基于改进FBD法的谐波电流检测研究

司为国[1]，丁祖军[2]，李 明[2]

（1.江苏省电力公司，江苏 南京 210024；2.东南大学电气工程学院，江苏 南京 210096）

摘要：对谐波电流快速检测和跟踪的能力是有源电力滤波器补偿性能好坏的关键，为了能快速有效的检测出三相四线制系统中的谐波电流，本文在介绍传统FBD法的理论原理的基础上提出了一种改进的FBD法。它是将传统的FBD法经过一次线性变换，减少了其间的矩阵运算。该方法不受系统电压畸变的影响，可以明显减少原方法的计算量。理论分析和仿真以及实验结果证实了该方法的正确性和优越性。

关键词：有源电力滤波器； 谐波电流； 检测； FBD法； 三相四线制

The improved FBD method in harmonic current detection

SI Wei-guo[1], DING Zu-jun[2], LI Ming[2]

(1.Jiangsu Electrical Power Company,Nanjing 210024,China;
2.Department of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096,China)

Abstract: This paper issues a kind of improved FBD method based on traditional FBD method in order to detect harmonic current rapidly and efficiently in three phases four wires system because the ability of harmonic current detection and compensation is the key parameter of the Active Power Filter(APF). The method is improved by a linear transformation so that matrix operation is reduced. The new method is influenced little by voltage distortion. The analysis, simulation and experiment have proved the correctness and its priority.

Key words: active power filter; harmonic current; detection; FBD method; three phases four wires

中图分类号： TM71 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2009)15-0083-04

0 引言

近年来，随着电力电子器件的广泛应用，公用电网中的谐波污染日益严重，影响了供电质量并且造成了电能的浪费，所以电网中的谐波问题的解决备受关注。有源电力滤波器（APF）[1]是一种动态抑制谐波和补偿无功的新型电力电子设备，具有高度可控性和快速响应性。而对电网中谐波电流的快速准确检测是APF能快速跟踪补偿的前提条件。目前常用的谐波检测法有基于无功功率理论的p-q-r法[2]和i_p-i_q法[3]，FBD法[4]，离散傅立叶变换法[5]，自适应谐波检测法[6]等。

FBD法是近些年国外学者新提出的一种时域检测方法。其物理意义明确、实时性好、适用于单相或者多相系统。本文在阐述FBD法基本原理的基础上，提出通过线性变换直接得到谐波参考指令电流分量，从而减少了空间投影变换带来的计算量和软件开销。通过软件仿真验证了该新方法的正确性和有效性。

1 FBD电流检测法

FBD法是将实际电路中每相负载等效为串联在各相的理想等值电导元件，电路中的功率全部消耗在这个等效电导上。设系统电压参考矢量为$u=(u_1,u_2,\cdots,u_m)$，电流矢量$i=(i_1,i_2,\cdots,i_m)$，其元素分别为电压电流瞬时值，则得：

瞬时功率：

$$p_\Sigma(t)=<i,u>=\sum_{n=1}^{m}u_n i_n=\sum_{n=1}^{m}p_n(t) \tag{1}$$

瞬时总电压：

$$\|u\|=\sqrt{<u,u>}=\sqrt{\sum_{n=1}^{m}u_n^2} \tag{2}$$

等效电导：

$$G_p(t)=\frac{p_\Sigma(t)}{\|u\|^2}=\frac{<i,u>}{<u,u>} \tag{3}$$

功率电流：

$$i_p = G_P(t)u \tag{4}$$

FBD 法在电流检测过程中通过锁相环（PLL）[7]生成与 a 相电压同相位的参考电压矢量替代实际的电压。由于锁相环可能会失锁而造成相位差，所以用过零检测电路[8]替代锁相环电路实现对 a 相电压过零点相位的检测。等效电导将系统电流分解成有功和无功两部分。经过低通滤波器后分别得到两者的直流电导分量 $\overline{G_p}$、$\overline{G_q}$，从而进一步可得到基波正序有功电流和无功电流，两者相加既得负载基波正序电流分量。用三相负载电流减去基波正序电流分量既为包含谐波电流、基波负序、零序分量的补偿分量。FBD 检测法原理如图 1 所示。

