

Correção Ótima do Fator de Potência de Sistemas Elétricos Industriais com Harmônicos

D.Sc. J. T. Oliveira, UFRN; E. F. Silva, UFRN e G. Bezerra Jr., COSERN

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia de cálculo para correção do fator de potência em sistemas elétricos industriais com harmônicos. Esta, por sua vez, é denominada Forma Direta de busca em uma variável. O método calcula o fator de potência variando o valor da capacitância do capacitor a ser introduzido no sistema elétrico. A partir da formulação matemática do sistema e desta técnica de otimização foi possível desenvolver a ferramenta computacional “Fator de Potência Harmônico Ótimo (FPHO)”. Como ilustração desta técnica, é mostrada uma simulação de um exemplo de aplicação implementado computacionalmente. Os resultados são satisfatórios.

PALAVRAS-CHAVE

Fator de Potência, Harmônicos, Método Numérico, Otimização.

I. INTRODUÇÃO

Com o aumento da utilização de dispositivos de estado sólido em sistemas elétricos de potência para conversão de frequência, potência e controle, surgiram alguns problemas, dentre os quais, o principal é o aparecimento de tensões e correntes harmônicas. Uma das conseqüências é o baixo fator de potência. Esse problema pode ser contornado, através da instalação de filtros passivos ou ativos. Em se tratando de instalar um filtro passivo no sistema, o problema consiste em dimensionar o filtro.

Para se fazer a correção do fator de potência e obter a solução mais adequada é necessário levar em consideração que o sistema possua tensão não senoidal. Através de um método matemático, encontra-se o capacitor ótimo.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma técnica de cálculo denominado Forma Direta e mostrar uma aplicação com o *software* desenvolvido a partir dela.

Para se resolver o problema de otimização se faz necessário o conhecimento de métodos matemáticos que possibilitem a localização do ponto ótimo (máximo ou mínimo)

da função objetivo considerada na modelagem do problema. Porém, deve-se garantir que, dentro de um intervalo qualquer, não esteja contido mais do que um ponto de máximo ou de mínimo, pois os métodos matemáticos baseados em derivadas só localizam máximos ou mínimos locais.

II. ABORDAGEM DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

A formulação de um problema de otimização requer o conhecimento de uma função objetivo a ser otimizada, as restrições impostas às variáveis e/ou à função objetivo, e um método de solução, a partir do qual a solução é determinada.

O fator de potência na carga será selecionado como a função objetivo a ser otimizada com respeito ao capacitor. A otimização dessa função implica em maximizá-la. Para a solução, será empregada a forma Direta de busca em uma variável.

Formulação da Função Objetivo:

O sistema elétrico a ser analisado é equivalente ao da Figura 1.

A impedância para cada harmônico, vista pela fonte de tensão em condições não senoidais, é dada por (1).

$$Z_{sh} = r_t + jx_t + \frac{R_l + jhX_l}{(1 - h^2\omega_0 X_l C) + jhR_l\omega_0 C} \quad (1)$$

Desenvolvendo (1) obtemos:

$$Z_{sh} = \left(r_t + \frac{R_l Z_1 + hX_l Z_2}{Z_1^2 + Z_2^2} \right) + j \left(hx_t + \frac{hX_l Z_1 - R_l Z_2}{Z_1^2 + Z_2^2} \right)$$

onde

$$Z_1 = 1 - h^2\omega_0 X_l C \quad \text{e} \quad Z_2 = hR_l\omega_0 C$$

ou

$$Z_{sh} = R_{sh} + jX_{sh} \quad (2)$$

sendo

$$R_{sh} = r_t + \frac{R_l Z_1 + hX_l Z_2}{Z_1^2 + Z_2^2} \quad \text{e} \quad X_{sh} = hx_t + \frac{hX_l Z_1 - R_l Z_2}{Z_1^2 + Z_2^2}$$

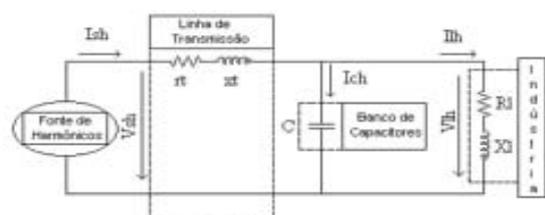


FIGURA 1. Configuração do sistema elétrico

Este trabalho foi financiado pelo “Programa de Pesquisa & Desenvolvimento da COSERN, dentro do Projeto de Transitórios Eletromagnéticos em Redes de Distribuição de Energia Elétrica com ênfase em Qualidade da Energia Elétrica” em convênio com os Departamentos de Engenharia Elétrica e de Engenharia de Computação e Automação da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

