

# 三相电压不对称时谐波与基波有功、无功电流的精确检测方法研究

杨杰<sup>1</sup>, 赖声礼<sup>1</sup>, 李心广<sup>2</sup>, 秦华标<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学电信学院, 广州 510640; 2. 广州大学物理与电子系, 广州 510405)

**摘要:** 当三相电压不对称时  $i_p - i_q$  检测法会产生误差, 本文对  $i_p - i_q$  检测法在三相电压不对称时存在的误差进行了分析。之后提出了一种改进的  $i_p - i_q$  检测法, 在该检测法中用基于低通滤波的 A 相正序电压提取单元代替原  $i_p - i_q$  检测法中的锁相环, 以提取 A 相正序电压。仿真与试验证明在三相电压畸变且不对称时该检测方法仍然能正确地检测出谐波与基波有功、无功电流。

**关键词:** 电力有源滤波器; 谐波; 无功电流

**中图分类号:** TM835 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)04-0006-04

## 1 前言

随着我国经济的不断发展, 越来越多的非线性、冲击性负载的投入使用, 使得电网的谐波污染日益严重。电网谐波的治理目前主要有 LC 无源滤波和基于电力电子技术的电力有源滤波器 (APF) 两种方式。与 LC 无源滤波器比较, 有源滤波器具有反应速度快, 能对变化的无功及电网谐波电流实现连续动态的跟踪补偿, 滤波特性不受系统阻抗的影响等优势<sup>[1]</sup>。为了获得电力有源滤波器控制电路所需的补偿参考电流指令信号, 实时检测非线性负载电流中的谐波分量和基波有功、无功分量是技术关键, 其准确性将影响到电力有源滤波器的滤波性能。

目前, 应用于有源滤波器中的补偿参考电流检测方法大致有以下几种。文献[2]提出基于瞬时无功功率理论的  $p - q$  法, 但该方法只适用于电网电压对称且无畸变情况下谐波电流的检测。文献[3]提出基于快速傅立叶变换 (FFT) 的检测方法, 该方法延迟时间长, 实时性差。文献[4]提出用小波变换提取基波分量的方法, 由于难于构造分频严格、能量集中的小波, 其检测精度有待改善<sup>[5]</sup>。文献[6]提出自适应电流检测方法, 其缺点是动态响应速度慢且不能滤除基波负序电流<sup>[7]</sup>。文献[8]提出  $i_p - i_q$  检测法, 该方法具有较好的实时性, 计算量少, 更适合电流的快速检测。但当三相电压不对称时, 该方法对基波有功、无功电流的检测存在误差。本文在分

析  $i_p - i_q$  法检测误差的基础上, 提出了一种改进的  $i_p - i_q$  检测法, 该方法在电压三相不对称且畸变的情况下仍能正确检测谐波与基波有功、无功电流。

## 2 $i_p - i_q$ 检测法原理简介

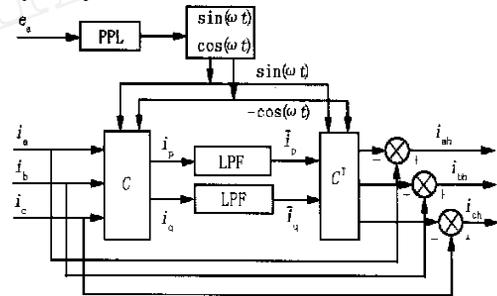


图 1  $i_p - i_q$  法检测原理图

Fig. 1 The schematic diagram of the  $i_p - i_q$  detecting method

$i_p - i_q$  检测法如图 1 所示。图中  $e_a$  为 A 相电压信号, PPL 为锁相环, 由锁相环控制其后的正弦、余弦发生电路, 产生与 A 相电压同相位的正弦和余弦信号, 以此消除电压畸变对检测精度的影响。对应图 1 简介  $i_p - i_q$  检测法原理。由于在三相电流不对称情况下  $i_p - i_q$  法仍然能正确检测到正序基波电流, 为了简便起见本文均以三相电流对称为例进行说明。设电网三相瞬时电流  $i_a, i_b, i_c$  除基波电流外还包含高次谐波电流, 可表示为:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} & I_n \sin(n t + \varphi_n) \\ & n \\ \sqrt{2} & I_n \sin(n t + \varphi_n - 2 / 3) \\ & n \\ \sqrt{2} & I_n \sin(n t + \varphi_n + 2 / 3) \\ & n \end{bmatrix} \quad (1)$$

