

# 基于改进 Fast-ICA 的电能质量谐波检测

王继, 王年, 汪炼, 沈玲, 庄振华

(安徽大学教育部电能质量工程研究中心, 安徽 合肥 230039)

**摘要:** 独立分量分析是利用信号的高阶统计量快速准确地实现信号分离和恢复。提出一种改进快速分离算法检测电能质量谐波的方法。在介绍了快速分离算法基本原理的基础上对牛顿迭代法进行了改进, 减少了迭代次数, 提高了收敛速度; 依据负熵极大的独立性准则实现谐波信号的盲分离, 再进行幅值修正以实现真实信号的估计; 对分离修正后的信号进行 FFT 分析, 得到幅值和频率, 进而实现对谐波的检测。仿真实验结果表明了该算法在检测精度和运行效率上都有所提高。

**关键词:** 盲源分离; 独立分量分析; Fast-ICA; 电能质量; 谐波

## Harmonic detection of power quality based on improved Fast-ICA

WANG Ji, WANG Nian, WANG Lian, SHEN Ling, ZHUANG Zhen-hua

(Education Ministry Power Quality Engineering Research Center, Anhui University, Hefei 230039, China)

**Abstract:** Independent component analysis (ICA) separates and restores signal by using the high-order statistics of that signal. A method of power quality's harmonic detection using improved Fast-ICA is proposed. First, the basic principles of Fast-ICA algorithm are introduced and with which Newton's iteration is improved, thereby the number of iterations is reduced and the convergence speed is improved. Harmonic signal is then carried out according to the independency principle of maximizing negentropy, the amplitude of the harmonic signal is revised to obtain the estimation of real signal. FFT is used to calculate the amplitude and frequency of the separative signal, thus the final harmonic's detection is completed. The detection accuracy and the operation efficiency have been improved in the simulation tests.

**Key words:** blind source separation; independent component analysis; Fast-ICA; power quality; harmonic

中图分类号: TM911.7; TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)18-0126-05

## 0 引言

近年来, 随着科学技术的发展, 非线性负荷用电设备的种类、数量和用电量迅猛增加, 谐波的危害十分严重。它会使电能的生产、传输和利用的效率降低; 使电气设备过热, 产生振动和噪声, 并使绝缘老化, 使用寿命缩短, 甚至发生故障或烧毁; 谐波可引起电力系统局部并联谐振或串联谐振, 使谐波含量放大, 造成电容器设备烧毁; 谐波还会引起继电保护和自动装置误动作, 以及对通信设备产生严重干扰等, 故谐波的准确检测显得尤为重要。目前, 谐波的检测方法主要有基于 FFT<sup>[1-3]</sup>、基于经验模式分解的有源滤波器检测法<sup>[4]</sup>、自适应检测

法<sup>[5-6]</sup>、基于功率的检测法<sup>[7-8]</sup>、基于奇异值分解<sup>[9]</sup>和基于独立分量<sup>[10]</sup>等。其中 FFT 是当前谐波检测中最为广泛的一种方法, 它是在离散傅里叶变换基础上的一种改进的高效率算法, 但其存在频谱混叠和泄漏等问题; 所谓基于经验模式分解的有源滤波器检测法, 就是把经验模式分解 (EMD) 应用于有源滤波器的一种谐波检测方法, 它不仅可以有效、准确地检测电网中的谐波分量, 而且具有很好的实时性, 但是, 其在对平稳信号的处理上并不理想; 自适应检测法, 它是在有源电力滤波器中, 根据误差信号的时间均值估计来调节递推算法的步长, 以达到对系统的收敛速度与稳态失调的灵活控制, 其可以做到即使在信号的信噪比较低的情况下, 也能保证较快的响应速度和较小的稳态失调, 但该算法对参数的选择依赖很大; 基于功率的检测法, 是根据 H.Akagi 提出的瞬时无功功率理论, 得到瞬时有功和瞬时无功, 并将其分解而计算出各次谐波分量,

