

# 考虑谐波源相关性的多谐波源谐波责任划分

李昕朔, 李永刚, 吴滨源

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

**摘要:** 多谐波源谐波责任划分是谐波针对性治理的关键和前提, 谐波源间相关性严重影响谐波责任划分精度。针对这个问题, 提出一种考虑谐波源相关性的多谐波源谐波责任划分方法。首先, 论证谐波源相关性对谐波责任划分精度的影响; 然后考虑工程现场谐波源不可测情况, 将谐波源间电压电流关系转化为背景谐波电压与公共连接点谐波电流间关系, 提出短时阻抗最小判据构建背景谐波电压, 并借助基于密度的噪空间聚类减小背景谐波电压波动对计算结果的影响, 构建指标因子筛选关注谐波源用户在不同数据段上电压电流有效数据, 实现考虑谐波源相关性下多谐波源谐波责任划分精度提升; 最后通过仿真算例验证所提方法能够较好地减小谐波源相关性较强下给谐波责任划分带来的影响。

**关键词:** 多谐波源; 谐波责任划分; 谐波阻抗; 谐波源相关性; 数据筛选; DBSCAN 聚类

**中图分类号:** TM72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2691 (2025) 03-0084-12

## Division of Harmonic Responsibility among Multiple Harmonic Sources Regarding Harmonic Source Correlation

LI Xinshuo, LI Yonggang, WU Binyuan

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** The division of harmonic responsibility among multiple harmonic sources is the key and prerequisite for targeted harmonic mitigation. The correlation among harmonic sources significantly impacts the accuracy of harmonic responsibility division. To address this issue, we propose a method for dividing the harmonic responsibility among multiple harmonic sources considering harmonic sources correlation. Firstly, we demonstrate the influence of harmonic source correlation on the accuracy of harmonic responsibility division. Then, considering the unmeasurable harmonic source in engineering environments, we transform the voltage and current relationship between harmonic sources into the relationship between background harmonic voltage and harmonic current at the point of common coupling (PCC). We construct the background harmonic voltage using a short-time impedance minimum criterion. In order to mitigate the influence of background harmonic voltage fluctuation on the calculation results, we employ density-based noise-space clustering. Indicator factors are constructed to filter and select valid harmonic voltage and current data from different data segments for users of concern. Finally, simulation examples verifies that the proposed method can effectively reduce the impact on harmonic responsibility division under the strong harmonic source correlation.

**Key words:** Multiple harmonic sources; harmonic responsibility division; harmonic impedance; harmonic source correlation; data filtering; DBSCAN clustering

## 0 引言

随着高比例新能源接入电网和非线性负载的

增加, 谐波引起的电能质量问题日渐突出<sup>[1-3]</sup>, 为了衡量用户引起的谐波对电网及相邻用户的影响, 需要计算各用户的谐波责任。传统的谐波责任划分方法大多在谐波源间相互独立和背景谐波电压波动较小的情况下进行估算的。然而在许多使用电力电子设备的场合, 如新能源并网, 并网逆

变器的控制策略需要对电网电压和电流进行采样,这使得谐波源之间存在一定的相关性<sup>[4-6]</sup>。

谐波阻抗的计算是谐波责任量化的重要前提。主要有回归法<sup>[7,8]</sup>、随机矢量法<sup>[9]</sup>、波动量法<sup>[10]</sup>、盲源分离法<sup>[11-13]</sup>。而其中波动量法、随机矢量法和盲多谐波责任划分中,且多存在背景谐波稳定和谐波源相互独立的假设。

线性回归方法是多谐波源责任划分的重要方法,该方法通过对量测数据做回归计算谐波阻抗值,其通常需要进行数据筛选提高在背景谐波波动下的估计精度<sup>[14-16]</sup>。文献[15]用波动量法计算谐波阻抗,再通过均值漂移算法对谐波电压数据分段,最后通过偏最小二乘实现责任划分,但是波动量法计算谐波阻抗在背景谐波波动较大时精度较低。文献[16]利用动态时间弯曲距离筛选关注时段内谐波数据相似度高的波形,再采用最小二乘计算谐波阻抗实现谐波责任划分,但是最小二乘在求解方面局限性较大,会出现无法回归。文献[17]利用统计学中的奈尔系数筛选数据,但其假设条件是 PCC 处波动量是相互独立谐波源波动叠加的结果,当谐波源间不满足此条件时并未讨论。文献[18]提出一种考虑背景谐波波动和阻抗变化的多谐波源责任划分方法,该方法利用 OPTICS 聚类不同阻抗对应数据段,再利用皮尔逊系数筛选 PCC 谐波数据来计算阻抗值实现责任划分,文献[19]对实测数据进行互近似熵值计算,保留 CAE 阈值要求区段来排除背景谐波干扰,利用 M 估计稳健回归实现谐波责任划分,文献[20]利用受关注谐波源馈线和系统侧馈线电流间特征关系来构建指标因子实现多谐波源责任划分,因为实际系统谐波源不可测,这三篇研究都是以 PCC 谐波电压电流数据间相关性作为筛选准则进而计算谐波阻抗,但谐波源间相关性增大时谐波阻抗真实值和估计值间误差变大,使得责任划分精度下降。

