

一种基于迭代算法的谐波电流检测方法

李自成, 孙玉坤

(江苏大学电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要:以“负载电流为周期电流时,负载电流与负载基波有功电流差的绝对值在一个周期内的积分值最小”为检测原理,提出了一种基于迭代算法的有源电力滤波器单相电路谐波电流检测方法。该方法能够快速跟踪负载基波有功电流幅值,特别是当负载电流发生突然变化时,能够特别快速地跟踪负载基波有功电流幅值。理论分析与仿真研究证实了该方法的正确性。

关键词:有源电力滤波器; 有功电流; 无功电流; 谐波电流

中图分类号: TM744 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)16-0036-04

0 引言

随着各种半导体变流装置在电力系统中的应用,谐波干扰和无功增加的问题日益严重,电力谐波治理已经成为一个广泛关注的课题。电力滤波分为无源和有源两种,它们的工作原理完全不同,有源电力滤波器具有能够实现动态连续实时补偿,不受电网元件影响等特点,在抑制谐波,提高电能质量方面显示了强大的生命力,其性能的好坏与它所采用的谐波电流检测方法有很大的关系。因此,如何检测非线性负载电流中的谐波及无功电流是有源电力滤波器的关键技术。

对于三相电路,基于瞬时无功功率理论的谐波电流检测方法^[1]是一种公认的较为成熟的方法。而对于单相电路,至今还没有一种公认的成熟的方法。现在,有源电力滤波器单相电路谐波电流检测方法的研究已经成为众多学者关注的一个焦点。他们一般认为谐波及无功电流的检测属于非线性问题,是比较复杂的。因此,他们纷纷将针对非线性系统的现代控制的最新理论如人工神经网络,自适应控制等用于单相电路谐波电流检测,为此提出了许多新方法,如基于神经元的自适应法^[2-4],基于补偿电流最小原理的检测方法^[5,6],基于电路模型和神经网络的检测方法^[7]等。尽管这些方法各有特点,但都存在各自的不足。本文以“当负载电流为周期电流时,负载电流与负载基波有功电流的差的绝对值在一个周期内的积分值最小”为检测原理,提出了一种能够快速跟踪负载基波有功电流幅值的有源

电力滤波器单相电路谐波电流检测方法。

1 检测原理

设单相电路中电源电压为:

$$u_s(t) = U_m \sin \omega t \quad (1)$$

非线性负载电流为:

$$i_L(t) = i_1(t) + i_h(t) = i_{1p}(t) + i_{1q}(t) + i_h(t) = i_{1p}(t) + i_c(t) \quad (2)$$

式中: $i_1(t)$ 为 $i_L(t)$ 中的基波电流, $i_h(t)$ 为谐波电流, $i_{1p}(t)$ 、 $i_{1q}(t)$ 分别为基波电流的有功分量和无功分量, $i_c(t)$ 为需要补偿的谐波及无功电流之和,称为畸变电流。

为了使电网电源仅向负载提供基波有功电流 $i_{1p}(t)$,有源电力滤波器应提供的补偿电流的期望值为

$$i_a^* = i_L(t) - i_{1p}(t) = i_c(t) \quad (3)$$

设基波有功电流幅值为 A^* ,则 $i_{1p}(t)$ 可表示为

$$i_{1p}(t) = A^* \sin \omega t \quad (4)$$

为了确定 A^* ,先假设补偿电流

$$i_a(t) = i_L(t) - A \sin \omega t = i_c(t) + i_{1p}(t) - A \sin \omega t \quad (5)$$

式中: A 为可调待定参数。

当 $i_{1p}(t) - A \sin \omega t \neq 0$ 时,补偿电流不仅包含全部畸变电流,而且包含部分基波有功电流。若能通过调节 A 值,使得 $i_{1p}(t) - A \sin \omega t = 0$,则补偿电流仅提供全部畸变电流,此时 $A = A^*$, $i_{1p}(t) = A^* \sin \omega t$,从而达到分离畸变电流的目的。