基金项目: 国家自然科学基金 (69772007) 资助项目;  
广东省自然科学基金 (C10605) 资助项目

式(1)中  $n=3k \pm 1$ ,  $k$  为整数,  $n=1$  时为基波, 其余为各次谐波。为角频率,  $I_n$ 、 $\varphi_n$  分别为各次电流的有效值及初相角。图 1 中变换矩阵为:

$$C = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sin t & \sin(t-2/3) & \sin(t+2/3) \\ -\cos t & -\cos(t-2/3) & -\cos(t+2/3) \end{bmatrix} \quad (2)$$

电网三相瞬时电流与矩阵  $C$  相乘, 得到瞬时有功电流  $i_p$  与瞬时无功电流  $i_q$ 。

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3} I_n \cos[(n-1)t + \varphi_n] \\ \sqrt{3} I_n \sin[(n-1)t + \varphi_n] \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式(3)可见, 当  $n=1$  时为直流分量。即  $i_p$ 、 $i_q$  的直流分量  $\bar{i}_p$ 、 $\bar{i}_q$  为:

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3} I_1 \cos \varphi_1 \\ -\sqrt{3} I_1 \sin \varphi_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$i_p$ 、 $i_q$  经低通滤波(LPF)后得到  $\bar{i}_p$ 、 $\bar{i}_q$ , 它们经反变换后得到基波电流  $i_{a1}$ 、 $i_{b1}$ 、 $i_{c1}$ ,

$$\begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \end{bmatrix} = C^T \begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} I_1 \sin(t + \varphi_1) \\ \sqrt{2} I_1 \sin(t + \varphi_1 - 2/3) \\ \sqrt{2} I_1 \sin(t + \varphi_1 + 2/3) \end{bmatrix} \quad (5)$$

最后, 由电网电流减去基波电流  $i_{a1}$ 、 $i_{b1}$ 、 $i_{c1}$  得到高次谐波电流。

$$\begin{bmatrix} i_{ah} \\ i_{bh} \\ i_{ch} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

基波有功电流通过下式计算:

$$\begin{bmatrix} i_{a1p} \\ i_{b1p} \\ i_{c1p} \end{bmatrix} = C^T \times \begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \\ 0 \end{bmatrix} = -\sqrt{2} \begin{bmatrix} \sin t \\ \sin(t-2/3) \\ \sin(t+2/3) \end{bmatrix} \times I_1 \cos \varphi_1 \quad (7)$$

而基波无功电流通过下式计算:

$$\begin{bmatrix} i_{a1q} \\ i_{b1q} \\ i_{c1q} \end{bmatrix} = C^T \times \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{i}_q \\ \bar{i}_p \end{bmatrix} = \sqrt{2} \begin{bmatrix} \cos t \\ \cos(t-2/3) \\ \cos(t+2/3) \end{bmatrix} \times I_1 \sin \varphi_1 \quad (8)$$

### 3 三相电压不对称时 $i_p - i_q$ 检测法误差分析

当三相电压不对称时, A 相电压的初相角与 A 相正序电压的初相角间存在相位差。  $i_p - i_q$  检测法

中的锁相环只能提取出 A 相电压, 而不是 A 相正序电压。现设 A 相电压的初相角与 A 相正序电压的初相角间的相位差为  $\theta$ , 进行误差分析。由于存在相位差  $\theta$ , 矩阵  $C$  变为:

$$C = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \sin(t+\theta) & \sin(t-2/3+\theta) & \sin(t+2/3+\theta) \\ -\cos(t+\theta) & -\cos(t-2/3+\theta) & -\cos(t+2/3+\theta) \end{bmatrix} \quad (9)$$

