数字化主动配电网的多谐波源谐波责任划分方法

李树荣[1]，马晓燕[2]，李　华[3]，陈长金[4]，李伟豪[1]

（1.国网河北省电力有限公司雄安新区供电公司，河北　雄安新区　071000；2.天津大学电气自动化与信息工程学院，天津　300072；3.国网河北省电力有限公司涉县供电分公司，河北　邯郸　056000；4.国网河北省电力有限公司电力培训中心，河北　石家庄　050021）

摘要：电网中公共连接点的谐波污染是多个谐波源共同作用的结果，为了更准确地划分公共连接点各个谐波源的谐波污染责任，提出了一种基于快速独立分量分析（FastICA）的多谐波源谐波污染责任划分方法。首先，准确划分谐波污染责任的前提是准确估算背景谐波和谐波传递阻抗，提出的方法可以基于FastICA完成背景谐波和谐波传递阻抗的估算；然后将各谐波源在PCC产生的谐波电压分量在PCC总谐波电压上矢量投影，计算得到各个谐波源的谐波责任；最后完成谐波污染责任划分。

关键词：数字化主动配电网；电能质量；多谐波源；谐波责任划分

中图分类号：TM74　　**文献标志码**：B　　**文章编号**：1001－9898(2021)03－0072－04

Harmonic Contribution Division Method of Multiple Harmonic Sources in Digital Active Distribution Grid

LI Shurong[1]，MA Xiaoyan[2]，LI Hua[3]，CHEN Changjin[4]，LI Weihao[1]

（1.State Grid Hebei Electric Power Co.，Ltd. Xiong'an New Area Power Supply Company，Xiong'an New Area 071000，China；2.School of Electrical and Information Engineering Tianjin University，Tianjin 300072，China；3.State Grid Hebei Electric Power Co.，Ltd. Shexian Power Supply Branch，Handan 056000，China；4.State Grid Hebei Training Center，Shijiazhuang 050021，China）

Abstract：The harmonic pollution at the point of common coupling (PCC) in the public grid is the outcome of combined contribution of multiple harmonic sources. For a better division of harmonic contribution，this paper proposes a method to quantify harmonic contributions of multiple harmonic sources based on FastICA. The background harmonics and the harmonic transfer impedance can be estimated accurately by the proposed method based on FastICA. Harmonic contribution of multiple harmonic source is calculated after the estimation of the background harmonics and the harmonic transfer impedance.

Key words：digital active distribution network；power quality；multiple harmonic source；division of harmonic contribution

随着电网的不断发展和低碳发展理念的普及，太阳能、风能等分布式电源作为清洁能源大量接入电网，导致传统电网的源荷关系发生了显著变化。为维持电网安全稳定、经济高效运行，电网控制由被动发展为主动，“主动电网”概念应运而生。与此同时，信息革命也在悄然发生，数字化作为信息革命的重要特征，其对电网的影响不可忽视，数字化主动配电网在能源网架、信息支撑和价值创造方面对传统电网赋能，实现业务数字化，数字价值化。数字化主动配电网中大量并网逆变器和控制系统接入电网，由此产生的谐波污染问题引起广泛关注[1-2]。非线性负荷和电力电子设备注入电网的谐波电流，不仅会使电网和负荷增加损耗，还会造成局部过热加速老化，缩短使用寿命等负面影响[3]，因此为有效治理谐波污染，改善电能质量，需要准确划分PCC处各谐波源的谐波污染责任，进行有效治理。

1　多谐波源责任划分方法概述

目前国内外在谐波责任划分领域有“干预式”[4-7]和“非干预式”两类方法。“干预式”方法由于需要向系统中人为注入谐波扰动，因而容易对系统造成不利影响，采用较少。较为常用的“非干预式”方法又可以分为参考阻抗法[8]和数据分析法，当前研究主要集中在数据分析法，很多研究者做出了有益探索。文献[9]提出波动量

