

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211733

基于混合寻优算法及分离一致性判断的系统谐波阻抗估计

林顺富, 李育坤, 李寅, 李东东

(上海电力大学, 上海 200090)

摘要: 针对独立成分分析方法中源信号非独立性引起的估计误差, 提出一种基于混合寻优及分离一致性判断的系统谐波阻抗估计方法。首先对公共连接点谐波电压和谐波电流测量数据进行中心化与白化处理。其次, 采用混沌映射获得初试解位置, 以负熵最大作为目标函数, 采用生物地理学-增强烟花混合算法寻优获得分离矩阵。进一步进行分离一致性判断, 得到具有较好独立性的分离矩阵。最后采用最小二乘法计算得到系统谐波阻抗。仿真和工程实例验证了所提方法与其他 ICA 算法相比具有更好的估计精度。

关键词: 谐波责任; 独立成分分析; 系统谐波阻抗; 混合寻优算法; 一致性判断

Harmonic impedance estimation based on a hybrid optimization algorithm and separation consistency screening

LIN Shunfu, LI Yukun, LI Yin, LI Dongdong

(Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: There is an estimation error caused by the non-independence of the source signal in the independent component analysis (ICA) method. Thus a system harmonic impedance estimation method based on the hybrid optimization and the separation consistency judgment is proposed. First, the data of the harmonic voltage and harmonic current measured at the point of common connection are centralized and whitened. Secondly, the position of the initial solution is obtained by chaotic mapping, and then the separation matrix is obtained by the biogeography-enhanced fireworks hybrid algorithm with the objective function of maximum negative entropy. Further, the separation matrix with better independence is obtained through separation consistency judgment. Finally, the harmonic impedance of the system is calculated by the least squares method. Simulation and case study results prove that the proposed method has better estimation accuracy than existing ICA algorithms.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51977127).

Key words: harmonic responsibility; independent component analysis; system harmonic impedance; hybrid optimization algorithm; consistency judgment

0 引言

我国要在 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和, “绿色”、“生态”也成为“十四五”规划的关键词。如今, 我国电网正在向高比例新能源、高比例电力电子设备的“双高”新型电网转型, 其中的谐波污染愈发严重, 谐波治理问题亟待解决。谐波责任划分对谐波治理具有重要意义, 系统谐波

阻抗的精确估计是谐波责任合理划分的前提^[1-7]。典型的谐波阻抗估计方法主要有波动量法^[8-9]、协方差法^[10]、线性回归法^[11-14]和独立成分分析法^[15-18]。波动量由于电力系统中背景谐波波动变大而产生较大误差。协方差法由于电力系统中滤波器或者功率因数校正电容器的使用导致的两侧谐波阻抗逐渐接近而产生较大误差。线性回归法的问题在于无法对背景谐波精确建模, 二元线性回归将背景谐波建模为常数, 而背景谐波是一个随时间波动的量, 这样的建模势必引入误差, 而随后学者提出的数据分段、选段等方法将背景谐波建模为多个常数段, 这样的建模方式虽然一定程度上解决了背景波动的问题, 但

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51977127); 上海市科学技术委员会项目资助(19020500800); 上海市教育发展基金会和上海市教育委员会“曙光计划”项目资助(20SG52)

是仍未解决背景谐波建模问题。

独立成分分析法(independent component analysis, ICA)因为适合研究先验知识较少或者模型难以建立的问题^[19]而越来越被重视,但 ICA 存在两个会影响误差的问题:1) ICA 算法的寻优能力对估计精度十分重要。2) ICA 算法是在源信号相互统计独立的假设下进行的。文献[18]计算得到基于状态反馈控制策略的 LCL 型新能源并网逆变器发射谐波与网侧谐波之间的相关系数,验证了新能源并网逆变器的并网会造成源信号的统计独立性变弱,如果在此情况下使用 ICA 估计会导致误差。针对问题 1),文献[15]通过采用二阶牛顿迭代寻优算法的快速 ICA(FastICA)估计系统谐波阻抗,文献[16]通过采用三阶牛顿迭代寻优算法的改进快速 ICA(improved FastICA)估计系统谐波阻抗,文献[17]通过采用最优步长精确线性搜索寻优算法的鲁棒 ICA(RobustICA)估计系统谐波抗,但以上的寻优方式都为梯度寻优方法,对解的初始值较为敏感,如果初值选取不当,会使寻优陷入局部最优或者鞍点,导致估计精度不高或者奇异解问题。针对问题 2),文献[18]提出了利用互信息值作为独立性测度重构观测信号的子带分解 ICA 方法,但该方法需要选择合适的小波包分解层数以及设定子带间的互信息阈值,但如果数值设置不当,甚至会造成相反的效果,一定程度上降低了其实用性。

针对梯度寻优算法寻优能力弱和源信号非统计独立造成的估计误差,本文首先采用混合寻优算法代替传统的梯度寻优,混合寻优算法通过混沌优化获得分布更均匀的初始解位置,并将烟花算法和生物地理学算法的寻优机制优势互补,以此提高系统谐波阻抗估计精度。随后,基于统计独立变量的函数保持“统计独立”的原理,利用统计独立的信号和其差分信号的 ICA 分离矩阵具有高相似度的特点,通过计算观测信号及其差分值的 ICA 分离矩阵的最大相关系数矩阵来判断 ICA 各分离分量与源信号的一致性,从而选用统计独立性较好的观测信号数据段进行阻抗估计,提高估计精度。仿真与工程实例表明,本文所提方法具有更好的估计精度。

1 基本原理

1.1 谐波分析模型

在谐波分析建模过程中,因为谐波源与电压无关,将其建模成为电流源,而在多组谐波源并联时,会出现谐波叠加效应,为了使建模更准确,将其建模为诺顿等效电路,而由于 PCC 点两侧都有谐波源接入,所以采用如图 1 所示的诺顿等效电路进行谐

波分析。

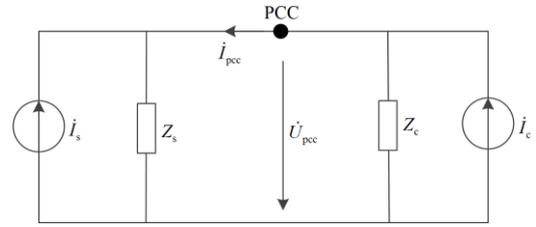


图 1 诺顿等效电路图

Fig. 1 Norton equivalent circuit diagram

根据诺顿等效电路列写方程式(1)。

$$\begin{cases} \mathcal{U}_{pcc} = \frac{Z_s Z_c}{Z_s + Z_c} \mathcal{I}_s + \frac{Z_s Z_c}{Z_s + Z_c} \mathcal{I}_c \\ \mathcal{I}_{pcc} = -\frac{Z_s}{Z_s + Z_c} \mathcal{I}_s + \frac{Z_s}{Z_s + Z_c} \mathcal{I}_c \end{cases} \quad (1)$$