由  $i_p - i_q$  检测法原理可得:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3} I_n \cos[(n-1)t + \varphi_n - \theta] \\ \sqrt{3} I_n \sin[(n-1)t + \varphi_n - \theta] \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3} I_1 \cos(\varphi_1 - \theta) \\ -\sqrt{3} I_1 \sin(\varphi_1 - \theta) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \end{bmatrix} = C^T \begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} I_1 \sin(t + \varphi_1 - \theta) \\ \sqrt{2} I_1 \sin(t + \varphi_1 - \theta - 2/3) \\ \sqrt{2} I_1 \sin(t + \varphi_1 - \theta + 2/3) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} i_{a1p} \\ i_{b1p} \\ i_{c1p} \end{bmatrix} = -\sqrt{2} \begin{bmatrix} \sin(t + \theta) \\ \sin(t - 2/3 + \theta) \\ \sin(t + 2/3 + \theta) \end{bmatrix} \times I_1 \cos(\varphi_1 - \theta) \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} i_{a1q} \\ i_{b1q} \\ i_{c1q} \end{bmatrix} = \sqrt{2} \begin{bmatrix} \cos(t + \theta) \\ \cos(t - 2/3 + \theta) \\ \cos(t + 2/3 + \theta) \end{bmatrix} \times I_1 \sin(\varphi_1 - \theta) \quad (14)$$

将式(5)与式(12)比较, 可见相位差  $\theta$  的出现, 对基波电流的检测没有影响, 由于谐波电流由式(6)计算, 因此对谐波电流也没有影响。将式(7)、式(8)分别与式(13)、式(14)比较, 对于三相基波有功、无功电流, 相位差  $\theta$  的出现使得基波有功、无功电流的幅值和相位都产生了误差。

### 4 改进的 $i_p - i_q$ 检测方法

由前面误差分析可知, 当三相电压不对称时,  $i_p - i_q$  检测方法对基波有功、无功电流的检测存在误差。在有源滤波器中, 如果要对谐波和无功同时进行补偿, 控制电路所需的补偿参考电流由电网电流减去基波有功电流得到, 因此, 精确检测基波有功电流对有源滤波器具有重要作用。为了精确检测基波有功、无功电流, 必须对传统的  $i_p - i_q$  检测方法的参考电压提供电路进行改进, 使其能够提取出 A 相正序基波电压  $e_{a1}$ 。本文提出了一种改进的  $i_p - i_q$

检测方法,其采用了基于低通滤波器的 A 相正序基波电压提取单元,用以代替传统  $i_p - i_q$  检测法中的锁相环单元。基于低通滤波的 A 相正序基波电压提取单元如图 2 所示。该单元在三相电压畸变且不对称时,仍然能正确地提取 A 相正序基波电压  $e_{a1}$ 。现分析其工作原理。设电源电压畸变且不对称,即含有高次谐波和负序电压,如式(15)所示。

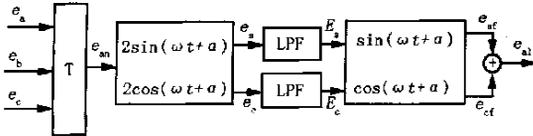


图 2 基于低通滤波器(LPF)的 A 相正序电压提取单元框图

Fig. 2 Block diagram of phase A fundamental positive sequence voltage selected unit based on LPF

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} E_n \sin(n t + 1_n) \\ \sqrt{2} E_n \sin(n t + 1_n - 2/3) \\ \sqrt{2} E_n \sin(n t + 1_n + 2/3) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sqrt{2} E_{2n} \sin(n t + 2_n) \\ \sqrt{2} E_{2n} \sin(n t + 2_n + 2/3) \\ \sqrt{2} E_{2n} \sin(n t + 2_n - 2/3) \end{bmatrix} \quad (15)$$

式(15)中下标  $1_n$  表示正序,  $2_n$  表示负序,当  $n = 1$  时表示基波。经过对称分量变换单元 T,可提取 A 相正序电压信号  $e_{an}$ 。

$$e_{an} = \sqrt{2} E_{1n} \sin(n t + 1_n) \quad (16)$$

将  $e_{an}$  与任意初相角  $\alpha$  的正弦、余弦信号矩阵相乘

$$\begin{bmatrix} e_s \\ e_c \end{bmatrix} = e_{an} \begin{bmatrix} 2\sin(\omega t + \alpha) \\ 2\cos(\omega t + \alpha) \end{bmatrix} \quad (17)$$