针对谐波源间相关性导致责任划分精度失准问题,文献[21]通过聚合各元件阻抗计算附加阻抗,利用改进协方差特性建立谐波阻抗表达式从而改善谐波源相关性对责任划分精度的影响,但其未考虑多谐波源模型下的责任划分。文献[22]以短路容量来构建背景谐波电压,筛选出构建的背景谐波电压与 PCC 谐波电流弱相关区间从而减少谐波源相关性对计算精度的影响,但未考虑多

谐波源分布问题且背景谐波电压构建方式较为繁琐。

鉴于此,本文提出一种多谐波源责任划分方法,该方法适用于谐波源相关性较强和背景谐波波动较大的情形。首先考虑到谐波源电流不可测,谐波电流源相关性用关注用户测量电流和背景谐波电压相关性代替,根据短时阻抗最小判据的方法构建背景谐波电压,采用 DBSCAN 筛选数据减少背景谐波波动对计算结果的影响<sup>[23]</sup>,通过相关系数筛选出背景谐波电压和关注用户测量电流弱相关时间区间来计算系统谐波阻抗估计值,依据相关性作为指标参数筛选出良好数据,根据本文的等值法实现谐波源责任定量划分,通过仿真算例验证,并与现有方法比较,体现了本文所提方法的可行性及良好的精确度。

### 1 考虑多谐波源相关性的影响分析

以图 1 所示多谐波源模型作为分析对象。

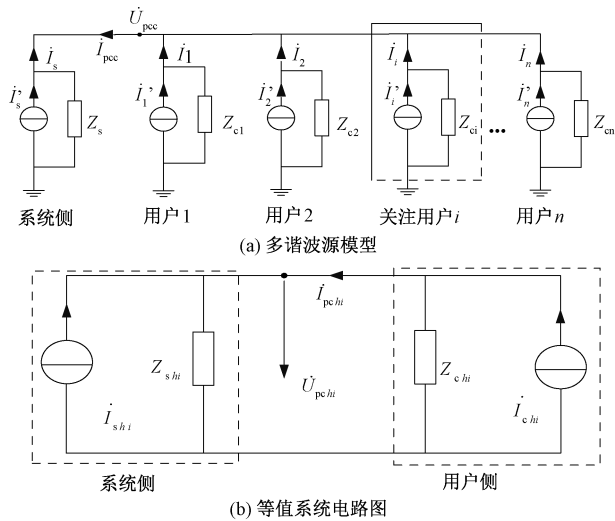


图 1 谐波源  $i$  诺顿等值电路

Fig. 1 Norton equivalent circuit of harmonic source  $i$

将图 1(a) 中系统侧和除关注谐波源用户  $i \in [1, n]$  外谐波源用户称为等值系统侧,其等值诺顿电路如图 1(b) 所示。关注用户  $i$  和等值系统侧  $h$  次谐波电流源分别为  $I_{chi}$  和  $I_{shi}$ , 相应的  $h$  次等值谐波阻抗为  $Z_{chi}$  和  $Z_{shi}$ ,  $Z_{shi}$  为关注谐波源用户  $i$  外其他谐波阻抗的并联值,  $U_{pchi}$  和  $I_{pchi}$  分别是等值系统公共连接点母线谐波电压和电流。

$$Z_{shi} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{sh0}} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{1}{Z_{chj}}} \quad (1)$$

式中:  $Z_{sh0}$  为未等值系统  $h$  次谐波阻抗。

从图 1(b) 诺顿等效电路图可得

$$\begin{cases} \dot{U}_{pchi} = \frac{Z_{shi}Z_{chi}}{Z_{shi} + Z_{chi}}(\dot{I}_{shi} + \dot{I}_{chi}) \\ \dot{I}_{pchi} = \frac{Z_{chi}\dot{I}_{chi}}{Z_{shi} + Z_{chi}} - \frac{Z_{shi}\dot{I}_{shi}}{Z_{shi} + Z_{chi}} \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)化简为

$$\dot{U}_{pchi} = \dot{I}_{pchi} \cdot Z_{shi} + \dot{I}_{shi} \cdot Z_{shi} = \dot{I}_{pchi} \cdot Z_{shi} + \dot{U}_{shi} \quad (3)$$

$U_{shi}$  为等值系统侧的  $h$  次背景谐波电压, 以往谐波阻抗计算误差来源主要分为下面几个方面:

(1) 背景谐波电压波动的影响; (2) 系统侧和用户侧谐波阻抗相对大小; (3) 谐波源之间的相关性相

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{E\{[\dot{I}_{chi} - E(\dot{I}_{chi})] \cdot [\dot{I}_{shi} - E(\dot{I}_{shi})]\}}{\sqrt{E\{[\dot{I}_{chi} - E(\dot{I}_{chi})]^2\}} \cdot \sqrt{E\{[\dot{I}_{shi} - E(\dot{I}_{shi})]^2\}}} \\ &= \frac{E\{[\alpha(\dot{I}_{shi} - E(\dot{I}_{shi})) + \dot{I}_{shi\perp} - E(\dot{I}_{shi\perp})] \cdot [\dot{I}_{shi} - E(\dot{I}_{shi})]\}}{\sqrt{E\{[\alpha\dot{I}_{shi} + \dot{I}_{shi\perp} - \alpha E(\dot{I}_{shi}) - E(\dot{I}_{shi\perp})]^2\}} \cdot \sqrt{E\{[\dot{I}_{shi} - E(\dot{I}_{shi})]^2\}}} \end{aligned} \quad (6)$$