式中: \mathcal{U}_{pcc} 、 \mathcal{I}_{pcc} 分别为 PCC 点处测得的谐波电压、谐波电流值; Z_s 、 Z_c 分别为系统侧、用户侧谐波阻抗; \mathcal{I}_s 、 \mathcal{I}_c 分别为系统侧、用户侧发射谐波电流值。

1.2 ICA 基本原理

1.2.1 ICA 数学模型

根据式(1)可得到 ICA 算法估计系统谐波阻抗时的数学模型,如式(2)所示。

$$\mathbf{X} = \mathbf{A} \mathbf{S} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{X} = [\mathcal{U}_{pcc-x} \quad \mathcal{U}_{pcc-y} \quad \mathcal{I}_{pcc-x} \quad \mathcal{I}_{pcc-y}]^T$ 为观测信号矩阵,其中 \mathcal{U}_{pcc-x} 和 \mathcal{U}_{pcc-y} 分别为 PCC 点电压值的实部和虚部, \mathcal{I}_{pcc-x} 和 \mathcal{I}_{pcc-y} 分别为 PCC 点电流值的实部和虚部; $\mathbf{S} = [\mathcal{U}_{s-x} \quad \mathcal{U}_{s-y} \quad \mathcal{I}_{c-x} \quad \mathcal{I}_{c-y}]^T$ 为源侧信号矩阵,其中 \mathcal{U}_{s-x} 和 \mathcal{U}_{s-y} 分别为系统侧发射谐波电压值实部和虚部, \mathcal{I}_{c-x} 和 \mathcal{I}_{c-y} 分别为用户侧发射谐波电流值实部和虚部; \mathbf{A} 为未知的混合矩阵,由 Z_s 和 Z_c 决定。

1.2.2 ICA 寻优目标

ICA 以负熵最大作为一个搜寻方向,负熵的定义如式(3)所示。

$$N_g(d) \approx [E\{g(d)\} - E\{g(d_{gauss})\}]^2 \quad (3)$$

式中: $N_g(\cdot)$ 为负熵的目标函数; $E\{\cdot\}$ 为期望; d 为提取出独立分量的估计值; d_{gauss} 是与 d 同方差的正态分布; $g(\cdot)$ 为非线性函数,取 $g = \tan h(1.5d)$ 。

1.2.3 利用 ICA 估计系统谐波阻抗方法

利用寻优算法得到独立分量矩阵 \mathbf{I} 以及分离矩阵 \mathbf{W} ,通过最小二乘法求得 \mathbf{I} 的混合系数矩阵 \mathbf{H} ,并根据 \mathbf{H} 中的元素值 h_{ij} 求得系统谐波阻抗 Z_s , h_{ij}

为 4×4 维矩阵 \mathbf{H} 中的元素值, 具体求解过程可参照文献[15]。

$$Z_s = \frac{h_{11}h_{31} + h_{21}h_{41}}{h_{31}^2 + h_{41}^2} + j \frac{h_{21}h_{31} - h_{12}h_{41}}{h_{31}^2 + h_{41}^2} \quad (4)$$

1.3 ICA 误差分析

ICA 方法以源信号彼此统计独立作为假设条件, 然而统计独立是一个非常强的假设条件。在实际工程应用中, 严格的统计独立往往过于理想化, 这种差异直接造成了采用 ICA 方法估计系统谐波阻抗时的误差。

若观测信号为彼此统计独立的变量(统计独立必正交), ICA 可以将它们完整分离(即分离信号与源信号一致)^[20]。然而对于彼此非统计独立的源信号, 非统计独立越严重, 分离信号与实际信号的差异越大。事实上, 尽管源信号之间存在弱的相关, ICA 分离结果仍然能够反映源信号特征^[20]。以下给出一个基于第 3.3 节的诺顿仿真模型构建不同统计独立性强弱的观测信号数据段, 用信号相关性大小来衡量其统计独立性强弱, 并采用 FastICA 估计系统谐波阻抗, 以此验证估计误差随信号统计独立性大小变化的关系。图 2 的四维图显示了采用 FastICA 方法估计系统谐波阻抗时幅值误差随信号相关性变化图。图中, 耦合系数 r 和波动系数 k 为控制源信号相关性均值的控制变量, 纵轴为源信号相关性 ρ 均值, 纵轴值越大即信号相关性越强, 模块颜色表示阻抗估计幅值相对误差均值大小, 相应的参数设置参照本文第 3.3 节。

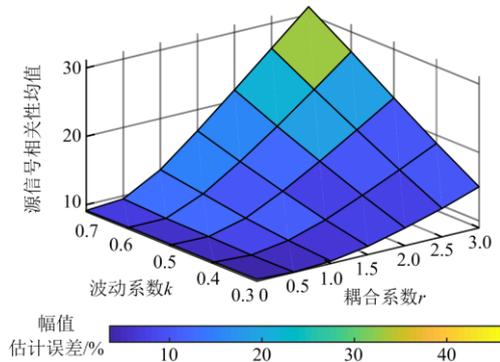


图 2 系统谐波阻抗估计幅值误差随信号相关性变化图

Fig. 2 Variation diagram of amplitude error of system harmonic impedance estimation with correlation

由图 2 可知: 模块颜色随纵轴方向逐渐变浅的趋势明显, 即幅值相对误差随源信号相关性均值的增加而增加, 且在信号相关性较低时误差较小。所以如何在不知道先验条件的情况下, 根据判断准则使用信号之间统计独立性较强数据段进行 ICA 分

离, 可以提高估计精度。

2 基于混合寻优算法及分离一致性判断的系统谐波阻抗估计方法

2.1 混沌映射产生烟花初始解

对于一种寻优算法而言, 解的初始分布位置对算法的最优解的寻找具有极大的影响: 解的初始分布位置在解空间内分布越均匀, 初始种群的多样性越佳, 越容易找到最优解。混沌优化 (chaotic optimization, CO) 是一种较为新颖的优化方法^[21], 具有类随机性、更好的空间遍历性和非重复性, 算法加入混沌优化后, 相对基于一定概率分布的随机搜索, 种群更加多样, 具有更大的几率跳出局部极值点, 使算法的搜索速度更快。

混沌优化有多种产生形式, 本文采用分布均匀, 寻优较快, 搜索效率较高的 Tent 映射来产生混沌序列, 其表达式为

$$z_{\mu+1} = \begin{cases} z_{\mu} / 0.7, & z_{\mu} < 0.7 \\ 10 / 3 z_{\mu} (1 - z_{\mu}), & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

烟花位置初始化:

设 $T_i = (T_{i1}, L, T_{i2}, L, T_{ib}, L, T_{iD})$ 为第 i 个烟花位置, $1 \leq b \leq D$, D 为搜索空间维数, T_{ib} 为第 i 个烟花在第 b 维的分量, 取值范围为 $[T_{\min}, T_{\max}]$, 由式 (6) 生成。

$$T_i = T_{\min} + z_{\mu+1} \cdot (T_{\max} - T_{\min}) \quad (6)$$

式中: $1 \leq i \leq M$, M 为烟花种群大小; $z_{\mu+1}$ 为生成的混沌序列。

2.2 混合寻优算法优化

增强烟花算法 (enhanced fireworks algorithm, EFWA) 是由 Tan 于 2013 年提出的新型智能寻优爆炸烟花算法的改进版^[24], EFWA 体现了一种新型的具有全局搜索能力与局部搜索能力自调节的寻优机制, 使得寻优更加充分, 防止陷入局部最优解。但是烟花算法的烟花之间无信息交互, 导致计算成本高。

生物地理学优化算法 (biogeography based optimization, BBO)^[24] 提供了一种根据个体的适应度值, 以概率将个体的某些维的值进行交叉迁移的方法, 这种信息交换与共享机制有助于补充爆炸烟花算法中种群交互能力差的缺点, 增强了不同个体之间的信息共享, 进一步增加解的多样性, 一定程度上降低计算成本。

将 BBO 中的迁移算子引入到 EFWA 中, 将两种寻优机制的优点结合, 互补他们的缺点。在爆炸操作中引入了一个迁移概率 ρ , 使得应用 BBO 迁移

机制的概率为 ρ , 应用 EFWA 的爆炸机制的概率为 $(1-\rho)$ 。文献[25]指出 ρ 取 0.5~0.8 较好, 在本方向实验中发现, 采取 0.5~0.8 的估计误差差距相差不大, 但是运行时间差距较大, 所以本文 ρ 取 0.5, 以此在可接受的误差范围内尽量减少估计时间。

2.3 源信号和观测信号一致性判断

2.3.1 差分计算与独立性保持

对于两个随机变量 m 和 n 不相关时, 存在:

$$\text{Cov}(m, n) = E[mn] - E[m]E[n] = 0 \quad (7)$$

式中: $\text{Cov}(\cdot)$ 和 $E[\cdot]$ 分别为协方差函数和期望; m 和 n 为随机变量。而如果两个随机变量 m 和 n 对任何整数 p 和 q 都有式(8)成立, 那么 m 和 n 统计独立, 两个变量如果统计独立必是正交的^[26]。

$$E[m^p n^q] - E[m^p]E[n^q] = 0 \quad (8)$$

式中, p 和 q 为任何整数。

若两个随机变量统计独立, 则这些变量的函数值也保持统计独立。依据这一理论假设 m 和 n 统计独立, 那么其导数 m' 、 n' 也是彼此相互独立的, 等距离离散值代替导数得式(9)和式(10), 具体验证可在文献[20]中查看。

$$\text{Cov}(\Delta m, \Delta n) = E[\Delta m \Delta n] - E[\Delta m]E[\Delta n] = 0 \quad (9)$$

$$E[\Delta m^p \Delta n^q] - E[\Delta m^p]E[\Delta n^q] = 0 \quad (10)$$

式中, Δm 和 Δn 分别为随机变量 m 和 n 的等距离离散值。

2.3.2 分离一致性判断准则

根据 2.3.1 节理论可知: 统计独立的信号差分过后其统计独立性依然保持, 差分前后的混合矩阵中对应分量保持一致, 既计算其相关系数应该等于 1; 而信号统计独立越弱, 源信号与 ICA 分离分量的差异越大, 既差分前后信号的 ICA 分离混合矩阵的差异越大、相关系数越小。

则 ICA 分离分量与源信号一致性判断准则为: 计算分离矩阵 \mathbf{W} 和差分信号分离矩阵 \mathbf{W}_1 的相关矩阵中与各个分量对应相关系数的最大绝对值, 若相关系数大于 0.95, 则可认为 ICA 分量与源信号是一致的; 当相关系数小于 0.8 时, ICA 分量与源信号出现较大的偏差, 计算结果不可信^[20]。在本方向实际使用时 0.95 的要求过于苛刻可能造成判断失败, 而过低有会引入误差, 本文采用 0.85 为判断指标。

2.4 所提方法流程图

根据以上理论介绍, 本文所提方法的流程图如图 3 所示。

具体流程如下所述:

- 1) 通过观测数据构建观测矩阵 \mathbf{X} 。
- 2) 对观测信号依次进行中心化与白化处理。
- 3) 以负熵最大作为目标函数, 采用混合寻优算

法寻优, 得到分离矩阵 \mathbf{W} , 并从观测信号中分离出独立分量 \mathbf{I} 。

4) 观测信号采用定值差分计算新的观测信号 \mathbf{Z} , 并进行第 2)、3)步得到分离矩阵 \mathbf{W}_1 。

5) 计算 \mathbf{W} 和 \mathbf{W}_1 的相关矩阵, 寻找与各个分量对应相关系数的最大绝对值。

6) 若最大值大于 0.85, 则保留第 3)步计算结果, 若不符合则舍弃。

7) 将保留的独立分量 \mathbf{I} 作为自变量, 观测信号 \mathbf{X} 作为因变量构建回归模型, 并通过最小二乘法计算得到系统谐波阻抗值。

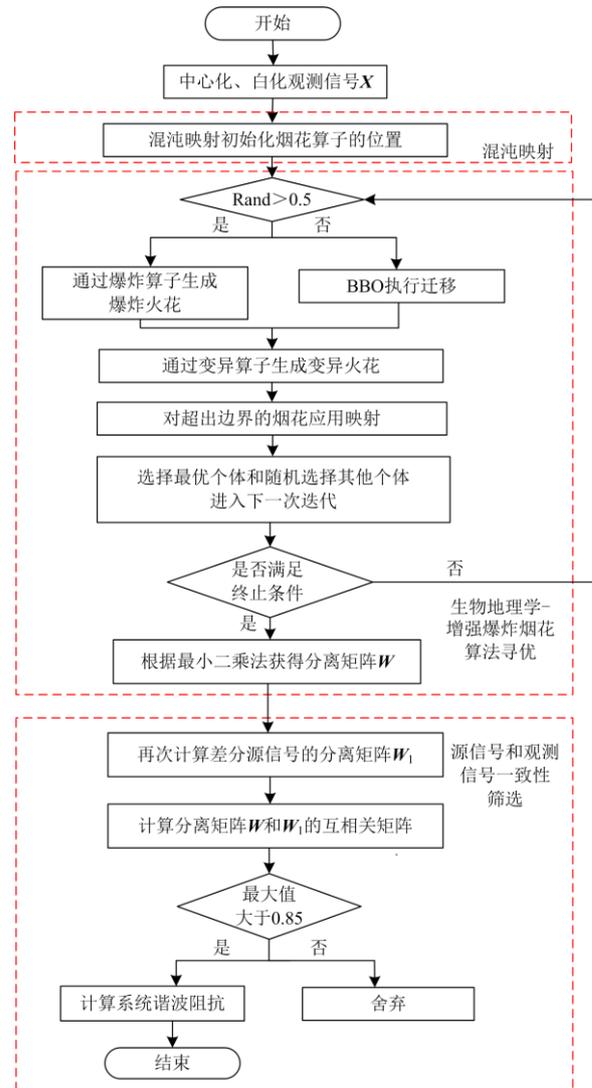


图 3 本文方法具体流程图

Fig. 3 Specific flow chart of this method

3 仿真验证

3.1 仿真模型建立

为了进行算法比较, 根据图 1 所示的诺顿等效

电路搭建仿真模型以进行算法比较, 具体参数为:
 \dot{I}_S 的幅值为 100 A, 初始相角为 $\pi/6$, 在其幅值和相角上增加 30% 的正弦扰动和 $\pm 30\%$ 随机扰动。令 \dot{I}_S 的相角设为 $-\pi/12$, 并在其幅值和相角上添加 $\pm 5\%$ 的随机扰动和 20% 正弦扰动, 同时在系统谐波阻抗和用户谐波阻抗 Z_S 和 Z_C 的实部和虚部增加 5% 的正弦扰动。

3.2 背景谐波波动与两侧阻抗逐步接近的情况分析

为模拟实际电网中背景谐波波动的情况, 将 \dot{I}_S 的幅值设为 \dot{I}_C 的 k 倍, k 为波动系数, 设置 k 由 0.1 以步长 0.1 逐步升至 1.0 来模拟背景谐波相对用户侧谐波波动变大的情况。

为了模拟实际电网中滤波器或者功率因数校正电容器的使用导致的两侧谐波阻抗逐渐接近的情况, 将 Z_C 设为 Z_S 的 a 倍。 a 为阻抗比系数, 阻抗比系数 a 分别取 10、6、2。通过阻抗比系数逐渐变小模拟两侧谐波阻抗逐渐接近的情况。

在仿真电路模型的 PCC 处采集 500 点谐波观测数据。采用 4 种方法估计系统谐波阻抗。方法 1 为 FastICA^[15], 方法 2 为 Improved FastICA^[16], 方法 3 为 RobustICA^[17], 方法 4 为混合寻优方法。

为了研究系数 a 和 k 对系统谐波阻抗估计误差的影响, 以 a 为横轴, k 为纵轴, 相对误差为竖轴作相应的估计误差分析曲线, 实部相对误差和虚部相对误差分别如图 4 和图 5 所示。具体数值参照表 A1—表 A6。

由图 4 和图 5 可知, 采用 ICA 类方法估计系统谐波阻抗时, 实部虚部误差都跟随 k 值的增加而增加, 而从图可见估计误差随 a 值变化而变化并不十分明显。图中, 不论是 k 值的增加或者 a 值的减少, 混合寻优方法因为采用了寻优能力更强的寻优算法, 其估计精度要好于其他 3 种采用梯度寻优的算法。FastICA 由于采用二阶牛顿迭代寻优, 估计误差最大, 而 Improved FastICA 由于改进了寻优算法, 误差整体比 FastICA 小, 而 RobustICA 呈现出实部误差小而虚部误差大的估计误差趋势。

为了使误差随 a 值变化的趋势变化可视化更强, 采用极坐标散点图绘制 $k=0.6$ 时相对误差随 a 值的变化, 如图 6 所示, 上半部分为阻抗估计实部误差, 下半部分为阻抗估计虚部误差, 箭头方向模拟了实际电网中滤波器或者功率因数校正电容器的使用导致两侧阻抗比逐步接近的过程, 每种颜色的背景代表相同 a 值下 4 个方法的对比。由图 6 可知,

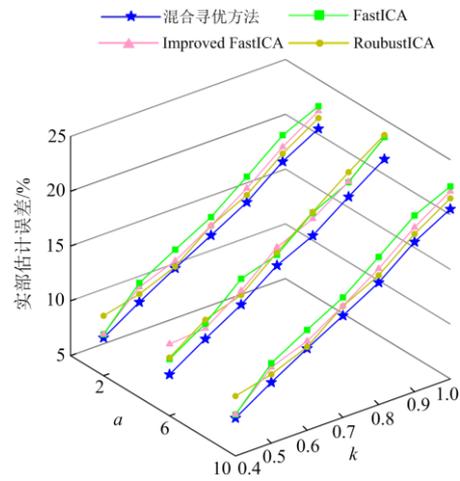


图 4 阻抗实部估计误差分析曲线

Fig. 4 Error analysis curve of impedance real part estimation

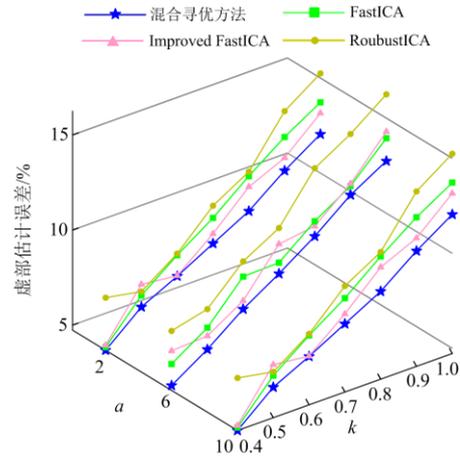


图 5 阻抗虚部估计误差分析曲线

Fig. 5 Error analysis curve of imaginary part estimation of impedance

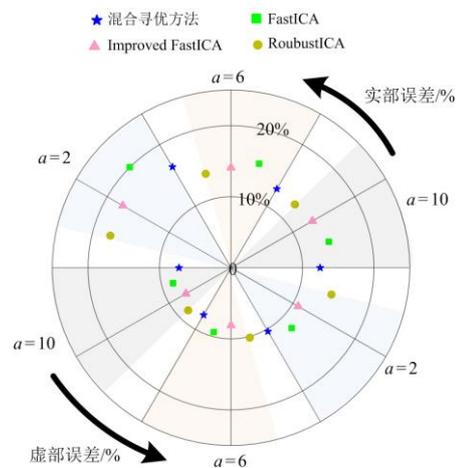


图 6 $k=0.6$ 时阻抗估计误差随 a 变化分析图

Fig. 6 Variation of impedance estimation error with a when $k=0.6$

4 种方法的误差点都随着 a 值的减少而略微有扩散(误差增大), 但是增加幅度不大, 既阻抗的逐步接近对 ICA 类方法的估计误差影响较小, 同时由图可知方法 4 的误差始终小于其他类方法。

综上, 本文所提方法对比采用其他梯度类优化的方法估计谐波阻抗时, 由于采用了寻优能力更强的寻优算法, 在背景谐波波动或两侧阻抗逐步接近的两种情况下进行比较, 本文方法都更具估计精度优势, 背景谐波波动对 ICA 类方法仍有影响, 而两侧阻抗比接近, 对 ICA 方法影响较小。

