

一种基于最速下降算法的基波提取自适应滤波器

饶莹¹, 郑建勇²

(1. 南京供电公司, 江苏 南京 210008;

2. 东南大学 电气工程系, 江苏 南京 210096)

摘要: 提出了一种基于最速下降算法的单相基波提取自适应滤波方法。对该自适应滤波器原理及设计方法进行了说明, 给出基波信号各参数表达式, 通过大量的 Matlab 仿真, 着重对该系统在电压畸变情况下的基波撮取性能进行考查, 同时分析了其检测精度与动态响应的关系、初始值的设置对检测效果的影响, 结果表明, 该自适应滤波器构成一个稳定的多参数(幅值、频率、相位)反馈控制回路, 可较准确地提取单相信号的基波分量, 实时性好, 且具有良好的鲁棒性和抗干扰能力。

关键词: 最速下降算法; 自适应滤波; 基波; 仿真

中图分类号: TM 744

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)08-0019-04

近年来, 供电质量污染日益严重, 电能质量问题已成为现代电力供应最主要的问题之一, 目前, 已有多种形式的采用电力电子技术的电能质量调节装置, 如动态电压恢复器(DVR)、综合电能质量控制器(UPQC)、固态电子转换开关(SSTS)等。这些装置各有特点, 适用于不同场合, 但就其检测策略而言, 均需要快速准确地提取基波有关信号, 在电压或电流畸变甚至频率或相位波动的情况下, 基波提取的精度和速度对电能质量调节装置的性能有很大影响^[1]。

针对基波分量的提取, 目前有基于模拟滤波器、经典信号分析的各种傅里叶变换、三相电路瞬时无功功率理论、小波变换等多种检测方法^[2-6]。

本文通过最速下降优化技术, 推导出一种自适应滤波的单相基波分量参数提取数字表达式。该方法构成一稳定的幅值、频率、相位跟踪反馈控制回路, 可较准确地提取单相信号的基波分量, 实时性较好, 且具有抗干扰及鲁棒性强等优点。本文通过理论和仿真试验, 对此检测方法的综合性能作了全面深入细致的分析。研究结果表明: 该自适应滤波器能抵抗内外部参数干扰, 具有较好的检测精度和动态响应。

1 自适应滤波器原理及设计方法

设单相电压为包含基波分量、各次谐波分量和噪声污染的畸变信号, 其表达式为

$$x(t) = \sum_{i=0}^{\infty} A_i \sin(\omega_i t + \delta_i) + n(t) \quad (1)$$

式中 基波分量为 $x_1(t) = A_1 \sin(\omega_1 t + \delta_1) = A_1 \sin \phi_1(t)$; A_1 为基波幅值, ω_1 为基波角频率, δ_1 为初始相位, $\phi_1(t)$ 为基波当前相位。

提取基波信号, 即获得与 $x_1(t)$ 最为接近的函数 $y(t) = A(t) \sin(\omega(t)t + \delta(t))$, 使得 $y(t)$ 与 $x_1(t)$ 的距离函数 d 取最小值^[7]。这里定义代价函数 $J(\theta(t), t)$ 为

$$J(\theta(t), t) = d^2(t, \theta(t)) = [x(t) - y(t, \theta(t))]^2 = e(t)^2 \quad (2)$$

其中, $\theta(t) = [A(t), \omega(t), \delta(t)]^T$, 表示 $\theta(t)$ 包含幅值、角频率和初相角 3 个未知变量。参数矢量 $\theta(t)$ 采用最速下降法式(3)^[8]进行估计:

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = -\mu \frac{\partial [J(t, \theta(t))]}{\partial \theta(t)} \quad (3)$$