$I_{shi\perp}$  和  $I_{shi}$  两者相互独立, 协方差系数为 0,  $E\{[\dot{I}_{shi} - E(\dot{I}_{shi})] \cdot [\dot{I}_{shi\perp} - E(\dot{I}_{shi\perp})]\} = 0$ , 式(6)进一步化简为

$$\rho = \frac{\sqrt{E\{[\dot{I}_{shi} - E(\dot{I}_{shi})]^2\}}}{\sqrt{E\{[\dot{I}_{shi} - E(\dot{I}_{shi})]^2\} + \frac{1}{\alpha^2}E\{[\dot{I}_{shi\perp} - E(\dot{I}_{shi\perp})]^2\}}} \quad (7)$$

幅值系数  $\alpha$  的变化会相应导致相关系数  $\rho$  的变化, 两者具有正相关关系, 将式(4)带入式(2), 可得

$$\begin{cases} \dot{U}_{pchi} = \frac{Z_{shi}Z_{chi}}{Z_{shi} + Z_{chi}} \left[ \underbrace{(\alpha + 1)\dot{I}_{shi}}_{\dot{I}'_{shi}} + \underbrace{\dot{I}_{shi\perp}}_{\dot{I}'_{shi\perp}} \right] \\ \dot{I}_{pchi} = \frac{Z_{chi}}{Z_{shi} + Z_{chi}} \underbrace{\dot{I}_{shi\perp}}_{\dot{I}'_{shi\perp}} - \frac{Z_{shi} - \alpha Z_{chi}}{(\alpha + 1)(Z_{shi} + Z_{chi})} \times \\ \underbrace{(\alpha + 1)\dot{I}_{shi}}_{\dot{I}'_{shi}} \end{cases} \quad (8)$$

定义  $I'_{shi} = (\alpha + 1)I_{shi}$ ,  $I'_{chi} = I_{shi\perp}$ ,  $Z'_{chi} = Z_{chi}$ ,

相关性大小。大多研究针对于(1)和(2), 但对于(3)相关研究较少。

采用文献[22]方式将  $I_{chi}$  分解为式(4)两部分来表达  $I_{shi}$ 、 $I_{chi}$  以及  $Z_{shi}$ 、 $Z_{chi}$  之间的相关关系。

$$\dot{I}_{chi} = \dot{I}_{shi\perp} + \alpha\dot{I}_{shi} \quad (4)$$

$I_{shi\perp}$  为  $I_{shi}$  的垂直分量, 两者相互独立,  $\alpha$  表示  $I_{shi}$  幅值系数,  $I_{shi}$ 、 $I_{chi}$  之间的相关系数用  $\rho$  表示为式(5):

$$\rho(I_{shi}, I_{chi}) = \frac{\text{cov}(\dot{I}_{shi}, \dot{I}_{chi})}{\sqrt{\text{var}(\dot{I}_{shi}) \text{var}(\dot{I}_{chi})}} \quad (5)$$

相关系数  $\rho$  越大表示相关性越强, 反之亦然。将式(4)带入式(5)得式(6):

可得

$$Z'_{shi} = \frac{Z_{chi}Z_{shi} - \alpha Z_{chi}^2}{(2\alpha + 1)Z_{chi} + \alpha Z_{shi}} \quad (9)$$

比较式(8)和式(2), 式(8)可以认为是参数集合  $\{I'_{shi}, I'_{chi}, Z'_{shi}, Z'_{chi}\}$  的谐波源模型, 其中谐波电流源分别  $I'_{shi} = (\alpha + 1)I_{shi}$ ,  $I'_{chi} = I_{shi\perp}$ , 在此模型中谐波电流源  $I'_{chi}$ 、 $I'_{shi}$  相互独立,  $Z'_{shi}$  是  $Z_{chi}$  和  $Z_{shi}$  的函数。

由图 1, 系统和关注用户  $i$  在 PCC 节点共同产生的谐波电压为式(2), 谐波用户  $i$  的谐波电压责任为

$$D_i = \frac{|Z_{chi}I_{chi}| \cos \theta_i}{|U_{pchi}|} \times 100\% \quad (10)$$

系统谐波电压责任为

$$D_s = \frac{|U_{shi}| \cos \theta_{shi}}{|U_{pchi}|} \times 100\% \quad (11)$$

式中:  $\theta_i$  和  $\theta_{shi}$  表示用户  $i$  和系统侧谐波电压  $U_{pchi}$  之间夹角。

由式(11)(12)可见谐波责任划分与  $Z_{shi}$  计算有直接关系, 且谐波源相关系数  $\rho$  和幅值系数  $\alpha$  有正相关关系, 由于幅值系数  $\alpha$  的存在, 系统谐波阻抗  $Z'_{shi}$  和  $Z_{shi}$  存在偏差, 所以, 谐波源相关性会影响谐波责任划分结果。