收稿日期：2021－04－19

作者简介：李树荣（1991－），男，助理工程师，主要从事变电检修、电能质量工作。

法，利用PCC电压电流波动量比值估算谐波阻抗，进而划分谐波污染责任，但是精度无法保证，而且主导侧不能判定。文献[10]提出线性回归法，根据诺顿等效电路方程系数来计算系统侧谐波阻抗和背景谐波，进行谐波责任划分，但是当背景谐波非正态分布时，估计有偏，而且易受不良数据干扰。文献[11]提出了随机独立矢量法，利用独立随机矢量协方差为零来提取系统侧谐波阻抗，划分谐波责任，但是当系统侧谐波发射水平较高时，误差较大，结果不够精确。文献[12]提出了极大似然估计法，其模型建立在背景谐波正态分布的基础上，求解似然方程得到系统侧谐波阻抗值，计算谐波责任，然而实际系统中，非线性负荷停机时的测量背景谐波难以符合标准正态分布的假设。

独立分量分析(Independent Component Analysis，ICA)是近年发展起来的一种新的盲源分离技术，利用源信号的独立性或弱相关性对混合信号进行解混分离。其中快速独立分量分析法(FastICA)由于无需选择步长，收敛速度快等优点而最为常用，国内外已有学者将该方法应用到谐波污染责任划分问题上[13]，取得了比较理想的效果，但只针对单谐波源的谐波责任划分。

为将FastICA推广到多谐波源谐波责任划分领域，本文提出了基于FastICA的多谐波源谐波责任划分方法，利用PMU测量得到的同步电压电流数据经过FFT得到各次谐波数据。然后将各次谐波数据拆分为实部虚部(x-y)分量，分别代入多谐波源等效混合模型，由FastICA解混分离出各源信号和混合矩阵计算得出谐波阻抗和背景谐波，最后在PCC处谐波电压上投影得到各谐波源的谐波污染责任。

2 基于FastICA的多谐波源谐波污染责任划分方法

2.1 快速独立分量分析

目前解决盲源分离(Blind Source Separation，BSS)问题最常用的是ICA技术，其无需先验知识，只需要各源信号相互独立或存在弱相关性即可，而且其消除噪声性能佳，在消除噪声的同时，可以有效分离各源信号，对其他细节几乎无破坏。

ICA分析的数学模型为：

$$\boldsymbol{X}(t)=A\boldsymbol{S}(t) \tag{1}$$

式中：t为离散时刻，取值为$t=1,2,\cdots,t_n$；$\boldsymbol{S}(t)$为N个未知的源信号组成的矩阵，$\boldsymbol{S}(t)=[S_1(t),S_2(t),\cdots,S_N(t)]^T$；$\boldsymbol{X}(t)$为$M$个可观测信号组成的矩阵，$\boldsymbol{X}(t)=[X_1(t),X_2(t),\cdots,X_M(t)]^T$。

ICA建立在以下基本假设前提下：

a. 各源信号$S_i(t)$均值为0并为实随机变量，源信号之间统计独立；

b. 源信号数N小于等于混合观测信号数M，即$M\geqslant N$；

c. 各源信号$S_i(t)$至多有1个高斯信号，即至多有1个源信号的概率密度函数为正态分布。

FastICA算法采用牛顿迭代算法对数据进行处理，具有收敛速度快、分离效果好、迭代稳定、无步长参数、易于使用等优点，使之在ICA算法中应用较为广泛，因此，本文采用FastICA算法进行盲源分离。

FastICA算法以负熵作为衡量信号独立性的目标函数，采用近似负熵作为度量随机变量非高斯性的判据，负熵越大则其非高斯性越强。本文采用的FastICA算法的目标函数是一种基于最大熵原理的负熵近似计算法，其数学表达式如下：