**基金项目:** 安徽省科技攻关计划重大科技专项项目 (08010202034); 安徽省教育厅自然科学研究重点项目 (KJ2010A007)

该方法有很好的实时性, 但硬件多, 花费大, 且存在不同的延时; 而基于奇异值和基于独立分量也都存在各自的不足。基于以上考虑, 本文在文献[10]和文献[11]的基础上, 引入一种改进 Fast-ICA 的电力谐波检测方法, 并对其进行了仿真实验, 仿真结果表明改进 Fast-ICA 谐波检测方法的正确性和有效性。

## 1 独立分量分析原理

### 1.1 独立分量分析方法<sup>[11-14]</sup>

独立分量分析 (Independent Component Analysis, ICA) 是近20多年发展并成熟起来的一种信号处理技术。基本的ICA是指从含有多个源信号的线性混合信号中分离出源信号的技术。除了已知源信号是统计独立外, 无其他先验知识, 它是伴随着盲源问题而发展起来的, 故又称盲分离 (Blind Source Separate)。

ICA线性组合模型如图1所示, 其中  $s_1$ 、 $s_2$ 、 $s_3$ 、 $s_4$  为4个非高斯分布的独立信号源,  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$  为4个由独立信号源经混合后的观测信号。

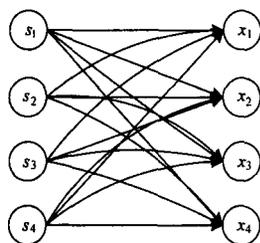


图1 ICA线性组合模型

Fig.1 Linear combination model of ICA

其中, 图1的线性组合模型也可以用矩阵形式表示为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{B}\mathbf{S} \quad (1)$$

当独立源信号  $\mathbf{S}$  和混合矩阵  $\mathbf{B}$  未知时, 我们要寻找一个分离矩阵  $\mathbf{W} = \mathbf{B}^{-1}$ , 从而实现从观测信号中分离出源信号, 即

$$\mathbf{Y} = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{X} = \mathbf{W}\mathbf{X} = \mathbf{S} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{S}$  分别为观测信号向量和源信号向量;  $\mathbf{B}$  为混合矩阵。在电能质量谐波检测中,  $\mathbf{B}$  代表电网中各独立信号的混合方式;  $\mathbf{S}$  是电网中独立信号。据此ICA可以求出  $\mathbf{Y}$ , 将其作为对  $\mathbf{S}$  的估计。

### 1.2 Fast-ICA 算法的改进<sup>[11]</sup>

Fast-ICA算法通常由对观测信号预处理和独立分量提取两部分组成, 其中信号预处理包括中心化和白化处理两部分, 所谓中心化, 就是减去平均值使之成为中数为零的信号; 而白化处理是通过PCA网络将观测信号线性变换为具有单位方差且各分量

互不相关的信号。由于在白化处理中已去除各分量的相关性, 所以也为后面的独立分量提取带来了方便。

在进行独立分量提取之前, 必须寻找一种独立性判据来度量分离信号的非高斯性, 也即独立性。在此, 本文采用负熵作为非高斯性的判据。那么, 对于一个随机变量  $y$ , 若其概率密度为  $p(y)$ , 则负熵的定义式为

$$J(y) = H(y_{\text{gauss}}) - H(y) \quad (3)$$

式(3)中:  $y_{\text{gauss}}$  是具有和  $y$  相同方差的高斯变量;  $H(y) = -\int p(y) \lg p(y) dy$  为随机变量  $y$  的信息熵。

