

基于互信息最小化盲源分离准则的电压闪变检测方法

国添栋, 王 祁

(哈尔滨工业大学电气学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为了准确测量电网电压闪变的参数, 提出了一种新的基于最小化互信息准则的盲源分离方法。将含有电压闪变的混合信号视为盲信号, 对采样得到的混合信号序列分别延时若干点, 构造输入信号矩阵, 基于互信息最小化盲源分离准则, 用Fast-ICA算法从混合信号中分离出闪变的包络波形, 再进行频率和幅值的计算, 就可得到短时闪变值。设计了由信号发生电路、功率放大电路及采样电路等组成的实验电路, 实验结果表明此方法对平稳和瞬时闪变信号的幅值、频率测量精度高, 特别是在含非整次调制谐波时, 优于传统的快速傅里叶变换算法, 取得了较好的效果。

关键词: 盲源分离; 电能质量; 电压闪变; 调幅波包络; Fast-ICA算法

Detection of voltage flicker based on blind source separation of minimum mutual information

GUO Tian-dong, WANG Qi

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To measure the parameters of voltage flicker accurately, blind source separation algorithm is presented based on the criterion of minimum mutual information. Taking the mixed signal containing voltage flicker as blind signal, the paper samples the order of mixed signals and delays them a number of points, and constructs the input signal matrix. The voltage flicker envelope curve is separated from mixed signal with Fast-ICA algorithm based on blind source separation of minimum mutual information. Then frequency and amplitude of the envelope curve are calculated and short-term flicker value is acquired. An experimental circuit containing signal generation circuit, power amplifier circuit and sampling circuit is designed. Experiment results show that the method is more effective in stationary and instantaneous voltage flicker detection. The method is better than conventional FFT algorithm when envelope curve contains inter-harmonics.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 60871034).

Key words: blind source separation; power quality; voltage flicker; envelope curve; Fast-ICA algorithm

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)01-0057-05

0 引言

随着经济发展和技术的进步, 用户对电能质量的要求越来越高, 而非线性负载如电弧炉、大功率拖动电机、电焊机、电力电子器件等直接接入电网中, 造成电网电压波动和闪变, 闪变是电压波动的特殊反应, 电压闪变不仅可导致人的主观视感不舒服, 还有可能使某些重要的电子仪器设备、控制系统或保护装置误动作^[1], 影响供电质量。电压波动和闪变是电能质量的一个重要指标, 能否从电网电压中准确地提取出波动电压, 直接影响电压波动和闪变计算的精度, 从而影响对电能质量的正确评估。

常用的提取电压波动信号调幅波包络的方法有

平方检测法、整流检测法、有效值检测法、快速傅里叶(FFT)检测法和小波检测法。

平方检测法和整流检测法需幅频特性极好的低通滤波器或带通滤波器, 才能完全将闪变信号频率范围外的直流、工频及工频谐波滤掉, 滤波器的设计不易实现; 而有效值检测法则要求将均方根值的计算时间准确地整定在半个工频周期上, 实现起来相当困难^[2], 易受到基波电压和基波频率的影响。而且滤波器的设计思想源于傅里叶变换原理, 由于傅里叶变换不具有时域分辨性, 因此捕捉不到间断或时变的调幅波信息。所以上述三种检测方法也不适用于检测时变非平稳的电压闪变信号。

FFT法在频域内进行滤波和处理, 然后再利用快速傅里叶反变换, 得到时域结果。但FFT法存在泄漏误差和栅栏效应^[3-4], 当输入信号中含有谐波

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60871034)

时, 误差会增大。小波检测法是一种比较理想的时间—尺度(时间—频率)分析方法, 它具有多分辨率分析的特点, 可以很好地应用在电压波动和闪变信号等非平稳电力信号的检测与分析中^[5-6]。但小波变换采用的多分辨率分析计算比较复杂^[7], 且小波基函数的不惟一使得小波基函数不好选择。

基于上述原因, 本文提出了一种基于最小化互信息准则的盲源分离理论提取电压闪变信号的调幅波, 由于该方法是一种数字化方法, 因此不受模拟电路参数影响, 也不存在 FFT 法的频谱泄漏、栅栏效应及小波检测法的小波函数选取等问题, 该算法能准确提取电压闪变包络信号, 不需要复杂的数学过程, 实现简单, 并用实验结果验证了此方法。

