

DOI: 10.7667/PSPC161316

# 基于引入松弛因子的改进式单通道 FastICA 的 间谐波检测方法

艾永乐<sup>1</sup>, 张王飞<sup>1</sup>, 闫玲玲<sup>2</sup>, 刘中印<sup>3</sup>

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000;  
3. 国网河南周口供电公司, 河南 周口 466000)

**摘要:** 为改善高阶 FastICA 间谐波检测算法对初值敏感性的问题, 提出一种基于松弛因子的改进式单通道 FastICA 间谐波检测方法。首先, 对单通道信号延迟处理构造观测信号矩阵, 采用主分量分析(PCA)对其降维处理。其次, 利用最速下降法求得松弛因子, 并对迭代初值进行修正。然后, 通过对称正交化 FastICA 算法对观测信号进行分离, 得到基波、谐波和间谐波的频率, 借助最小二乘法估计出相应的幅值和相位。仿真结果表明, 该算法不仅能够较精准地检测到间谐波及其相关参数, 同时降低了高阶算法对初值的敏感性。

**关键词:** 间谐波; 松弛因子; 改进式快速独立分离法; 对称正交化; 最小二乘法

## Inter-harmonic detection method based on improved single channel FastICA with relaxation factor

AI Yongle<sup>1</sup>, ZHANG Wangfei<sup>1</sup>, YAN Lingling<sup>2</sup>, LIU Zhongyin<sup>3</sup>

(1. Dept of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;  
2. XJ Electric CO., LTD., Xuchang 461000, China; 3. State Grid Zhoukou Power Supply Company, Zhoukou 466000, China)

**Abstract:** To solve the initial values impact of the inter-harmonic detection based on high order FastICA, an inter-harmonic detection method based on improved single channel FastICA with relaxation factor is proposed. Firstly, a multi-channel signal observed is formed by cycle-spinning of single channel mixed single, then dimensionality of the multi-channel signal is reduced by principal component analysis. Secondly, by using the relaxation factor which is calculated with the steepest descent method to modify the iterative initial value. Lastly, the symmetry orthogonalization FastICA algorithm is applied to get the frequency of inter-harmonic, and the inter-harmonic amplitude and phase is accurately obtained by using the least squares method. Simulation results show that the algorithm can accurately obtain the inter-harmonic frequency as well as the corresponding harmonic parameters, and also reduce the sensitivity to initial value of the higher order algorithm.

**Key words:** inter-harmonic; relaxation factor; improved FastICA; symmetrical orthogonalization; least square method

## 0 引言

诸如整流器、逆变器等电力电子器件的大量投入使用以及多种不同电源的运行, 使得电网中的谐波源由传统的负载方到供电方<sup>[1]</sup>, 造成电网中的谐波源和谐波含量随之增加, 对电网系统运行的可靠性以及电气设备的利用率造成很大的影响。谐波治理显得尤为重要。谐波检测作为治理谐波的重要前提, 高效的谐波检测方法为谐波治理提供良好的依据。

目前常用的谐波检测方法中, 快速傅立叶变换

(FFT)应用最为广泛, 但存在一定的频谱泄漏和栅栏效应<sup>[2]</sup>。小波变换(WT)的计算量相对较大, 且不同尺度的小波函数在频域中存在相互干扰<sup>[3]</sup>, 同时, 由于间谐波本身特点, 使得其频率与谐波相近式很难精确检测。经验模态分解(EMD)能够将采集到的电力信号分解成不同尺度的模态函数, 但存在模态混叠现象<sup>[4]</sup>。

独立分量法(ICA)是最常用的盲源分离算法之一, 近年来被应用到谐波检测当中。FastICA 是独立分量法中重要的优化算法<sup>[5-6]</sup>, 改进的 FastICA 算法具有高阶收敛速度, 但对初始值较为敏感<sup>[7]</sup>。同

时, 实际应用中, 通常采集到的是单道信号。基于上述问题, 在总结前人的基础上, 提出一种基于引入松弛因子的改进式单通道 FastICA 的间谐波检测方法。

## 1 快速独立分量法

### 1.1 FastICA 算法原理

ICA<sup>[8]</sup>是指假设给定的一组随机变量的观测信号  $\mathbf{x} = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))^T$  是由一组独立成分  $\mathbf{s} = (s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t))^T$  线性混合而成, 其中  $t$  是采样时间。即