然而, 在实际计算时, 由于随机变量  $y$  的概率密度  $p(y)$  未知, 故一般用式(4)来对负熵进行估算:

$$J(y) \propto [E\{G(y)\} - E\{G(y_{\text{gauss}})\}]^2 \quad (4)$$

由式(4)可以看出,  $y$  的非高斯性越强,  $E\{G(y_{\text{gauss}})\}$  就越小, 负熵  $J(y)$  越大, 故可以用负熵极大化来作为独立性的判据。即在做完观测信号预处理后, 依据负熵判据来寻找矩阵  $\mathbf{W} = \mathbf{B}^{-1}$ , 使其负熵最大。也就是对  $E\{G(y)\} = E\{G(\mathbf{W}^T \mathbf{x})\}$  求极值, 使  $E\{G(\mathbf{W}^T \mathbf{x})\}$  最大。

$$E'\{G(\mathbf{W}^T \mathbf{x})\} = E\{x \cdot g(\mathbf{W}^T \mathbf{x})\} = 0 \quad (5)$$

式(5)中,  $g(\cdot)$  是目标函数  $G(\cdot)$  的导数。由牛顿迭代定理式(6):

$$x_{t+1} = x_t - [f(x_t)/f'(x_t)], \quad t = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

可得:

$$\mathbf{W}_t = E\{x \cdot g(\mathbf{W}_{t-1}^T \mathbf{x})\} - E\{g'(\mathbf{W}_{t-1}^T \mathbf{x})\} \mathbf{W}_{t-1} \quad (7)$$

$$\mathbf{W} = \mathbf{W}_t / \|\mathbf{W}_t\| \quad (8)$$

由式(6)可以证明当  $f(x) = 0$ ,  $f'(x) \neq 0$  时, 它是二阶收敛的。在此, 对式(6)进行修正, 使之满足三阶收敛, 从而提高其收敛的速度。修正形式如下:

$$x_{t+1}^* = x_t - [f(x_t)/f'(x_t)], \quad t = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

$$x_{t+1} = x_t - [2f(x_t)/(f'(x_t) + f'(x_{t+1}^*))] \quad (10)$$

由修正后的牛顿迭代公式, 可得改进的 Fast-ICA 算法公式为:

$$\mathbf{W}^* = E\{x \cdot g(\mathbf{W}_{t-1}^T \mathbf{x})\} - E\{g'(\mathbf{W}_{t-1}^T \mathbf{x})\} \mathbf{W}_{t-1} \quad (11)$$

$$\mathbf{W}_t = 2E\{x \cdot g(\mathbf{W}_{t-1}^T \mathbf{x})\} - [E\{g'(\mathbf{W}_{t-1}^T \mathbf{x})\} + E\{g'(\mathbf{W}_{t-1}^T \mathbf{x})\}] \mathbf{W}_{t-1} \quad (12)$$

$$\mathbf{W} = \mathbf{W}_t / \|\mathbf{W}_t\| \quad (13)$$

## 2 基于改进 Fast-ICA 的电力谐波检测

### 2.1 电力谐波概述

谐波是一个周期性电气量的正弦波分量，其频率为基波频率的整数倍。电力系统谐波的定义是对周期性非正弦电量进行傅里叶级数分解，除了得到与电网基波频率相同的分量，还得到一系列大于电网基波频率的分量，这部分电量称为谐波。谐波频率与基波频率的比值 ( $n = f_u / f_1$ ) 称为谐波次数。

电网中有时也存在非整数倍谐波，称为间谐波。谐波实际上是一种干扰量，它会使电网受到“污染”。

在供电系统中，通常认为交流电压和交流电流为正弦波形，其中正弦电压可表示为：

$$U(t) = \sqrt{2}u \sin(\omega t + \theta) \quad (14)$$

正弦电压施加在非线性无源元件，如电阻、电感和电容上，其电流和电压分别为比例积分和微分关系，仍为同频率的正弦波。但当正弦电压施加在非线性电路上时，电流就变为非正弦波，非正弦电流在电网阻抗上产生压降，会使电压波形也变为非正弦波。

### 2.2 基于改进 Fast-ICA 的电力谐波检测原理

对于一观测电压或电流信号  $x(t)$ ，其由目标信号  $s(t)$  和谐波干扰信号  $s_1(t)$  组成，即

$$x(t) = s(t) + s_1(t) = s(t) + m_h \cdot \frac{1}{h} \cdot \sin(h\omega_f t + \theta_h) \quad (15)$$