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

式中：K是一个正常数，y、v是均值为0，方差为1的随机变量。G是一个非二次函数，这里采用如下所示的函数代替：

$$G(y)=y^3 \tag{3}$$

FastICA优化算法的实质是通过寻求使$J(y)$取得最大值的分离矩阵$\boldsymbol{W}$，求出对应的估计结果Y。由于现实中的源信号之间不可能总是完全相互独立，因此在进行盲信号处理之前要对混合信号做预处理，分为2步：第1步是去均值，避免数据量纲相差过大引起误差；第2步是白化，去除混合信号之间的相关性，减少迭代次数提高算法稳定性。去均值的公式为：

$$\hat{X}(t_i)=X(t_i)-\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}X(t_i) \tag{4}$$

式中：n为各观测信号的数据长度，取值应当适宜，若数据长度过大会增加计算量，每次计算时间跨度大，期间系统谐波容易变化；若数据长度过小则分离效果不佳，导致谐波污染责任划分有误。

白化处理是线性变换，有：

$$Z(t)=\boldsymbol{W}_0\hat{X}(t) \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{W}_0$ 为白化矩阵，其公式为 $\boldsymbol{W}_0=\Lambda^{-0.5}\boldsymbol{U}^T$，$\Lambda$ 为协方差矩阵 $\boldsymbol{C}_X$（$\boldsymbol{C}_X=\hat{X}\hat{X}^T$）的特征值矩阵，$\boldsymbol{U}$ 为 $\boldsymbol{C}_X$ 的特征向量矩阵。

经过上述处理过程后即可进行迭代分离，迭代的目的是使负熵最大化，通过对负熵最大近似值 $E\{G(W^TZ)\}$ 优化求得。经过公式推导可得优化后的牛顿迭代算法：

$$\begin{cases}W_{i+1}=E\{XG(W_i^TZ)\}-E\{G'(W_i^TZ)\}W_i\\ W_{i+2}=\dfrac{W_{i+1}}{\|W_{i+1}\|}\end{cases} \tag{6}$$

式中：$i=1,2,\cdots,m$，m 表示迭代次数。当 $\|W_{i+1}\|$ 没有变化或者变化小于给定值时，迭代完成。此时 Y 为最终分离的独立分量。

综上所述，求解步骤如图1所示。

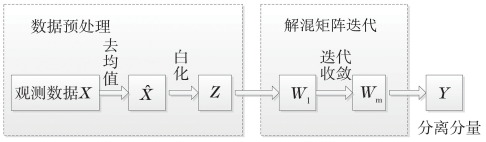


图1 FastICA求解步骤

2.2 基于FastICA的多谐波源谐波责任划分

配电网中多谐波源的谐波污染问题可以用图2表示。

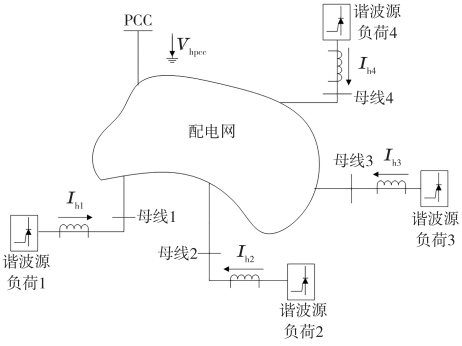


图2 配电网谐波污染

图2中PCC处的谐波电压是系统侧背景谐波和多个谐波源负荷共同作用的结果。配电网中谐波源负荷向电网中注入谐波电流，流经系统谐波阻抗，增强了PCC处的谐波电压，PCC处谐波电压可由下式计算：

