

# 基于相量叠加的 P 控制在并联有源滤波器中的应用

崔福鑫<sup>1</sup>, 刘会金<sup>1</sup>, 李琼林<sup>1</sup>, 王碧芳<sup>2</sup>

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2 武汉职业技术学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 首先分析了并联有源滤波器误差信号的特点, 并指出了传统 P 控制应用于并联有源滤波器的不足是积分环节的作用具有周期性。针对误差信号的特点, 在相量叠加的基础上提出了采用误差信号按周期叠加的改进 P 控制方法, 以消除积分环节的周期性。该方法应用于并联有源滤波器的控制中可有效地消除控制系统的稳态误差, 提高系统的稳态和动态性能。仿真和实验结果证明了该控制方法的有效性。

关键词: 并联有源滤波器; 相量叠加; P 控制

中图分类号: TM531.5 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)07-0026-05

## 0 引言

电力电子装置和非线性负荷带来的谐波污染问题已引起广泛关注, 许多专家和学者一直在研究开发动态可调的装置来解决电能质量问题。其中具有代表意义的是有源电力滤波器 (APF), 它可以对大小及频率变化的谐波以及变化的无功进行补偿, 并能有效地克服无源滤波器的缺点, 是一种比较理想的谐波补偿装置。因此, 有源电力滤波器的研究与应用得到了迅速发展<sup>[1]</sup>。从目前国外的使用情况来看, 利用有源电力滤波器进行谐波和无功补偿也是今后的一个发展趋势<sup>[5]</sup>。

经过 20 多年的发展, APF 技术已经比较成熟, 通常采用的控制方式有负荷电流检测控制方式、系统电流检测方式、安装点电流检测方式以及由两者构成的复合控制方式。

并且, 由电力电子元件构成的 APF 主电路也需要采用一定的控制方法来调制输入信号, 使其变为功率信号作用于补偿对象。目前, 有源滤波器的控制一般分为内、外两层。内部控制直接面向电力电子主电路, 根据给定的参考信号来控制电力电子器件; 外部控制则面向被补偿对象, 根据系统控制目标为内层控制提供参考信号, 以减小检测误差及计算延时等对系统性能的影响<sup>[4,2]</sup>。目前, 很多控制方法已经应用于外部控制, 取得了很多成果。其中, PI 控制作为经典控制方法, 以其实现简单, 控制系统稳定等优点, 在有源滤波器的控制当中也得到了应用。

传统 P 控制方法在应用于有源滤波器的控制时, 实验表明其效果并不理想。文献 [7] 把 PI 控制与重复控制构成复合控制应用于正弦波逆变器中, 改善了传统 PI 控制, 但从重复控制的原理可以看

出, 其不适用于含有多重频率的信号, 因此, 不适合应用于有源滤波器的控制。本文首先对有源滤波器控制误差信号的特性进行了分析, 得出其具有周期性和一个工频周期内积分为零的特点, 针对这一特点研究了传统的 P 控制应用于有源滤波器控制时积分环节的特性, 得出了传统 P 控制效果不理想原因之一是积分环节的作用具有周期性的结论, 并根据误差信号的特点在相量叠加的基础上提出了一种采用误差信号按周期叠加的改进 P 控制方法, 以消除积分环节的周期性。通过 Matlab 仿真及在自行研制的有源滤波装置的实验验证了该控制方法的有效性。

## 1 并联有源滤波器的原理及误差信号特点

并联有源滤波器的基本原理就是根据所检测到的负荷谐波电流分量来控制主电路, 使其发出一个大小相等、相位相反的谐波电流进行抵消, 从而起到实时补偿谐波的目的。其主要电路及对应的控制原理如图 1、2 所示。其中:  $i_{APF}$  为并联有源滤波器发出的三相补偿电流;  $i_h$  为检测到的谐波电流;  $i_s, i_l$  分别为系统电流和负荷电流。

在这种控制方式中, 补偿电流通过负反馈使系统形成闭环以提高系统的性能。输入信号  $i_h$  和反馈信号  $i_{APF}$  都可表示为谐波电流的叠加<sup>[6]</sup>, 即:

$$\begin{cases} i_h(t) = \sum_{n=2}^m I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \\ i_{APF}(t) = \sum_{n=2}^m I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \end{cases}$$