1 盲源分离理论

1.1 盲源分离信号模型

盲源分离 (Blind Source Separation, BSS) 技术作为 20 世纪 80 年代末提出的一种新的信号处理方法, 目前已经成为现代信号处理领域的一个极其活跃的分支。盲源分离就是在信号源和系统传输特性未知的条件下, 从观测信号(即系统的输出信号)辨识系统的输入信号。当假设输入信号相互统计独立时, 盲源分离也称为独立分量分析 (Independent Component Analysis, ICA)。

盲信号分离可以用下面的混合方程描述:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)]^T$ 为 n 个源信号构成的 n 维向量; $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)]^T$ 为 m 维观测数据向量, 其元素是各个传感器得到的输出; $m \times n$ 维矩阵 \mathbf{A} 称为混合矩阵, 其元素表示信号的混合情况; $\mathbf{n}(t)$ 为噪声信号。为了使盲信号分离问题可解, 必须做以下假设:

- (1) 混合系统为线性系统;
- (2) 混合矩阵 $\mathbf{A} \in R^{m \times n}$ 为列满秩;
- (3) 源信号矢量 $\mathbf{s}(t)$ 的各个分量之间相互统计独立, 并且 $\mathbf{s}(t)$ 的分量中, 服从高斯分布的分量不超过一个。
- (4) 系统的噪声为加性噪声或可忽略不计。

本文假设噪声信号为零。盲源信号分离问题就是要从观测矢量中恢复出源信号矢量, 即要找到一个分离矩阵 \mathbf{W} , 通过 $\mathbf{y}(t) = \mathbf{W}\mathbf{x}(t)$ 产生源信号的估计。

用于盲源分离的分离准则较多, 本文采用基于信息论的输出互信息最小化 (Minimum Mutual Information, MMI) 准则。

1.2 输出互信息最小化 (MMI) 准则

互信息是指一组随机变量的各变量具有的该集合中其他随机变量的信息的度量。利用信息熵可以将 n 个(标量)随机变量 $x_i, i=1, \dots, n$ 之间的互信息 I 定义为:

$$I(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n H(x_i) - H(\mathbf{x}) \quad (2)$$

式中, \mathbf{x} 是包含所有 x_i 的那个向量。

盲源分离的目的是使输出信号各分量尽可能相互独立, 因此基于信息理论的最小化互信息的盲源分离准则就是选择适当的分离矩阵 \mathbf{W} , 使输出 Y 各分量之间的相依性最小即独立性最大, Y 的各分量之间的相依程度可以用 K-L 散度度量。

设观测的输出变量为 Y, Y 各分量的联合概率密度函数 $p(Y; \mathbf{W}) = p(y_1, y_2, \dots, y_n)$ 和边缘概率密度函数乘积 $\bar{p}(Y; \mathbf{W}) = p(y_1)p(y_2) \cdots p(y_n)$ 之间的散度为:

$$I(\mathbf{W}) = \int p(y_1, \dots, y_n) \log \frac{p(y_1, y_2, \dots, y_n)}{p(y_1)p(y_2) \cdots p(y_n)} dY \quad (3)$$

式中, $I(\mathbf{W})$ 为非负的, 当 Y 的各分量相互独立时 $I(\mathbf{W})=0$ 为最小值。因此当 Y 的各分量之间的互信息不断减小时, 也就意味着 Y 各元素之间的相依性在不断减小, 独立性在不断增加。因此 $I(\mathbf{W})$ 可以作为一个目标函数。

1.3 多维输入信号的建立

在进行盲信号分离时, 必须输入多维输入信号作为盲信号处理算法的输入, 才能分离出各原信号。而一维信号由于携带的信息量少, 不能满足盲信号分离的要求。因此根据电压测量的特点, 构造一个多维输入延时矩阵作为输入信号^[8], 在这个矩阵中包含了待分离信号的足够的潜在信息, 从而能够分离出各独立信号源。其关键是假设存在一个动态系统, 由 n 个信号源线性混合而成, 从一维的观测数据 $x(t)$ 中产生一系列延时向量。则 t 时刻系统的状态为:

$$\mathbf{X}(t) = \{x(t-\tau), x(t-2\tau), \dots, x(t-(m-1)\tau)\} \in R$$

其中: τ 为时间延迟因子; m 为输入矩阵维数。

包含有一系列延迟向量的输入矩阵可表示为如式 (4)。

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_t & x_{t+\tau} & \cdots & x_{t+N\tau} \\ x_{t+\tau} & x_{t+2\tau} & \cdots & x_{t+(n+1)\tau} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{t+(m-1)\tau} & x_{t+m\tau} & \cdots & x_{t+(m+N-1)\tau} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, X_1, X_2, \dots, X_m 为构造的 m 路输入信号。实验中, 对一路观测信号延迟若干个采样点后, 构建输入信号矩阵。