$$\boldsymbol{V}_{hpcc}=\boldsymbol{I}_{h1}\boldsymbol{Z}_{h1pcc}+\boldsymbol{I}_{h2}\boldsymbol{Z}_{h2pcc}+\boldsymbol{I}_{h3}\boldsymbol{Z}_{h3pcc}+\boldsymbol{I}_{h4}\boldsymbol{Z}_{h4pcc}+\boldsymbol{V}_{h0} \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{V}_{hpcc}$ 是PCC处 h 次谐波电压，$\boldsymbol{I}_{h1}$，$\boldsymbol{I}_{h2}$，$\boldsymbol{I}_{h3}$，$\boldsymbol{I}_{h4}$ 是谐波源负荷1、谐波源负荷2、谐波源负荷3和谐波源负荷4的 h 次谐波电流，$\boldsymbol{Z}_{h1pcc}$，$\boldsymbol{Z}_{h2pcc}$，$\boldsymbol{Z}_{h3pcc}$，$\boldsymbol{Z}_{h4pcc}$ 分别是谐波源负荷1、2、3、4与PCC之间的 h 次谐波传递阻抗，$\boldsymbol{V}_{h0}$ 是 h 次背景谐波。$\boldsymbol{V}_{hpcc}$ 是各谐波源负荷混合作用的结果，可以等效看作FastICA模型中的混合信号，由此根据ICA数学模型建立谐波污染等效模型，如公式(8)：

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{V}_{hpcc}\\ \boldsymbol{I}_{h1}\\ \boldsymbol{I}_{h2}\\ \boldsymbol{I}_{h3}\\ \boldsymbol{I}_{h4}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{Z}_{h1pcc} & \boldsymbol{Z}_{h2pcc} & \boldsymbol{Z}_{h3pcc} & \boldsymbol{Z}_{h4pcc} & 1\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{I}_{h1}\\ \boldsymbol{I}_{h2}\\ \boldsymbol{I}_{h3}\\ \boldsymbol{I}_{h4}\\ \boldsymbol{V}_{h0}\end{bmatrix} \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{V}_{hpcc}=[\boldsymbol{V}_{hpcc}(t_1),\cdots,\boldsymbol{V}_{hpcc}(t_n)]$ 是PCC处 h 次谐波电压各时刻采样值向量，$\boldsymbol{I}_{h1}=[\boldsymbol{I}_{h1}(t_1),\cdots,\boldsymbol{I}_{h1}(t_n)]$，$\boldsymbol{I}_{h2}=[\boldsymbol{I}_{h2}(t_1),\cdots,\boldsymbol{I}_{h2}(t_n)]$，$\boldsymbol{I}_{h3}=[\boldsymbol{I}_{h3}(t_1),\cdots,\boldsymbol{I}_{h3}(t_n)]$ 和 $\boldsymbol{I}_{h4}=[\boldsymbol{I}_{h4}(t_1),\cdots,\boldsymbol{I}_{h4}(t_n)]$ 分别是谐波源负荷1、谐波源负荷2、谐波源负荷3和谐波源负荷4的 h 次谐波电流各时刻采样值向量。由于FastICA分离结果具有幅值和次序的不确定性，因此为解决幅值不确定性，可推导得式(9)：

$$\underbrace{\begin{bmatrix}\boldsymbol{V}_{hpcc}\\ \boldsymbol{I}_{h1}\\ \boldsymbol{I}_{h2}\\ \boldsymbol{I}_{h3}\\ \boldsymbol{I}_{h4}\end{bmatrix}}_{X}=\underbrace{\begin{bmatrix}k_1\boldsymbol{Z}_{h1pcc} & k_2\boldsymbol{Z}_{h2pcc} & k_3\boldsymbol{Z}_{h3pcc} & k_4\boldsymbol{Z}_{h4pcc} & k_5\\ k_1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & k_2 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & k_3 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & k_4 & 0\end{bmatrix}}_{A}\underbrace{\begin{bmatrix}\boldsymbol{I}_{h1-Y}\\ \boldsymbol{I}_{h2-Y}\\ \boldsymbol{I}_{h3-Y}\\ \boldsymbol{I}_{h4-Y}\\ \boldsymbol{V}_{h0-Y}\end{bmatrix}}_{S} \tag{9}$$