在式 (15) 中： $m_h$  为  $h$  次谐波幅值； $\omega_f$  为基波角频率； $\theta_h$  为  $h$  次谐波的初相角。

所谓谐波的检测，就是从  $x(t)$  中检测出  $s_1(t)$ ，对于谐波频率 ( $h\omega_f / 2\pi$ ) 的检测，可以用简单的谱分析来完成；但对于谐波的幅值和相位的检测，如果没有谐波参考源，问题就变得很复杂，通常采用从观测信号  $x(t)$  中提取一段目标信号较弱的的数据来对谐波的幅值和相位进行估计，这种做法的精度通常不能保证。而改进的 Fast-ICA 的提出给谐波的幅值和相位的估计提供了一个新的思路。

由于改进的 Fast-ICA 可以估计多路线性混合信号的混合矩阵的系数，所以式 (15) 中的谐波信号  $s_1(t)$  的检测不可以直接用改进的 Fast-ICA 来进行，因为改进的 Fast-ICA 至少需要两路输入信号。为此，对式 (15) 进行变换可得：

$$x(t) = s(t) + s_1(t) = s(t) + A \cdot \sin(h\omega_f t) + B \cdot \cos(h\omega_f t) \quad (16)$$

其中： $m_h \cdot \frac{1}{h} = \sqrt{A^2 + B^2}$ ， $\theta_h = \arctg(B/A)$

由式 (16) 可以看出，对谐波信号  $s_1(t)$  幅值和相位的估计可转化为对  $A$  和  $B$  的估计。另外，对于谐波的检测，可以构造两路参考输入信号  $s_2(t) = \sin(h\omega_f t)$  和  $s_3(t) = \cos(h\omega_f t)$ ，所以，观测信号  $x(t)$  可以看成是由源信号  $s_0(t)$ 、 $s_2(t)$  和  $s_3(t)$  线性混合而成，即

$$x(t) = b_{11}s_0(t) + b_{12}s_2(t) + b_{13}s_3(t) \quad (17)$$

$$A \cdot \sin(h\omega_f t) = b_{22}s_2(t) \quad (18)$$

$$B \cdot \cos(h\omega_f t) = b_{33}s_3(t) \quad (19)$$

若用矩阵形式可表示为：

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ A \sin(h\omega_f t) \\ B \cos(h\omega_f t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ 0 & b_{22} & 0 \\ 0 & 0 & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0(t) \\ s_2(t) \\ s_3(t) \end{bmatrix} \quad (20)$$

通过改进 Fast-ICA 分析，可以估计以上的矩阵各系数  $A = b_{22}$ ， $B = b_{33}$ ，再由式 (16) 估计出谐波的幅值和相位，继而估计出谐波信号  $s_1(t)$ 。

## 3 实验结果及分析

实验中，本文构造了频率为 50 Hz 的基波信号和频率为 150 Hz 的 3 次谐波信号，如图 2 所示，并利用一随机混合矩阵将基波信号、3 次谐波信号的

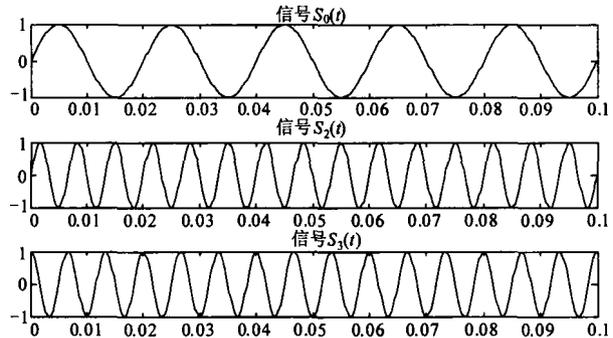


图 2 基波信号和 3 次谐波正弦、余弦图  
Fig.2 Fundamental signal and the diagram of three sub-harmonic's sine and cosine