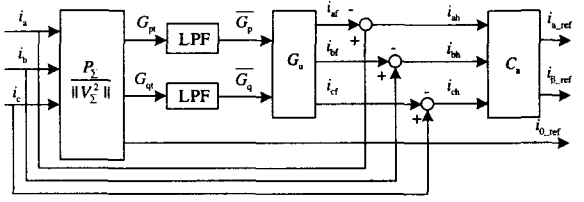

图 1　FBD 检测法

Fig.1 Sketch of FBD method

设三相参考电压为

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \omega t \\ \sin(\omega t - 120^0) \\ \sin(\omega t + 120^0) \end{bmatrix} \tag{5}$$

用下标 1、2、0 分别表示三相四线制不对称系统中正序、负序、零序电流，则三相电流可如下公式表示为正序电流、负序电流以及零序电流之和。

$$\begin{cases} i_a = \sum_{n=1}^{\infty}[I_{1n}\sin(n\omega t + \phi_{1n}) + I_{2n}\sin(n\omega t + \phi_{2n}) + \\ \quad I_{0n}\sin(n\omega t + \phi_{0n})\ ] \\ i_b = \sum_{n=1}^{\infty}[I_{1n}\sin(n\omega t + \phi_{1n} - 120^0) + \\ \quad I_{2n}\sin(n\omega t + \phi_{2n} + 120^0) + I_{0n}\sin(n\omega t + \phi_{0n})\ ] \\ i_c = \sum_{n=1}^{\infty}[I_{1n}\sin(n\omega t + \phi_{1n} + 120^0) + \\ \quad I_{2n}\sin(n\omega t + \phi_{2n} - 120^0) + I_{0n}\sin(n\omega t + \phi_{0n})\ ] \end{cases} \tag{6}$$

因此有三相瞬时有功电导 G_P，无功电导 G_q 为：

$$G_P = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{e_{a_+}^2 + e_b^2 + e_c^2} = \tag{7}$$

$$\sum_{n=1}^{\infty}[I_{1n}\cos((n-1)\omega t + \phi_{1n}) - I_{2n}\cos((n+1)\omega t + \phi_{2n})]$$

$$G_q = \sum_{n=1}^{\infty}[I_{1n}\sin((n-1)\omega t + \phi_{1n}) + I_{2n}\sin((n+1)\omega t + \phi_{2n})] \tag{8}$$

其经过低通滤波器后得到直流电导量

$$\begin{cases} \overline{G_p} = I_{11}\cos\phi_{11} \\ \overline{G_q} = I_{11}\sin\phi_{11} \end{cases} \tag{10}$$

Φ_{11} 为 a 相电压与基波正序的夹角。三相基波正序有功电流为

$$\begin{bmatrix} i_{af} \\ i_{bf} \\ i_{cf} \end{bmatrix} = \overline{G_p}\begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 120^0) \\ \sin(\omega t + 120^0) \end{bmatrix} + \overline{G_q}\begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t - 120^0) \\ \cos(\omega t + 120^0) \end{bmatrix} \tag{11}$$

此时再用三相负载电流 i_a、i_b、i_c 减去基波正序有功电流即得到三相参考指令电流 i_{ah}、i_{bh}、i_{ch}。利用 3-2 变换矩阵变换为 αβ 坐标下的 i_{α_ref} 和 i_{β_ref}。即：

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha\_ref} \\ i_{\beta\_ref} \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta} \bullet \begin{bmatrix} i_{ah} \\ i_{bh} \\ i_{ch} \end{bmatrix} \tag{12}$$

FBD法能准确的检测出电网的谐波电流，因为其检测电流的最终结果中没有使用到电压的幅值，因此即使在电压产生畸变时检测结果也不受影响。

2　FBD 检测法的改进

由式(7)和式(8)可知，

$$G_P = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{e_{a_+}^2 + e_b^2 + e_c^2} =$$

$$\frac{2}{3}\begin{bmatrix} \sin \omega t & \sin(\omega t - 120^0) & \sin(\omega t + 120^0) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$G_q = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - 120^0) & \cos(\omega t + 120^0) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