式中：$\boldsymbol{I}_{h1-Y}$，$\boldsymbol{I}_{h2-Y}$，$\boldsymbol{I}_{h3-Y}$，$\boldsymbol{I}_{h4-Y}$ 和 $\boldsymbol{V}_{h0-Y}$ 是FastICA分离结果，通过 k_1，k_2，k_3，k_4 的不同取值即可解决FastICA分离结果的幅值不确定性，次序不确定性可以通过分离结果与源信号的相关系数匹配解决，相关系数定义如下：

$$\rho_{ij}=\frac{\sum(S_i-\bar{S}_i)(y_j-\bar{y}_j)}{\sqrt{\sum(S_i-\bar{S}_i)^2}\sqrt{\sum(y_j-\bar{y}_j)^2}} \tag{10}$$

由于越相似其相关系数越大，因此当 ρ_{ij} 绝对值接近于1时，可以认为源信号 S_i 与分离信号 y_i

相匹配，即分离信号 y_i 是源信号 S_i 的对应分离结果。由式(9)可得谐波传递阻抗如下：

$$\boldsymbol{Z}_{h1pcc}=\frac{A(1,1)}{A(2,1)} \tag{11}$$

$\boldsymbol{Z}_{h2pcc}$，$\boldsymbol{Z}_{h3pcc}$，$\boldsymbol{Z}_{h4pcc}$同理可得。

下面计算谐波污染责任，如图 3 所示。

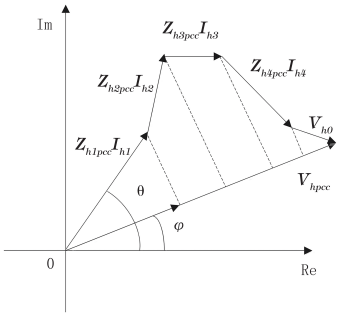


图 3　谐波污染责任计算

各谐波源 h 次谐波污染责任可由其在 PCC 处产生的谐波电压在 $\boldsymbol{V}_{hpcc}$ 上的投影与 $|\boldsymbol{V}_{hpcc}|$ 的比值计算得到，计算公式为：

$$\boldsymbol{HI}_{h1}=\frac{|\boldsymbol{Z}_{h1pcc}\boldsymbol{I}_{h1}\cos(\theta-\varphi)|}{|\boldsymbol{V}_{hpcc}|}\times 100\% \tag{12}$$

式中：$\boldsymbol{HI}_{h1}$ 为谐波源负荷 1 在 PCC 处 h 次谐波污染责任；θ 为谐波源负荷 1 的谐波电流在 PCC 处引起谐波电压 $\boldsymbol{Z}_{h1pcc}\boldsymbol{I}_{h1}$ 的相角；φ 为 PCC 处 h 次谐波电压 $\boldsymbol{V}_{hpcc}$ 的相角。

综上所述，基于 FastICA 的谐波责任划分步骤如图 4 所示。

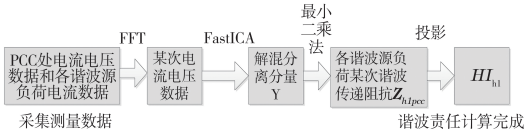


图 4　计算步骤示意

3　仿真分析

为验证上述方法的正确性，采用 MATLAB/simulink 平台搭建了 18 节点的 10 kV 配电网模型。拓扑结构如图 5 所示。

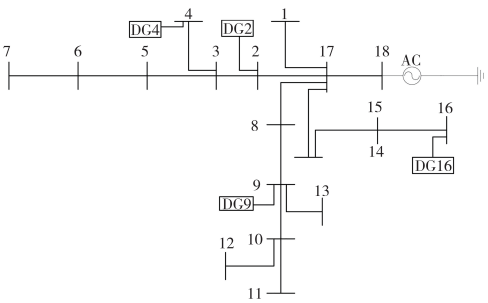


图 5　配电网拓扑结构

在节点 2、4、9、16 分别接入 DG，DG 接入处和 PCC 处均已安装电流电压量测装置。采用的 DG 模型为恒流源模型，参考并网逆变器典型谐波频谱设置参数(见表 1)。仿真时将谐波源负荷在 90%～110%额定值范围内随机波动，模拟实际系统中负荷的自然波动。