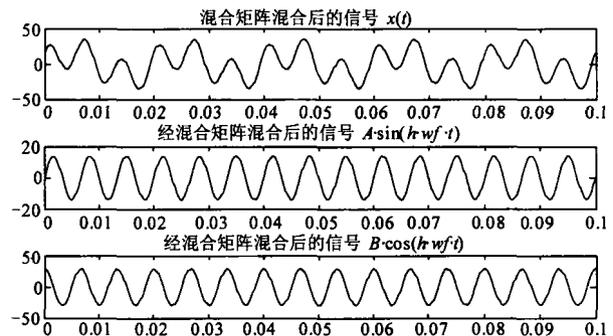


图 3 混合后各信号图  
Fig.3 Diagram of mixed signal

正弦部分和 3 次谐波信号的余弦部分这三路信号进行混合, 得到实验所用的混合信号。其中混合后信号如图 3 所示。针对所构造的混合信号, 文中通过 Fast-ICA 算法和改进的 Fast-ICA 算法的比较实验, 验证了本文算法的正确性和有效性。

### 3.1 实验结果

文中改进的 Fast-ICA 算法, 是在原有 Fast-ICA 算法基础上, 对其二阶收敛性进行修正, 使其满足三阶收敛而得到的。采用此改进算法来实现信号的分离, 再利用负熵作为独立性判据, 最终实现谐波信号检测。实验结果如图 4 和图 5 所示, 其中图 4 是对图 3 的混合信号利用 Fast-ICA 算法分离后的三路信号; 图 5 是经改进的 Fast-ICA 算法分离出的信号。

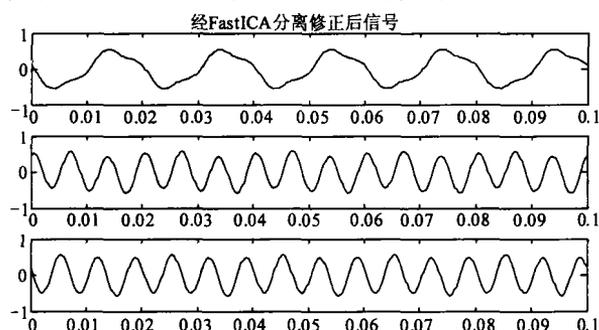


图 4 Fast-ICA 算法分离后各信号图

Fig.4 Diagram of separated signal by Fast-ICA algorithm

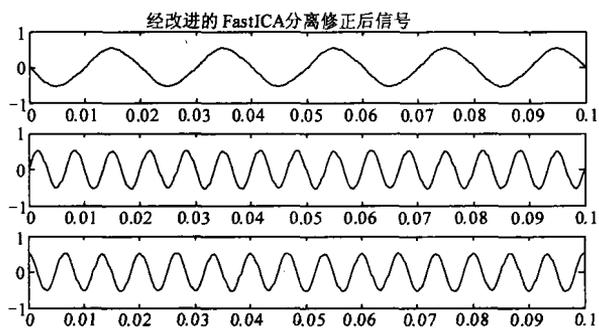


图 5 改进的 Fast-ICA 算法分离后各信号图

Fig.5 Diagram of separated signal by improved Fast-ICA algorithm

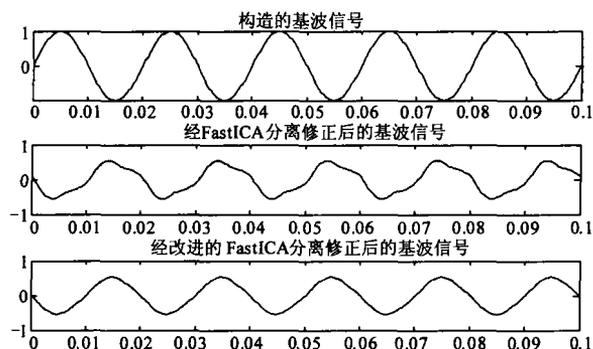


图 6 两算法分离前后基波信号对比图

Fig.6 Fundamental signal's comparison of Fast-ICA and improved Fast-ICA

另外, 本文还对所分离的信号做了基于 FFT 的幅频分析, 以检验分离的准确性。而且对于基波信号和谐波信号, 文中还就两算法做了对比实验, 实验结果如图 6、图 7 和图 8 所示, 其中, 图 6 是两算法分离前后基波信号对比图; 图 7 是两分离前后谐波信号对比图; 图 8 是两分离前后谐波信号幅频对比图。