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

式中,  $\mathbf{A}$  为混合系数矩阵。在混合系数矩阵和源信号未知的情况下, 利用 ICA 算法寻找一个分离矩阵  $\mathbf{W} = \mathbf{A}^{-1}$ , 得到源信号  $\mathbf{s}$ , 即

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W}\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{x} = \mathbf{s} \quad (2)$$

利用 ICA 对信号分离之前, 需要寻找一个独立判据来度量分离信号的非高斯性。本文利用负熵作为判据标准。首先需要随机变量的概率密度函数进行估计, 而实际中源信号的概率分布并不知道。在此, 通过对高阶累积量的近似估计, 近似将负熵的表达式看作

$$J(y) \propto [E\{G(y)\}] - [E\{G(y_{\text{gauss}})\}]^2 \quad (3)$$

式中:  $G(y)$  可以为任意非二次函数;  $E\{G(y)\}$  为期望。在此取  $G(y) = \frac{1}{a} \log \cosh ay$ 。当  $J(y)$  达到极大值时, 可认为各独立分量分离完成。同时对  $E\{G(y)\} = E\{G(\mathbf{w}^T \mathbf{x})\}$  求取极值, 得到 FastICA 算法的迭代公式为

$$\mathbf{w} = E\{\mathbf{x}g(\mathbf{w}^T \mathbf{x})\} - E\{\mathbf{x}g'(\mathbf{w}^T \mathbf{x})\}\mathbf{w} \quad (4)$$

$$\mathbf{w}^* = \mathbf{w} / \|\mathbf{w}\| \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{w}$  是分离矩阵  $\mathbf{W}$  的其中一列, 对其做归一化处理, 得  $\mathbf{w}^*$ 。如果分离得到的独立成分不收敛, 则继续上述过程, 直至提取的独立成分收敛。

### 1.2 基于对称正交化的 FastICA 算法

通过上述方法, 仅估计出其中一个独立成分。若需要对多个独立成分进行估计, 则需将该算法重复多次, 以便得到更多的独立成分<sup>[9]</sup>。ICA 算法中, 要求解向量是正交的, 因此每估计出一个独立成分, 都需要对其进行正交化处理。常用的正交化方法有: 渐进正交化、对称正交化。渐进正交化通过对独立成分逐个正交化, 使得先估计出的独立成分中的误差累积到后面估计的独立成分中, 造成误差放大; 而对称正交化是对所有独立成分并行正交化。因此,

本文选用对称正交化, 该方法不仅可以消除前者在正交过程中造成的误差累积, 还可以提高迭代速率。基于对称正交化 FastICA 算法如下:

1) 对观测信号进行数据预处理, 即中心化、白化。

2) 选择要估计的独立成分的个数  $n$ 。

3) 随机生成初始值全部的  $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_n]$ , 初始化, 并用下面第 5) 步的方法对分离矩阵  $\mathbf{W}$  进行正交化。

4) 对每个  $i = 1, 2, \dots, n$ , 按式(4)、式(5)更新  $\mathbf{w}_i$ , 其中  $g(y) = dG(y)/dt$ ,  $g'(y) = dg(y)/dt$ 。

5) 对矩阵  $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_n]^T$  对称正交化处理:  $\mathbf{W} \leftarrow (\mathbf{W}\mathbf{W}^T)^{-1/2}\mathbf{W}$ 。

6) 如若不收敛, 返回步骤 4)。

### 1.3 改进的 FastICA 算法

FastICA 算法的迭代公式是通过牛顿迭代法求得, 满足二阶收敛。对于处理一般数据而言, 可以满足速度要求, 但处理工程上数据量很大或是对实时性要求比较严格的数据来说, 二阶收敛显然不能满足情况。通过对牛顿迭代算法的改进, 得出满足三阶收敛的 FastICA 算法。

$$\mathbf{w}^1 = E\{\mathbf{x}g(\mathbf{w}^T \mathbf{x})\} - 2E\{g'(\mathbf{w}^T \mathbf{x})\}\mathbf{w} \quad (6)$$

$$\mathbf{w}^2 = E\{\mathbf{x}g(\mathbf{w}^T \mathbf{x})\} - E\{g'(\mathbf{w}^T \mathbf{x})\}\mathbf{w} \quad (7)$$

$$\mathbf{w}^\# = \mathbf{w}^2 / \|\mathbf{w}^2\| \quad (7)$$

三阶 FastICA 算法收敛速度快, 但对初始值的选择比较敏感。又因 FastICA 算法中的初始值是系统随机生成的, 且不同的初始值会影响算法的性能和收敛效果。因此, 通过最速下降法, 引入一种松弛因子, 对迭代初值进行修正, 并找出合适的初始值, 从而减少初始值对三阶 FastICA 算法的影响<sup>[10]</sup>。最速下降法是以负梯度方向作为下降方向的优化算法, 又称梯度法。其计算步骤如下:

1) 随机生成一初始化矩阵, 并将其变为正交阵  $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_n]$ 。

2) 计算  $E\{\mathbf{x}g(\mathbf{W}^T \mathbf{x})\}$  在  $\mathbf{w}$  处的梯度值。

$$\lambda = - \begin{bmatrix} \frac{\partial E\{\mathbf{x}g(\mathbf{W}^T \mathbf{x})\}}{\partial w_1} & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & \dots & \frac{\partial E\{\mathbf{x}g(\mathbf{W}^T \mathbf{x})\}}{\partial w_n} \end{bmatrix}^{-1} \quad (8)$$

式中,  $\frac{\partial E\{\mathbf{x}g(\mathbf{W}^T \mathbf{x})\}}{\partial w_i} = E\{x_i^2 g'(\mathbf{W}^T \mathbf{x})\}$ , 函数值在负梯度的方向下降比较快, 故将梯度值作为松弛因子代入  $\mathbf{W}' = \mathbf{W} + \lambda E\{\mathbf{x}g(\mathbf{W}^T \mathbf{x})\}$  中。

3) 判断敛散性, 若收敛则取  $W_0 = W'$ ; 反之, 返回步骤 2) 继续。

## 2 观测信号的处理

### 2.1 观测信号的建立

实际的谐波检测一般只能采集到一路观测信号, 其中源信号未知。ICA 算法模型观测信号和源信号个数相同。为满足 ICA 算法模型要求, 通过对单通道信号循环平移构造虚拟信号<sup>[11]</sup>, 即

$$\mathbf{X}(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t+1) \\ \vdots \\ x(t+(n-1)) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中,  $n$  为观测信号的维数。

国家标准 GB/T14549—1993《电能质量 公用电网谐波》中规定, 谐波的测量次数一般为 2~19 次, 对于负荷变化快的谐波源一般不少于 30 次。在此选择构造 100 维观测信号。

### 2.2 观测信号的预处理

单通道信号循环平移得到的观测信号矩阵需要进一步, 确定信号中所含的谐波/间谐波个数, 从而修正观测信号的维数, 构造出满足 ICA 算法要求的观测信号矩阵。

本文采用主分量分析法(PCA)对观测信号矩阵预处理<sup>[12]</sup>, 相比于特征值分解(EVD)和奇异值分解(SVD)两种方法<sup>[13]</sup>, PCA 不仅可以对观测信号进行降维处理, 获取谐波/间谐波个数, 同时也降低了算法的复杂度。

首先, 对观测信号进行中心化处理, 得到零均值矩阵  $\mathbf{X}$ , 求得其协方差矩阵  $\mathbf{C}_X$ , 并计算协方差矩阵  $\mathbf{C}_X$  的特征值  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  和特征向量  $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_n$ 。

其次, 定义主分量贡献率为  $\eta = \lambda_i / \sum_{i=1}^n \lambda_i$ , 若前  $K$  个主分量的贡献率累积达到 98% 或以上, 即可选为特征信号。

综上可得前  $K$  个主分量  $p_1, p_2, \dots, p_k$ :

$$\mathbf{P} = [p_1, p_2, \dots, p_k]^T = \mathbf{E}^T \mathbf{X} \quad (10)$$

可近似认为其包含了输入数据的几乎全部信息, 其中  $\mathbf{E} = [e_1, e_2, \dots, e_k]^T$ 。

### 3 最小二乘确定幅值相位

在低信噪比的情况下, 该方法测得信号的幅值和相位存在一定误差<sup>[13-14]</sup>, 不满足谐波检测精度的

要求。本文借助最小二乘法, 对信号的幅值和相位进行估计, 以提高检测精度。对采样信号

$$x(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin(2\pi f_i t + \varphi_i) = \sum_{i=1}^n a_i \sin 2\pi f_i t + b_i \cos 2\pi f_i t \quad (11)$$

