

# 瞬时无功功率理论在配电网电能质量控制中的应用

武小梅<sup>1,3</sup>, 栗颂东<sup>2</sup>, 文福拴<sup>3</sup>

(1. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006; 2. 葫芦岛供电公司, 辽宁 葫芦岛 125000;  
3. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641)

**摘要:** 随着电力电子设备使用的增长, 电力系统中的谐波污染越来越严重, 有源电力滤波器被认为是改善谐波污染、提高电能质量的有效方法。提出了一种基于并联型有源电力滤波器改善配电网电能质量的控制策略。首先阐述了三相四线制配电网中补偿的原理; 然后运用瞬时无功功率理论的  $i_p - i_q$  法进行谐波电流的检测; 最后采用改进了的三角波脉宽调制进行补偿电流的控制。利用 Matlab 软件作为仿真平台, 仿真实验证明了所提出控制策略的有效性。

**关键词:** 配电网; 电能质量; 有源滤波; 瞬时无功理论; 脉宽调制

## Application of instantaneous reactive power theory in power quality control of distribution network

WU Xiao-mei<sup>1</sup>, LI Song-dong<sup>2</sup>, WEN Fu-shuan<sup>3</sup>

(1. Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;  
2. Huludao Power Supply Company, Huludao 125000, China; 3. College of Electrical Engineering,  
South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** With the increment of using power electronic instruments, the harmonic pollution in power system becomes more and more serious. Active power filter is considered as an effective appliance to improve harmonics and power quality. This paper proposes a control strategy to improve the power quality of distribution circuits by using shunt active power filter. First, in a three-phase four-line distribution system, the compensating principle is described. Next, the  $i_p - i_q$  method in instantaneous reactive power theory is used to detect the harmonic currents. Finally, the corrected triangular pulse width modulation is used to control the compensated currents. By using Matlab as the simulation tool, simulation of a practical case shows the efficiency of the proposed control strategy.

**Key words:** distribution network; power quality; active power filter; instantaneous reactive power theory; pulse width modulation

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)10-0079-04

## 0 引言

在过去的二十多年里电力电子设备的使用增长很快。这就使电力工业中增加了无功功率的需求以及产生了更多的谐波污染。为了改善电能质量, 需要对系统中存在的谐波进行测量和校正, 这就需要合适的测量和校正方法。为此人们提出了许多无功功率的定义。早在二十世纪八十年代日本的 Akagi 就提出了基于三相三线制系统的瞬时无功功率的定义<sup>[1]</sup>。文中虽然没有考虑瞬时零序功率, 但给出了补偿功率的简洁定义。Furuhashi 等<sup>[2]</sup>详细讨论了瞬时无功功率的理论, 并且指出瞬时无功功率

不仅包括功率中的虚部, 还包括零序元件产生的瞬时无功功率, 但是没有考虑均值为零的交变有功功率。文献[3]考虑了零序功率, 并在公式中使用了正交  $\alpha-\beta-0$  变换。这种算法计算上比较精确。文献<sup>[4]</sup>介绍了广义的无功功率和有功功率的定义。该文中有功功率和无功功率分别用电压向量和电流向量的内积和外积来表示。文中还进一步阐述了 pq 理论就是广义功率定义的一种特殊情况。

上述考虑零序功率的瞬时无功功率理论为解决配电网中普遍存在的三相四线制中的问题提供了新的理论依据。本文根据上述瞬时无功功率理论对配电网中的电能质量进行控制, 采用了一种改进的三角波脉冲宽度调制电流控制策略。经 Matlab 仿真证明, 具有很好的跟踪补偿效果。

基金项目: 广东省教育厅专项重点实验室 (IDSYS200701)

### 1 三相系统的瞬时电流和瞬时功率

文献[4]给出了瞬时无功理论的各个物理量的清晰定义。假设配电电路为三相四线制,如图1所示。下标 a, b 和 c 分别表示相应的相,下标 S, L 和 F 分别表示电源、负载和补偿器。瞬时电源电压向量  $\vec{v}_s$ 、电源电流向量  $\vec{i}_s$ 、负载电流向量  $\vec{i}_L$ , 以及滤波器输出电流向量  $\vec{i}_F$  定义如下

$$\vec{v}_S = [v_{Sa} \ v_{Sb} \ v_{Sc}]^T, \quad \vec{i}_S = [i_{Sa} \ i_{Sb} \ i_{Sc}]^T$$

$$\vec{i}_L = [i_{La} \ i_{Lb} \ i_{Lc}]^T, \quad \vec{i}_F = [i_{Fa} \ i_{Fb} \ i_{Fc}]^T \quad (1)$$