由基于无功功率理论的 *ip*-*iq* 法可知：

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = C \bullet \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}}$$

$$\begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \sin(\omega t - 120^0) & \sin(\omega t + 120^0) \\ -\cos(\omega t) & -\cos(\omega t - 120^0) & -\cos(\omega t + 120^0) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{14}$$

对比式(13)和式(14)可以发现 G_p 是 i_p 的 $\sqrt{\frac{2}{3}}$ 倍，G_q 是 i_q 的 $-\sqrt{\frac{2}{3}}$ 倍。

由前述 G_p 与 i_p，G_q 与 i_q 线性比例关系可得：

$$G_p = \sqrt{\frac{2}{3}} \bullet i_p$$

$$G_q = -\sqrt{\frac{2}{3}} \bullet i_q \tag{15}$$

改进后的新的算法如图 2 所示。

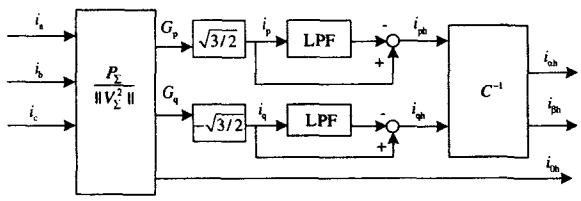

图 2 改进的 FBD 检测法

Fig.2　Sketch of improved FBD method

算法的前半部分采用 FBD 法，三相负载电流 i_a，i_b，i_c 与参考电压作用得到等效电导 G_p、G_q，经过线性变换转化为 i_p、i_q。通过低通滤波器得到直流分量后再用 i_p、i_q 减去直流分量得到交流分量 i_{ph}、i_{qh}，最后经过 pq 变换矩阵，坐标变换到 α、β、0 下，得到参考指令电流 $i_{\alpha h}$、$i_{\beta h}$、i_{oh}。相比较而言，采用改进型的 FBD 法减少了坐标变换引起矩阵运算，大大减少了计算量，降低了软件开销，并保证了较好的实时性。

3　仿真分析

采用电力系统仿真软件 PSCAD4.2 对三相四线制系统进行仿真，参数为：系统三相电压频率 50 Hz，电压有效值 50 V，负载是由二极管、100 Ω 电阻、0.004 H 电感和 1000 μF 构成的三相单相整流桥不对称负载，分别验证 FBD 法和改进后的 FBD 检测法。检测结果如图 3、图 4 所示。