其中正常数 μ 为步长参数, 参数估计表达式为

$$\begin{aligned} \frac{dA(t)}{dt} &= -\mu_1 \frac{\partial}{\partial A(t)} [u(t) - A(t) \sin \phi(t)]^2 = \\ &2\mu_1 e(t) \sin \phi(t) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\omega(t)}{dt} &= -\mu_2 \frac{\partial}{\partial \omega(t)} [u(t) - A(t) \sin(\omega(t)t + \delta(t))]^2 = \\ &2\mu_2 e(t) A(t) t \cos \phi(t) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\delta(t)}{dt} &= -\mu_3 \frac{\partial}{\partial \delta(t)} [u(t) - A(t) \sin(\omega(t)t + \delta(t))]^2 = \\ &2\mu_3 e(t) A(t) \cos \phi(t) \end{aligned} \quad (6)$$

$$y(t) = A(t) \sin \phi(t) \quad (7)$$

$$e(t) = u(t) - y(t) \quad (8)$$

$$\phi(t) = \omega(t)t + \delta(t) \quad (9)$$

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = \omega(t) + t \frac{d\omega(t)}{dt} + \frac{d\delta(t)}{dt} \quad (10)$$

由于式(7)中引入了与时间相关的变量 t , 须对其进行简化。考虑系统为自适应反馈结构, 可将变量 t 用常数代替, 这样只对收敛速度有部分影响。将式(4)~(10)改写为离散表达式:

$$A(n+1) = A(n) + k_1 T_s e(n) \sin \phi(n) \quad (11)$$

$$\omega(n+1) = \omega(n) + k_2 T_s e(n) A(n) \cos \phi(n) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \phi(n+1) &= \phi(n) + T_s \omega(n) + \\ &T_s k_3 e(n) A(n) \cos \phi(n) \end{aligned} \quad (13)$$

$$y(n+1)=A(n+1)\sin\phi(n+1) \quad (14)$$

$$e(n+1)=u(n+1)-A(n+1)\sin\phi(n+1) \quad (15)$$

由式(11)~(15)可见:本文提出一原理清晰、结构简单、软硬件实现方便的自适应反馈滤波系统,下面对算法性能进行分析。

2 仿真实验及分析

仿真实验在 Matlab 环境下编写 .m 文件,对算法在理想和畸变情况下的输入电压基波跟踪效果进行分析,所有待分析信号幅值均采用规一化处理。设理想输入为工频电压,离散采样率为 5 kHz。

2.1 输入电压无畸变

理想情况下,输入电压为无畸变的纯正弦波,表达式为

$$x(t)=\sin(100\pi t)$$

图 1(a)~(d)显示了自适应滤波器对纯正弦信号的基波幅值、频率和相位的跟踪性能。幅值和相位的初始值均为 0,频率初始值为 50 Hz,根据步长参数设置的不同,滤波器可在约 5 个周期内精确跟踪纯正弦信号各参量,具有较好的跟踪精度和实时性。

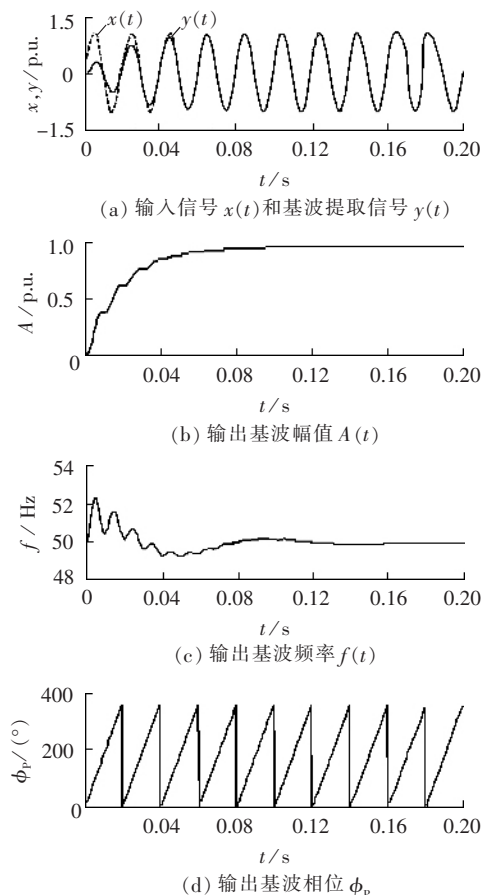


图 1 输入电压为理想正弦波时的基波跟踪效果

Fig.1 Tracing effect when input voltage is ideal sine wave

2.2 输入电压有畸变

2.2.1 电压为方波

图 2 显示了本文算法对输入方波的基波提取能力,设输入信号是周期为 0.02 s 的方波电压,其值

在 $-1 \sim 1$ p.u. 之间变化。图 2(a)中虚线为输入方波电压 $x(t)$ 、实线表示检测到的基波电压 $y(t)$,图 2(b)表示检测谐波(畸变)电压 $e(t)$ 。由仿真结果可知,本算法可在 5 个周期内完全跟踪方波信号的基波,具有较好的基波检测精度。