由于 $i_{1p}(t)$ 和 $i_c(t)$ 为待测量,因此无法由式(5)判断 A 应取何值,方可使

$$i_{1p}(t) - A \sin \omega t = 0 \quad (6)$$

基金项目:江苏省高新技术项目(GB2004024);江苏大学高级人才专项基金资助项目(1283000064)

故先考虑补偿电流的绝对值积分

$$\int_{t_1-T}^{t_1} |i_a(t)| dt = \int_{t_1-T}^{t_1} |i_c(t) + i_{1p}(t) - A \sin \omega t| dt \quad (7)$$

因为 $i_{1p}(t)$ 与 $A \sin \omega t$ 为同频同相正弦波,若调节上式中的 A 值,使补偿电流的绝对值的积分值最小,此时有

$$\begin{aligned} \min \left[\int_{t_1-T}^{t_1} |i_a(t)| dt \right] &= \int_{t_1-T}^{t_1} |i_c(t) + i_{1p}(t) - A^* \sin \omega t| dt \\ &= \int_{t_1-T}^{t_1} |i_c(t)| dt \\ i_{1p}(t_1) - A^* \sin \omega t_1 &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

得到 t_1 时刻的基波有功电流 $i_{1p}(t_1) = A^* \cdot \sin \omega t_1$,从而可以求出 t_1 时刻补偿电流的瞬时值为 $i_a(t_1) = i_c(t_1) = i_L(t_1) - i_{1p}(t_1) = i_L(t_1) - A^* \sin \omega t_1$ (9)

这样就完成了补偿电流的实时检测。其理论基础为:当负载电流为周期电流时,负载电流与负载基波有功电流差的绝对值在一个周期内的积分值最小。

2 基于迭代算法的谐波电流检测方法

根据检测原理,本文提出了一种基于迭代算法的有源电力滤波器单相电路谐波电流检测方法。

设负载电流 $i_L(t)$ 在一个周期 T 中的 N 个采样(周期采样,采样周期为 $\frac{T}{N}$) 值为 $i_L[1], i_L[2], \dots,$

$i_L[N]$ ($i_L[N]$ 对应 t_1 时刻的采样值);对应的与电源电压 $u_s(t)$ 同相的 N 个幅值为 1 的正弦值为 $\sin \omega t[1], \sin \omega t[2], \dots, \sin \omega t[N]$ 。

设 $A^{(n)}$ 为在 t_1 时刻将要迭代计算出的负载基波有功电流幅值, $A^{(n-1)}$ 为在 t_1 时刻前一个采样周期中迭代计算出的负载基波有功电流幅值。 $A^{(n)}$ 将在 $A^{(n-1)}$ 的基础上跟踪负载基波有功电流的真实幅值 A^* 的变化。由于无法确定 $A^{(n-1)}$ 是大于 A^* 还是小于 A^* ,因此,根据检测原理,应采用试探比较法确定迭代计算的方向。

设迭代步长为 h ,则:

$$P_0 = \{i_L[1] - A^{(n-1)} \sin \omega t[1]\}^2 + \{i_L[2] - A^{(n-1)} \sin \omega t[2]\}^2 + \dots + \{i_L[N] - A^{(n-1)} \sin \omega t[N]\}^2 \quad (10)$$

$$P_1 = \{i_L[1] - (A^{(n-1)} + h) \sin \omega t[1]\}^2 + \{i_L[2] - (A^{(n-1)} + h) \sin \omega t[2]\}^2 + \dots + \{i_L[N] - (A^{(n-1)} + h) \sin \omega t[N]\}^2 \quad (11)$$

$$P_2 = \{i_L[1] - (A^{(n-1)} - h) \sin \omega t[1]\}^2 + \{i_L[2] - (A^{(n-1)} - h) \sin \omega t[2]\}^2 + \dots + \{i_L[N] - (A^{(n-1)} - h) \sin \omega t[N]\}^2 \quad (12)$$

则可计算:

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (13)$$

$$\Delta P_1 = P_1 - P_0 \quad (14)$$

$$\Delta P_2 = P_2 - P_0 \quad (15)$$

根据 $\Delta P, \Delta P_1, \Delta P_2$ 的符号,可以确定 P_0, P_1 和 P_2 三者中的最小值,这样可以确定迭代计算的方向。迭代量取迭代步长乘以在离散采样时补偿电流在一个周期内的平方和的差值的绝对值即 $|\Delta P_1|$ 或者 $|\Delta P_2|$,差值越大,则迭代量越大,这样当负载电流处于稳定状态时, $A^{(n)}$ 将在 $A^{(n-1)}$ 的基础上快速逼近负载基波有功电流的真实幅值 A^* 。当负载电流处于变化状态时, $A^{(n)}$ 将在 $A^{(n-1)}$ 的基础上快速跟踪负载基波有功电流的真实幅值 A^* 的变化。

根据检测原理,迭代算法为:

首先计算出 ΔP 的值。

如果 $\Delta P > 0$,则计算 ΔP_2 的值,如果 $\Delta P_2 \geq 0$,则 $A^{(n)} = A^{(n-1)}$;如果 $\Delta P_2 < 0$,则 $A^{(n)} = A^{(n-1)} - h|\Delta P_2|$ 。

如果 $\Delta P < 0$,则计算 ΔP_1 的值,如果 $\Delta P_1 \geq 0$,则 $A^{(n)} = A^{(n-1)}$;如果 $\Delta P_1 < 0$,则 $A^{(n)} = A^{(n-1)} + h|\Delta P_1|$ 。

由迭代算法计算出 t_1 时刻的基波有功电流幅值 $A^{(n)}$,使用式(9)可计算出 t_1 时刻实际要补偿的谐波及无功电流的值。

3 仿真研究

在以上分析的基础上,对此方法进行了仿真研究。仿真时,使用 Turbo C 2.0 编程,程序运行生成的数据存入数据文件中,再使用 Matlab 7.0 经过简单的编程将仿真波形显示出来;电源电压为参考电压,取其幅值为 1,即 $u_s(t) = \sin \omega t$,迭代步长 h 取 0.05,负载电流 i_L 在一个周期内的采样个数 N 取 500。图 1 为负载电流幅值突然从 10 A 上升到 20 A 时的基波有功电流真实幅值 A^* ,基波有功电流幅值 A ,基波有功电流 i_{1p} 和补偿电流 i_a 的仿真曲线;图 2 为负载电流幅值突然从 20 A 下降到 10 A 时的基波有功电流真实幅值 A^* ,基波有功电流幅值 A ,基波有功电流 i_{1p} 和补偿电流 i_a 的仿真曲线;图 3 为负载电流幅值突然从 10 A 下降到 0 A 时的基波有功电流真实幅值 A^* ,基波有功电流幅值 A ,基波有功电流 i_{1p} 和补偿电流 i_a 的仿真曲线;图 4 为负载电流幅值从 10 A 在一个周期内线性增加到 20 A 时的基波