3.3 两侧源信号统计独立性变化情况分析

为了模拟信号统计独立性变弱的情况, 根据文献[18]设置背景侧发射谐波在用户侧发射谐波中占有一定比例来模拟实际的耦合情况, 通过耦合系数 r (模拟信号耦合对信号相关性的影响)和波动系数 k (模拟背景侧信号波动大小对相关性的影响)来控制两侧信号的相关性大小, 并通过相关系数 ρ 来量化设置两侧信号间的统计独立性强弱, 其定义为

$$\rho(\hat{\mathcal{I}}_C, \hat{\mathcal{I}}_S) = \frac{\text{cov}(\hat{\mathcal{I}}_C, \hat{\mathcal{I}}_S)}{\sqrt{\text{var}(\hat{\mathcal{I}}_C) \text{var}(\hat{\mathcal{I}}_S)}} \quad (11)$$

式中, $\text{cov}(\cdot)$ 和 $\text{var}(\cdot)$ 分别为协方差函数和方差函数。

设置参数 $\hat{\mathcal{I}}_C = \mu(\hat{\mathcal{I}}_{C,u} + r\hat{\mathcal{I}}_{S,u})$, $\hat{\mathcal{I}}_{C,u}$ 和 $\hat{\mathcal{I}}_{S,u}$ 分别为两侧谐波发射源为统计独立时的设定值, 为了让 $\hat{\mathcal{I}}_C$ 的幅值在 k 和 r 的共同作用下保持大致恒定, 设置参数 $\mu = |\hat{\mathcal{I}}_{C,u}| / |\hat{\mathcal{I}}_C|$ 。波动系数 k 分别取 0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 时, 耦合系数 r 分别取 0.5、1、1.5、2、2.5、3, 仿真生成 500 个数据段, 源信号的总体相关性如图 2 所示。

为验证伴随信号统计独立性变弱本文所提方法的有效性, 采用 3 种方法做系统谐波阻抗估计, 分别为 FastICA^[15]、子带分解与 ICA^[16]和本文所提方法, 以波动系数 k 为横轴、耦合系数 r 为纵轴、相对误差为竖轴作相应的估计误差, 分析曲线如图 7 和图 8 所示, 具体误差值如表 A7—表 A18 所示。

由图 7 和图 8 可知, 采用 FastICA 估计谐波阻抗的误差从左下角向右上角逐渐升高, 采用子带分解与 ICA 效果要好于 FastICA, 但是出现少数误差尖峰如 $k=0.5, r=3$, $k=0.7, r=3$, 这是由于子带分解小波包层数选择不当, 以 $k=0.7$ 为例, 将小波包层数由 10 层降至 5 层, 误差由 55.95%(实部)、43.79%(虚部)降至 33.57%(实部)、25.86%(虚部), 由此可见对于子带分解与 ICA, 子带数等先验信息十分重要, 子带选取不当甚至可能导致方法失败, 而本文方法相较于其他两种方法误差较小且无需先验

信息。综上本文方法更适合两侧源信号统计独立性变化弱的情况。

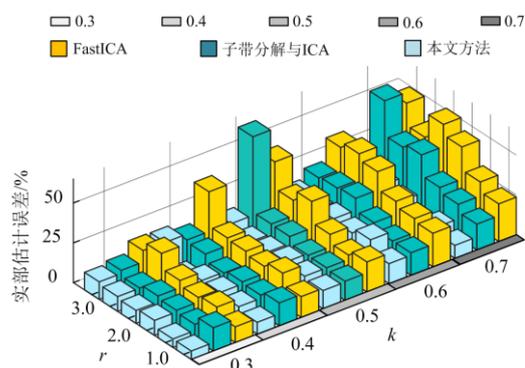


图 7 阻抗实部估计误差分析图

Fig. 7 Error analysis diagram of impedance real part estimation

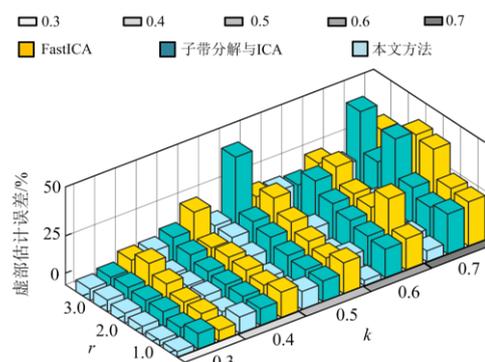


图 8 阻抗虚部估计误差分析图

Fig. 8 Error analysis diagram of impedance imaginary part estimation

4 工程实例验证

为了进一步通过实例系统对所提方法进行验证, 采用电力录波设备对上海某 10 kV/0.4 kV 配电变压器低压侧 PCC 点处的谐波数据进行测量, 通过离散傅里叶分析从 24 h 里测得的电压与电流数据中获取 1440 个 3 次谐波电压与 3 次谐波电流数据, 图 9 和图 10 分别为 3 次谐波电压和 3 次谐波电流幅值趋势图。

根据变压器铭牌信息, 计算得到系统 3 次谐波阻抗的幅值参考值为 0.063 Ω , 将 1440 个谐波数据点分为 0~6 h、6~12 h、12~18 h、18~24 h 共 4 个数据段, 为对比本文方法与其他典型方法在实测场景下的应用效果, 分别采用波动量法^[8]、协方差法^[10]和本文方法对系统谐波阻抗进行估计, 并计算各方法阻抗幅值估计误差值结果如图 11 所示, 计算结果如表 A19 所示。

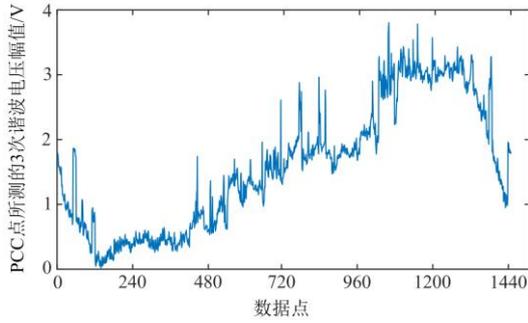


图9 配电变压器低压侧 PCC 点 3 次谐波电压幅值曲线图
Fig. 9 Third harmonic voltage amplitude curve of PCC point at low voltage side of distribution transformer

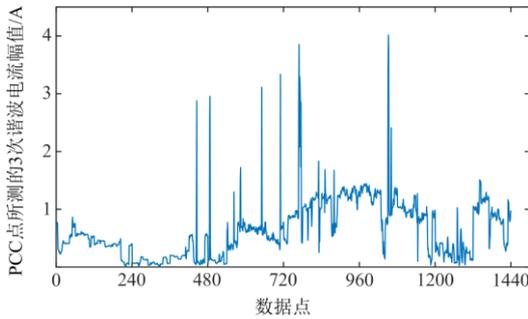


图10 配电变压器低压侧 PCC 点 3 次谐波电流幅值曲线图
Fig. 10 Third harmonic current amplitude curve of PCC point at low voltage side of distribution transformer