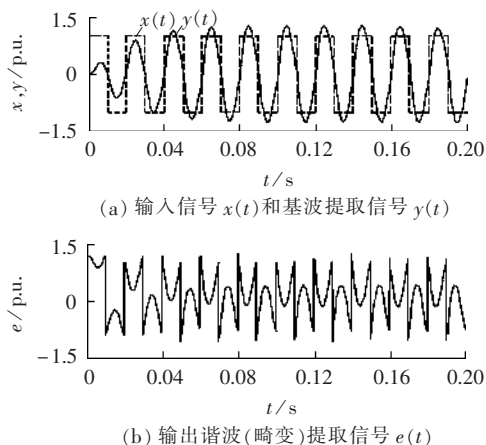


图 2 输入电压为方波时的基波跟踪效果

Fig.2 Tracing effect when input voltage is square wave

2.2.2 电压含谐波

仿真谐波源的设置,根据实际工业情况,以奇次谐波为主,设输入信号表达式为

$$x(t)=\sin(100\pi t)+0.5\sin(300\pi t+\pi/4)+0.2\sin(500\pi t+\pi/3)+0.1\sin(700\pi t+\pi)$$

由图 3(a)中含严重畸变谐波的电压信号在 1 个周期内有多个过零点,不能由传统的过零检测锁相方式进行基波跟踪。图 3(b)(c)显示出本算法对含谐波分量的输入电压具有较好的基波提取精度和效果。谐波分量对基波提取效果的影响将随后分析。

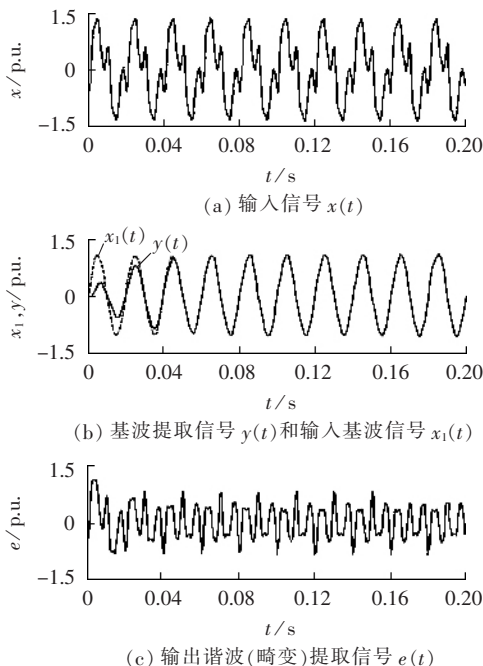


图 3 输入电压含谐波时的基波跟踪效果

Fig.3 Tracing effect when input voltage contains harmonic

为了考察本文算法的滤波能力,作出输入信号中含有各种频率时的频率响应特性,见图 4(图中 A 为幅值, n 为谐波次数)。当谐波次数 $n>4$ 时,幅值响应 $A<0.1$,即频率大于 4 次倍频的分量在提取出的基频分量中所占比重小于 10%,因此本算法对高频分量有较强的抑制作用。而在基频附近时,有较大的响应输出,算法对低频分量的抑制能力稍差。

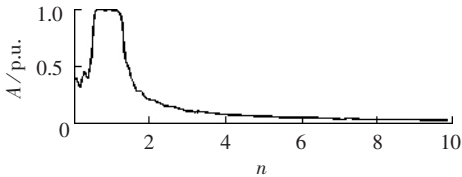


图 4 自适应滤波法的频率响应特性
Fig.4 The frequency response of adaptive filter

2.2.3 电压含噪声

由于滤波作用、自适应梯度算法积分作用及反馈的调节作用,使得该检测方法对信号噪声干扰不敏感,具有较强的鲁棒性和抗干扰能力。当输入电压信号混有信噪比 $SNR=10\text{ dB}$ 的高斯白噪声时,基波分量跟踪检测结果如图 5 所示。图 6 为当输入电压混有不同信噪比的噪声时,引入的幅值检测稳态误差曲线。信噪