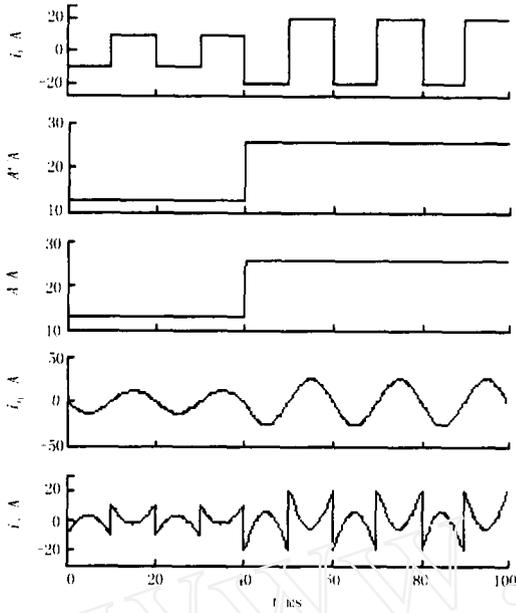


图1 负载电流突然增大时的仿真曲线
Fig.1 Simulation waveforms with load current abrupt increase

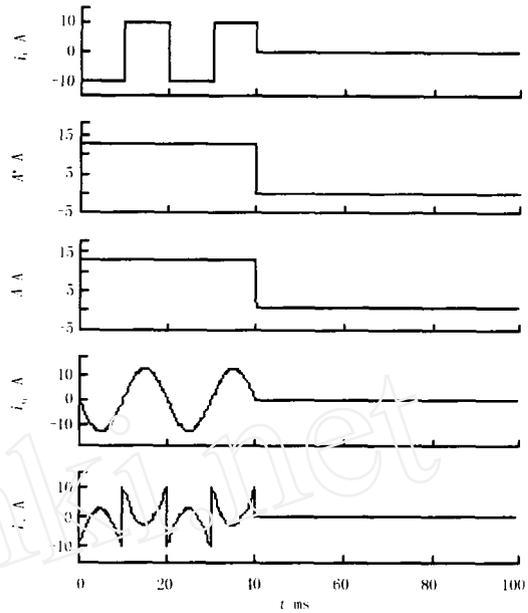


图3 负载电流突变为零时的仿真曲线
Fig.3 Simulation waveforms with load current collapse

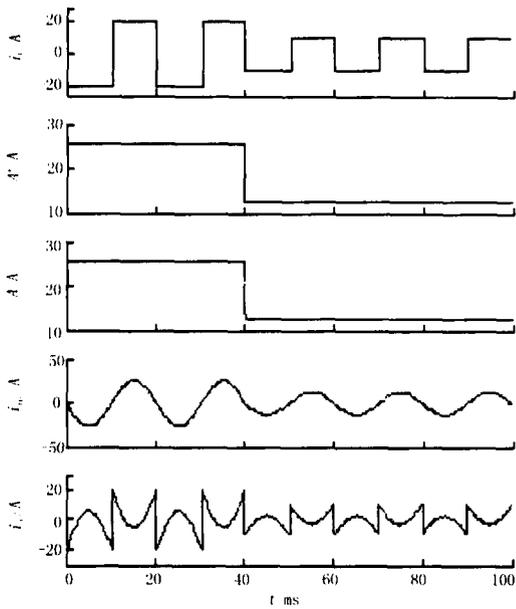


图2 负载电流突然减小时的仿真曲线
Fig.2 Simulation waveforms with load current abrupt decrease

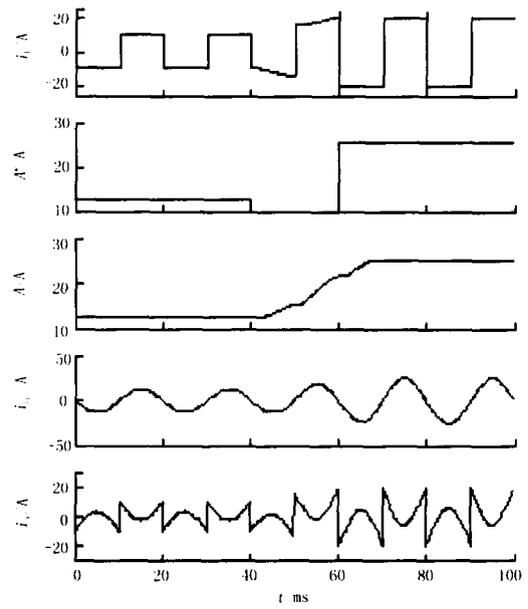


图4 负载电流线性增加时的仿真曲线
Fig.4 Simulation waveforms with load current linear increase

有功电流真实幅值 A^* (其中,变化段为 40 ms 到 60 ms, A^* 处于变化中,曲线上此段以 0 A 表示),基波有功电流幅值 A ,基波有功电流 i_{1p} 和补偿电流 i_s 的仿真曲线;图 5 为负载电流幅值从 10 A 在一个周期内按指数规律减小到零时的基波有功电流真实幅值 A^* (其中,变化段为 40 ms 到 60 ms, A^* 处于变化中,曲线上此段以 0 A 表示),基波有功电流幅值 A ,基

波有功电流 i_{1p} 和补偿电流 i_s 的仿真曲线。仿真研究表明:当负载电流 i_l 发生突然变化时, A 曲线“几乎立刻”跟踪上 A^* ,如图 1~3 所示;当负载电流缓慢变化时, A 曲线能够比较平滑地快速跟踪 A^* 的变化,负载电流从缓慢变化到稳定后在小于半个周期时间内 A 曲线就可逼近 A^* ,如图 4~5 所示。仿真研究证实了该方法的正确性。

