

基于独立分量分析的电压闪变检测方法

刘 阳^{1,2}, 杨洪耕¹

(1. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065;

2. 四川电力建设管理公司, 四川 成都 610021)

摘要:独立分量分析利用信号的高阶统计量快速准确地实现信号的分离和恢复。提出利用独立分量分析和同步滤波相结合的电压闪变检测方法。首先,采用同步解调的方法将包络信号和工频电压相乘的形式转变为包络信号和中心频率为 100 Hz 的双边带调幅信号的线性组合;然后依据负熵最大化的独立性准则和基于固定点的 Fast-ICA 算法进行盲信号分离;对分离得到的包络信号进行幅值修正,实现真实信号的估计。仿真结果表明该算法能准确分离平稳和非平稳的电压闪变信号的包络信号,且对幅值和频率的检测精度高。

关键词:电能质量;电压波动和闪变;独立分量分析(ICA);盲信号分离

中图分类号: TM 761; TM 92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2007)11-0034-04

0 引言

冲击性功率的电力负荷设备,如冶炼电弧炉、轧钢机、电弧焊机等在运行过程中常伴随着有功电能和无功电能之间的变化而产生波动,造成电网供电系统电压的波动与闪变^[1-2]。研究电压波动与闪变;积极采取措施以保证电能质量已成为当前供用电的一项重要而紧迫的任务。

电网电压中波动信号(包络信号)的检出方法是电压波动与闪变测量中的关键技术之一,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^[3-11]。

由于独立分量分析是依据信号的高阶统计量对信号实现分离,且不存在频谱混叠的问题,因此提出一种基于独立分量分析的电压波动信号(包络信号)检测算法,用来分离电压闪变信号的包络信号。首先,构造一个与基波电压同频、同相位的同步电压与发生闪变的电网电压相乘,就可以得到待检测的电压闪变的包络信号和中心频率为 100 Hz 的双边带调幅信号的线性组合,然后利用盲信号分离算法代替传统的滤波器提取出闪变的包络信号。分离出闪变包络信号后,可以很容易地按选定的闪变标准计算有关参数。

1 独立分量分析(ICA)原理

1.1 独立分量分析

独立分量分析 ICA (Independent Component Analysis) 是近年来发展起来的一种非常有效的盲源分离技术^[12]。ICA 处理的对象是一组相互统计独立的信号源经线性组合而产生的混合信号,其目的是从混合信号中提取出各个独立的信号分量。

设 $s_1(t)$ 、 $s_2(t)$ 是 2 个非高斯分布的独立源, $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 是 2 个观察信号, a_{ij} 是未知的模型系数,模型可描述为

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

或用矩阵形式描述为

$$X = A \cdot S \quad (2)$$

在独立源 S 和混合矩阵 A 都是未知的情况下,希望能寻找一分离矩阵 $W = A^{-1}$,从观测信号中进行源信号的分离,即

$$\hat{S} = A^{-1} \cdot X = W \cdot X \quad (3)$$

式中 $\hat{S}$ 为信号源 S 的估计值。

1.2 基于负熵最大化的 ICA 算法

由信息论理论可知^[13]:在所有等方差的随机变量中,高斯变量的熵最大。因而可以利用熵来度量非高斯性。为得到一种对高斯分布为零、总是非负的非高斯性的度量,常用熵的修正形式,即负熵。设 y_G 为 n 个高斯随机变量组成的随机矢量,与 y 有相同的均值和协方差阵,则 $J(y) = H_G(y) - H(y)$ 称为负熵。可见,负熵总是非负的。输出互信息可以用负熵表示为 $I(y) = J(y) - \sum_{i=1}^n J(y_i)$ 。最小化互信息相当于最大化负熵。因而基于最大化负熵的代价函数为

$$\Phi_{NM}(W) = -\log |\det W| - \sum_{i=1}^n J(y_i) + H_G(y) - H(x) \quad (4)$$

基于负熵最大化的学习规则为

$$\Delta W \propto [(W^T)^{-1} - \xi(y)x^T] W^T W = (I - \xi(y)y^T) W \quad (5)$$