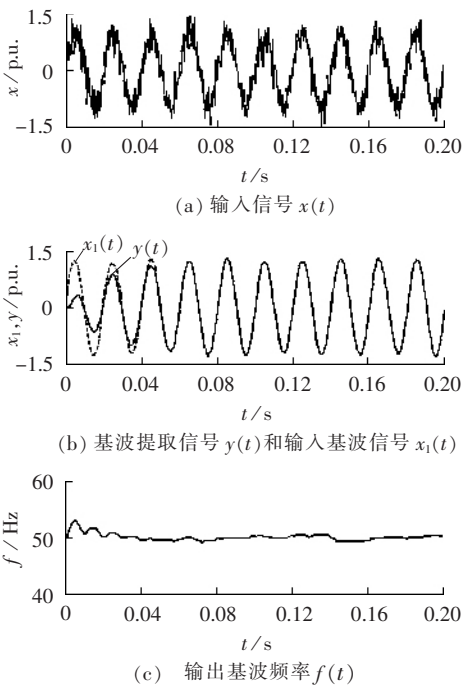


图 5 输入电压含噪声时的基波跟踪效果
Fig.5 Tracing effect when input voltage contains noise

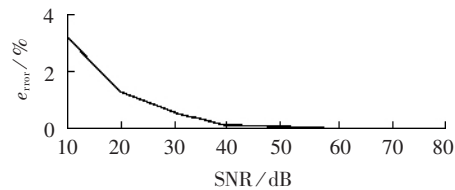


图 6 不同信噪比情况下幅值检测稳态误差曲线
Fig.6 Magnitude detection error curve vs. signal-noise ratio

比最大为 10 dB 时噪声引入幅值检测的误差约为 3%,因此自适应滤波器对噪声干扰具有较强的抑制作用。

2.2.4 基波参数突变

幅值、频率和相位是本算法的 3 个关键参数,图 7~9 分别为输入电压基波发生幅值下降 10%、频率下降 10% 以及相位跳变 30° 的情况下,自适应滤波器的基波检测跟踪结果。由仿真结果可见:自适应算法基本能在 5 个周期内准确跟踪到参数的变化,而其余参数经过微小扰动,自动调节回复稳定。此外,该方法可以跟踪基波频率的变化,对频率偏移具有较强的鲁棒性,同时可提供较为精确的频率偏差检测,这与经典傅里叶法相比,具有一定的优越性。

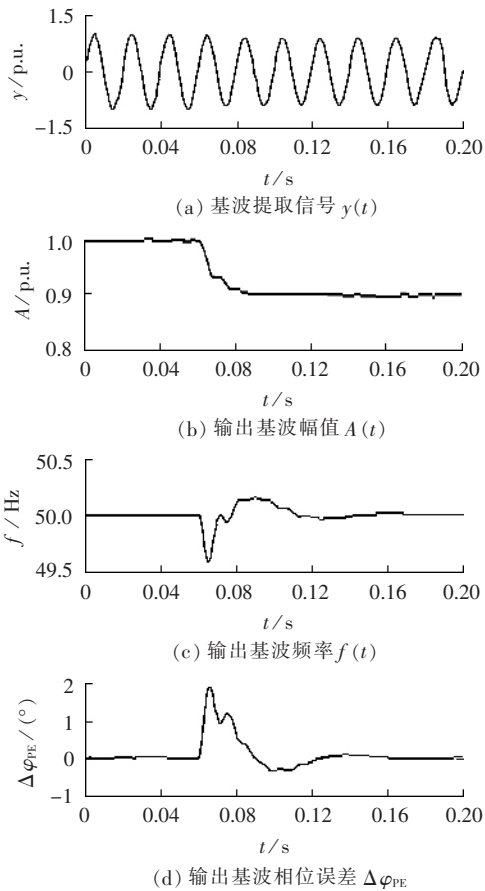
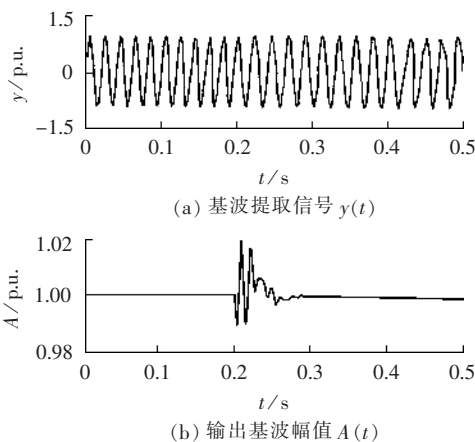