表 1　谐波源负荷的谐波电流典型频谱

谐波次数	幅值/%	相角/(°)
1 次	100	0.00
5 次	18.24	−55.68
7 次	11.90	−84.11
11 次	5.73	−143.56

首先，通过 simulink 仿真得到电流电压量测数据，采样频率为 12 800 Hz，数据长度为 256 个点。利用 FFT 得出所求某次谐波电流电压数据，以 5 次谐波电流电压为例，得 PCC 处 5 次谐波电压和各谐波源负荷 5 次谐波电流如图 6 所示。

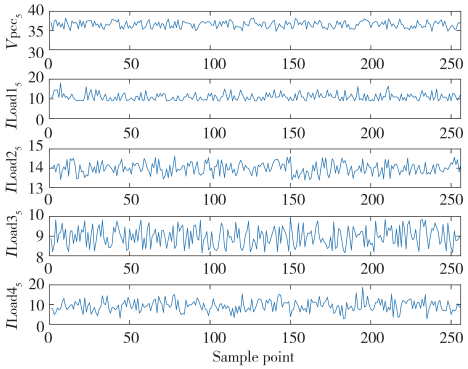


图 6　5 次谐波电压电流值

由于 FastICA 要求输入信号为实随机变量，因此在输入 FastICA 程序前将数据拆分为实部虚部分别进行 FastICA 计算。分离效果如图 7、图 8 所示。

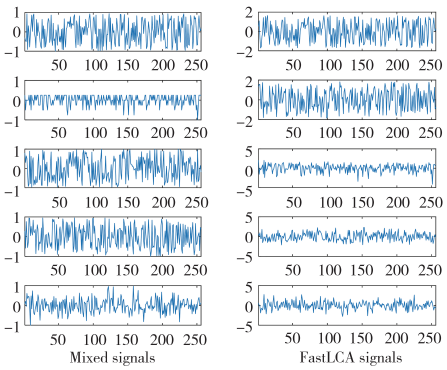


图 7　实部 FastICA 分离效果

由图 7、图 8 不难辨识混合信号与源信号对应关系，解出混合矩阵 $\boldsymbol{A}$，进而由式(11)(下转第 86 页)

像的透视变换进行坐标系变换，以增强自动抑制模型的泛化能力。

参考文献：

[1] 严有祥，洪志超，蔡长铭.输电线路智能视频监控系统的研究与应用[J].供用电，2012，25(5)：27－30.

[2] 李庚寅.电力系统分析基础[M].北京：机械工业出版社，2010：11－14.

[3] 吴天京，代　攀，闫　畔，等.新一代智能输变电技术标准体系研究[J].供用电，2020，37(3)：16－21.

[4] 龚钢军，张　帅，吴秋新，等.基于 TensorFlow 的高压输电线路异物识别[J].电力自动化设备，2019，39(4)：204－209.

[5] 蒋　涛，蔡富东，杨学杰，等.输电线路通道可视化远程巡检探讨与实践[J].中国电力，2016，49(11)：42－45.

[6] 邓元婧，汪从敏，夏开全，等.架空输电线路通道环境的巡视技术与应用[J].浙江电力，2014，33(8)：28－31.

[7] 高成成.临沂地区输电线路运维模式研究[D].济南：山东大学，2018.

[8] 王　波，马富齐，董旭柱，等.电力深度视觉：基本概念、关键技术与应用场景[J].广东电力，2019，32(9)：3－10.

[9] 薛禹胜，赖业宁.大能源思维与大数据思维的融合(一)大数据与电力大数据[J].电力系统自动化，2016，40(1)：1－8.