1.4 Fast-ICA算法

根据信息论中关于互信息的定义, 可得互信息最小化的准则函数为:

$$I(Y, \mathbf{W}) = \sum_{i=1}^n H(y_i) - H(x) - \log |\det \mathbf{W}| \quad (5)$$

式中: y_i 为输出信息 y 中的第 i 个元素; H 为信息熵; $\det \mathbf{W}$ 为分离矩阵 \mathbf{W} 的行列式。

若以式 (5) 作为代价函数进行信号分离, 则运算量较大, 且不容易收敛。芬兰的Hyvärinen提出的快速不动点ICA算法 (Fast-ICA) 克服了上述算法的缺点, 是一种快速、鲁棒的离线算法, 它将 n 个源信号的独立分量分析变成了对 n 个优化问题的求解, 即将混合的信号逐个分离^[9]。这种算法的对比函数为:

$$J(\mathbf{W}) = [E\{G(\mathbf{W}^T \mathbf{X})\} - E\{G(v)\}]^2 \quad (6)$$

式中: $G(\cdot)$ 为任意非二次型函数; \mathbf{W} 为一权向量且满足约束条件 $E[(\mathbf{W}^T \mathbf{X})^2] = 1$; v 为一零均值、单位方差的高斯变量。 $G(u)$ 按如下等式选取。

$$G(u) = -\frac{1}{a} \exp(-au^2/2)$$

$$G'(u) = u \exp(-au^2/2)$$

在 $E\{(\mathbf{W}_i^T \mathbf{X})(\mathbf{W}_j^T \mathbf{X})\} = \delta_{ij} (i, j = 1, \dots, n)$ 条件

约束下, 使 $\sum_{i=1}^n J(\mathbf{W}_i)$ 最大化, 即使 $I(Y, \mathbf{W})$ 最小化, 分离出相应的各独立分量, 可得:

$$\mathbf{W}_{p+1} = \mathbf{W}_{p+1} - \sum_{j=1}^p \mathbf{W}_{p+1}^T \mathbf{C} \mathbf{W}_j \mathbf{W}_j^T \quad (7)$$

式中: $\mathbf{C} = E\{\mathbf{X}\mathbf{X}^T\}$ 是观测向量的协方差矩阵; \mathbf{X} 为已白化过的数据^[10]。

2 闪变的包络信号的检出

要对电压闪变信号进行分析, 首先要检出闪变的包络信号, 然后才能进行盲信号分离。

2.1 闪变的包络信号及检测方法

电压闪变能引起电网电压的波动, 电网电压信号可表示为:

$$V(t) = [A_0 + \sum_{m=1}^K A_m \sin(\omega_m t)] \cos(\omega_0 t) \quad (8)$$

式中: A_0 为工频基波电压的幅值; ω_0 为工频角频率; A_m 为构成闪变信号的谐波的幅值; ω_m 为构成闪变信号的谐波的角频率。

则闪变信号可表示为:

$$v(t) = \sum_{m=1}^K A_m \sin(\omega_m t) \quad (9)$$

实际电压信号中, 50 Hz工频分量占绝大部分, 其他分量 (如暂态、谐波等) 均属于高频分量。因此, 在对信号进行盲源分离之前应先对信号进行预处理, 目的是将电压波动信号的频谱分别移到零频率和100 Hz附近, 以便进一步分离出电压闪变的包络信号。因为波动的工频正弦信号乘以同频同相位正弦信号后就得到了闪变的包络信号和直流量、工频的二倍频交流分量, 可以将此信号看作是闪变的包络信号和工频二倍频信号的线性组合, 则将此信号序列和它的延迟若干采样点序列作为盲源分离的输入信号, 构建一个输入信号矩阵, 然后就可以进行盲信号分离, 得到闪变的包络信号。