可以改写为

$$\tilde{\mathbf{X}} = \mathbf{H} \mathbf{R} \quad (12)$$

式中:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \sin 2\pi f_1 t_1 & \cos 2\pi f_1 t_1 & \cdots & \sin 2\pi f_k t_1 & \cos 2\pi f_k t_1 \\ \sin 2\pi f_1 t_2 & \cos 2\pi f_1 t_2 & \cdots & \sin 2\pi f_k t_2 & \cos 2\pi f_k t_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sin 2\pi f_1 t_N & \cos 2\pi f_1 t_N & \cdots & \sin 2\pi f_k t_N & \cos 2\pi f_k t_N \end{bmatrix}$$

是  $N \times 2k$  阶矩阵;  $\tilde{\mathbf{X}} = [x_1, x_2, \dots, x_N]$  是  $N$  维向量;  $\mathbf{R} = [a_1, b_1, \dots, a_k, b_k]^T$  是  $2k$  维向量。利用最小二乘法对式(12)中的  $\mathbf{R}$  进行估计处理。

$$\mathbf{R} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{X}} \quad (13)$$

式中,  $\tilde{\mathbf{X}}$  是采样信号。式(8)中的频率已由改进的 FastICA 确定, 并求得  $\mathbf{R}$  后, 即可得各频率成分的幅值和相位为

$$A_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2} \quad (14)$$

$$\varphi_i = \arctan \frac{b_i}{a_i} \quad (15)$$

综上, 基于引入松弛因子的改进式单通道 FastICA 的间谐波检测可归纳如下:

- 1) 根据式(6)对采集到的单通道信号进行处理, 得到多路观测信号矩阵  $\mathbf{X}(t)$ 。
- 2) 对观测信号矩阵  $\mathbf{X}(t)$  做预处理。
- 3) 利用本文提出的算法对预处理后的观测信号矩阵进行处理。
- 4) 通过最小二乘法对分离后得到的信号进行幅值和相位的估计。

## 4 实验仿真分析

根据间谐波的特点, 构造如下虚拟待测信号。

$$x(t) = 5 \sin(\omega t) + 2.1 \sin(0.8\omega t + \pi/6) + 1.5 \sin(3\omega t + \pi/4) + 0.9 \sin(4.8\omega t + \pi/9) + 0.4 \sin(5\omega t + \pi/3) + e(t) \quad (16)$$

式中, 基波频率为  $\omega = 50$  Hz。其中含有基波, 150 Hz、250 Hz 的谐波和 40 Hz、240 Hz 的间谐波,  $e(t)$  是 20 dB 的白噪声。采样频率为 1 kHz, 采样点数为 1000。

首先将虚拟待测信号循环平移构造出 100 道观测信号矩阵, 并对观测信号进行 PCA 预处理, 得主

成分  $P$ 。图 1 为单通道渐近正交化 FastICA 分离后的信号。图 2 为单通道对称正交化 FastICA 分离后的信号。图 3 为本文所提方法分离后的信号。