图 7 输入电压幅值突变时的基波跟踪效果
Fig.7 Tracing effect when input voltage changes suddenly in magnitude



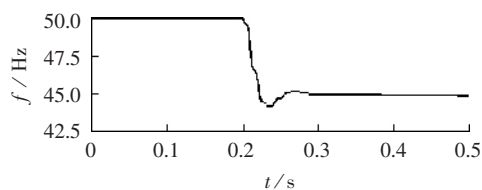
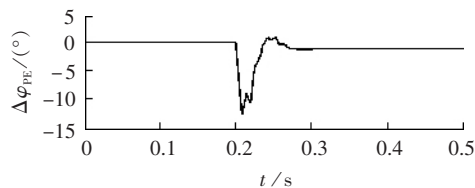
(c) 输出基波频率 $f(t)$ (d) 输出基波相位误差 $\Delta\varphi_{PE}$

图 8 输入电压频率突变时的基波跟踪效果

Fig.8 Tracing effect when input voltage changes suddenly in frequency

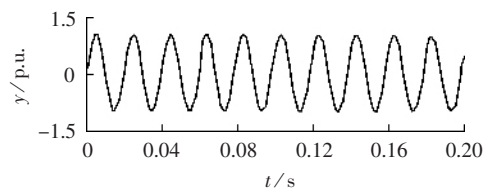
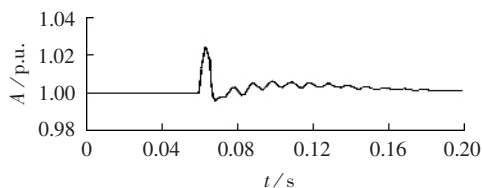
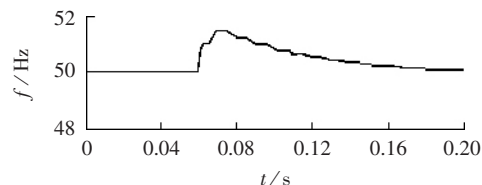
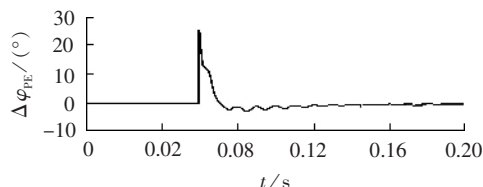
(a) 基波提取信号 $y(t)$ (b) 输出基波幅值 $A(t)$ (c) 输出基波频率 $f(t)$ (d) 输出基波相位误差 $\Delta\varphi_{PE}$

图 9 输入电压相位突变时的基波跟踪效果

Fig.9 Tracing effect when input voltage changes suddenly in phase

3 检测精度与动态响应的关系

步长因子 μ 决定了梯度算法的收敛速度,也决定了自适应滤波器的动态响应速度^[8]。在满足算法稳定收敛的前提下, μ 取值越大则梯度收敛得越快,响应速度也越快,但检测精度相应降低。经过大量仿真发现,对于某个特定的参考输入,系统特性完全取决于步长参数 k_1, k_2, k_3 的合理取值。 k_1 影响幅值提取的速度和精度, k_2 和 k_3 影响基波频率和相位的输出

速度和精度,由于动态响应和检测精度存在着矛盾,通过选择适当的 k_1, k_2, k_3 , 可达到不同的设计要求。

4 初始值的设置对检测效果的影响

由算法原理和仿真分析可知:初始值的设置越接近于系统真实参数,自适应滤波器收敛得越快。当初始值具有较大偏差时,由前面的分析可知:滤波器具有较强的鲁棒性,系统输出仍可以在一定次数的迭代反馈计算后收敛到真实值。在实际应用中为了加快收敛速度,将初始值尽量接近于标准参数为宜。