2.2 包络信号的幅值确定和频率的计算

由于分离后的闪变包络信号的幅值还不能准确确定, 这是盲源分离算法的一个缺点, 因此 必须在提取出包络信号后再对其进行幅值修正。经过ICA提取出的包络信号为

$$y(t) = kA(t) = k + ka(t) \quad (10)$$

其中, y 为提取信号 $y(t)$ 的均值: $k = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} y(t)$ 。

然后, 对其进行幅值确定, 求得闪变包络信号为 $a(t) = [y(t) - k]/k$ ^[11]。闪变包络信号的频率 $f = f_c/N$ 。式中 f_c 为采样频率, N 为信号两周期间峰值间隔。

3 实验验证

3.1 实验电路

为验证盲源分离理论在电压波动与闪变的检测中的正确性与有效性, 设计了闪变信号发生器、功放电路及采样电路, 按照IEC的规定直接模拟交流230 V供电, 接上白炽灯泡进行试验验证。

闪变信号发生器电路原理框图如图1所示, 由晶振电路、分频器电路、EPROM、D/A转换电路、低通滤波器电路等组成。其中晶振产生4 MHz方波, 由分频器分频给EPROM存储器, 做其地址信号, 存储器中储存着工频载波及调幅波的波形数据, 为提高精度, 数据为12位二进制数, 由D/A转换电路将

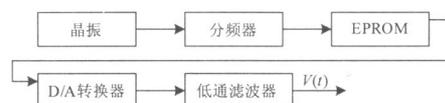


图1 闪变信号发生器电路原理框图

Fig.1 Block diagram of voltage flicker generator

数字量变为模拟波形,再由低通滤波器滤波,输出光滑、连续的信号波形。

由信号发生器输出的信号还不能直接带载,必须经功放电路进行电压和电流放大。输出电压为30 V、电流为2 A的功率信号,经输出变压器变换产生230 V市电,可以接白炽灯泡进行试验。电路原理框图如图2所示。进行电压闪变检测时,将一只输入为250 V、输出为5 V、线性度为0.05%的电压互感器与负载并联,将输出信号接入数据采集卡,进行采样和计算。采集卡用NI公司的PCI1716,具有16位分辨率,输入电压范围±5V,采样频率为2 400 Hz。

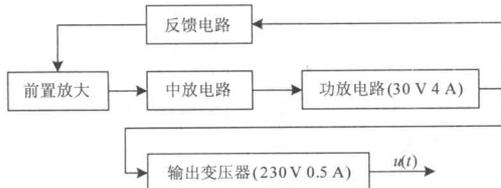


图2 功放电路原理框图 Fig.2 Block diagram of power amplifier circuit

3.2 实验结果

3.2.1 单一频率的闪变信号

设供电电压中含有一个频率为5 Hz、幅度为11.5 V的调幅波信号造成闪变,信号发生器的输出波形、盲源分离后的波形及经幅值确定后的波形如图3所示。若将交流230 V幅值归一化,则11.5 V相当于0.05。图中纵坐标为相对幅值,横坐标为采样点。u为信号发生器发出的电压闪变信号,a1为调幅波波形,a2为盲源分离后的调幅波波形,可以看出幅值发生改变,a3为经幅值确定后的调幅波波形,与a1完全相同。经计算a3幅值为11.452 V,频率为5.000 Hz。

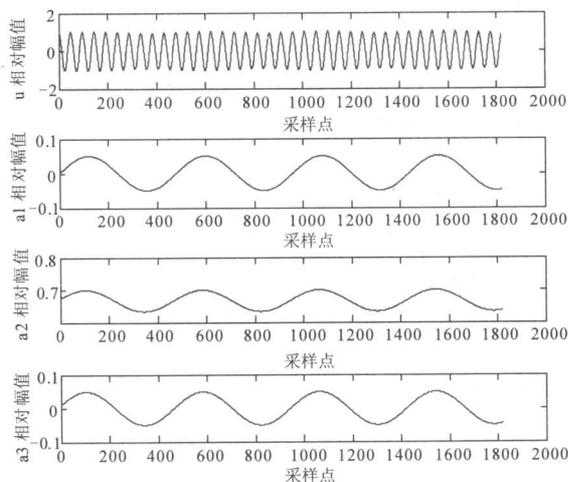


图3 单一频率的闪变波形及包络波形 Fig.3 Voltage flicker curve and envelope curve of single frequency