式中:  $\omega$  为基波角频率,  $m$  为所需补偿的最高谐波电流次数。

由此可得误差信号

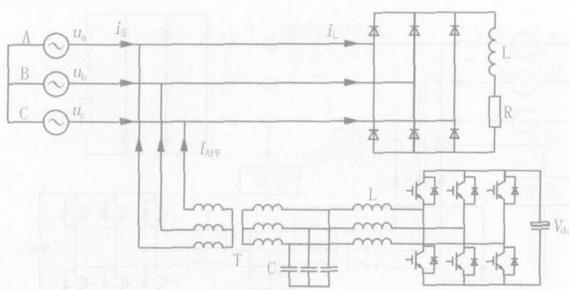


图 1 并联有源滤波器主电路

Fig 1 Main circuit of shunt APF

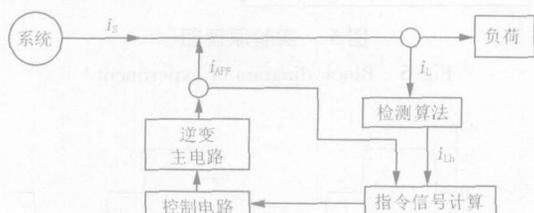


图 2 并联有源滤波器的控制原理

Fig 2 Control configuration of shunt APF

$$e(t) = \sum_{n=2}^m (I_n \sin(n \omega t + \varphi_n) - I_n \sin(n \omega t + \varphi_n))$$

设  $T$  为工频周期, 则  $T = 2\pi/\omega$ , 所以

$$\sin(n \omega(t+T) + \varphi_n) = \sin(n \omega t + n \omega T + \varphi_n) = \sin(n \omega t + \varphi_n)$$

同理:  $\sin(n \omega(t+T) + \varphi_n) = \sin(n \omega t + \varphi_n)$

由此可以得出:  $e(t+T) = e(t)$

而在一个工频周期内  $\int_0^T \sin(n \omega t + \varphi_n) dt = 0$ , 因

此,  $e(t) = 0$

由此可以看出工频周期是误差信号的周期, 而且对一个工频周期, 误差信号的积分为零。误差信号的这一特点决定了传统 P 控制在有源滤波器控制中的不足。下面主要分析这个问题并提出改进的 PI 控制方法。

## 2 传统 P 控制原理及分析

PI 控制蕴涵了动态控制过程中过去和现在的主要信息。其中, 比例 (P) 代表了当前的信息, 起校正偏差的作用, 使过程反应迅速。积分 (I) 代表了过去积累的信息, 它能消除稳态误差, 改善系统的稳态特性。因此, 设计好的 P 控制器具有动态响应速度快, 稳态精度高, 鲁棒性强的优点, 在大多数系统中得到了广泛的应用<sup>[7]</sup>。

文献 [3] 指出了传统 P 控制对正弦的参考电流, 难以达到理想的控制效果。从下面的分析可知, 对在一个周期内积分为零的周期型参考信号, 传统 P 控制的效果均不佳。

传统 P 控制中, 积分控制在离散系统中的表达式为:

$$u(k) = k_i T_i \sum_{i=0}^k e(i)$$

其实质是对误差的每个采样点进行叠加<sup>[6]</sup>。对在一个周期内积分为零的周期型信号, 在每个周期结束时  $u(k) = 0$ , 即积分只能在每个周期内反应误差累加的信息, 在每个周期开始时从零开始叠加, 结束时又为零。因此积分环节具有周期性, 不能在反应整个过程误差累积的信息, 难以很好地消除稳态误差, 达不到理想的控制效果。