J. T. Oliveira é professor adjunto do Departamento de Engenharia Elétrica da UFRN (e-mail: jtavares@ct.ufrn.br).

E. F. Silva é graduando em Engenharia Elétrica pela UFRN (e-mail: fernandeselves@bol.com.br).

Dessa forma, a admitância vista pela fonte é dada por:

$$Y_{sh} = \frac{R_{sh}}{R_{sh}^2 + X_{sh}^2} - j \frac{X_{sh}}{R_{sh}^2 + X_{sh}^2} \quad \text{ou}$$

$$Y_{sh} = G_{sh} - jB_{sh} \quad (3)$$

Assim, o módulo da corrente total fornecida pela fonte será:

$$I_s = \sqrt{\sum_h (G_{sh}^2 + B_{sh}^2)} V_{sh}^2 \quad (4)$$

A tensão para cada harmônico na carga será:

$$V_{lh} = \frac{V_{sh}}{1 + Z_{lh}(Y_{ch} + Y_{lh})} \quad (5)$$

onde

$$Z_{lh} = r_l + jhx_l, \quad Y_{ch} = jh\omega_0 C \quad \text{e} \quad Y_{lh} = G_{lh} - jB_{lh}$$

sendo

$$G_{lh} = \frac{R_{lh}}{R_{lh}^2 + X_{lh}^2} \quad \text{e} \quad B_{lh} = \frac{R_{lh}}{R_{lh}^2 + X_{lh}^2}$$

Desenvolvendo (5), obtemos a tensão total na carga:

$$V_l = \sqrt{\sum_h \left[\frac{V_{sh}^2}{(K_1^2 + K_2^2)} \right]} \quad (6)$$

sendo

$$K_1 = 1 + r_l G_{lh} - hx_l (h\omega_0 C - B_{lh}) \quad \text{e}$$

$$K_2 = hx_l G_{lh} - r_l (h\omega_0 C - B_{lh})$$

A potência ativa total na carga será

$$P_l = \sum_h (V_{lh}^2 G_{lh})$$

onde

$$V_{lh}^2 = \frac{V_{sh}^2}{K_1^2 + K_2^2}$$

Enfim, podemos expressar o fator de potência como:

$$PF_l = \frac{\sum_h (V_{lh}^2 G_{lh})}{\sqrt{\sum_h \left[\frac{V_{sh}^2}{(K_1^2 + K_2^2)} \right]} \sqrt{\sum_h (G_{sh}^2 + B_{sh}^2)} V_{sh}^2} \quad (7)$$

$$\text{ou} \quad PF_l = \frac{P_l}{V_l I_s}$$

III. FORMA DE CÁLCULO EMPREGADA

Forma Direta:

Este método consiste em fazer variar o valor da capacitância em uma faixa de valores e, aplicando em (7), calcular o fator de potência. Com os valores obtidos de fator de potência, constrói-se um gráfico, onde se pode observar sua variação em função do valor do capacitor a ser instalado em paralelo com a carga.

IV. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Dados do Sistema Elétrico:

Fonte de Tensão

O conteúdo harmônico da tensão fase-neutro da fonte é mostrado na Tabela 1.

TABELA 1
Conteúdo Harmônico da Fonte de Tensão

Fundamental	100%	2400 V
Quinto	5%	120 V
Sétimo	3%	72 V
Décimo primeiro	2%	48 V
Décimo terceiro	1%	24 V
Linha de Transmissão		
Resistência:		0,011537066 W
Reatância Indutiva:		0,115370666 W
Tensão nominal = 4160 V		
Indústria (Carga)		
Potência aparente:		5500 kVA
Fator de potência inicial:		0,6831

V. SIMULAÇÃO DO EXEMPLO COM FPHO

Para executar uma demonstração com FPHO deve-se seguir os passos abaixo mencionados:

Preencha os campos: Fonte - Máximo Harmônico Desejado: 13; Digite os dados da Tabela 1 (coluna 3 – Módulos de Tensões). Linha de Transmissão – Resistência: 0,011537066 W; Reatância Indutiva: 0,115370666 W; Tensão Nominal: 4160 V. Carga – Potência Aparente: 5500 kVA e Fator de Potência: 0,6831. Faixa de Capacitância Desejada: por exemplo: de 0 (zero) a 0.002 Faraday. Veja a Figura 2;