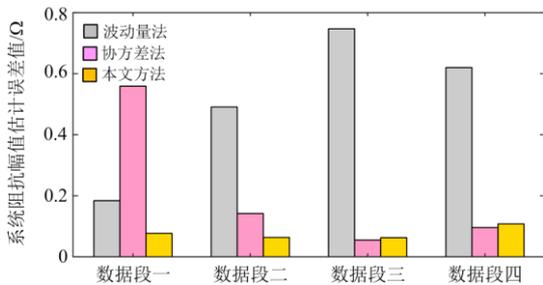


图11 3 种方法系统谐波阻抗幅值估计误差值统计图
Fig. 11 Statistical diagram of harmonic impedance amplitude estimation error of three methods

由图 11 可知,由于波动量法假设中不考虑背景谐波波动,其估计误差最大,协方差由于能一定程度上消除背景谐波影响,估计误差明显下降,而本文的计算误差明显小于其他两种方法。

为对比本文方法与改进前方法在实测场景下的应用效果,分别采用 FastICA、子带分解与 ICA 法和本文方法对系统谐波阻抗进行估计,并计算各方法阻抗幅值估计误差值结果如图 12 所示,计算结果如表 A20 所示。

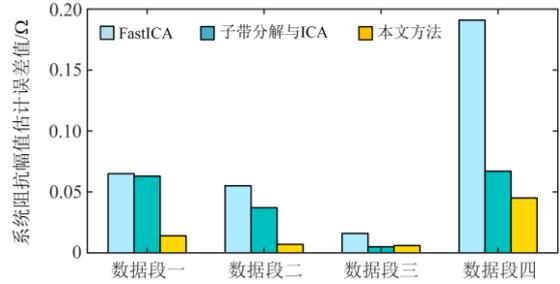


图 12 3 种方法系统谐波阻抗幅值估计误差值统计图
Fig. 12 Statistical diagram of harmonic impedance amplitude estimation error of three methods

由图 12 可知,在 0~6 h、6~12 h、12~18 h、18~24 h 内,本文方法计算误差都比其他两种方法要小,估计结果更接近基准值。

考虑到实际电网中的系统谐波阻抗在短时间内波动不大,因此可通过估值结果的方差来评价各方法的性能^[27]。计算各时间段估值方差数值,并计算整体估计的均值,计算结果如表 1 所示。

表 1 各方法估计方差对比

Table 1 Comparison of estimated variance of each method

时间段	估计方差		
	FastICA	子带分解与 ICA	本文方法
数据段一	1.38	2.93	0.72
数据段二	1.58	1.01	0.62
数据段三	1.27	0.47	0.81
数据段四	1.39	1.24	0.62
均值	1.41	1.41	0.69

由表 1 可知,本文方法的整体估计方差明显低于其他两种方法, FastICA 与本文方法各时间段的方差变化比较平稳,而子带分解与 ICA 法由于子带数固定,导致其无法适应多变的环境,各时段估计方差变化较大,再次印证了选择合适的子带数对于子带分解与 ICA 方法的重要性。

因此,由本文方法和其他典型方法的估计误差对比、本文方法和改进前方法估计误差和估计方差对比中证明了所提方法在实测系统中的适用性和有效性。

5 结论

本文针对使用独立成分分析(ICA)估计系统谐波阻抗时采用梯度寻优导致寻优能力弱和信号统计独立性弱带来的分离误差,分别提出了采用混合寻优算法和分离信号一致性判断的方法。通过仿真与 3 种采用不同寻优机制寻优的 ICA 算法和子带分解与 ICA 算法做系统谐波阻抗估计误差对比,结果表明不论是背景谐波波动、两侧阻抗逐步接近、信号统计独立性弱的情况,本文方法都有较好的效果。

所提方法适合于高比例新能源、高比例电力电子设备的“双高”新型电网的离线高精度谐波阻抗估计。进一步利用分离可靠性评估来提高谐波阻抗估计的精度是 ICA 改进算法的下一步研究方向。

附录 A

表 A1 $a = 2$ 时阻抗实部估计误差

Table A1 Estimation error of real part of impedance when $a = 2$

k	阻抗实部估计误差/%			
	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
0.4	12.51	11.86	14.57	10.95
0.5	15.09	15.42	15.29	13.40
0.6	20.01	17.47	17.47	16.38
0.7	20.33	21.24	19.93	18.63
0.8	24.02	22.10	23.35	21.43
0.9	25.32	25.37	24.14	23.99
1.0	29.03	27.56	29.84	25.53

表 A2 $a = 6$ 时阻抗实部估计误差

Table A2 Estimation error of real part of impedance when $a = 6$

k	阻抗实部估计误差/%			
	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
0.4	10.18	11.55	10.31	8.77
0.5	12.25	11.81	12.59	10.85
0.6	15.17	14.08	13.68	12.81
0.7	16.17	16.87	16.41	15.21
0.8	18.85	18.30	18.92	16.76
0.9	20.46	20.52	21.38	19.13
1.0	23.41	23.36	23.60	21.40

表 A3 $a = 10$ 时阻抗实部估计误差

Table A3 Estimation error of real part of impedance when $a = 10$

k	阻抗实部估计误差/%			
	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
0.4	8.77	8.80	10.46	8.46
0.5	12.29	11.92	11.28	10.54
0.6	14.16	13.14	12.61	12.47
0.7	15.96	15.18	15.17	14.29
0.8	18.48	17.41	16.80	16.15
0.9	21.09	20.02	19.41	18.68
1.0	22.57	22.13	21.48	20.51

表 A4 $a = 2$ 时阻抗虚部估计误差

Table A4 Estimation error of imaginary part of impedance when $a = 2$

k	阻抗虚部估计误差/%			
	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
0.4	7.43	6.93	9.99	6.45
0.5	9.52	9.25	10.39	8.49
0.6	12.00	10.85	14.54	10.33
0.7	12.39	13.82	14.59	11.99
0.8	16.48	14.01	17.57	13.93
0.9	16.17	16.49	19.20	15.76
1.0	18.19	17.74	23.36	16.77

表 A5 $a = 6$ 时阻抗虚部估计误差

Table A5 Estimation error of imaginary part of impedance when $a = 6$

k	阻抗虚部估计误差/%			
	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
0.4	6.12	6.81	7.86	4.99
0.5	7.35	6.92	8.33	6.21
0.6	9.36	8.10	10.16	7.66
0.7	9.42	10.41	11.25	8.84
0.8	10.93	10.67	13.71	10.14
0.9	12.11	12.23	14.84	11.63
1.0	13.95	14.29	16.25	12.74