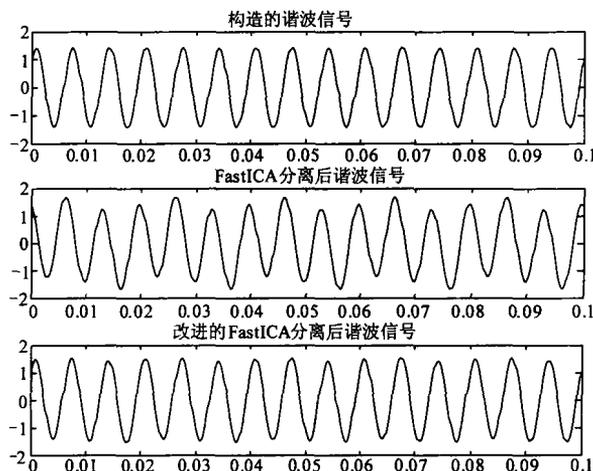


图 7 两分离前后谐波信号对比图

Fig.7 Harmonic signal's comparison of before and after separated

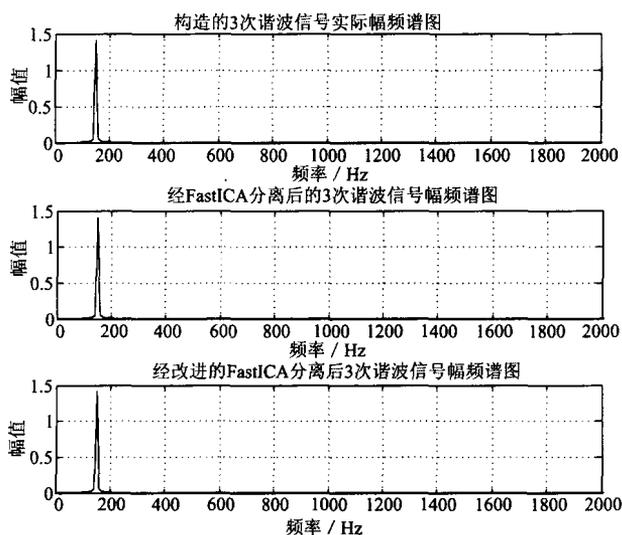


图 8 两分离前后谐波信号幅频对比图

Fig.8 Spectrum analysis of before and after separated

### 3.2 实验结果比较

上述实验中, 如图 4 和图 5 所示, ICA 基本可以把谐波信号从混合信号中提取出来; 而在分离结果的准确性方面, 如图 6、图 7 和图 8 所示, 改进的 Fast-ICA 算法比原有的 Fast-ICA 算法效果好; 另外, 在利用改进的 Fast-ICA 算法分离信号时迭代次数有 100 多次, 而利用 Fast-ICA 分离信号时, 迭代

次数多达 500 多次, 这说明在收敛速度方面, 改进的 Fast-ICA 算法明显优于 Fast-ICA 算法。其中两算法的迭代次数和运行时间对比情况如表 1 所示。

表 1 两算法迭代次数和运行时间对比表

Tab.1 Table of two algorithm's iterations and run-time

算法	迭代次数	计算时间/s		
		256 点	512 点	1 024 点
Fast-ICA	521	0.735	0.875	0.891
改进的 Fast-ICA	142	0.581	0.596	0.644