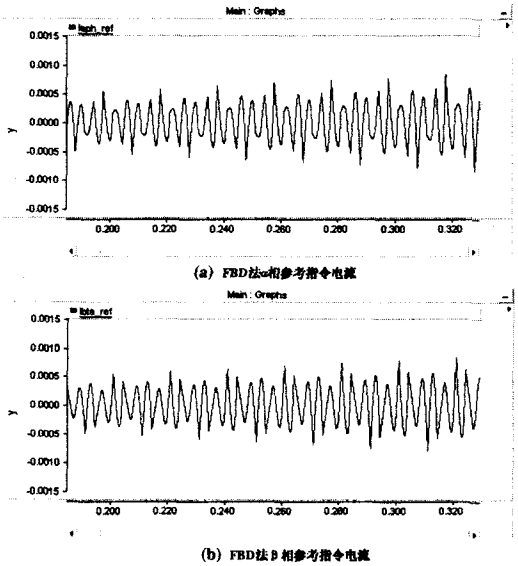

图 3　FBD 法得到的参考指令电流

Fig.3 Reference current by FBD method

如此时需要对无功电流进行补偿时，只要断开图 1 中无功电导 G_{qL} 的直流分量即可。

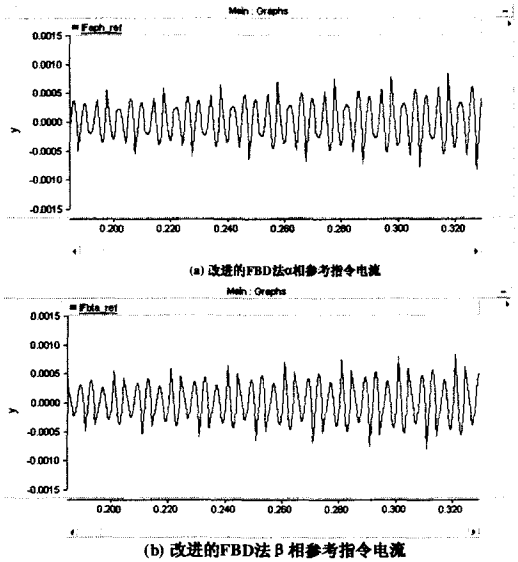

图 4　改进的 FBD 法得到的参考指令电流

Fig.4　Reference current by improved FBD method

补偿无功电流时只需要断开图 2 中 i_q 的直流分量即可。

4　实验结论

前述在仿真的基础上验证了改进的 FBD 法在理论上的可行性，能较好地实现谐波检测。现在实验平台上进行实验进一步验证该方法的正确性和相对于传统 FBD 法的优越性。APF 实验平台负载为带阻感负载的二极管三相桥整流电路，其中负载电阻为 2 Ω，电感为 15mH。采用数字式示波器和 Fluke 公司的电能质量分析仪记录实验波形。检测方法分别为改进的 FBD 法和传统 FBD 法进行对比分析，电流控制采用基于滞环比较的空间矢量策略[9]。

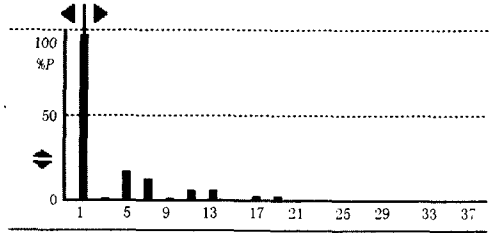

图 5 补偿前电流畸变率 23.7%

Fig.5 Current distortion before compensation

由图 5 可见，补偿前电流中含有大量 5 次、7 次、11 次等谐波，此时电流畸变率达到 23.7%。投入有源电力滤波器，实施补偿。

传统 FBD 法谐波电流检测计算量大，速度慢，

得到参考指令电流后输出的补偿电流往往会实际滞后于当时的补偿值，造成补偿跟踪较慢，补偿效果较差。改进的 FBD 法由于减少了计算量而使得电流谐波检测能更迅速地得到所需的参考指令电流，补偿跟踪速度也更快，补偿效果较传统方法有明显改进。图 6 为采用改进的 FBD 法，由图可见补偿后谐波被有效抑制，畸变率也由原来的 23.7%降为 5.7%，实验证明系统对谐波的抑制效果较好，具有良好的跟踪特性。图 7 为桥臂此时的补偿电流。图 8 为采用传统 FBD 法检测谐波电流进行运算补偿后的畸变率，可见补偿效果并不理想，畸变率为 10.6%仍然较大。对比图 6 和图 8 可以看出改进后的 FBD 法较传统 FBD 法有较明显的优越性。