## 2 谐波阻抗计算与谐波源责任划分

### 2.1 谐波源相关性转换

上述分析,谐波阻抗的准确计算需要降低  $I_{chi}$  和  $I_{shi}$  之间的相关性,但由于谐波源电流  $I_{chi}$  和  $I_{shi}$  不可测,公共连接点母线谐波电压  $U_{pchi}$  和电流

$$\rho(\dot{U}_{shi}, \dot{I}_{pchi}) = \frac{\text{cov}(\dot{U}_{shi}, \dot{I}_{pchi})}{\sqrt{\text{var}(\dot{U}_{shi}) \text{var}(\dot{I}_{pchi})}} = \frac{\text{cov}(\dot{I}_{shi}, \dot{I}_{chi}) - (Z_{shi}/Z_{chi}) \text{var}(\dot{I}_{shi})}{\sqrt{\text{var}(\dot{I}_{shi}) \text{var}(\dot{I}_{chi}) + (Z_{shi}/Z_{chi})^2 \text{var}^2(\dot{I}_{shi}) + 2(Z_{shi}/Z_{chi}) \text{cov}(\dot{I}_{shi}, \dot{I}_{chi}) \text{var}(\dot{I}_{shi})}} \quad (12)$$

由式(5)可知,  $\text{cov}(I_{chi}, I_{shi})$  和  $\rho(I_{chi}, I_{shi})$  是正相关关系,通过式(12)类比可知,  $\rho(U_{shi}, I_{pchi})$  和  $\rho(I_{chi}, I_{shi})$  具有正相关关系,所以可通过降低  $\rho(U_{shi}, I_{pchi})$  来减小  $\rho(I_{chi}, I_{shi})$ 。

### 2.2 短时阻抗最小判据构建背景谐波电压

降低背景谐波电压和 PCC 谐波电流可以减小谐波源相关性对责任划分的影响。本文采用短时阻抗最小判据实现对背景谐波电压的构建。

电力系统运行方式改变会导致系统谐波阻抗变化。但在较短时间内,可认为其变化很小。以标准差  $\sigma$  来表征系统谐波阻抗的变化程度<sup>[24]</sup>,在某个包含有  $N$  个数据点的短数据段内:

将式(3)转化为  $N$  个离散点的形式

$$\dot{U}_{pchi}(n) + Z_{shi} \dot{I}_{pchi}(n) = \dot{U}_{shi}(n) \quad (13)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [Z_{shi}(n) - \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N Z_{shi}(m)]^2} \quad (14)$$

式中:  $Z_{shi}(n)$ 、 $Z_{shi}(m)$  分别为  $n$ 、 $m$  点的系统谐波阻抗。将式(13)代入式(14):

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| \frac{\dot{U}_{shi}(n) - \dot{U}_{pchi}(n)}{\dot{I}_{pchi}(n)} - \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \frac{\dot{U}_{shi}(m) - \dot{U}_{pchi}(m)}{\dot{I}_{pchi}(n)} \right|^2 \quad (15)$$

上式只有背景谐波电压  $U_{shi}$  是未知的,通过找到  $U_{shi}$  的一组解来最小化  $\sigma^2$ , 根据文献[25]化简式(15):

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \left( \frac{\dot{U}_{pchi}(m)}{\dot{I}_{pchi}(m)} - \frac{\dot{U}_{pchi}(n)}{\dot{I}_{pchi}(n)} \right) - \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \left( \frac{\dot{U}_{shi}(m)}{\dot{I}_{pchi}(m)} - \frac{\dot{U}_{shi}(n)}{\dot{I}_{pchi}(n)} \right) \right|^2 \quad (16)$$

$I_{pchi}$  是可测的,因此需要通过其两者关系来降低谐波源之间的相关性。

通过式(2)和式(3)得到,  $U_{shi} = I_{shi} \cdot Z_{shi}$ ,  $I_{pchi} = (I_{chi} \cdot Z_{chi} - I_{shi} \cdot Z_{shi}) / (Z_{chi} + Z_{shi})$ , 计算两者之间相关系数如式(12):

式(13)可以表达为

$$A U_{shi} = b \quad (17)$$

其中:

$$A = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} -\frac{N-1}{\dot{I}_{pchi}(1)} & \frac{1}{\dot{I}_{pchi}(2)} & \dots & \frac{1}{\dot{I}_{pchi}(N)} \\ \frac{1}{\dot{I}_{pchi}(1)} & -\frac{N-1}{\dot{I}_{pchi}(2)} & \dots & \frac{1}{\dot{I}_{pchi}(N)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{\dot{I}_{pchi}(1)} & \frac{1}{\dot{I}_{pchi}(2)} & \dots & -\frac{N-1}{\dot{I}_{pchi}(N)} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$U_{shi} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{shi}(1) \\ \dot{U}_{shi}(2) \\ \vdots \\ \dot{U}_{shi}(N) \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} \dot{b}(1) \\ \dot{b}(2) \\ \vdots \\ \dot{b}(N) \end{bmatrix} \quad (19)$$

由于矩阵稠密,且计算时间复杂度较高,针对此问题采用基于 Householder 变换的 QR 分解来求解,其计算步骤为

矩阵表示为向量形式,  $A = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ , 取

$$\omega_1 = \frac{\alpha_1 - a_1 e_1}{\|\alpha_1 - a_1 e_1\|_2}, a_1 = \|\alpha_1\|_2 \quad (20)$$

$$H_1 = I - 2\omega_1 \omega_1^T$$

得到式(21):

$$\left\{ \begin{aligned} H_1 A &= (H_1 \alpha_1, H_1 \alpha_2, \dots, H_1 \alpha_n) = \begin{bmatrix} r_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 0 & & & \\ \vdots & & & \\ 0 & & & \end{bmatrix} \\ B_1 &= (\beta_2, \beta_3, \dots, \beta_n) \in R^{n-1} \\ \omega_2 &= \frac{\beta_2 - b_2 e_1}{\|\beta_2 - b_2 e_1\|_2}, b_2 = \|\beta_2\|_2 \end{aligned} \right. \quad B_1 \quad (21)$$