由图 6 和图 7 可以看出, 经改进的 Fast-ICA 算法分离出的谐波信号几乎和原信号相同; 由图 8 的幅频谱图可知分离后的幅值和频率也和原信号相差不多, 说明利用改进的 Fast-ICA 算法对谐波信号进行检测是切实可行的。然而, 在利用改进的 Fast-ICA 算法分离的过程中, 由于除相互独立外, 无其他先验知识, 很难知道各信号独立性的精确阈值, 所分离出的信号发生了相移, 这可能会对检测精度有所影响。

### 4 结论

文中提出了基于改进的 Fast-ICA 算法电能质量谐波的检测方法, 仿真实验表明此方法可以较准确地检测出观测信号中的谐波信号, 进而对其进行 FFT 分析, 得到准确的幅值、频率, 最终完成对谐波的检测。然而, 由于在利用改进的 Fast-ICA 算法分析时, 其源信号和混合矩阵均未知, 故而会存在两个不确定性, 即幅度不确定和信号输出顺序不确定, 对于幅度, 可以通过采用一定的方法来对其修正, 而信号输出顺序对本文中谐波的检测影响不大, 故本文的方法具有可行性。但是由实验也可以看出, 由于这种不确定性的存在, 检测结果还是存在一定误差, 在以后的研究中需对其进行改进。

### 参考文献

[1] Grandke T. Interpolation algorithms for discrete Fourier transforms of weighted signals[J]. IEEE Trans on IM, 1983, 32 (2).

[2] XI Jiang-tao. A new algorithm for improving the accuracy of periodic signal analysis[J]. IEEE Trans on IM, 1996, 45 (4).

[3] Ferrero A. High accuracy Fourier analysis based on synchronous sampling techniques[J]. IEEE Trans on IM, 1992, 41 (6).

[4] 杨晓萍, 刘普森, 钟彦儒. 基于经验模式分解的有源滤波器谐波检测[J]. 电工技术学报, 2009, 24 (5): 203-208.

YANG Xiao-ping, LIU Pu-sen, ZHONG Yan-ru. Harmonic detection of active power filter based on empirical mode decomposition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24 (5): 203-208.

[5] 何英杰, 邹云屏, 刘飞, 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): 27-30. HE Ying-jie, ZOU Yun-ping, LIU Fei, et al. Improved adaptive algorithm of harmonic current detection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26 (9): 27-30.

[6] Dash P K, Swain D P, Liew A C, et al. An adaptive linear combiner for on-line tracking of power system harmonic[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11 (4).

[7] 梅军, 沈亚飞, 郑建勇, 等. 三相四线制系统中基于等功率法的谐波检测[J]. 电力自动化设备, 2008, 28 (2): 53-57. MEI Jun, SHEN Ya-fei, ZHENG Jian-yong, et al. Harmonic detection based on equal power method in three-phase four-wire system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28 (2): 53-57.

[8] Akagi H. New trends in active filters for power conditioning[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1996, 32 (6).

[9] Lobos T, Kozina T, Koglin H J. Power system harmonics estimation using linear least squares method and SVD[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2001, 148 (6).

[10] Hyvarinen A. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1999, 10 (3).

[11] 黄丽妍, 高强, 亢海燕, 等. 改进的快速独立分量分析算法[J]. 华北电力大学学报, 2006, 33 (3): 61-64. HUANG Li-yan, GAO Qiang, KANG Hai-yan, et al. Improved fast-ICA algorithm[J]. Journal of North China Electric Power University, 2006, 33 (3): 61-64.

[12] Lee T w. Independent component analysis-theory and application[M]. Boston: Kluwer Academic, 1998.

[13] Bell A J. An information-maximization approach to blind separation and blind deconvolution[J]. Neural Computation, 1995, 7 (4).

收稿日期: 2009-09-24

作者简介:

王 继 (1981-), 男, 硕士生, 研究方向为电能质量; E-mail: wangji81@foxmail.com

王 年 (1966-), 男, 教授, 研究方向为电能质量, 计算机视觉, 模式识别及应用;

汪 炼 (1986-), 男, 硕士生, 研究方向为电能质量。