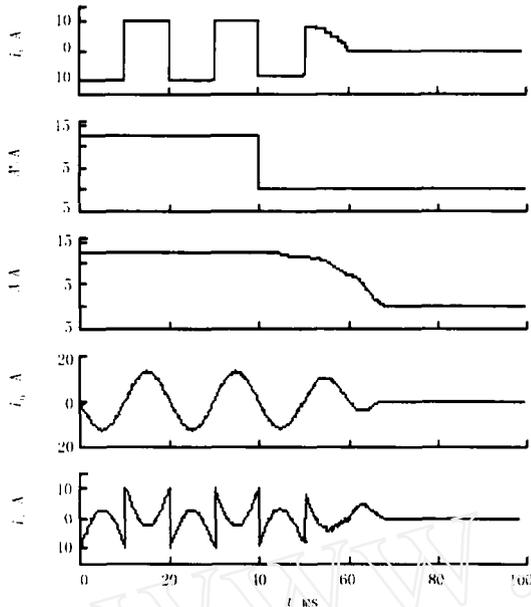


图5 负载电流按指数规律减小为零时的仿真曲线
Fig. 5 Simulation waveforms with load current exponential decrease to zero

4 结论

1) 根据检测原理,提出了一种基于迭代算法的有源电力滤波器单相电路谐波电流实时检测方法,该方法能够快速跟踪负载基波有功电流幅值,特别是当负载电流发生突然变化时,能够特别快速地跟踪负载基波有功电流幅值。

2) 迭代步长的设定比较困难,但是该方法可以方便地进行计算机仿真,因此可以根据实际需要,通过计算机仿真确定出最佳迭代步长。

3) 此方法不仅适用于单相电路,而且适用于三相电路,它具有普遍的适用性。

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 on Industry Application, 1984, 20(3):625-630.
- [2] WANG Qun, WU Ning, WANG Zhao-an. A Neuron Adaptive Detecting Approach of Harmonic Current for APF and Its Realization of Analog Circuit[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2001, 50(1):77-84.
- [3] 王群,周维维,吴宁.一种基于神经网络的自适应谐

波电流检测法[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1997, 20(5):6-11.

WANG Qun, ZHOU Luo-wei, WU Ning. An Adaptive Detecting Approach of Harmonic Currents Based on ANN [J]. Journal of Chongqing University, Natural Science Edition, 1997, 20(5):6-11.

- [4] 王群,吴宁,苏向丰.有源电力滤波器谐波电流检测的一种新方法[J]. 电工技术学报, 1997, 12(1):1-5.

WANG Qun, WU Ning, SU Xiang-feng. A New Detecting Approach of Harmonic Currents for the Active Power Filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1997, 12(1):1-5.

- [5] 周维维,江泽佳,吴宁.基于补偿电流最小原理的谐波与无功电流检测方法[J]. 电工技术学报, 1998, 13(3):33-36.

ZHOU Luo-wei, JIANG Ze-jia, WU Ning. A Detecting Approach of Harmonic and Reactive Current Based on the Minimum Compensated Currents [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1998, 13(3):33-36.

- [6] 周维维,李自成,吴宁.有源电力滤波器谐波及无功电流的一种检测方法[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2000, 23(1):53-55.

ZHOU Luo-wei, LI Zi-cheng, WU Ning. A Detecting Method for Harmonics and Reactive Currents in Active Power Filter[J]. Journal of Chongqing University, Natural Science Edition, 2000, 23(1):53-55.

- [7] 于志豪,刘志珍,徐文尚.基于电路模型和神经网络的谐波电流检测方法[J]. 电工技术学报, 2004, 19(9):86-89.

YU Zhi-hao, LIU Zhi-zhen, XU Wen-shang. A Detecting Approach of Harmonic Current Based on the Circuit Model and Artificial Neural Networks [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(9):86-89.

- [8] ZHOU Luo-wei, LI Zi-cheng. A Novel Active Power Filter Based on the Least Compensation Current Control Method[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2000, 15(4):655-659.