其中, $\xi(y) = -\frac{\partial}{\partial W} \sum_{i=1}^n J(y_i)$; I 为单位矩阵。

可见,负熵完全可以度量信号之间的独立性。Fast-ICA 算法由芬兰赫尔辛基大学 Hyvärinen 等人提出^[13]。该算法采用牛顿迭代算法,对 x 的大量采样点进行批处理,收敛速度快。在实际的负熵计算中,由于概率密度函数 $p(y)$ 未知,故一般由下式进行估算:

$$J(y) \propto [E\{G(y)\} - E\{G(v)\}]^2$$

其中, $\mathbf{v}$ 是与 $\mathbf{y}$ 具有相同均值和协方差矩阵的高斯变量。 G 为任意的非二次函数。

算法的目的就是通过选取 $\mathbf{W}$, 使得 $J(\mathbf{y})$ 最大, 即 $E\{G(\mathbf{y})\}$ 最大。对 $E\{G(\mathbf{y})\}=E\{G(\mathbf{W}^T \mathbf{x})\}$ 求极值。

$E'\{G(\mathbf{W}^T \mathbf{x})\}=E\{\mathbf{x}g(\mathbf{W}^T \mathbf{x})\}=0$, $g(\cdot)$ 是 $G(\cdot)$ 的导数。由牛顿迭代定理:

$$\mathbf{W}' = \mathbf{W} - \frac{E\{\mathbf{x}g(\mathbf{W}^T \mathbf{x})\}}{E\{\mathbf{x}^T \mathbf{x}g'(\mathbf{W}^T \mathbf{x})\}} = \mathbf{W} - \frac{E\{\mathbf{x}g(\mathbf{W}^T \mathbf{x})\}}{E\{g'(\mathbf{W}^T \mathbf{x})\}} \quad (6)$$

等号两边乘 $E\{g'(\mathbf{W}^T \mathbf{x})\}$, 令 $\mathbf{W}^+ = -E\{g'(\mathbf{W}^T \mathbf{x})\} \times \mathbf{W}$, 可得:

$$\mathbf{W}^+ = E\{\mathbf{x}g(\mathbf{W}^T \mathbf{x})\} - E\{g'(\mathbf{W}^T \mathbf{x})\} \cdot \mathbf{W} \quad (7)$$

进一步求出 $\mathbf{W}$ 的更新值 $\mathbf{W}^*$, $\mathbf{W}^* = \mathbf{W}^+ / \|\mathbf{W}^+\|$ 。如果不收敛, 则重复上述过程。上述算法只估计了一个独立分量。如果要估计 n 个独立分量, 需要使用 n 个列矢量 $\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \dots, \mathbf{W}_n$ 。

2 线性 ICA 模型的电压闪变包络信号提取

2.1 电压闪变数学模型

电压闪变是由电网电压波动引起的。电压闪变用调幅信号表示^[3]:

$$u(t) = A(t) \cos \omega t = \sqrt{2} U [1 + M \cdot a(t)] \cos \omega t \quad (8)$$

调制信号:

$$a(t) = \sum_h \frac{1}{h} \cos \omega_h t \quad (9)$$

式中 ω 为工频角频率; U 为电网电压额定值; M 为调频的幅度; $A(t)$ 为包络信号; $a(t)$ 为调制信号; ω_h 为调制信号的基波角频率; h 为谐波次数。

一般电压波动频率范围为 0.01~25 Hz, 电弧炉引起的电压波动频率集中在 1~14 Hz 范围内, 且各频率分量幅度大致与频率成反比, 调幅系数可达 10 %^[3]。

2.2 电压闪变信号的包络检波原理

电压闪变的包络信号 $A(t)$ 携带着电压闪变的幅度和频率信息。为了解调出闪变包络信号, 现在构造一个与基波电压同频率同相位的同步电压 $u_r(t)$ 乘以电压闪变信号 $u(t)$, 得到乘积信号 $x(t)$, 采样得到的离散信号为 $x(j)$ (j 为采样点数)。经过这样处理后将电压闪变信号分解为包络信号和中心频率为 100 Hz 的双边带调幅信号线性组合, 从而可利用 ICA 分离出电压闪变的包络信号。