3.2.2 多频率合成的闪变信号

设调幅波信号由三个相对幅值分别为0.100 0、0.033 3、0.020 0,频率分别为5 Hz、15 Hz、25 Hz,闪变信号u、闪变包络a1、盲源分离信号a2及幅值确定后的波形a3如图4所示。将a1和a3比较可以看出波形一致。

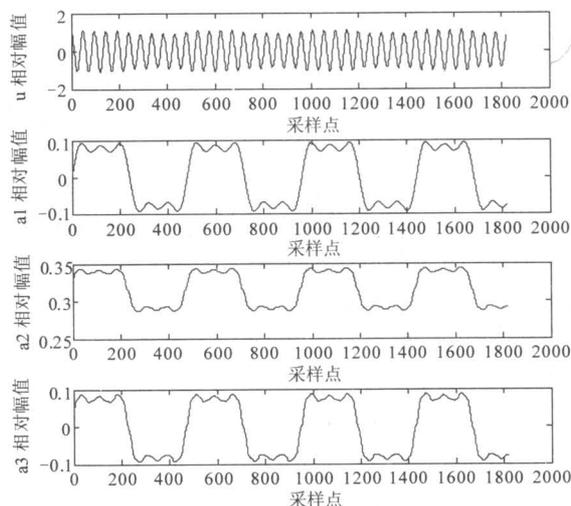


图4 多频率合成的闪变波形及包络波形 Fig.4 Voltage flicker curve and envelope curve of multi-frequency

3.2.3 短时瞬态闪变的检测

依然采用上例中的闪变包络信号,只是闪变发生的时间设为0.200~0.400 s之间,其余时间为正常工频信号。短时瞬态闪变信号及闪变包络信号波形如图5所示。经计算闪变的发生时间为0.205~0.406 s间,结果与实际信号不同,原因是盲源分离后,信号的相位发生变化,计算过程也对准确度造成影响。

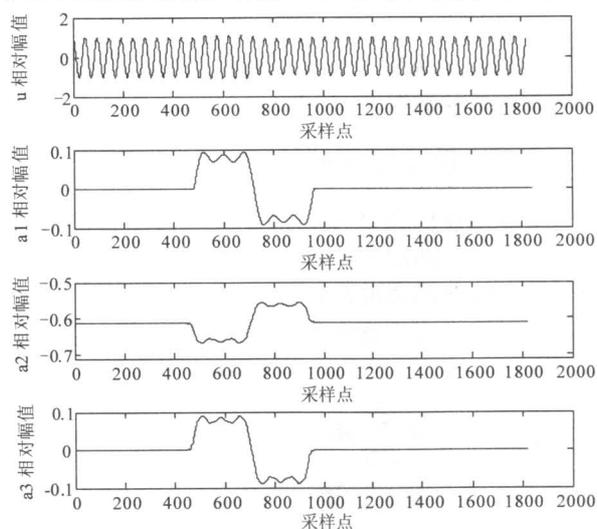


图5 短时瞬态闪变波形及闪变包络波形 Fig.5 Transient flicker curve and envelope curve

3.2.4 与FFT法测量误差的比较

分别将频率和相对幅值分别如表1所示的调幅波信号加在实验电路中, 230 V为1。用FFT加Hanning窗分析法和本文的盲源分离法分别测量, FFT的采样频率为200 Hz, 采样点数为256。频率的测量结果和相对误差如表2所示; 幅值的测量结果和相对误差如表3所示。

表1 频率和相对幅值设定值

Tab.1 Settings of amplitude and frequency

| 频率/Hz | 5.5 | 9.5 | 11.5 | 15.0 | 25.0 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 幅值/% | 0.180 | 0.127 | 0.148 | 0.216 | 0.521 |

表2 频率测量结果

Tab.2 Results of frequency

| 设定值/Hz | FFT法 | 相对误差/% | 盲源分离法 | 相对误差/% |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| 5.5 | 5.469 | -0.564 | 5.517 | 0.309 |
| 9.5 | 9.375 | -1.316 | 9.524 | 0.253 |
| 11.5 | 11.328 | -1.496 | 11.520 | 0.174 |
| 15.0 | 14.844 | -1.040 | 15.000 | 0.000 |
| 25.0 | 25.000 | 0.000 | 25.000 | 0.000 |