由于有源滤波器中的误差信号具有每个工频周期的积分为零的特点, 因此, 传统 P 控制的效果不佳。

## 3 基于相量叠加的 P 控制

从误差信号的表达式中可以看出, 它是由各种频率的正弦信号叠加而成。其中每个频率下的正弦信号都可以表示为相量形式, 该相量的大小和方向随工频周期改变, 可以反应出误差信号的变化。为了提高积分控制的效果, 本文把传统 PI 中对每个采样点积分变为对相量进行叠加。对于  $n$  次谐波, 其积分控制表达式可以写为:

$$U_n(k) = k_i \sum_{i=0}^k (T_i E_n(i))$$

相量叠加过程如图 3 所示。

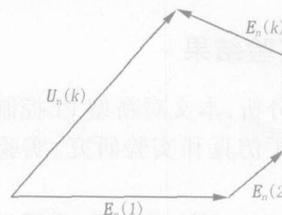


图 3 相量叠加过程

Fig 3 Process of vector splicing

通过对  $U_n(k)$  在时域内进行叠加就可以得到积分控制器的输出  $u(k)$ 。

设积分器从  $i = 0$  开始对误差矢量  $E_n(i)$  进行叠加, 在  $i = k$  时  $E_n(i) = 0$ , 而输出矢量  $E_n(k)$  保持恒定不变。因此, 可以看出新型 P 控制与传统 P 控制具有相同的特点, 可以用来消除稳态误差, 提高系

统性能。

这里积分步长  $T_i$  已经不具有传统 P 控制中的意义,它仅表示对每个相量的放大倍数。在积分过程中可以通过改变该系数调整积分速度,使之与偏差大小相对应,偏差越大,积分越慢,反之则越快。

该控制算法在时域中的实现可以表示为误差信号按周期叠加,算式可写为:

$$u_n(k) = u_{n-1}(k) + k_i T_i(n) e_n(k)$$

其中:  $u_n(k)$ ,  $u_{n-1}(k)$  分别为  $n$  和  $n-1$  个周期第  $k$  个采样点的积分结果;  $e_n(k)$  为第  $n$  个周期第  $k$  个采样点的误差值。  $T_i(n)$  为第  $n$  个周期的积分步长。

从时域讲,其实质是对每个采样点进行 PI 控制,相当于  $N$  个 P 控制 ( $N$  为采样点数) 并行工作来消除稳态误差。

因为 P 控制本身具有计算量小,实现简单的特点,所以,虽说多个 P 控制并行工作,与其他控制方式相比计算量仍很小,应用在高速数据处理器 (DSP) 中具有很强的实时性。同时,因为对每个采样点都进行 PI 控制,扰动对控制的影响也相对减小,所以抗干扰能力也有所提高。

由以上分析可知,该方法克服了传统 P 控制应用于一个周期内积分为零的周期信号的不足,对该类信号可以很好地消除稳态误差,同时具有较好的实时性和抗干扰能力。

仿真实现框图如图 4 所示。

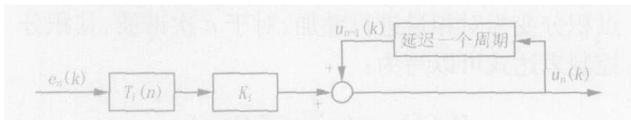


图 4 仿真实验框图

Fig 4 Matlab simulation model of novel PI control

### 4 仿真及实验结果

根据以上分析,本文对新型 P 控制在有源滤波器中的应用做了仿真和实验研究。实验原理图如图 5 所示。

仿真在 Matlab 环境下进行,采用带有感性负载的三相整流桥作为谐波源。其补偿电流的计算采用基于三相电路的瞬时无功理论的谐波检测方法。控制器参数根据实验凑试法确定。图 6 ~ 8 给出了仿真结果。图 6 为有源滤波器投入前系统电流 A 相的波形及频谱。

实验研究采用自行研制的应用双 DSP 控制的有源滤波器。TMS320vc33 实现控制算法, TMS3202407 产生 PWM 控制信号,两者通过双口 RAM 进行通讯。