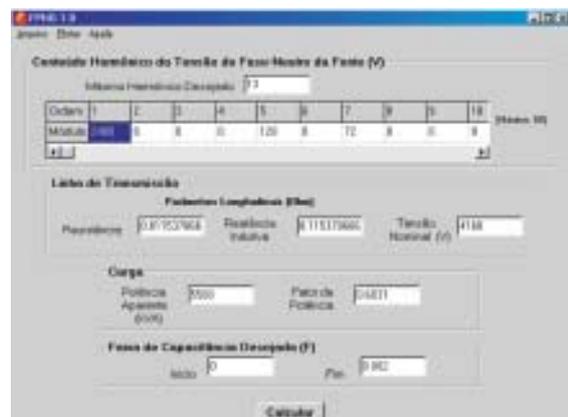


FIGURA 2. Tela do FPHO com os dados do sistema exemplo.

Depois de terminado o procedimento de preenchimento dos campos, pressiona-se o botão Calcular. Então a tela mostrada na Figura 3 será apresentada.

Para visualiza o gráfico basta pressionar o botão Plotar ou, se desejar, o botão Voltar, para mudar algum dado na tela inicial ou começar tudo de novo. Veja Figura 3.

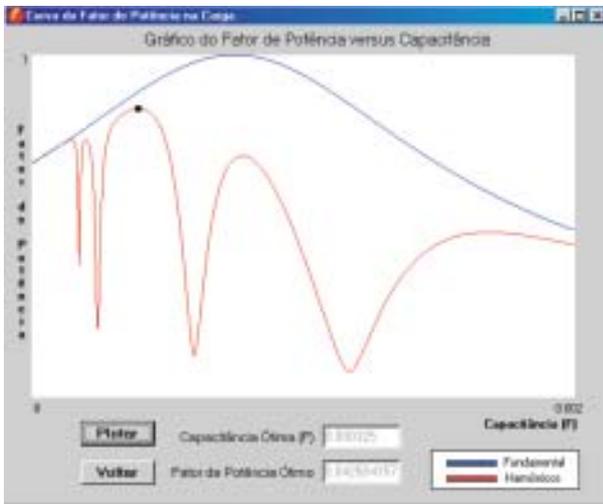


FIGURA 3. Comportamento da tensão na indústria (Carga) do sistema exemplo.

Na tela mostrada através da Figura 3 é possível saber o valor do Fator de Potência Ótimo com sua respectiva capacitância.

O resultado da aplicação mostrado na Figura 3 conduz às seguintes conclusões:

Houve uma melhoria considerável no fator de potência da indústria;

O fator de potência encontrado é o ótimo;

O sistema não teria fator de potência unitário em virtude dos harmônicos;

Caso o sistema fosse considerado apenas para a fundamental (método tradicional), a solução encontrada não seria a verdadeira, podendo deixar o sistema instável.

VI. CONCLUSÕES

Neste artigo foi mostrado como uma forma simples de cálculo para correção do fator de potência, em sistemas elétricos com harmônicos, produz bons resultados e pode substituir métodos mais sofisticados. Em virtude disso, o método apresentado aqui serve como ferramenta para prover uma boa solução (solução ótima) nas condições propostas e em condições reais. Além da compensação reativa do sistema, o mesmo converge rapidamente em qualquer situação proposta.

Mesmo depois de feita a compensação, o fator de potência pode não estar dentro do mínimo aceitável por norma, isso poderia ser contornado com a introdução de filtros sintonizados na frequência dos harmônicos, o que não é levado em conta neste trabalho.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Chu, R. F.; Avendano, R. H. A direct method for identifying the optimal power factor correction in nonsinusoidal Systems. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, no. 4, Apr. 1985, pp. 959-964.
- [2] 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.
- [3] Emanuel, A. E. On the assessment of harmonic pollution. IEEE Trans. on Delivery, vol. 10, no. 3, jul. 1995, pp. 1693-1698.
- [4] Pileggi, D. J.; Chandra, N. H.; Emanuel, A. E. Prediction of harmonics voltages in distribution systems. IEEE Trans. on Power Apparatus and systems, vol. PAS-100, no. 3, mar. 1981.
- [5] Ortmeyer, T. H.; Hiyama, T. Distribution system harmonic filter planning. IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 11, no. 4, oct. 1996, pp. 2005-2008.
- [6] Arrillaga, J.; Bradley, D. A.; Bodger, P. S. "Power Systems Harmonics". John Wiley & Sons. NY. 1985.
- [7] Miller, T. J. E. "Reactive Power Control in Electric Systems". John Wiley & Sons. NY. 1982.
- [8] Bazaraa, M. S.; Shetty C. M. "Nonlinear Programming: Theory and Algorithms". John Wiley & Sons. Atlanta. 1979.