表3 相对幅值测量结果

Tab.3 Results of relative amplitude

| 设定值/% | FFT法 | 相对误差/% | 盲源分离法 | 相对误差/% |
|--------|-------|---------|-------|--------|
| 0.180 | 0.179 | -0.556 | 0.179 | -0.556 |
| 0.127 | 0.100 | -21.260 | 0.124 | -2.362 |
| 0.148 | 0.133 | -10.135 | 0.145 | -2.027 |
| 0.216 | 0.195 | -9.722 | 0.202 | -6.481 |
| 0.5210 | 0.521 | 0.000 | 0.514 | -1.344 |

从表2和表3的测量结果可以看出, ICA法总的测量精度要优于加窗FFT法, 特别是对非整次调幅波的测量精度要大大高于加窗FFT法, 且不存在频谱混叠和泄漏。

4 结论

提出基于最小化互信息准则的盲源分离方法进行电压闪变信号包络的检测, 通过计算得到闪变准确的幅值和频率, 此方法对单频闪变、多频闪变等平稳电压闪变和短时瞬变闪变的包络信号能准确、有效地检测出来, 是进行电压闪变检测和电能质量管理的有效方法。

参考文献

[1] Daniele Gallo, Carmine Landi, Nicola Pasquino. An instrument for objective measurement of light flicker[J]. Measurement, 2008 (41): 334-340.
 [2] 杨海霞, 王永宏, 曾丰. 基于AOK-TFR和TLS-ESPRIT的电压闪变参数提取方法[J]. 电力系统保护与控制,

2009, 37 (16): 29-34.
 YANG Hai-xia, WANG Yong-hong, ZENG Feng. Extracting the parameter of voltage flicker based on AOK-TFR and TLS-ESPRIT[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (16): 29-34.
 [3] Elnady Amr, Salama MMA. Mitigation of the voltage fluctuations using an efficient disturbance extraction technique[J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77 (3): 266-275.
 [4] 蒋春芳, 刘敏. 基于双插值FFT算法的间谐波分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (3): 11-14.
 JIANG Chun-fang, LIU Min. Inter-harmonics analysis based on double interpolation FFT algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38 (3): 11-14.
 [5] 陈详训. 实时跟踪电压闪变幅度的移动不变小波分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (10): 1-7.
 CHEN Xiang-xun. A shift-invariant wavelet-based method for tracking voltage flicker level[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (10): 1-7.
 [6] 周文晖, 李青, 周兆经. 采用小波多分辨率信号分解的电能质量检测[J]. 电工技术学报, 2001, 16(6): 81-84.
 ZHOU Wen-hui, LI Qing, ZHOU Zhao-jing. Power quality detecting using wavelet multiresolution signa decomposition[J]. Transactions of China Electro-Technical Society, 2001, 16 (6): 81-84.
 [7] 吴昊, 戴本祁, 居继涛. 一种电压闪变实时检测的新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (8): 30-33.
 WU Hao, DAI Ben-qi, JU Ji-tao. A novel real-time detection of voltage flicker[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (8): 30-33.
 [8] James C J, Lowe D. Extracting multisource brain activity from a single electromagnetic channel[J]. Artificial Intelligence in Medicine, 2003, 28 (6): 89-104.
 [9] Hyvarinen A, Karhunen J, Oja E. Independent component analysis[M]. NewYork: John Wiley and Sons, 2001.
 [10] Aapo Hyvarinen. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1999, 10 (3): 626-635.
 [11] 刘阳, 杨洪耕. 基于独立分量分析的电压闪变检测方法[J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (11): 34-37.
 LIU Yang, YANG Hong-geng. Voltage flicker detection based on independent component analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27 (11): 34-37.

收稿日期: 2010-04-21; 修回日期: 2010-06-17

作者简介:

国添栋 (1967-), 男, 博士研究生, 从事数字信号处理、电工测量、自动控制的的研究工作; E-mail: gtd8522@sina.com

王 祁 (1944-), 男, 教授, 博士生导师, 从事传感器技术及应用、自动化测量技术、数字信号处理等的研究工作。