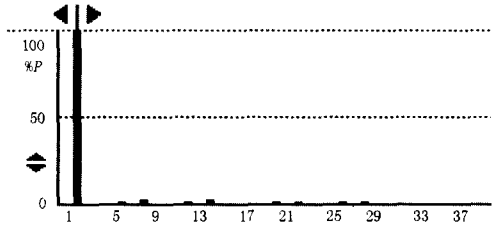

图 6 补偿后电流畸变率 5.7%

Fig.6 Current distortion after compensation

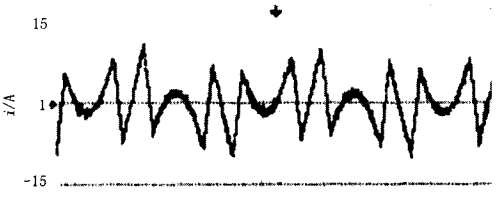

图 7 补偿时的桥臂电流

Fig.7 Bridge current of compensation

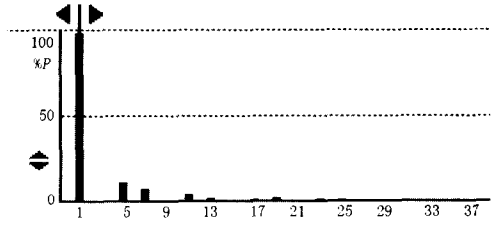

图 8 传统 FBD 法补偿后畸变率 10.6%

Fig.8 Current distortion after compensation by traditional FBD method

实验中的直流侧电压由三相整流桥输出恒定在 100 V，若在直流侧引入电压 PI 调节[10]，调节直流侧电压越高，则跟踪补偿越快，将会有更好的效果。

参考文献

[1] 穆永保，张建成.基于电流源控制策略的并联混合型有源滤波器的研究[J]. 华北电力大学学报，2005，32：4-7.
MU Yong-bao, ZHANG Jian-cheng. Research of Shunt Hybrid Active Power Filter based on Current Source Control Strategy[J]. Journal of North China Electric Power University, 2005，32：4-7.

[2] 陈艳慧，刘开培，郭书芳. 电力系统谐波检测的p-q-r法及其局限性[J]. 电网技术，2004，28 (13)：88-91.
CHEN Yan-hui, LIU Kai-pei, GUO Shu-fang. Power System Harmonic Detection by p-q-r Method and its Limitation[J]. Power System Technology,2004，28 (13)：88-91.

[3] 唐 蕾，陈维荣. 瞬时无功功率理论坐标变换的推导及谐波电流检测原理分析[M]. 电网技术，2008，32(5)：66-69.
TANG Lei, CHEN Wei-rong. Deduction of Coordinate Transform for Instantaneous Reactive Power Theory and Analysis on the Principle of Harmonic Current Detection Method[J]. Power System Technology,2008，32(5)：66-69.

[4] 陈峻岭，姜新建，孙卓,等. 基于 FBD 法的三相电力系统电流检测方法的应用[J]. 电力系统自动化，2004，28(24)：23-27.
CHEN Jun-ling,JIANG Xin-jian,SUN Zhuo,et al. Current Detections for Three-phase Power System based on FBD Method[J]. Automation of Electric Power Systems,2004，28(24)：23-27.

[5] 雷万军，李红雨，卓放，等.基于 DFT 谐波检测方法的大容量并联型有源电力滤波器的研制[J].电工电能新技术，2004，23（2）：69-72.
LEI Wan-jun, LI Hong-yu, ZHUO Fang, et al. Development of Large Capacity Active Power Filter based on DFT Fetection Method[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2004，23（2）：69-72.

[6] 何英杰,等.一种改进自适应谐波检测算法研究[J].电力自动化设备，2006，26(9)：23-26.
HE Ying-jie,et al. Improved Adaptive Algorithm of Harmonic Current Detection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006，26(9)：23-26.

[7] 李根，庞浩，徐健飞，等.一种基于改进锁相环的谐波分析逻辑电路[J].电力系统自动化，2007，31(21)：82-85.
LI Gen, PANG Hao, XU Jian-fei, et al. Logic Circuit for Harmonic Analysis Based on Enhanced PLL[J]. Automation of Electric Power Systems,2007，31(21)：82-85.

（下转第 90 页　continued on page 90）

测 2006 年 7 月 31 日的负荷。表 2 是本文方法与直接用 BP 法对一天 24 点的预报结果的比较结果。表 3 是将上述方法同样应用到吉林地区负荷预测的结果。可以看出，该方法对吉林地区的负荷预测的精度更准确。

表 3　吉林地区用 ANN 方法和本文方法进行 24 小时负荷预报的结果

Tab.3 Load forecasting results during 24 hours in Jilin district by ANN and the presented method respectively