式(17)中  $e_s, e_c$  分别为:

$$e_s = \sqrt{2} E_{1n} \{ \cos[(n+1)t + 1_n + \alpha] - \cos[(n-1)t + 1_n - \alpha] \} \quad (18)$$

$$e_c = \sqrt{2} E_{1n} \{ \sin[(n+1)t + 1_n + \alpha] + \sin[(n-1)t + 1_n - \alpha] \} \quad (19)$$

其中含有直流分量,经低通滤波(LPF)后即可得到它们的直流分量  $E_s, E_c$

$$\begin{bmatrix} E_s \\ E_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} E_{1n} \cos(\alpha) \\ \sqrt{2} E_{1n} \sin(\alpha) \end{bmatrix} \quad (20)$$

通过下面的计算可以得到 A 相正序基波电压为:

$$e_{a1} = E_s \sin(\omega t + \alpha) + E_c \cos(\omega t + \alpha) = \sqrt{2} E_{1n} \sin(\omega t + \alpha) \quad (21)$$

最后,由  $e_{a1}$  控制正弦、余弦产生电路,为  $i_p - i_q$  检测系统提供与 A 相正序基波电压同相位的正弦、余弦信号。

基于响应速度和滤波效果方面的考虑,A 相正序电压提取单元中的 LPF 采用二阶巴特沃兹(Butterworth)低通滤波器。截止频率为 25 Hz,延时为一个工频周期(20 ms)。

### 5 仿真与试验结果

现通过仿真对比研究两种检测方法。在系统仿真中,三相电压畸变且不对称。三相畸变电流如图 3 所示,其中基波电流幅值为 100 A,含 20% 的 5 次与 7 次谐波。分别采用传统的  $i_p - i_q$  检测法与本文提出的改进  $i_p - i_q$  检测法对三相畸变电流进行检测。仿真结果表明,两种方法检测到的谐波电流相同,如图 4 所示。图 5 为三相畸变电流所含有的基波有功、无功电流。图 6 为两种方法得到的基波有功、无功电流波形,其中虚线为传统的  $i_p - i_q$  检测法得到的电流波形,实线为改进的  $i_p - i_q$  检测法得到的电流波形。比较图 5、图 6,可见传统的  $i_p - i_q$  检测法检测到的基波有功、无功电流在幅值和相位上都存在误差,而改进的  $i_p - i_q$  检测法检测的效果比较理想。仿真结果与理论分析一致。