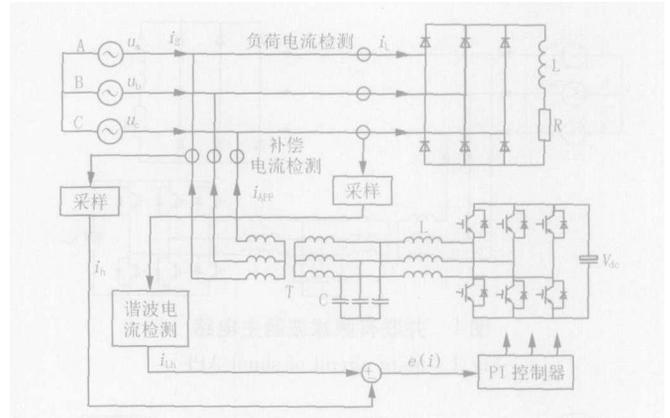


图 5 实验原理图

Fig 5 Block diagram of experiment

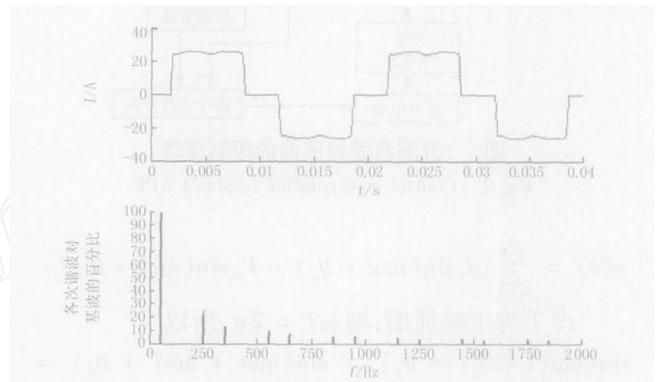


图 6 补偿前电流波形及频谱分析图

Fig 6 Waveform and spectrum of uncompensated current

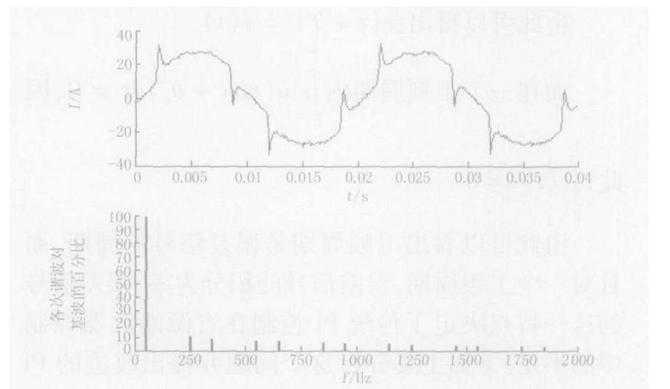


图 7 采用传统 P 控制补偿后电流波形及频谱分析图

Fig 7 Waveform and spectrum of compensated current using conventional PI control

负荷为带感性负载的三相整流桥。负荷中电阻为 25 ,电感为 13.2 mH,控制器参数与仿真参数相同。数据通过仿真器采集并输入到计算机储存和分析,分析软件采用 Matlab,图 9 ~ 14 分别给出了补偿前后三相电流的波形和频谱分析图。