5 结语

本文提出了一种简单实用的单相基波信号的提取方法,采用最速下降优化技术,推导出一稳定的参量跟踪反馈自适应数字滤波器,可较准确地得到了参考信号的基波幅值、角频率和相位这 3 个基本参数。多个算例结果表明该方法对检测系统的内部参数和基波频率变化具有一定的鲁棒性和抗干扰能力,检测精度和动态响应性能良好。此外,本方法亦可推广用于谐波的检测^[10]。

参考文献:

- [1] 江红胜,侯勇,朱晓光. 基波分量的一种快速提取方法及其在有源滤波器中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(6): 34-37.
JIANG Hong-sheng, HOU Yong, ZHU Xiao-guang. Novel fundamental detection method and its application in the active power filter[J]. Proceedings of the EPSA, 2004, 16(6): 34-37.
- [2] 王冲,解大,陈陈. 三种谐波和无功电流检测算法的综合性能比较[J]. 电力电容器, 2003(3): 8-13.
WANG Chong, XIE Da, CHEN Chen. Comparison of comprehensive performance of three methods for detecting harmonics and reactive current[J]. Power Capacitors, 2003(3): 8-13.
- [3] 刘进军,刘波,王兆安. 基于瞬时无功功率理论的串联混合型单相电力有源滤波器[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(1): 37-41.
LIU Jin-jun, LIU Bo, WANG Zhao-an. Hybrid type series active power filter used in single-phase circuit based on instantaneous reactive power theory[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(1): 37-41.
- [4] FURST H W, PIGL M, BAIER J. An analogy method of detecting superimposed power line voltage disturbance[J]. IEEE Trans Instrum Meas, 1994, 43(6): 889-893.
- [5] JOU H L. A short data window algorithm for detecting the peak value of sinusoidal signals[J]. IEEE Trans Ind Electron, 1990, 37(5): 424-425.
- [6] 戴朝波,林海雪,雷林绪. 两种谐波电流检测方法的比较研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 80-84.
DAI Chao-bo, LIN Hai-xue, LEI Lin-xu. A study on the comparison of two harmonic current detecting methods[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 80-84.
- [7] 吕干云,程浩忠,董立新,等. 一种新的有源滤波器参考信号提取方法[J]. 继电器, 2004, 32(16): 5-7.
LÜ Gan-yun, CHENG Hao-zhong, DONG Li-xin, et al. A new detecting method for reference signal of APF[J]. Relay, 2004, 32(16): 5-7.
- [8] HAYKIN S. 自适应滤波器原理[M]. 北京:电子工业出版社, 2003.

[9] 李乔,吴捷. 自适应谐波电流检测方法用于有源电力滤波器的仿真研究[J]. 电工技术学报,2004,19(12):86-90.

LI Qiao,WU Jie. Simulation study of adaptive harmonic current detection method for active power filters [J]. Trans of China Electrotechnical Society,2004,19(12):86-90.

[10] KARIMI-GHARTEMANI M,IRAVANI M R. Robust and frequency-adaptive measurement of peak value[J]. IEEE Trans on Power Delivery,2004,19(2):481-489.

作者简介:

饶莹(1982-),女,江苏如皋人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用(**E-mail**:yingrao1982@seu.edu.cn);

郑建勇(1966-),男,江苏南京人,教授,主要研究方向为电力电子与电力传动。

Adaptive filter based on steepest descent method
for fundamental extraction

RAO Ying¹,ZHENG Jian-yong²
(1. Nanjing Power Supply Company,Nanjing 210008,China;
2. Southeast University,Nanjing 210096,China)

Abstract: An adaptive filter based on the steepest descent method is presented to extract the single-phase fundamental. Its principle and design are explained and expressions of fundamental signal parameters are offered. Through plenty simulations with Matlab,the extraction performance with distorted input voltages is investigated,as well as the relationship between the precision and the dynamic response and the influence of initial value setting on the performance are analyzed. Results show that,it forms a stable multi-parameter(magnitude,frequency and phase) feedback control system,which extracts the single - phase fundamental rather correctly. It has good real-time performance and is robust with uncertainties and noise.

This project is supported by the High Technology Project of Jiangsu Province(BG2004038) and the Science and Technological Brainstorm Project of Jiangsu Province(BE2003043).

Key words: steepest descent method; adaptive filter; fundamental component; simulation