表 A6 $a = 10$ 时阻抗虚部估计误差

Table A6 Estimation error of imaginary part of impedance when $a = 10$

k	阻抗虚部估计误差/%			
	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
0.4	4.89	5.00	7.50	4.73
0.5	6.94	7.52	7.14	6.33
0.6	8.38	7.30	8.46	7.28
0.7	9.67	8.84	10.31	8.32
0.8	11.19	10.62	11.42	9.35
0.9	12.57	11.48	13.93	10.80
1.0	13.72	13.15	15.24	12.05

表 A7 $r = 0.5$ 时阻抗实部估计误差

Table A7 Estimation error of real part of impedance when $r = 0.5$

k	阻抗实部估计误差/%		
	FastICA	子带分解与 ICA	本文方法
0.3	9.88	14.59	5.28
0.4	12.98	14.32	7.41
0.5	18.88	12.03	11.5
0.6	21.01	14.06	12.5
0.7	23.63	16.16	8.15

表 A8 $r = 1$ 时阻抗实部估计误差

Table A8 Estimation error of real part of impedance when $r = 1$

k	阻抗实部估计误差/%		
	FastICA	子带分解与 ICA	本文方法
0.3	14.73	9.17	5.29
0.4	20.19	11.63	9.71
0.5	15.63	12.97	12.98
0.6	22.74	13.91	19.97
0.7	29.83	21.10	12.04

表 A9 $r = 1.5$ 时阻抗实部估计误差

Table A9 Estimation error of real part of impedance when $r = 1.5$

k	阻抗实部估计误差/%		
	FastICA	子带分解与 ICA	本文方法
0.3	13.22	10.47	9.39
0.4	16.94	12.50	11.14
0.5	21.11	13.26	14.42
0.6	25.99	17.86	16.70
0.7	44.26	24.14	7.06

表 A10 $r = 2$ 时阻抗实部估计误差

Table A10 Estimation error of real part of impedance when $r = 2$

k	阻抗实部估计误差/%		
	FastICA	子带分解与 ICA	本文方法
0.3	16.36	11.90	8.14
0.4	18.86	10.51	11.08
0.5	34.25	17.52	13.08
0.6	37.05	25.65	18.13
0.7	50.88	37.01	13.02

表 A11 $r = 2.5$ 时阻抗实部估计误差

Table A11 Estimation error of real part of impedance when $r = 2.5$

k	阻抗实部估计误差/%		
	FastICA	子带分解与 ICA	本文方法
0.3	25.81	9.34	9.29
0.4	19.68	14.84	5.59
0.5	27.44	17.85	11.75
0.6	40.76	24.52	16.60
0.7	35.23	34.27	15.48

表 A12 $r = 3$ 时阻抗实部估计误差

Table A12 Estimation error of real part of impedance when $r = 3$

k	阻抗实部估计误差/%		
	FastICA	子带分解与 ICA	本文方法
0.3	20.13	12.93	11.00
0.4	41.12	16.18	19.91
0.5	44.05	65.06	15.77
0.6	37.21	23.37	17.22
0.7	49.18	55.95	20.49

表 A13 $r = 0.5$ 时阻抗虚部估计误差

Table A13 Estimation error of imaginary part of impedance when $r = 0.5$

k	阻抗虚部估计误差/%		
	FastICA	子带分解与 ICA	本文方法
0.3	5.53	7.95	2.76
0.4	12.86	8.46	8.27
0.5	15.67	10.37	9.14
0.6	15.77	14.54	2.65
0.7	22.46	20.33	5.55

表 A14 $r = 1$ 时阻抗虚部估计误差

Table A14 Estimation error of imaginary part of impedance when $r = 1$

k	阻抗虚部估计误差/%		
	FastICA	子带分解与 ICA	本文方法
0.3	8.27	5.20	2.76
0.4	10.62	8.92	5.17
0.5	12.36	10.39	3.72
0.6	30.44	15.41	8.90
0.7	23.57	18.01	7.35

表 A15 $r = 1.5$ 时阻抗虚部估计误差

Table A15 Estimation error of imaginary part of impedance when $r = 1.5$

k	阻抗虚部估计误差/%		
	FastICA	子带分解与 ICA	本文方法
0.3	8.37	7.51	4.10
0.4	12.45	9.16	7.49
0.5	15.09	11.83	4.60
0.6	20.31	17.62	5.03
0.7	37.84	22.27	5.96

表 A16 $r = 2$ 时阻抗虚部估计误差

Table A16 Estimation error of imaginary part of impedance when $r = 2$

k	阻抗虚部估计误差/%		
	FastICA	子带分解与 ICA	本文方法
0.3	11.88	7.53	4.99
0.4	13.39	10.10	6.84
0.5	19.17	15.41	9.42
0.6	21.40	20.41	11.51
0.7	39.44	41.32	12.96

表 A17 $r = 2.5$ 时阻抗虚部估计误差

Table A17 Estimation error of imaginary part of impedance when $r = 2.5$

k	阻抗虚部估计误差/%		
	FastICA	子带分解与 ICA	本文方法
0.3	16.57	8.38	5.95
0.4	12.41	12.81	6.64
0.5	25.61	17.62	13.57
0.6	29.48	26.27	7.02
0.7	29.77	23.79	10.48

表 A18 $r = 3$ 时阻抗虚部估计误差

Table A18 Estimation error of imaginary part of impedance when $r = 3$

k	阻抗虚部估计误差/%		
	FastICA	子带分解与 ICA	本文方法
0.3	12.46	7.74	5.86
0.4	24.79	15.84	12.75
0.5	20.52	44.84	13.81
0.6	25.41	18.39	19.21
0.7	30.51	43.78	19.48

表 A19 实测数据系统谐波阻抗幅值估计结果 1

Table A19 Estimation results of harmonic impedance amplitude of system based on measured data 1

时间段	Ω			
	波动量法	协方差法	本文方法	基准值
数据段一	0.184	0.559	0.077	0.063
数据段二	0.491	0.142	0.0637	0.063
数据段三	0.747	0.055	0.0629	0.063
数据段四	0.620	0.096	0.108	0.063

表 A20 实测数据系统谐波阻抗幅值估计结果 2

Table A20 Estimation results of harmonic impedance amplitude of system based on measured data 2

时间段	Ω			
	FastICA	子带分解与 ICA	本文方法	基准值
数据段一	0.128	0.126	0.077	0.063
数据段二	0.118	0.100	0.0637	0.063
数据段三	0.047	0.068	0.0629	0.063
数据段四	0.254	0.130	0.108	0.063