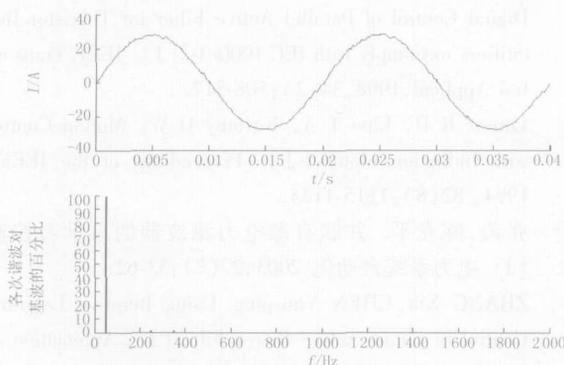


图 8 采用改进 P 控制补偿后电流波形及频谱分析图

Fig 8 Waveform and spectrum of compensated current using novel PI control

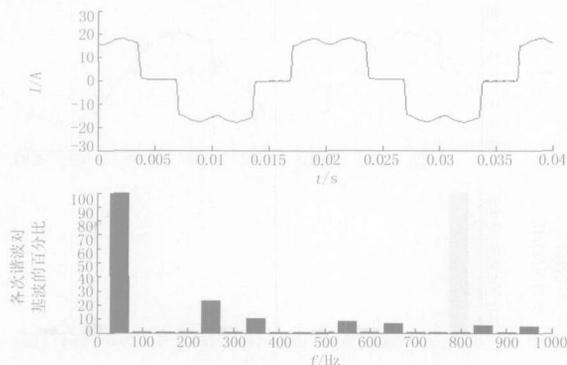


图 11 补偿前 B 相电流波形及频谱分析图

Fig 11 Waveform and spectrum of uncompensated current in phase B

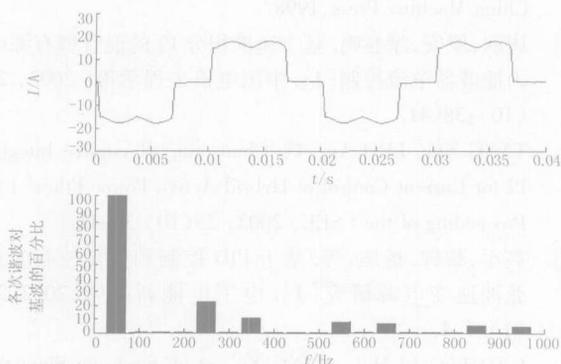


图 9 补偿前 A 相电流波形及频谱分析图

Fig 9 Waveform and spectrum of uncompensated current in phase A

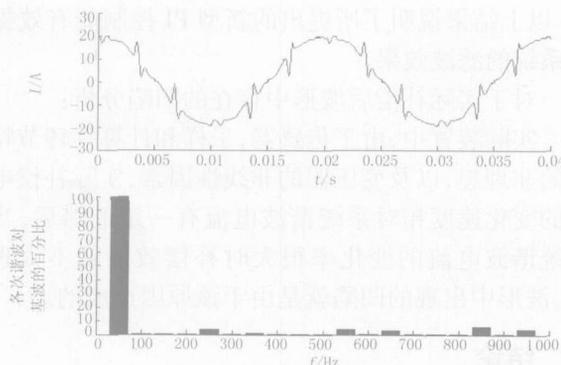


图 12 补偿后 B 相电流波形及频谱分析图

Fig 12 Waveform and spectrum of compensated current in phase B

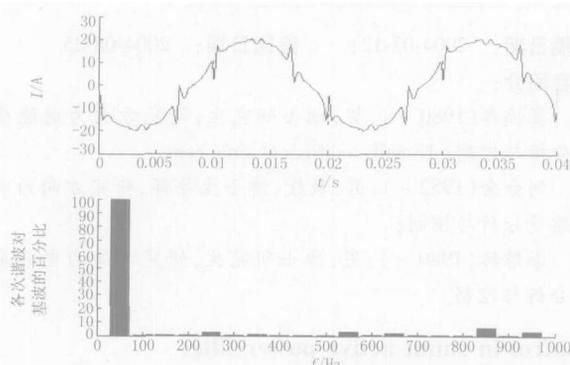


图 10 补偿后 A 相电流波形及频谱分析图

Fig 10 Waveform and spectrum of compensated current in phase A

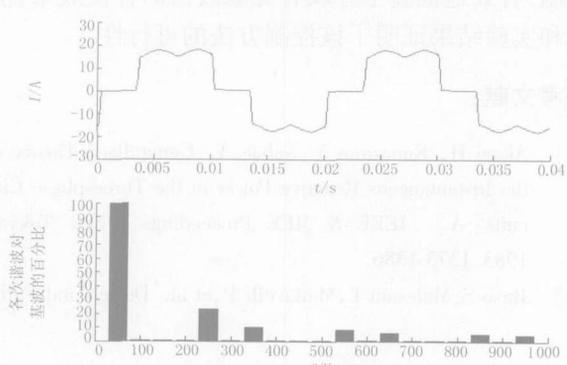


图 13 补偿前 C 相电流波形及频谱分析图

Fig 13 Waveform and spectrum of uncompensated current in phase C

从仿真结果中可以看出:补偿前电流畸变严重,5次、7次、11次等高次谐波含量较高。采用传统 PI 控制进行补偿可以在一定程度上改善电流波形,但是效果不太理想。图 6 给出的频谱分析结果表明电

流波形中仅补偿了谐波总量的 1/2,仍然存在不少的高次谐波分量。图 7 是采用新型 P 控制进行补偿得到的电流波形及频谱分析,可以看出电流中谐波含量已经很低,有源滤波器的补偿效果良好。从图 8 可以看出,改进 P 控制在实际装置中也有很好的效