其中,上标 T 表示转置运算。

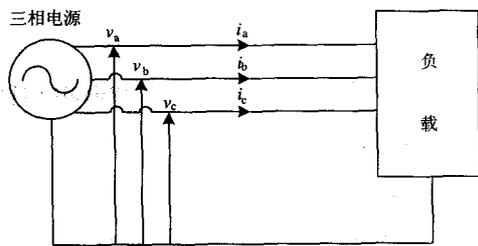


图1 三相四线制系统

Fig.1 Three-phase four-wire system

瞬时有功功率是一个标量,定义为向量  $\vec{v}$  和  $\vec{i}$  的内积,即

$$p = \vec{v} \cdot \vec{i} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (2)$$

瞬时无功功率定义为向量  $\vec{v}$  和  $\vec{i}$  的外积,即

$$\vec{q} = \vec{v} \times \vec{i} = [q_a \ q_b \ q_c]^T = \begin{bmatrix} v_b i_c - v_c i_b \\ v_c i_a - v_a i_c \\ v_a i_b - v_b i_a \end{bmatrix} \quad (3)$$

瞬时有功电流向量  $\vec{i}_p$  和瞬时无功电流向量  $\vec{i}_q$  分别定义为

$$\vec{i}_p = [i_{ap} \ i_{bp} \ i_{cp}]^T = \frac{p}{\vec{v} \cdot \vec{v}} \vec{v} \quad (4)$$

$$\vec{i}_q = [i_{aq} \ i_{bq} \ i_{cq}]^T = \frac{\vec{q} \times \vec{v}}{\vec{v} \cdot \vec{v}} \quad (5)$$

整个电流向量为有功和无功电流向量之和,即

$$\vec{i} = \vec{i}_p + \vec{i}_q \quad (6)$$

### 2 补偿回路和检测电流的产生

图2给出了三相四线制补偿系统的原理图。系

统接有一个三相的非线性负载,一个由三相脉冲宽度调制(PWM)的逆变器构成的有源滤波器与负载并联。检测电路采用基于  $i_p - i_q$  法的谐波电流检测方法。

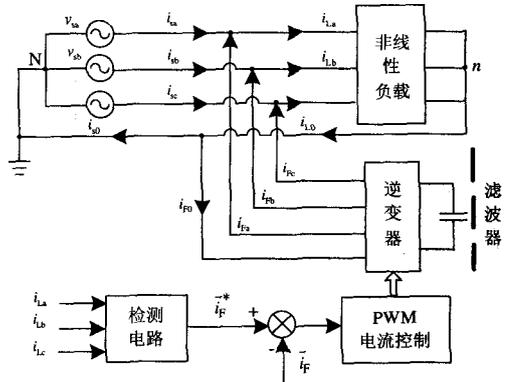


图2 三相四线制补偿系统原理图

Fig.2 Compensating system principle diagram of three-phase four-wire system

对于三相四线制系统中三相电流  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  包含零序分量,可根据坐标变换将它们转换到正交的  $\alpha - \beta - 0$  坐标系

$$\begin{bmatrix} i'_\alpha \\ i'_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = [C_{33}] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\text{其中: } [C_{33}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}$$

求出零序分量为

$$i_0 = \frac{\sqrt{3}}{3} (i_a + i_b + i_c) \quad (8)$$

将此零序分量从各电流中剔除<sup>[6]</sup>,即令

$$\begin{cases} i'_a = i_a - i_0 \\ i'_b = i_b - i_0 \\ i'_c = i_c - i_0 \end{cases} \quad (9)$$

则  $i'_a$ 、 $i'_b$ 、 $i'_c$  中只含正序分量和负序分量,分别表示为

$$\begin{cases} i'_a = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ I_{+n} \sin(n\omega t + \varphi_{+n}) + I_{-n} \sin(n\omega t + \varphi_{-n}) \right] \\ i'_b = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ I_{+n} \sin(n\omega t + \varphi_{+n} - 120^\circ) + I_{-n} \sin(n\omega t + \varphi_{-n} + 120^\circ) \right] \\ i'_c = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ I_{+n} \sin(n\omega t + \varphi_{+n} + 120^\circ) + I_{-n} \sin(n\omega t + \varphi_{-n} - 120^\circ) \right] \end{cases} \quad (10)$$

