

$$i_a = \sum_{k=1}^n I_{km} \text{sen}(k\omega t + \gamma_k) \quad (11)$$

onde : - I_{km} é a amplitude da k -ésima harmônica da corrente i_a ;
 - γ_k é o ângulo de fase da k -ésima harmônica da corrente i_a .

- vi. Calcular a potência reativa demandada pelo conversor como :

$$Q = \sum_{k=1}^n \frac{V_{km} I_{km}}{2} \text{sen}(\theta_k - \gamma_k) \quad (12)$$

4. Exemplo de Aplicação

Para ilustrar a aplicação do método da interação de harmônicos para o cálculo do fluxo de potência harmônico foi utilizado um sistema de potência de cinco barras mostrado na Figura 3. Todos os dados em pu estão na base 69kV e 100 MVA, na frequência fundamental.

Na Tabela 1 são mostrados alguns resultados do cálculo do fluxo de potência harmônico para o sistema exemplo da Figura 3.

5. Conclusão

Dentre as técnicas existentes para o cálculo do fluxo de potência harmônico, a mais utilizada é aquela que aplica a metodologia da análise no domínio da frequência (varredura de frequência) em conjunção com método de Newton para o cálculo do fluxo de potência na frequência fundamental. Desse modo, a interação entre o sistema de potência e as fontes de correntes harmônicas (cargas não-lineares), como por exemplo conversores, é determinada de forma mais realista, ou seja com mais precisão.

Essa ênfase dada à interação entre sistema de potência e conversor se justifica pelo fato de que a performance do conversor é fortemente afetada pela magnitude e frequência do espectro das tensões nodais do conversor, pois é através da ação do conversor que parte da potência fundamental é convertida em potência harmônica.

Dessa forma, o cálculo iterativo do fluxo de potência fundamental associado com o fluxo de potência harmônico resulta em uma solução convergente.

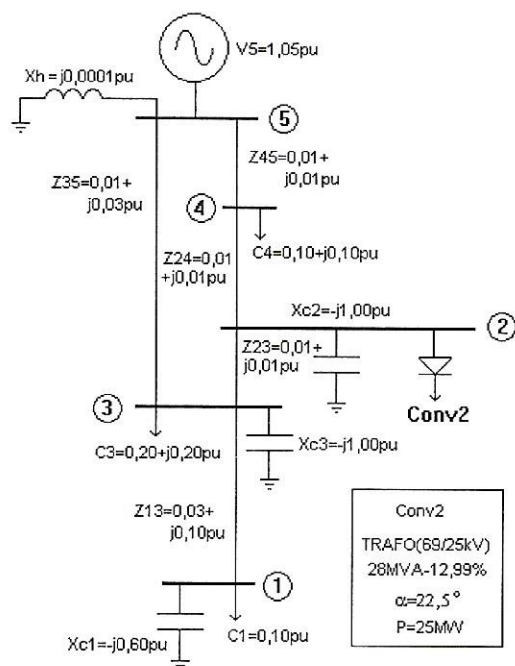


Figura 3 : Sistema Exemplo

TABELA 1 : TENSÕES NODAIS (%)

| BÁRRA | FUNDAM. (%) | 5a. HARM. (%) |
|-------|-------------|---------------|
| 1 | 122,12 | 0,257 |
| 2 | 107,92 | 0,598 |
| 3 | 108,81 | 0,467 |
| 4 | 106,36 | 0,301 |
| 5 | 105,00 | 0,004 |

6. Referências Bibliográficas

- [1] YACAMINI, R. et al. Harmonics in Multiple Converter Systems : a Generalized Approach, IEE Proc. Part B, vol. 127, no. 2, March, 1980.
- [2] XU, W. et al. A Multiphase Harmonic Load Flow Solution Technique, IEEE Transactions on Power Systems, vol. PS-6, pp. 174-182, February, 1991.
- [3] SHARMA, V. et al. An Iterative Approach for Analysis of Harmonics Penetration in Power Transmission Networks, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 6, no. 4, pp. 1698-1706, October, 1991.
- [4] XIA, D. et al. Harmonic Power Flow Studies, Part I - Formulation and Solution, Part II - Implementation and Practical Application, IEEE Transactions on PAS, vol. PAS-101, pp. 1257-1270, June, 1982.
- [5] SONG, W. et al. The Integration of HVDC Subsystems into Harmonic Power Flow Algorithm, IEEE Transactions on PAS, vol. PAS-103, pp. 1953-1961, August, 1984.
- [6] TAMBY, J. P. et al. Q'Harm - A Harmonic Power Flow Program for Small Systems, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 3, no. 3, pp. 949-955, August, 1988.