取 $t=\xi$, 时刻, 其变换为

$$\begin{aligned} x(\xi) &= u(\xi) \cdot u_r(\xi) = \\ &= A(\xi) \cos(\omega \xi + \Phi_0) \cos(\omega \xi + \Phi_0) = \\ &= \frac{1}{2} A(\xi) + \frac{1}{2} A(\xi) \cos[2(\omega \xi + \Phi_0)] = \\ &= a_1 s_1(\xi) + a_2 s_2(\xi) \end{aligned} \quad (10)$$

通过以上方法对采样信号进行变换后, 就可以把电压闪变的包络信号分离出来。图 1 为电压闪变检波原理图。

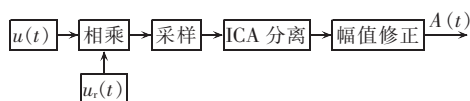


图 1 电压闪变信号检波原理

Fig.1 Demodulation of voltage flicker

2.3 ICA 算法多输入通道信号的构造

根据前面对 ICA 问题的描述可知, ICA 能有效地估计多路线性混合信号的混合矩阵系数^[14]。显然, 通过上面的变换后得到式(10)是一个线性组合而产生的混合信号, 但是该问题不能直接用 ICA 的方法进行求解, 因为 ICA 需要至少 2 路观测信号。对此, 根据得到的这一路观测信号来构建多路观测信号, 以此作为多路输入信号来进行 ICA 分离。

提出通过构造一个嵌入矩阵作为多通道输入信号^[14], 在这个矩阵中包含了所需要的信号的信息和特征, 以此获取这一路观测信号中的足够多的潜在信息。其核心是: 设存在一个动态系统, 是由 n 个信号源线性混合而成, 设该系统自由度为 D , 由文献^[15]的理论可知, 可以通过观测所得时间序列重构一个新的状态空间, 以此获得未知动态系统的状态。一个常用的构造嵌入矩阵的方法就是从一维的观测数据 $\mathbf{x}(t)$ 中产生一系列延时向量。因此, 有 t 时刻动态系统的状态为

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

其中, τ 为时间延迟因子, m 为嵌入矩阵维数。

根据文献^[15]可知欧氏空间中嵌入矩阵维数 $\hat{m}$ 至少要大于 D , 表示为: $\hat{m} > 2D+1$ 。而在具体运用中 m 要远大于理论给定值 $\hat{m}$, 因为实际运用中存在大量的噪声, 而且矩阵维数 m 必须足够大以获取足够的信息内容。因此, 包含有一系列延迟向量的嵌入矩阵表示为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_t & x_{t+\tau} & \cdots & x_{t+N\tau} \\ x_{t+\tau} & x_{t+2\tau} & \cdots & x_{t+(N+1)\tau} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{t+(m-1)\tau} & x_{t+m\tau} & \cdots & x_{t+(m+N-1)\tau} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{X}_m \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中, $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_m$ 为构造的 m 路输入信号。

针对式(10)的实际情况, 观测信号 $\mathbf{x}(t)$ 可以看成是由 $s_1(t), s_2(t)$ 2 个非高斯分布独立源构成的线性组合, 所以该系统的自由度为 2, 在不考虑噪声的情况下, 需要构造产生 4 路输入信号。在该试验仿真中系统采样频率为 1 600 Hz, 为了充分获取这一路观测信号中的足够多的内在信息, 对这一路观测信号延迟 8~10 个采样点, 构造出 4 路观测信号。