本文责任编辑：丁　力

(上接第 75 页)

求得各谐波源负荷到 PCC 处的谐波传递阻抗，最后由式(12)求得各谐波源在 PCC 处的谐波责任。计算结果(取 256 次均值)如表 2 所示。

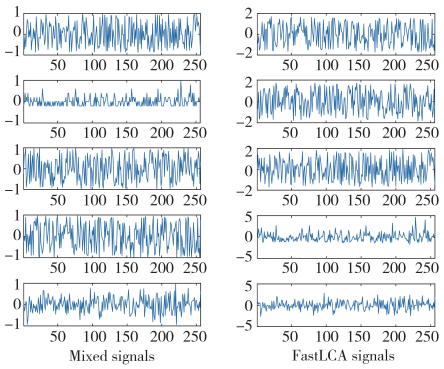


图 8　虚部 FastICA 分离效果

表 2　谐波责任计算结果

谐波源	精确值/%	计算值/%
谐波源负荷 1(DG2)	13.35	10.86
谐波源负荷 2(DG4)	27.14	24.31
谐波源负荷 3(DG9)	30.53	29.16
谐波源负荷 4(DG16)	21.94	18.64
背景谐波	7.04	17.03
总和	100	100

由表 2 数据可以看出，该方法谐波责任划分的精度较高，具有实际应用价值。

4　结束语

本文提出的基于 FastICA 的多谐波源谐波责任划分方法，通过采集数字化主动电网中布置的 PMU 测得的同步电压电流数据经过 FFT 得到各次谐波数据；然后将各次谐波数据拆分为实部虚部($x-y$)分量，分别代入多谐波源等效混合模型，由 FastICA 解混分离出各源信号和混合矩阵计算得出谐波阻抗和背景谐波；最后在 PCC 处谐波电压上投影得到各谐波源的谐波污染责任，实现准确划分多谐波源谐波污染责任的目的。

数字化主动配电网中各类传感器密集布置，数据越来越多元，比如热信号、光信号、振动信号等，如何利用多种数据，实现多角度监测谐波，需要在之后的工作中进一步探索。

参考文献：

[1] MAZIN HE，XU W，HUANG Biao.Determining the harmonic impacts of multiple harmonic-producing loads[J].IEEE Trans on Power Delivery，2011，26(2)：1187－1195.

[2] 石磊磊，贾清泉，林丽娟，等.电力电子化配电网谐波分布式全局优化治理策略[J].中国电机工程学报，2020，40(9)：2914－2924.

[3] 常亮亮，谢　毅，曾　萍，等.风电场新型综合电能质量治理装置[J].电力系统及其自动化学报，2016，28(3)：82－86.

[4] 师　威，袁继森.10 kV 配电线路故障原因分析及预防措施[J].河北电力技术，2012，31(6)：25－26.

[5] 王　磊，王秋莎，陈　岩.基于监测值和 IAHP 的电能质量综合评估方法[J].河北电力技术，2018，37(4)：5－8，39.

[6] 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.

[7] 朱国锋，牟龙华.基于配电网谐波责任划分的分布式有源滤波系统[J].电力系统自动化，2015，39(21)：126－131，150.

[8] Xu W，Liu Y. A method for determining customer and utility harmonic contribution at the point of common coupling[J].IEEE Trans on Power Delivery，2000，15(2)：804－811.

[9] 惠　锦，杨洪耕，叶茂清.基于阻抗归一化趋势判别的谐波发射水平估计[J].中国电机工程学报，2011，31(10)：73－80.

[10] 孙媛媛，尹志明.基于 M 估计稳健回归的多谐波源责任区分[J].中国电机工程学报，2012，32(31)：166－173，233.

[11] Hui J，Yang H G，Lin S F，et al.Assessing utility harmonic impedance based on the covariance characteristic of random vectors[J].IEEE Trans on Power Delivery，2010，25(3)：1778－1786.

[12] 华回春，贾秀芳，曹东升，等.系统谐波阻抗估计的极大似然估计方法[J].中国电机工程学报，2014，34(10)：1692－1699.

[13] Zhao Xi，Yang Honggeng.A new method to calculate the utility harmonic impedance based on FastICA[J]. IEEE Trans on Power Delivery，2016，31(1)：381－388.

本文责任编辑：王丽斌