则

$$\hat{\mathbf{H}}_2 = \mathbf{I} - 2\omega_2 \omega_2^T, \mathbf{H}_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \hat{\mathbf{H}}_2 \end{pmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{H}_2(\mathbf{H}_1 \mathbf{A}) = \begin{pmatrix} r_1 & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ 0 & r_2 & a_{21} & \cdots & a_{2n} \\ 0 & 0 & & & \\ \vdots & \vdots & & \mathbf{C}_2 & \\ 0 & 0 & & & \end{pmatrix}, \mathbf{C}_2 \in \mathbb{R}^{n-2} \quad (23)$$

以此类推,得到  $n-1$  个  $\mathbf{H}_{n-1}$  矩阵:

$$\mathbf{H}_{n-1} \cdots \mathbf{H}_2 \mathbf{H}_1 \mathbf{A} = \begin{pmatrix} r_1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ 0 & r_2 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & r_n \end{pmatrix} = \mathbf{R} \quad (24)$$

得到  $\mathbf{A} = \mathbf{Q}\mathbf{R}$ , 其中  $\mathbf{Q}$  为正交矩阵,  $\mathbf{R}$  为上三角矩阵:

$$\begin{cases} \mathbf{Q} = \mathbf{H}_1 \mathbf{H}_2 \cdots \mathbf{H}_{n-1} \\ \mathbf{R} = \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{A} = \mathbf{Q} \mathbf{A} \end{cases} \quad (25)$$

得到背景谐波电压  $U_{shi}$  的估计值:

$$U_{shi} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{Q}^T \mathbf{b} \quad (26)$$

### 2.3 DBSCAN 聚类筛选数据

背景谐波电压波动是导致估计结果偏差的重要因素,本文通过 DBSCAN 对构造的背景谐波电压  $U_{shi}$  进行数据筛选。

根据式(2)

$$|\dot{U}_{pchi}| \angle \theta_{(\dot{U}_{pchi}, I_{pchi})} = |\dot{I}_{pchi}| Z_{shi} + |\dot{U}_{shi}| \angle \theta_{(\dot{U}_{shi}, I_{pchi})} \quad (27)$$

式中:  $\angle \theta_{(\dot{U}_{pchi}, I_{pchi})}$  为  $U_{pchi}$  和  $I_{pchi}$  之间相位角,  $\angle \theta_{(\dot{U}_{shi}, I_{pchi})}$  为  $U_{shi}$  和  $I_{pchi}$  之间相位角;  $|\cdot|$  表示变量幅值。

定义:

$$\begin{cases} U_{real} = |\dot{U}_{pchi}| \cos \theta_{(\dot{U}_{pchi}, I_{pchi})} \\ U_{imag} = |\dot{U}_{pchi}| \sin \theta_{(\dot{U}_{pchi}, I_{pchi})} \end{cases} \quad (28)$$

$$\begin{cases} U_{shireal} = |\dot{U}_{shi}| \cos \theta_{(\dot{U}_{shi}, I_{pchi})} \\ U_{shimag} = |\dot{U}_{shi}| \sin \theta_{(\dot{U}_{shi}, I_{pchi})} \end{cases} \quad (29)$$

将式(28)(29)带入式(27),并将其分解为实部和虚部表达形式:

$$\begin{cases} U_{real} = |\dot{I}_{pchi}| Z_{sreal} + U_{shireal} \\ U_{imag} = |\dot{I}_{pchi}| Z_{simag} + U_{shimag} \end{cases} \quad (30)$$

式中:  $Z_{sreal}$  和  $Z_{simag}$  为系统谐波阻抗实部和虚部,  $U_{shireal}$ 、 $U_{shimag}$  为背景谐波电压实部和虚部。

DBSCAN 算法对于任意形状的数据分布都具有较好聚类效果且对噪声数据不敏感。DBSCAN 聚类中将核心点定义为在对象半径  $Eps$  内含有超过最小数目  $MinPts$  的点,该点都在簇内,而边界点和噪音点是簇外的点。

DBSCAN 聚类步骤如下:

- (1) 数据集  $D$  中的所有对象标记为未处理状态;
- (2) 检查数据集  $D$  中的每个对象  $p$  的  $Eps$  邻域  $N_{Eps}(p)$  包含的对象数是否小于最小数目  $MinPts$ , 如果是进入步骤(3), 如果否进入步骤(4);
- (3) 标记对象  $p$  为边界点或噪声点;
- (4) 标记对象  $p$  为核心点, 并建立新簇  $C_i$ , 将  $N_{Eps}(p)$  中未归入任何一个簇的对象加入  $C_i$ ;
- (5) 检查是否所有对象  $p$  已经归入某个簇或标记为边界或噪声点, 如果否, 回到步骤(2), 如果是, 输出结果。