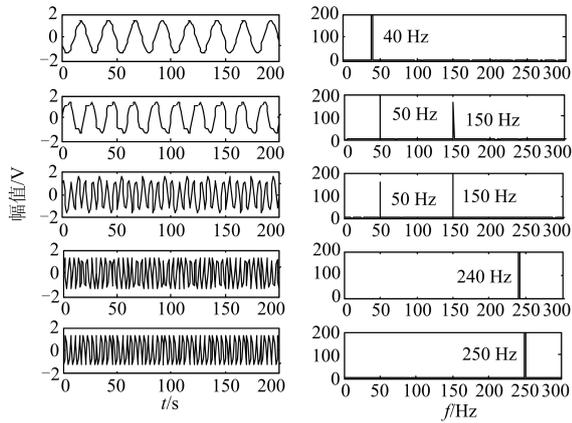


图 1 单通道渐近对称正交化 FastICA 分离后的信号

Fig. 1 Signals separated by FastICA based on serial orthogonalization

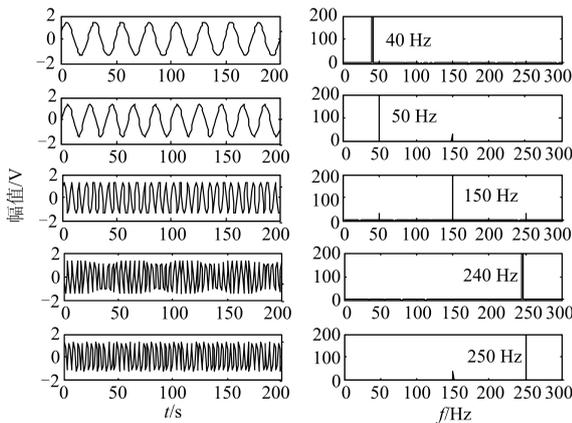


图 2 单通道对称正交化 FastICA 分离后的信号

Fig. 2 Signals separated by FastICA based on symmetrical orthogonalization

通过图 1、图 2 对比分析可知, 图 1 中在基波和三次谐波处存在明显的波形畸变。针对该方法在渐近式正交化过程中造成的误差累计采用对称正交化对虚拟待测信号进行处理, 如图 2。由图 2 可以看出, 畸变情况有所改变, 但仍存在少量的波形畸变。

图 3 为引入松弛因子的改进式单通道对称正交化 FastICA 算法对虚拟待测信号检测的结果。对比图 2 和图 3 可知, 波形畸变情况明显得到改善。

同时, 为验证本文所提算法对间谐波参数估计的准确性, 当信噪比为 10 dB 时, 对虚拟待测信号分别采用单通道对称正交化 FastICA 和本文所提算法对待测信号进行处理, 求得其频率、幅值和相位,

如表 1 所示。其中, 方法 1 为单通道对称正交化 FastICA, 方法 2 为本文所用算法。

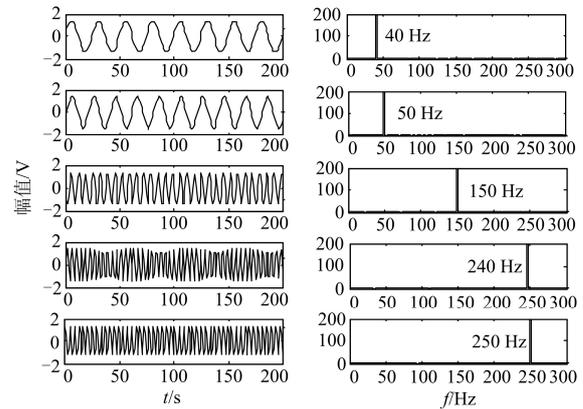


图 3 引入松弛因子的改进式单通道对称正交化 FastICA 分离后的信号

Fig. 3 Signals separated by improved FastICA with relaxation factor based on symmetrical orthogonalization

表 1 不同信噪比下的检测值

信噪比	给定值	方法 1		方法 2	
		频率/Hz	幅值/V	相位/(°)	
10 dB	40/2.1/30	40/2.0872/30.0132	40/2.1024/30.0029		
	50/5/0	50/4.9769/0.0020	50/5.0311/0.0010		
	150/1.5/45	150/1.4932/44.9122	150/1.5013/45.0713		
	240/0.9/20	...	240/0.9027/20.0129		
	250/0.4/60	250/0.4015/59.8071	250/0.3957/60.0945		
20 dB	40/2.1/30	40/2.0901/30.0107	40/2.1027/30.0006		
	50/5/0	50/5.1052/0.0000	50/5.0021/0.0000		
	150/1.5/45	150/1.4937/45.0107	150/1.5014/44.9652		
	240/0.9/20	240/0.8347/19.9081	240/0.9017/20.0147		
	250/0.4/60	250/0.3847/59.8405	250/0.4008/60.0152		

从表 1 可以看出, 在低信噪比的情况下, 引入松弛因子的改进式单通道 FastICA 算法较之改进式单通道 FastICA 算法, 在间谐波各个参数的估计上更合理, 更有效。

## 5 结论

本文采用引入松弛因子的改进式单通道对称正交化 FastICA 间谐波检测方法。在无先验知识的情况下, 通过该方法对采集到的一路信号进行处理。仿真结果表明, 该方法满足间谐波的检测要求, 具有较高的抗噪性。松弛因子的引入, 有效地解决了随机初值对高阶算法的影响, 同时利用最小二乘法, 使得信噪比较低时依旧可以对间谐波的幅值和相位准确估计。