其中: +表示正序分量, -表示负序分量,  $n$  表示谐波

次数。这样, 对  $i'_a$ 、 $i'_b$ 、 $i'_c$  检测得到的基波正序分量如下所示

$$\begin{bmatrix} i_{a+1} \\ i_{b+1} \\ i_{c+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} I_{+1} \sin(\omega t + \varphi_{+1}) \\ \sqrt{2} I_{+1} \sin(\omega t + \varphi_{+1} - 120^\circ) \\ \sqrt{2} I_{+1} \sin(\omega t + \varphi_{+1} + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (11)$$

将此基波正序电流分量与  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  相减, 就可以得出包含谐波、基波负序、零序在内的最终检测结果  $i_{ad}$ 、 $i_{bd}$ 、 $i_{cd}$ , 原理如图 3。

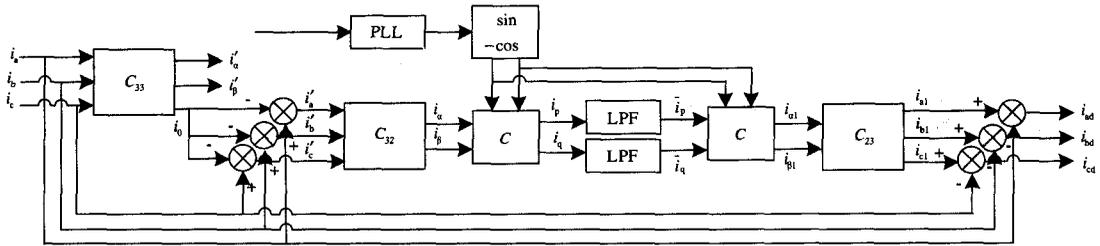


图 3 电流检测原理图

Fig.3 Principle diagram of current detection

### 3 控制策略

并联型有源滤波器 (APF) 产生的补偿电流应实时跟踪其指令电流的变化, 要求补偿电流发生器具有很好的实时性, 因此本文的电流控制采用跟踪型 PWM 控制方式。目前应用于有源电力滤波器的电流跟踪控制电路一般采用两种策略<sup>[7-9]</sup>: 三角波脉宽调制电流控制和滞环比较电流控制法。前者的优点是开关频率固定、控制简单、动态响应好, 缺点是开关损耗大、存在高频畸变分量和高频失真、精度低、在大功率应用中受到限制; 而后者的优点是实现较简单、动态响应快、对负载适应能力强, 缺点是开关频率不固定、易产生过大的脉动电流和开关噪声、开关频率、响应速度和电流跟踪精度受滞环宽度影响。由于本文的研究对象是配电网, 有源滤波器的容量不是很大, 所以采用改进的三角波脉宽调制电流控制策略。经仿真证明, 具有很好的跟踪补偿效果。

在控制方式的选取上, 由于本文以同时补偿谐波电流和无功电流为目的, 故采用检测负载电流的控制方式, 其指令电流运算电路的输入信号来自负载电流, 补偿电流能很好地跟踪指令电流。但是在主电路电力开关高频通断的过程中, 会产生其工作

频率附近一些次数很高的谐波。为了滤除这些频率较高的谐波, 在有源电力滤波器系统中加入了由电感、电阻、电容构成的高通滤波器 (HPF)。

### 4 算例及结果验证

三相四线制的配电网线电压有效值为 220 V, 电源阻抗为  $Z_s = 0.6 + j0.15 \Omega$ 。采用并联平波电容的二极管整流电路仿真非线性负载, 且负载消耗的有功功率为 60 kW, 无功功率为 4 000 var, 负载与

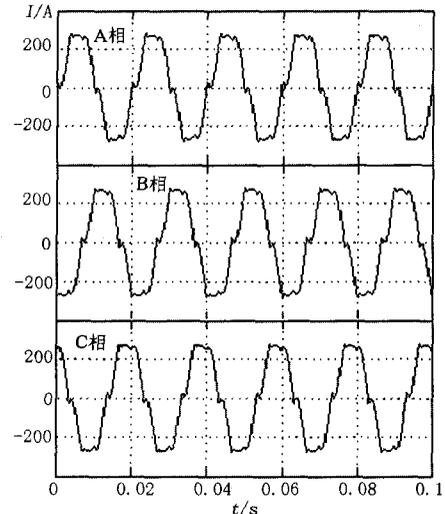


图 4 补偿前电源电流波形

Fig.4 Source current waveforms before compensating

补偿点的等效连接阻抗为  $Z_L = 0.5 + j0.01 \Omega$ 。图 4 和图 6 分别为有源滤波器补偿前后的电源电流波形。图 5 是补偿电流的波形。由图可见，通过补偿电源电流基本接近正弦。