### 2.4 阻抗计算与责任划分指标因子构建

文献[25]根据 PCC 处测量谐波数据的相关特性,使用相关函数计算出谐波阻抗。但是,当谐波源的相关性增加时,这种方法会产生较大的估计误差。

在概率论和统计学中,相关系数表示 2 个随机变量间线性关系强弱,通常用归一化相关系数表征相关函数随时间间隔  $k$  的衰减程度<sup>[26]</sup>。归一化相关系数大小如表 1 所示。

表 1 归一化相关系数

| Tab. 1 Normalized correlation coefficients |      |
|--|------|
| 相关系数                                       | 相关程度 |
| 0~0.3                                      | 弱相关  |
| 0.3~0.5                                    | 实相关  |
| 0.5~0.8                                    | 显著相关 |
| 0.8~1.0                                    | 高度相关 |

在本文所提出的方法中,分别估计谐波阻抗的实部和虚部,这里介绍实部的估计方法。 $U_{shireal}$  和  $|I_{pchi}|$  之间的归一化交叉相关函数<sup>[26]</sup>如下式:

$$r(k) = \frac{\frac{1}{(n-k)} \sum_{i=k+1}^n U_{shireal}(i) |\dot{I}_{pchi}(i-k)|}{\frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n U_{shireal}^2(i) \cdot \sum_{i=1}^n |\dot{I}_{pchi}(i)|^2}} \quad (31)$$

式中: $n$ 为总样本数; $i$ 为采样点; $k$ 为两个序列的时间间隔。归一化相关函数随着 $k$ 的增加而减少,以 $|r(k)| < 0.3$ 来筛选选择 $|\dot{I}_{pchi}|$ 和 $U_{shireal}$ 弱相关区间,将 $k_{\max}$ 定义为满足 $|r(k)| < 0.3$ 的最大 $k$ ;因此,当 $k$ 属于 $[k_{\max}, n-1]$ 时, $|\dot{I}_{pchi}|$ 和 $U_{shireal}$ 可认为是弱相关的其互相关函数可认为等于0。

式(28)实部部分乘以 $|\dot{I}_{pchi}|$ ,并计算 $U_{shireal}$ 和 $|\dot{I}_{pchi}|$ 间互相关函数

$$U_{real} |\dot{I}_{pchi}| = |\dot{I}_{pchi}| Z_{sreal} |\dot{I}_{pchi}| + U_{shireal} |\dot{I}_{pchi}| \quad (32)$$

$$\begin{cases} \frac{1}{n-k} \sum_{i=k+1}^n U_{real}(i) \cdot |\dot{I}_{pchi}(i-k)| = \\ \frac{Z_{sreal}}{n-k} \sum_{i=k+1}^n |\dot{I}_{pchi}(i)| \cdot |\dot{I}_{pchi}(i-k)| + \\ \underbrace{\frac{1}{n-k} \sum_{i=k+1}^n U_{shireal}(i) \cdot |\dot{I}_{pchi}(i-k)|}_{\approx 0} \end{cases} \quad (33)$$

可得每个时间间隔 $k$ 的谐波阻抗实部大小:

$$\begin{aligned} E\{U_{pcc}(n)(I'_{hi}(n-k))^*\} - Z_{chi} E\{I'_{hi}(n)(I'_{hi}(n-k))^*\} \\ = \sum_{k=1,2,\dots,n}^{k \neq i} Z_{chk} E\{I'_{hi}(n)(I'_{hi}(n-k))^*\} + Z_{sh0} E\{I'_{hi}(n)(I'_{hi}(n-k))^*\} \\ \underbrace{Z_{shi} E\{I'_{hi}(n)(I'_{hi}(n-k))^*\}} \end{aligned} \quad (37)$$

文献[20]分析了关注谐波源 $i$ 和系统侧馈线电流波动量之间的联系,并利用受关注谐波源馈线和系统侧馈线电流间特征关系来构建指标因子实现多谐波源责任划分,但从式(37)可以看到谐波源间相关性增大会使筛选数据计算的谐波阻抗有较大误差。由于实际系统谐波源不可测,文献[20]本质还是筛选PCC谐波电压电流数据相关性高的数据,这种筛选方法保留的数据并不能避免谐波源相关性对计算结果带来的误差,且关注用户外谐波源波动也会对数据筛选造成影响。本文则通过构建背景谐波电压 $U_{shi}$ ,通过设定的量测数据相关系数阈值 $k$ 来筛选 $U_{shireal}$ 和 $|\dot{I}_{pchi}|$ 间弱相关区间,从式(29)可知在此弱相关区间可以削弱谐波源间相关性对关注用户责任划分结果的影

$$Z_{sreal}(k) = \frac{\sum_{i=k+1}^n U_{real}(i) \cdot |\dot{I}_{pchi}(i-k)|}{\sum_{i=k+1}^n |\dot{I}_{pchi}(i)| \cdot |\dot{I}_{pchi}(i-k)|}, \quad k \in [k_{\max}, n-1] \quad (34)$$

对计算的 $Z_{sreal}$ 求平均,得到谐波阻抗实部估计值为式(35):

$$Z_{sreal} = \frac{1}{n-k_{\max}} \sum_{k=k_{\max}}^{n-1} Z_{sreal}(k) \quad (35)$$