预报时刻	实际值	ANN 方法		本文方法	
		预报值	相对误差	预报值	相对误差
	/MW	/MW	/(%)	/MW	/（%）
0：00	257.69	260.92	1.25	263.1	2.09
1：00	265.46	250.65	-5.58	266.3	0.32
2：00	261.00	270.71	3.72	263.8	1.07
3：00	261.57	256.55	-1.92	263.34	0.67
4：00	261.17	251.75	-3.61	260.9	-0.10
5：00	274.15	265.08	-3.31	280.7	2.39
6：00	288.74	298.66	3.44	290.1	0.47
7：00	298.23	302.67	1.49	302.1	1.30
8：00	293.53	303.1	3.26	295.83	0.08
9：00	307.15	391.41	4.00	303.4	-1.22
10：00	305.44	294.69	-3.52	305.73	0.09
11：00	314.49	295.03	-6.19	311.99	-0.80
12：00	306.25	306.86	0.20	295.64	-3.4
13：00	309.92	297.32	-4.07	308.83	-0.35
14：00	310.74	290.04	-6.66	306.7	-1.3
15：00	312.35	297.3	-4.82	305.31	-2.25
16：00	321.12	309.50	-3.62	319.86	-0.39
17：00	341.88	348.75	2.01	340.8	-0.32
18：00	335.47	343.06	2.26	336.35	-0.026
19：00	328.32	316.49	-3.60	328.13	0.058
20：00	317.29	305.71	-3.65	319.06	0.55
21：00	296.03	274.2	-7.37	302.67	2.24
22：00	286.35	270.39	-5.57	289.12	0.96
23：00	277.53	253.73	-8.58	277.88	0.13
平均误差			2.10		0.12

3　结论

本文利用了小波变换和 BP 神经网络相结合的方法进行电力系统短期负荷预测。把过去直接对负荷序列的预测替代为对小波系数的预测，并对小波系数作阈值处理，然后对不同尺度域的小波系数采用神经网络进行预测，最后通过小波逆变换，得到预测日的负荷序列。通过盘锦地区与吉林地区的实际预测结果与传统的 ANN 方法对比表明，本文提出的方法具有很好的预测精度，可以满足实际运行需要。

参考文献

[1] 郜能灵,侯志俭. 小波模糊神经网络在电力系统短期负荷预测中的应用[M]. 中国电机工程学报, 2004,24(1): 24-29.
TAI Neng-ling, HOU Zhi-jian. New Short Term-load Forecasting Principle with the Wavelet Transform Fuzzy Neural Network for the Power System[J].Proceedings of the CSEE, 2004,24(1):24-29.

[2] 徐军华,刘天琪. 基于小波分解和人工神经网络的短期负荷预测[J].电网技术,2003,34(7):35-38.
XU Jun-hua, LIU Tian-qi. An Approach to short-term Load Forecasting Based on Wavelet Transform and Artifical Neural Network[J].Power System Technology, 2003,34(7):35-38.

[3] 杨建国. 小波分析及其工程应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.

[4] 飞思科技产品研发中心.神经网络理论与MATLAB7实现[M].北京:电子工业出版社，2005.

收稿日期：2008-09-11；　　修回日期：2008-09-28

作者简介：

宋人杰（1963-），女，教授，研究方向为计算机在电力系统中的应用；E-mail:srj1963331@sina.com

边奕心（1979-），女，硕士研究生，研究方向为计算机在电力系统中的应用。

（上接第 86 页　continued from page 86）

[8] 朱连成,王仲初.无锁相环电压全周期过零检测电路的仿真与设计[J].现代电子技术，2007，9：87-89.
ZHU Lian-cheng, WANG Zhong-chu. Simulation and Design about Detector Circuit of Voltage Cross Zero in Complete Period without Phase Lock Loop[J]. Modern Electronics Technique, 2007，9：87-89.

[9] 田大强，蒋平，唐国庆.空间矢量控制在有源滤波器中的应用研究[J].电力电子技术，2003，37（4）：1-3.
TIAN Da-qiang, JIANG Ping, TANG Guo-qing. Adaptive SVPWM Control Strategy in Active Filter[J]. Power Electronics, 2003，37（4）：1-3.

[10] 纪飞峰,等.基于直流侧电压周期离散控制的单相并联有源滤波器[J].中国电机工程学报，2005,25(20):37-43.
JI Fei-feng, et al. A Single-Phase Shunt Active Filter based on Cycle Discrete Control for DC-SIDE Voltage[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(20): 37-43.

收稿日期：2008-09-16；　　修回日期：2008-11-27

作者简介：

司为国（1970-），男，博士研究生，研究方向电力电子在电力系统中应用、电网技术管理；

丁祖军（1978-），男，博士研究生，研究方向电力电子；

李　明（1981-），男，硕士研究生，研究方向电力电子。E-mail: lm_1230@163.com