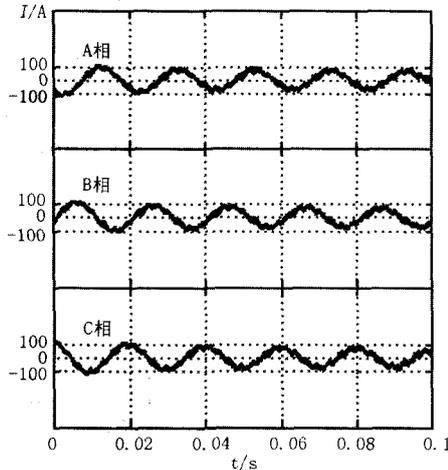


图 5 补偿电流波形

Fig.5 Compensated current waveforms

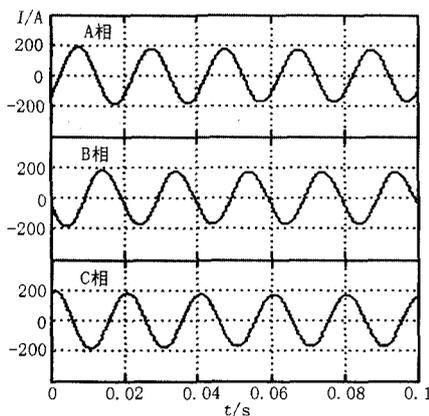


图 6 补偿后的电源电流波形

Fig.6 Source current waveforms after compensating

### 5 结论

本文将广义的瞬时无功功率理论用在配电网的电能质量控制上。文中介绍了瞬时电流和瞬时功率的定义，提出了适用于三相四线制配电网的电流检测方法，并且采用三角波脉冲宽度调制的电流控制策略来控制有源滤波器的输出。仿真实验证明了所提方法的正确性。

### 参考文献

[1] Akagi H, Kanazawa, Y, Nabae A. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices

Without Energy Storage Components[J]. IEEE Trans Ind, 1984, 20(3): 625-630.

[2] Furuhashi T, Okuma S, Uchikawa Y. A Study on the Theory of Instantaneous Reactive Power[J]. IEEE Trans Ind Electron, 1990, 37(1): 86-90.

[3] Watanabe E H, Stephan RM, Aredes M. New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(2): 697-703.

[4] Peng F Z, Lai J S. Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-phase Power Systems[J]. IEEE Trans Instrum Meas, 1996, 45(1): 293-297.

[5] Peng F Z, Ott G W, Adams D J. Harmonic and Reactive Power Compensation Based on the Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for 3-Phase 4-Wire Systems[J]. IEEE Trans Power Electron, 1998, 13(6): 1174-1181.

[6] 王兆安, 杨君. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

[7] 魏磊, 张伏生, 耿中行, 等. 基于瞬时无功功率理论的电能质量扰动检测、定位与分类方法[J]. 电网技术, 2004, 28 (6): 53-58.

WEI Lei, ZHANG Fu-sheng, GENG Zhong-xing, et al. Detection, localization and Identification of Power Quality Disturbance Based on Instantaneous Reactive Power Theory[J]. Power System Technology, 2004, 28 (6): 53-58.

[8] 胡铭, 陈珩. 有源滤波技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (3): 66-70.

HU Ming, CHEN Heng. Active Power Filter Technology and its Application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (3): 66-70.

[9] 蒋平, 王宝安, 等. 配电网串并联复合有源电力滤波器的仿真研究[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (19): 36-40.

JIANG Ping, WANG Bao-an, et al. Simulation Analysis of Series-parallel Active Power Filter for Distribution Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (19): 36-40.

收稿日期: 2008-11-13; 修回日期: 2008-12-02

### 作者简介:

武小梅(1972-), 女, 博士研究生, 讲师, 从事电力系统分析运行与控制以及电能质量等方面的研究; E-mail: eexiaomei@126.com

栗颂东(1965-), 男, 本科, 工程师, 从事电网自动化的运行与研究; 文福拴(1965-), 男, 博士生导师, 广东省“珠江学者”, 特聘教授, 主要从事电力市场、电力系统故障诊断与系统恢复方面的研究工作。