同理可计算等值系统谐波阻抗虚部。

根据计算的系统谐波阻抗来对多谐波源用户实现责任划分。如图1(a)所示,公共连接点谐波问题由 $n$ 个谐波源共同作用,各谐波源的 $h$ 次谐波电流表示为 $I'_{h1}, I'_{h2}, \dots, I'_{hi}, \dots, I'_{hn}$ ( $h$ 表示谐波次数, $n$ 表示谐波源馈线编号),公共连接点处的谐波电压 $U_{pcc}$ 为

$$U_{pcc} = \underbrace{Z_{chi} I'_{hi}}_{V_{hi}} + \underbrace{Z_{ch2} I'_{h2} + Z_{ch3} I'_{h3} + \dots + Z_{chn} I'_{hn}}_{U_h} + U_{h0} \quad (36)$$

式中: $U_{h0}$ 表示未等值系统背景谐波电压。

对式(36)两端同乘以 $I'_{hi}$ , $U_{pcc}$ 和 $I'_{hi}$ 间相关函数可以表示为式(37):

响。

根据式(31)筛选得到的弱相关区间可得关注谐波源用户 $i$ 谐波电流和谐波电压采样数据 $I_{pchi}^F$ 、 $U_{pchi}^F$ (上标F表示经过筛选后的变量),将其定义为第 $i$ 个数据段,在此筛选的数据段估算得 $Z_{shi}$ ,仿真实验表明该方法既能保证数据的完整性,又能筛选出符合估算谐波责任划分的采样数据。

当关注谐波源用户 $i$ 单独作用时,等值系统侧在PCC产生的谐波电压 $U_{s-pchii}^F$ 为

$$E(U_{s-pchii}^F) \approx E(U_{pchii}^F) + Z_{shi} E(I_{pchii}^F) \quad (38)$$

式中: $E(\cdot)$ 表示变量的均值。

同理,谐波源用户 $i$ 在PCC产生的谐波电压 $U_{c-pchii}^F$ 为

$$E(U_{c-pchii}^F) = E(U_{pchii}^F) - E(U_{s-pchii}^F) \quad (39)$$

以  $U_{c-pchi}$  在  $U_{pchi}$  的投影作为谐波责任定量划分准则, 如下图 2 所示。

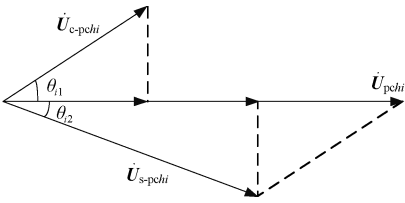


图 2  $h$  次谐波电压投影图

Fig. 2 Vector projection diagram for  $h$  harmonic voltage

采用文献[20]方式计算关注谐波源用户  $i$  在第  $i$  个数据筛选段的谐波责任  $\mu_{ii}$  为

$$\mu_{ii} = \frac{|E(\dot{U}_{c-pchii}^F)|^2 + |E(\dot{U}_{pchii}^F)|^2 - |E(\dot{U}_{s-pchii}^F)|^2}{2|E(\dot{U}_{pchii}^F)|^2} \quad (40)$$

在一个谐波责任划分周期内,  $n$  个谐波源用户可得  $n$  个筛选后的数据段, 在第  $j \neq i \in [1, n]$  个数据筛选段, 谐波源用户  $i$  在其等值系统侧 PCC 产生的谐波电压为

$$E(\dot{U}_{s-pchij}^F) \approx E(\dot{U}_{pchij}^F) + Z_{shi}E(\dot{I}_{pchij}^F) \quad (41)$$

关注谐波源用户  $i$  在第  $j$  个数据筛选段在 PCC 产生的谐波电压为

$$E(\dot{U}_{c-pchij}^F) = E(\dot{U}_{pchij}^F) - E(\dot{U}_{s-pchij}^F) \quad (42)$$

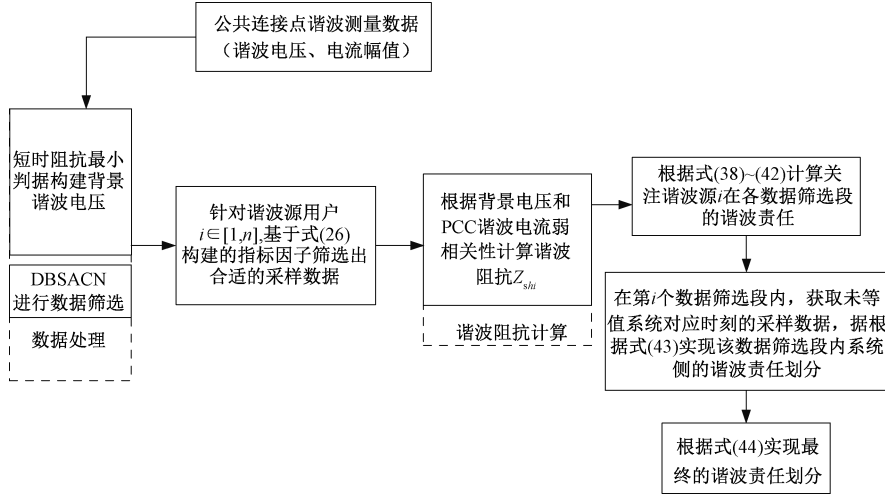


图 3 谐波责任划分流程图

Fig. 3 Responsibility division flow chart

### 3 仿真算例验证

#### 3.1 仿真算例设置

根据图 1 搭建 3 谐波源仿真模型, 以 3 次谐波为例分析谐波责任划分情况。

在第 1.1 节分析了谐波源之间的相关性, 假

将  $U_{s-pchij}^F$ 、 $U_{c-pchij}^F$  代替式 (38) 中的  $U_{s-pchii}^F$ 、 $U_{c-pchii}^F$  就可得关注谐波源用户  $i$  在第  $j$  个数据筛选段内的谐波责任  $\mu_{ij}$ , 同理可得到其他谐波源用户在责任划分周期内的谐波责任。