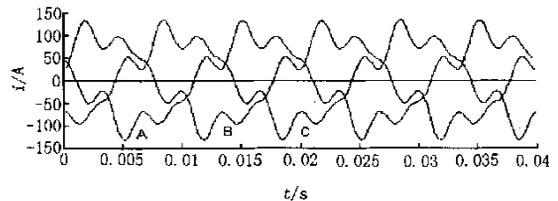


图 3 三相电流波形

Fig. 3 Waveform of three-phase current

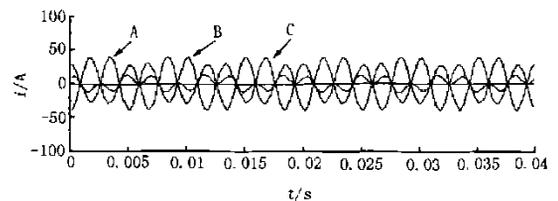


图 4 两种方法检测到的三相谐波电流

Fig. 4 Three-phase current harmonics detected by two methods

将本文提出的改进  $i_p - i_q$  检测法应用于并联型有源滤波器实验系统中。谐波源为三相二极管桥式整流电路。有源滤波器主要由功率电路单元和控

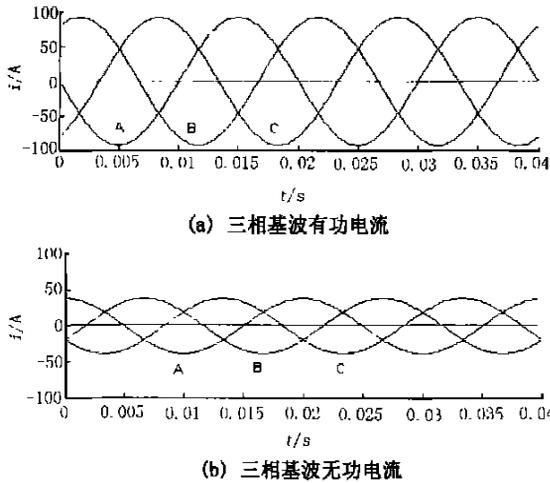


图 5 三相电流中所含有的基波有功、基波无功电流  
Fig.5 The active current and the reactive current of three-phase current

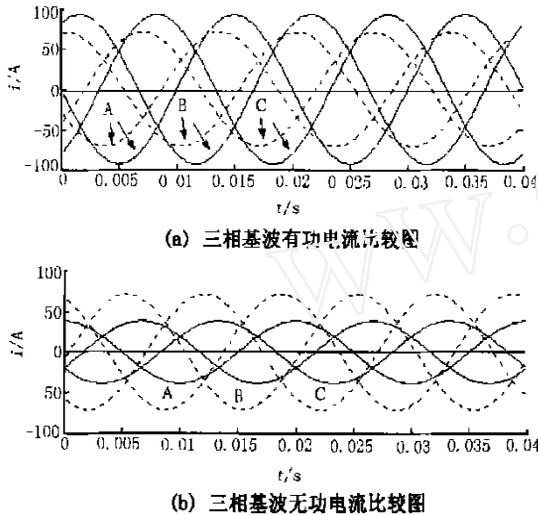


图 6 两种方法检测到的基波有功、无功电流

Fig.6 The active current and the reactive current detected by two methods

制单元构成。功率电路单元是一个 PWM 逆变器,逆变器中的 IGBT 采用富士通公司的智能功率模块 IPM,该模块额定电压为 1200 V,额定电流为 50 A。为了调试方便,目前实验系统的控制单元由工控机与研祥公司的 818HD 工控卡组成。工控机完成检测运算并产生 PWM 脉冲控制信号,通过工控卡控制 IGBT 动作。试验的结果如图 7 所示。图 7(a)中为 a 相和 c 相电压波形,可见电压不对称且含有高次谐波。