收稿日期: 2004-11-26; 修回日期: 2005-03-29

作者简介:

李自成(1967-),男,博士研究生,讲师,研究方向为电力电子技术及其应用;E-mail:lifengli9222@ujs.edu.cn

孙玉坤(1958-),男,教授,博士生导师,研究方向为电机智能控制。

Harmonic current detecting based on iterative algorithm

LI Zi-cheng, SUN Yu-kun

(下转第 45 页 continued on page 45)

合的 Fuzzy - PI 调节器,利用这种调节器对有源滤波器直流电压进行控制,能够克服非线性因素的影响,具有很强的鲁棒性。实验结果证明该方法比传统的比例积分控制有更好的控制效果。同时在此基础上利用 Fuzzy - PI 调节器补偿谐波电流也能取得良好的效果,实验表明补偿后的系统电流基本上消除了稳态误差。理论分析和实验结果证明该控制方法具有一系列传统控制无法与之比拟的优点,具有一定的实际应用推广价值。

参考文献:

- [1] 孙庚山,兰西柱. 工程模糊控制[M]. 北京:机械工业出版社,1995.
SUN Geng-shan, LAN Xi-zhu. Engineering Fuzzy Control [M]. Beijing: China Machine Press, 1995.
- [2] 章正斌,吴汝善,于健. 模糊控制工程[M]. 重庆:重庆大学出版社,1995.
ZHANG Zheng-bin, WU Ru-shan, YU Jian. Fuzzy Control Engineering[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1995.
- [3] 查晓明,等. 三相交流系统综合补偿的补偿分量检测研究[J]. 电网技术,1999,23(7):23-25.
- ZHA Xiao-ming, et al. Study on Measurement of Compensatory Component for Three Phase AC System Integrative Compensation[J]. Power System Technology, 1999, 23(7):23-25.
- [4] Singh B, Al-Haddad K, Chandra A. A New Control Approach to Three-phase Active Filter for Harmonics and Reactive Power Compensation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13 (1).
- [5] Nastran J, Cajhen R, Seliger M, et al. Active Power Filter for Non-linear AC Loads[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1994, 9(1).

收稿日期: 2004-12-06; 修回日期: 2005-06-24

作者简介:

- 陈宇(1981-),女,硕士研究生,研究方向为电能质量分析与控制;E-mail:chenyu030416@hotmail.com
- 王碧芳(1979-),女,在职硕士研究生,研究方向为电力电子;
- 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。

Fuzzy control applied to the active power filter

CHEN Yu¹, WANG Bi-fang^{1,2}, LIU Hui-jin¹

(1. Wuhan University, Wuhan 410072, China; 2. Wuhan Vocational Technical College, Wuhan 430074, China)

Abstract: It is difficult to calculate the differentiation constant in the classical PI control method. The variation of the constant is combined with characteristics of the controlled element. However, the Fuzzy controller with good dynamic response characteristics is not sensitive to the procedural parameters. The Fuzzy-controller have the advantages of good robust and minimum nonlinear effect. In this paper, the Fuzzy - PI controller worked on the DC voltage source of APF directly. The combined Fuzzy control and PI adapter controlled the parameters of PI controller by using the Fuzzy control method. The experiment showed the control performance is much more reasonable than that of the classical PI control. It confirms the accuracy of the theory. The Fuzzy control on the compensation current was proposed based on the result.

Key words: APF; Fuzzy control; membership grade; control law

(上接第 39 页 continued from page 39)

(College of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Using "when load current is periodic function, the integral value in a period for absolute value of load current subtracting fundamental active current is the least" as detecting principle, a detecting approach of harmonic current in single-phase circuit based on fast iterative algorithm in active power filter was proposed. It is capable of fast tracking load fundamental active current maximum value and especially the maximum value when load current takes a abrupt change. The correctness of the method was verified by theoretical analysis and simulation research.

This project is supported by High-tech Item of Jiangsu Province(No. GB2004024) and Dedicated fund for Higher Intellectuals of Jiangsu University(No. 1283000064).

Key words: active power filter; active current; reactive current; harmonic current