2.4 包络信号的幅值修正

盲信号分离存在 2 种不确定性或模糊性: 分离后信号顺序排列和复振幅(幅值和初始相位)的不确定性^[12]。盲信号分离的不确定性是由于混合矩阵 $\mathbf{A}$ 的非完全辨识引起的。在电压闪变的检测中, 幅值的不确定性对闪变各个频率成分的幅值结果会产生较大影响。因此, 必须在 ICA 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

$$y(t) = kA(t) = k + ka(t) \quad (12)$$

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

然后, 对其进行幅值修正求得调制信号 $a(t)$ 为

$$a(t) = [y(t) - k] / k \quad (13)$$

3 电压闪变信号检测的仿真试验结果

3.1 单一频率的闪变

为验证本文算法的性能,对含有的单一频率的闪变信号(频率为 7.5 Hz,幅值为 0.066 7 V)在采样频率为 1 600 Hz 的情况下,在 Matlab7.0.1 中进行仿真试验。由式(8)所示的闪变数学模型可以得到仿真信号:

$$u(t) = A[1 + M \sin(2\pi ft)] \cos \omega t \quad (14)$$

式中 $A = 1 \text{ V}$; $M = 0.066 7$; $f = 7.5 \text{ Hz}$; $\omega = 100 \pi \text{ rad/s}$ 。

图 2 为仿真试验输出信号波形, $u(t)$ 为发电电压闪变的电网电压, $A(t)$ 为试验设置的电压闪变信号, $y(t)$ 为 ICA 的闪变提取的包络信号, $a(t)$ 为修正后的调制信号, j 为采样点数。

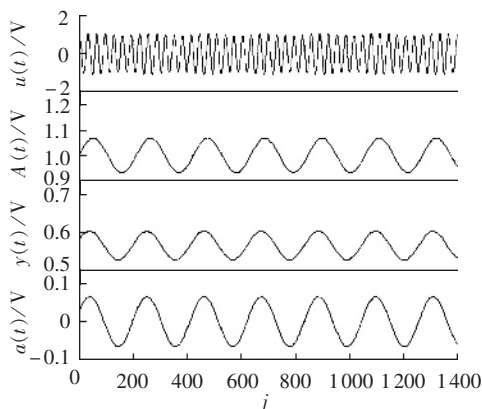


图 2 单频闪变分析

Fig.2 Analysis of flicker with one frequency

3.2 多种频率的闪变

在前面仿真的基础上,调制信号由单一调制变为谐波调制,信号中含有基波、三次谐波、五次谐波。设电压闪变信号为

$$u(t) = A[1 + M \cdot a(t)] \cos \omega t \quad (15)$$

$$a(t) = \sum_h \frac{1}{h} \cos h \omega_f t \quad (16)$$

式中 $\omega = 100 \pi \text{ rad/s}$; $\omega_f = 6 \pi \text{ rad/s}$; $A = 1 \text{ V}$; $M = 0.1$; $h = 1, 3, 5$ 。

对比图 3 中的试验设置的电压闪变信号 $A(t)$ 和经 ICA 分离后的修正输出信号 $a(t)$,可以看出由 ICA 分离求得的包络信号和理论值基本一致。

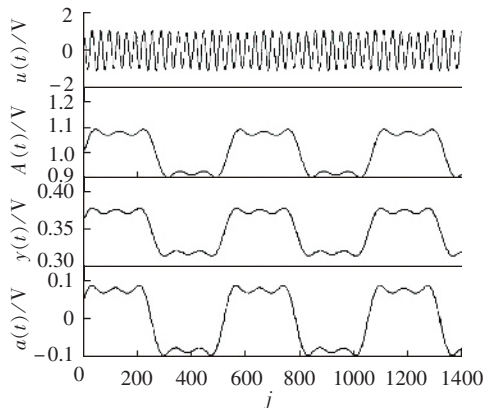


图 3 多种频率成分的闪变分析

Fig.3 Analysis of flicker with three frequencies

3.3 多种频率的短时暂态闪变

设短时暂态电压闪变信号为

$$u(t) = A[1 + g(t) \cdot Ma(t)] \cos \omega t \quad (17)$$

$$a(t) = \sum_h \frac{1}{h} \cos h \omega_f t \quad (18)$$

式中 时间范围为 0.196~0.796 s, $g(t) = 1$; $A = 1 \text{ V}$; $\omega = 100 \pi \text{ rad/s}$; $\omega_f = 6 \pi \text{ rad/s}$; $M = 0.1$; $h = 1, 3, 5$ 。