参考文献

- [1] LI R, WONG P, WANG K, et al. Power quality enhancement and engineering application with high permeability distributed photovoltaic access to low-voltage distribution networks in Australia[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(3): 183-189.
- [2] 邵振国, 许昊铂, 肖颂勇, 等. 新能源电网中的谐波问题[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 178-187.
SHAO Zhenguo, XU Haobo, XIAO Songyong, et al. Harmonic problems in a new energy power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 178-187.
- [3] 孙可慧, 刘国鹏, 李少雄, 等. 基于实测数据的电动汽车充电站电能质量分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 74-88.
SUN Kehui, LIU Guopeng, LI Shaoxiong, et al. Power quality analysis method of an electric vehicle charging station based on measured data[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 74-88.
- [4] BILGUNDI S K, SACHIN R, PRADEEPA H, et al. Grid power quality enhancement using an ANFIS optimized PI controller for DG[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(1): 26-29.
- [5] 王允建, 陈丰. 基于信息熵的多谐波源定位研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 35-40.
WANG Yunjian, CHEN Feng. Research on multiple harmonic sources localization based on information entropy[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 35-40.
- [6] 王焰宇, 随慧斌. 谐波源责任划分技术的工程应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 140-148.
WANG Zhaoyu, SUI Huibin. Engineering application of harmonic source responsibility division technology[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 140-148.
- [7] 王莉虹, 肖先勇, 张逸, 等. 非线性负荷谐波贡献畸变功率评估指标与方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 41-47.
WANG Lihong, XIAO Xianyong, ZHANG Yi, et al. A distortion power based assessment index and method of harmonic contribution of nonlinear loads[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 41-47.
- [8] CUI Y, XU W. Assessment of potential harmonic problems for systems with distributed or random harmonic sources[C] // IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 24-28, 2007, Tampa, FL, USA.
- [9] YANG H, PIROTTE P, ROBERT A. Harmonic emission levels of industrial loads statistical assessment[C] // CIGRE Conference on Large High Voltage Electric Systems, 1996, Paris, France.
- [10] 惠锦, 杨洪耕, 林顺富, 等. 基于独立随机矢量协方差特性的谐波发射水平评估方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 27-31.
HUI Jin, YANG Honggeng, LIN Shunfu, et al. Assessment method of harmonic emission level based on covariance characteristic of random vectors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(7): 27-31.
- [11] 张巍, 杨洪耕. 基于二元线性回归的谐波发射水平估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 54-57.
ZHANG Wei, YANG Honggeng. A method for assessing harmonic emission level based on binary linear regression[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 54-57.
- [12] 王瑜, 臧天磊, 符玲, 等. 考虑背景谐波电压变化的多谐波源谐波责任划分[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(18): 55-61.
WANG Yu, ZANG Tianlei, FU Ling, et al. Harmonic contribution partition of multiple harmonic sources considering background harmonic voltage fluctuation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(18): 55-61.
- [13] 王行亚, 肖先勇, 吴俊, 等. 基于线性度校验的二元线性回归系统谐波阻抗估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2826-2835.
WANG Hangya, XIAO Xianyong, WU Jun, et al. Utility harmonic impedance estimation based on binary linear regression with linearity calibration[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2826-2835.
- [14] 林顺富, 颜昕昱, 戴焯敏, 等. 基于子空间动态系数回归的系统谐波阻抗估计方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 146-153.
LIN Shunfu, YAN Xinyu, DAI Yemin, et al. Estimation method of system harmonic impedance based on sub-space dynamic coefficient regression[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 146-153.
- [15] 赵熙, 杨洪耕. 基于快速独立分量分析的系统侧谐波

- 阻抗计算方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 139-144, 151.
- ZHAO Xi, YANG Honggeng. Method of calculating system-side harmonic impedance based on FastICA[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 139-144, 151.
- [16] 林顺富, 李扬, 汤波, 等. 基于改进 FastICA 及偏小二乘法的系统谐波阻抗估计[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 308-314.
- LIN Shunfu, LI Yang, TANG Bo, et al. System harmonic impedance estimation based on improved FastICA and partial least squares partial least squares[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 308-314.
- [17] 陈飞宇, 肖先勇, 汪颖. 采用稳健独立分量分析的谐波发射水平评估方法[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 3007-3013.
- CHEN Feiyu, XIAO Xianyong, WANG Ying. A method for harmonic emission level assessment based on robust independent component analysis[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 3007-3013.
- [18] 林顺富, 颜昕昱, 钟良亮, 等. 基于子带分量分解与独立分量分析的系统谐波阻抗估计方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(1): 179-190.
- LIN Shunfu, YAN Xinyu, ZHONG Liangliang, et al. System harmonic impedance estimation method based on sub-band component decomposition and independent component analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 179-190.
- [19] 王法松, 王忠勇, 李睿, 等. 统计相关源信号分离模型与算法综述[J]. 控制与决策, 2015, 30(9): 1537-1545.
- WANG Fasong, WANG Zhongyong, LI Rui, et al. Survey on statistical dependent source separation model and algorithms[J]. Journal of Control and Decision, 2015, 30(9): 1537-1545.
- [20] 姚志湘, 刘焕彬, 粟晖. 盲信号分离输出与源信号的一致性判断[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2007, 35(5): 50-53.
- YAO Zhixiang, LIU Huanbin, SU Hui. Judgment on consistency of blind source separation outputs with source signals[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science), 2007, 35(5): 50-53.
- [21] 赵欣. 不同一维混沌映射的优化性能比较研究[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(3): 913-915.
- ZHAO Xin. Research on optimization performance comparison of different one-dimensional chaotic maps[J]. Application Research of Computers, 2012, 29(3): 913-915.
- [22] ZHENG S, JANECEK A, TAN Y. Enhanced fireworks algorithm[C] // IEEE Congress on Evolutionary Computation, June 20-23, 2013, Cancun, Mexico: 2069-2077.
- [23] 谭莹, 郑少秋. 烟花算法研究进展[J]. 智能系统学报, 2014, 9(5): 515-528.
- TAN Ying, ZHENG Shaoqiu. Recent advances in fireworks algorithm[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2014, 9(5): 515-528.
- [24] DAN S. Biogeography-based optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2009, 12(6): 702-713.
- [25] ZHANG B, ZHANG M X, ZHENG Y J. A hybrid biogeography-based optimization and fireworks algorithm[C] // 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), July 6-11, 2014, Beijing, China.
- [26] HYVARINEN A, OJA E. Independent component analysis: algorithms and applications[J]. Neural Networks, 2000, 13(4): 411-430.
- [27] 赵永扬, 徐方维, 舒勤, 等. 基于背景谐波最小波动能量的系统侧谐波阻抗估计[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(24): 142-148, 200.
- ZHAO Yongyang, XU Fangwei, SHU Qin, et al. Harmonic impedance estimation on system side based on minimum fluctuation energy of background harmonic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 142-148, 200.

收稿日期: 2021-12-19; 修回日期: 2022-03-08

作者简介:

林顺富(1983—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电能质量及智能电网用户端技术; E-mail: shunfulin@shiep.edu.cn

李育坤(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为谐波责任划分. E-mail: 1849872337@163.com

(编辑 魏小丽)