## 6 结束语

$i_p - i_q$  检测法由于其具有电路结构简单,动态响应特性好等优点,在电流有源滤波器中得了一定的应用。但是在三相电压不对称时,基波有功、无功

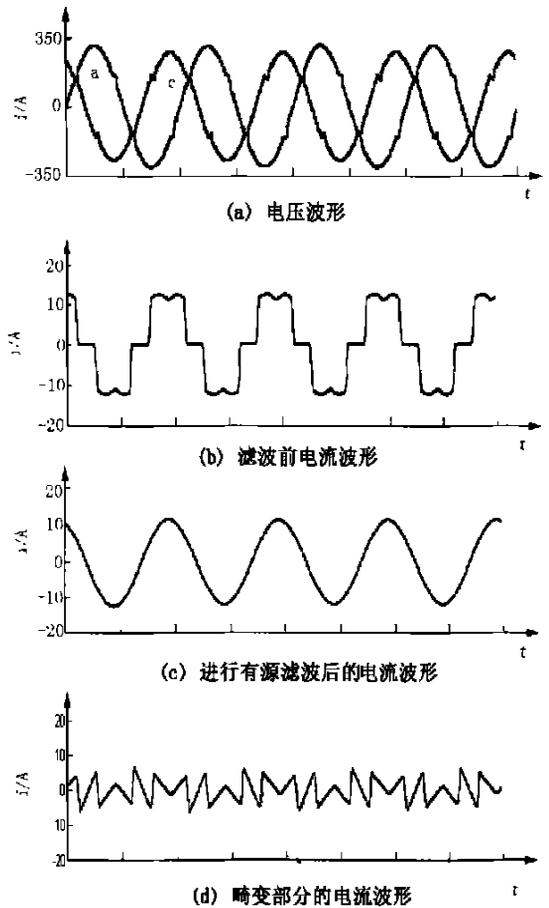


图 7 试验结果

Fig.7 Experiment results

电流的检测存在较大误差。针对这一的缺点,本文提出了改进的  $i_p - i_q$  检测方法。仿真和试验结果表明,改进的  $i_p - i_q$  检测方法,在电网三相电压畸变且不对称的情况下,仍然能精确地检测谐波和基波有功、无功电流,值得在电力有源滤波系统中推广应用。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Akagi H, Nabae A. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components[J]. IEEE Trans on Industry Applications,1984,20(3):625-630.
- [3] 候振程,陆治国,邹言,等.一种新的谐波和无功电流实时检测方法[J].重庆大学学报,1991,14(6):28-31.
- [4] 杨晔,任震,唐卓尧.基于小波变换检测谐波的新方法[J].电力系统自动化,1997,21(10):39-42.

(下转第 20 页)

## 5 结论

通过对电机在轻载时运行机理的分析,建立了电机节能的数学模型,得出了电机功率因数与转差率以及与定子端电压的单值函数关系,并通过算例验证了其正确性。这将为电机节能控制器的研制提供理论基础。

## 参考文献:

[1] Frank. Nola. Power factor control system for AC induction

motors[P]. U. S. A Patent. 4052648 act. 4,1977.

[2] 汤蕴,史乃,等.电机学[M].西安:西安交通大学出版社,1993.

收稿日期: 2002-08-09; 修回日期: 2002-11-05

作者简介:

吕广强(1974-),男,博士研究生,研究方向为电力传动和电力电子在电力系统中的应用;

纪延超(1962-),男,教授,博士生导师,研究方向为FACTS及电力电子在电力系统中的应用。

### Theoretical study on energy saving by varying the stator voltage for induction motors

L ü Guang-qiang, JI Yan-chao

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The operation principle is analyzed when varying the stator voltage of induction motors in this paper. By analyzing the relationship of power factor, slip ratio and the stator voltage, the function between power factor and the stator voltage is derived. The mathematical model on energy saving of induction motors is proposed. The result of an example shows the applicability of energy saving, which provides the theoretical basis for control schemes.

**Key words:** varying voltage; energy saving; induction motors

(上接第9页)

- [5] 王建,冉启文,纪延超,等.谐波检测中小波变换频域特性分析[J].电力系统自动化,1998,22(7):40-43.
- [6] 王群,吴宁,谢品芳.一种基于神经元的自适应谐波电流检测法[J].电力系统自动化,1997,21(10):13-16.
- [7] 秦梅,周林,叶一麟.三相平衡和不平衡系统中有害电流的检测技术[J].电工技术杂志,2000,(6):4-6.
- [8] 杨君,王兆安.三相电路谐波电流两种检测方法的对比研究[J].电工技术学报,1995,(5):43-48.

收稿日期: 2002-08-05; 修回日期: 2002-10-09

作者简介:

杨杰(1974-),男,博士研究生,研究方向为通讯与数字信号处理、电力电子技术;

赖声礼(1939-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为生物电磁学,电能质量监控;

李心广(1963-),男,副教授,在职博士研究生,研究方向为电力电子与计算机应用;

秦华标(1967-),男,博士,高工,主要研究方向为智能控制与计算机应用。

### Research on precision detection method of harmonics, fundamental active current and reactive current in the case of unsymmetrical three-phase voltage

YANGJie<sup>1</sup>, LAI Sheng-li<sup>1</sup>, LI Xin-guang<sup>2</sup>, QIN Hua-biao<sup>1</sup>

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangzhou University, Guangzhou 510405, China.)

**Abstract:** The  $i_p$ - $i_q$  detecting method will cause errors when three-phase voltage is imbalance. The errors are analyzed in this paper. A improved  $i_p$ - $i_q$  detecting method is put forward. In order to select phase A fundamental positive sequence voltage, a voltage selected unit based on low pass filter is used to replace the phase lock loop of  $i_p$ - $i_q$  detecting method. Simulation and experiment show that the improved  $i_p$ - $i_q$  detecting method can accurately detect harmonics, active current and reactive current of fundamental when three-phase voltage is imbalance and is distorted.

**Key words:** active power filter; harmonics; reactive current