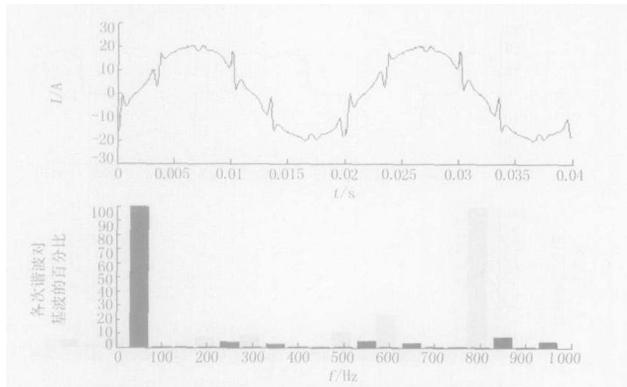


图 14 补偿后 C 相电流波形及频谱分析图

Fig 14 Waveform and spectrum of compensated current in phase C

果。以上结果说明了所提出的新型 P 控制能有效提高系统的滤波效果。

对于实际补偿后波形中存在的凹陷分析:

实际装置中,由于传感器、采样和计算等环节特性的非理想,以及变压器的非线性因素,实际补偿电流的变化速度相对系统谐波电流有一定的滞后,当系统谐波电流的变化率很大时补偿效果就不太理想。波形中出现的凹陷就是由于该原因造成的。

## 5 结论

本文针对并联有源滤波器的特点,分析了传统 P 控制应用的不足,提出了基于相量叠加的新型 PI 控制,有效地提高了并联有源滤波器的补偿效果。仿真和实验结果证明了该控制方法的可行性。

## 参考文献:

- [1] Akagi H, Kanazawa Y, Nabae A. Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in the Three-phase Circuits [A]. IEEE & JIEE Proceedings IPEC. Tokyo: 1983. 1375-1386
- [2] Buso S, Malesani L, Mattavelli P, et al Design and Fully

Digital Control of Parallel Active Filter for Thyristor Rectifiers to Comply with IEC 1000-3-2 [J]. IEEE Trans on Ind Applicat, 1998, 34 (2): 508-517.

- [3] Lorenz R D, Lipo T A, Novotny D W. Motion Control with Induction Motors [J]. Proceedings of the IEEE, 1994, 82 (8): 1115-1135
- [4] 张霞,陈允平. 并联有源电力滤波器的自学习控制 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (7): 53-62  
ZHANG Xia, CHEN Yun-ping Using Iterative Learning Control in Shunt Active Power Filter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (7): 53-62
- [5] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿 [M]. 北京:机械工业出版社, 1998  
WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun Harmonic Exclusion and Reactive Power Compensation [M]. Beijing: China Machine Press, 1998
- [6] 唐欣,罗安,涂春鸣. 基于递推积分 P 的混合型有源电力滤波器电流控制 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (10): 38-41.  
TANG Xin, LUO An, TU Chun-ming Recursive Integral PI for Current Control of Hybrid Active Power Filter [J]. Proceeding of the CSEE, 2003, 23 (10) 38-41.
- [7] 高军,黎辉,杨旭,等. 基于 PD 控制和重复控制的正弦波逆变电源研究 [J]. 电工电能新技术, 2002, 21 (1): 1-4.  
GAO Jun, LI Hui, YANG Xu, et al Study on Sinewave Inverter Switch with PD Control and Repetitive Control [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2002, 21 (1): 1-4

收稿日期: 2004-07-12; 修回日期: 2004-08-25

作者简介:

崔福鑫 (1980 - ), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制; E-mail: cui fuxin@ sina.com

刘会金 (1952 - ), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电能质量分析与控制;

李琼林 (1980 - ), 男, 博士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制。

## Application of phasor splicing based PI control in shunt active power filter

CUI Fu-xin<sup>1</sup>, LIU Hui-jin<sup>1</sup>, LI Qiong-lin<sup>1</sup>, WANG Bi-fang<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2 Wuhan Technical College, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** This paper analyses the characteristics of the control error of shunt active power filter (APF), and points out that the integral part of PI is periodical, which is the demerit of using conventional PI control. Based on the phasor splicing, a novel PI control algorithm splicing the error per period is presented. This algorithm can get rid of the demerit of conventional PI control, and can improve steady-state and dynamic performance of APF. Its validity is proved by simulation and experiments.

**Key words:** APF; phasor splicing; PI control