运用 ICA 算法对电压信号进行时频分析的结果如图 4 所示。

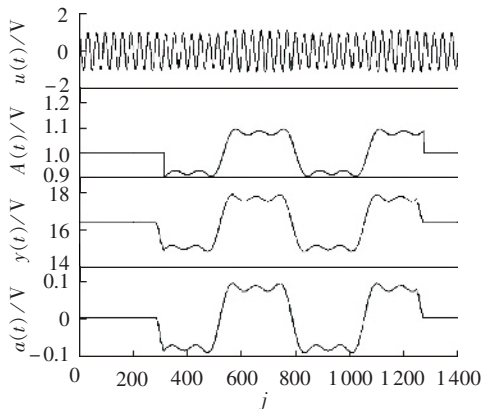


图 4 短时暂态电压闪变分析

Fig.4 Analysis of transient flicker

由图 2~4 的结果分析可见,除 ICA 算法会对分离结果造成相移的影响,分离出的电压闪变包络波形与设置的闪变信号波形几乎相同。对图 4 输出信号的分析可知,短时暂态闪变信号设定闪变时间为 0.196~0.796 s,检测得到的时间为 0.189~0.788 s。这也是由于分离出的信号发生了相移,而影响了闪变发生终止时间的检测精度。

为更为严格地分析比较 ICA 算法求得的包络信号的准确性,采用一种高精度 FFT 算法^[16]对分离得到的包络信号进行频谱分析,结果如表 1 所示。

表 1 仿真信号参数及检测值

Tab.1 Parameters of simulative flicker and detected values

分析对象	频率/Hz		幅值/V	
	设定值	检测值	设定值	检测值
单一频率	7.500 0	7.500 0	0.066 7	0.066 5
	3.000 0	3.000 0	0.100 0	0.099 9
	9.000 0	9.000 0	0.033 3	0.033 2
多种频率	15.000	15.000	0.020 0	0.019 6
	3.000 0	3.000 0	0.100 0	0.099 7
	9.000 0	9.000 0	0.033 3	0.033 1
短时闪变	15.000	15.000	0.020 0	0.019 5

4 结论

提出了通过独立分量分析对电压闪变信号进行检测,然后对包络信号进行高精度 FFT 分析,进而得到较为准确的频率和幅值。通过仿真可以看出,对单一频率的闪变、多种频率成分的闪变等多种平稳电压闪变和短时暂态闪变的检测结果表明该方法能够准确、有效地检测出闪变信号的包络信号,也能较

为准确地检测出扰动发生和终止的时间。由于 ICA 算法对噪声敏感,在存在较大噪声的情况下,如何利用文中算法是下一步研究的课题。

参考文献:

- [1] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(四)——电压波动与闪变的测量分析[J]. 电力自动化设备, 2004,24(1):1-4.
YANG Hong-geng,XIAO Xian-yong,LIU Jun-yong. Issues and technology assessment on power quality. Part 4: measurement and analysis of voltage fluctuation and flicker[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004,24(1):1-4.
- [2] 赵刚,施围,林海雪. 闪变值计算方法的研究[J]. 电网技术, 2001,25(11):15-18.
ZHAO Gang,SHI Wei,LIN Hai-xue. A study on calculation of short term flicker severity[J]. Power System Technology, 2001, 25(11):15-18.
- [3] 白先红,潘文霞,史林军. 波动电压的检测方法与系数修正综述[J]. 电力自动化设备, 2003,23(5):75-78.
BAI Xian-hong,PAN Wen-xia,SHI Lin-jun. A survey on fluctuant voltage detection methods and coefficient modification [J]. Electric Power Automation Equipment, 2003,23(5):75-78.
- [4] 高师湃,李群湛,贺建闽. 闪变测试系统研究[J]. 电力自动化设备, 2002,22(5):22-25.
GAO Shi-pai,LI Qun-zhan,HE Jian-min. Study on voltage flicker measurement systems [J]. Electric Power Automation Equipment, 2002,22(5):22-25.
- [5] SOLIMAN S A,EL-HAWARY M E. Measurements of power system voltage and flicker levels for power quality analysis: a static LAV state estimation based algorithm[J]. Int J Electric Power Energy Syst, 2000,22(8):447-450.
- [6] GIRGIS A A,MAKRAM E B. Measurement of voltage flicker magnitude and frequency using a Kalman filtering based approach[C]//Electrical and Computer Engineering, 1996. Edmonton, Canada: IEEE, 1996:659-662.
- [7] 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 detection using wavelet multiresolution signal decomposition [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001,16(6):81-84.
- [8] 陈祥训. 采用小波技术的几种电能质量扰动的测量与分类方法[J]. 中国电机工程学报, 2002,22(10):1-6.
CHEN Xiang-xun. Wavelet-based measurements and classification of short duration power quality disturbances[J]. Proceedings of the CSEE, 2002,22(10):1-6.
- [9] ABDEI-GALIL T K,EL-SAADANY E F,SALAMA M M A. Energy operator for on-line tracking of voltage flicker levels [C]//Proc Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. New York, USA: IEEE, 2002:1153-1157.
- [10] MAREI M I,ABDEL-GALIL T K,EL-SAADANY E F, et al. Hilbert transform based control algorithm of the DG interface for voltage flicker mitigation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005,20(2):1129-1133.
- [11] 李天云,赵妍,韩永强,等. Hilbert-Huang 变换方法在谐波和电压闪变检测中的应用[J]. 电网技术, 2005,29(2):73-77.
LI Tian-yun,ZHAO Yan,HAN Yong-qiang, et al. Application of Hilbert-Huang transform method in detection of harmonic and voltage flicker[J]. Power System Technology, 2005,29(2):73-77.
- [12] 杨福生,洪波. 独立分量分析的原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.
- [13] Hyvärinen A. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1999,10(3):626-634.
- [14] JAMES C J,LOWE D. Extracting multisource brain activity from a single electromagnetic channel[J]. Artificial Intelligence in Medicine, 2003,28(2):89-104.
- [15] TAKENS F. Detecting strange attractors in turbulence[C]//Dynamical Systems and Turbulence, Warwick, 1980. Berlin: Springer, 1981:366-381.
- [16] 张伏生,耿中行,葛耀中. 电力系统谐波分析的高精度 FFT 算法[J]. 中国电机工程学报, 1999,19(3):63-66.
ZHANG Fu-sheng,GENG Zhong-xing,GE Yao-zhong. FFT algorithm with high accuracy for harmonic analysis in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1999,19(3):63-66.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

刘 阳(1980-),男,四川达州人,硕士研究生,研究方向为电能质量和电压闪变的检测与分析(E-mail: milan_ly928@sina.com);

杨洪耕(1949-),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,长期从事谐波模型与分析方法、电能质量分析与控制技术等方面的教学与科研工作。

Voltage flicker detection based on independent component analysis

LIU Yang^{1,2}, YANG Hong-geng¹

(1. School of Electrical and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Sichuan Electric Construction Management Corporation, Chengdu 610021, China)

Abstract: ICA (Independent Component Analysis) separates and restores signal by using the high-order statistics of that signal. A method of voltage flicker detection using synchronous filtering and ICA is proposed. The multiplicative result of envelope signal and power voltage is transformed into the signal combination of envelope signal and DSB (Double Side Band) modulated signal with 100 Hz as its central frequency. With fixed-point Fast-ICA algorithm, BSS (Blind Source Separation) is then carried out according to the independency principle of maximizing Negentropy. The amplitude of the separated envelop signal is revised to obtain the estimation of real signal. Simulation results show that, this method separates the envelop signal from steady or unsteady voltage flicker with higher precision of frequency and amplitude detection.

Key words: power quality; voltage fluctuation and flicker; independent component analysis; blind