## 参考文献

- [1] 李天云, 袁明哲, 许广婷, 等. 基于随机子空间结合稳定图的间谐波高精度检测方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(20): 50-54.  
LI Tianyun, YUAN Mingzhe, XU Guangting, et al. An inter-harmonic high-accuracy detection method based on stochastic subspace and stabilization diagram[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(20): 50-54.
- [2] 肖助力, 龚仁喜, 陈双. 基于改进 S 变换的电力系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 84-90.  
XIAO Zhuli, GONG Renxi, CHEN Shuang. Detection of harmonics in power system based on modified S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 84-90.
- [3] 丛超, 胡全义, 王慧武. 一种基于混沌振子的电力系统谐波检测新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 7-16.  
CONG Chao, HU Quanyi, WANG Huiwu. A new detecting method for harmonics in power system using chaotic oscillator[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 7-16.
- [4] 孙曙光, 庞毅, 王景芹, 等. 一种基于新型小波阈值去噪预处理的 EEMD 谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 42-48.  
SUN Shuguang, PANG Yi, WANG Jingqin, et al. EEMD harmonic detection method based on the new wavelet threshold denoising pretreatment[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 42-48.
- [5] 王继, 王年, 汪炼, 等. 基于改进 FastICA 的电能质量谐波检测[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 126-130.  
WANG Ji, WANG Nian, WANG Lian, et al. Harmonic detection of power quality based on improved FastICA[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 126-130.
- [6] 汪斌, 王年, 蒋云志, 等. 改进 FastICA 算法在谐波检测中的应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(3): 135-138.  
WANG Bin, WANG Nian, JIANG Yunzhi, et al. Application of improved FastICA in Harmonic detection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(3): 135-138.
- [7] 季策, 王艳茹, 沙明博, 等. 引入松弛因子的高阶收敛 FastICA 算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(2): 204-207.  
JI Ce, WANG Yanru, SHA Mingbo, et al. Relaxation factor-based FastICA with higher order convergence[J]. Journal of Northeast University (Natural Science), 2014, 35(2): 204-207.
- [8] HYVÄRINEN A, KARHUNEN J, OJA E. 独立成分分析[M]. 周宗谭, 董国华, 徐昕, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [9] 冉曦希, 周群. 基于 Fast-ICA 和对称正交化的谐波检测[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 132-136.  
RAN Xixi, ZHOU Qun. Harmonic detection based on Fast-ICA and symmetrical orthogonalization[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 132-136.
- [10] 李智明. 基于改进 FastICA 算法的混合语音盲分离[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.  
LI Zhiming. Blind separation of mixed audio signals based on improved FastICA[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [11] 何川, 舒勤, 李旻. 基于改进单通道 FastICA 的谐波与间谐波检测[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2959-2964.  
HE Chuan, SHU Qin, LI Min. Detection of harmonic and inter-harmonic based on improved single channel FastICA[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2959-2964.
- [12] 张斌, 庄池杰, 胡军, 等. 结合降维技术的电力负荷曲线集成聚类算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3471-3479.  
ZHANG Bin, ZHUANG Chijie, HU Jun, et al. Ensemble clustering algorithm combined with dimension reduction techniques for power load profiles[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3471-3479.
- [13] 夏向阳, 李灵红, 禹红, 等. 电力系统中多谐波源的谐波分析方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(12): 4239-4244.  
XIA Xiangyang, LI Linghong, YU Hong, et al. Harmonic analysis method based on multi-harmonic source in power system[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(12): 4239-4244.
- [14] 孟玲玲, 孙常栋, 韩宝如. 基于最小二乘法和独立分量分析的间谐波检测算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 76-81.  
MENG Lingling, SUN Changdong, HAN Baoru. Algorithm for inter-harmonic detection based on least square method and ICA[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 76-81.

收稿日期: 2016-08-16; 修回日期: 2016-10-20

作者简介:

艾永乐(1963—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究领域为交流多相电机新颖控制策略和电能质量检测与提高; E-mail: aiyongle@hpu.edu.cn

张王飞(1988—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统谐波、间谐波检测; E-mail: mophiezh@163.com

闫玲玲(1985—), 女, 本科, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护与控制。E-mail: 360494683@qq.com

(编辑 张爱琴)