在第  $i$  个筛选数据段内, 获取未等值系统采样点数据, 根据式 (38) 得系统等值电压源  $E(U_{s-pch0i}^F)$ , 初始系统侧在第  $i$  数据段内谐波责任为

$$\mu_{i0} = \frac{|E(\dot{U}_{s-pch0i}^F)|}{|E(\dot{U}_{pchii}^F)|} \quad (43)$$

为减少估计误差, 在  $p \in [1, n]$  个数据段内,  $n$  个谐波源用户在数据段  $p$  内有  $\sum_{i=0}^n \mu_{ip} = \mu_p$ , 假设每个数据段有效采用数据数目为  $N_p$ , 总的有效采样数目为  $\sum_{p=1}^n N_p = N$ , 最终关注谐波源用户  $i$  的谐波电压责任为

$$\mu_i = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^n \frac{\mu_{ip}}{\mu_p} N_p \quad (44)$$

#### 2.5 责任划分流程图

综上, 考虑到 PCC 处多谐波源间相关性的情形, 通过数据构造和实测数据相关性估算图 1 等值系统的谐波阻抗, 进而基于上述方法实现多谐波源的责任划分。

设参考谐波电流源  $I_{sp}$  和  $I_{cp}$  相互独立。  $I_{cp}$  幅值为 80 A,  $|I_{sp}|$  为  $|I_{cp}|$  的  $m$  倍, 向  $|I_{cp}|$  和  $|I_{sp}|$  添加  $\pm 10\%$  随机扰动和 5% 正弦扰动;  $I_{sp}$  相角设置为  $20^\circ$ ,  $I_{cp}$  相角设置为  $-20^\circ$  并添加  $\pm 10\%$  随机扰动和 5% 正弦扰动。考虑到相关性影响, 将谐波电流源分别设置为  $I_s = I_{sp}$ ,  $I_{c1} = \beta_1 I_{sp} + I_{cp}$ ,  $I_{c2} = \beta_2 I_{sp} + I_{cp}$ ,  $I_{c3} =$

$\beta_3 I_{sp} + I_{cp}$ , 分别取  $m = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.2, \beta_1 = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.2$ , 图4为用户1谐波源电流  $I_{c1}$  和等值系统谐波源  $I_s$  之间相关性。

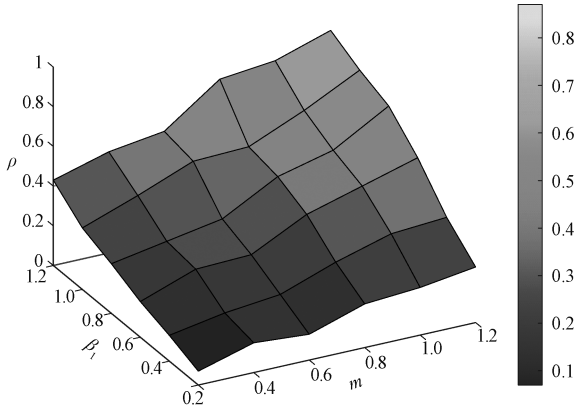


图4 相关系数变化

Fig. 4 Change of the correlation coefficient

上图可见,  $\beta_1$  和  $m$  为常数时, 相关系数分别随  $m$  和  $\beta_1$  增加而增加, 通过调整  $\beta_i$  和  $m$  来模拟不同的相关情况。

### 3.2 仿真结果分析

仿真设置系统侧三次谐波阻抗设置为  $5 + j25 \Omega$ , 用户侧3个谐波源谐波阻抗分别为  $Z_{c1} = 15 + j55 \Omega, Z_{c2} = 20 + j40 \Omega, Z_{c3} = 50 + j120 \Omega$ 。

以用户1作为受关注谐波源用户, 仿真生产400个谐波电压电流采样数据, 采用阻抗偏差最小构建背景谐波电压, 通过 DBSCAN 对数据筛选结果如图5所示。

根据 DBSCAN 聚类筛选后的背景谐波电压实部和 PCC 谐波电流之间相关性系数如图6(b)所示。

通过式(34)式(35)计算谐波阻抗值, 调整  $\beta_i$  和  $m$  的取值, 以表1划分的4种典型的相关程度分析谐波源间相关性对谐波阻抗估计的影响, 其中方法1为波动量法, 方法2为随机矢量法, 方法3为独立成分分析法, 方法4为本文所提方法, 谐波阻抗实部和虚部误差结果如图7所示。

方法1~4计算误差随着背景谐波波动增大以及谐波源间之间相关性的增加而增加。方法1受背景谐波电压波动影响较大, 在谐波源相关性较强时误差较大; 方法2假设背景谐波电压和 PCC 测量谐波电流相关性较弱, 然而随着背景谐波增大, 这一假设很难成立; 当背景谐波波动增加, 或谐波源间的相关性很强时, 方法3就不太有效; 相

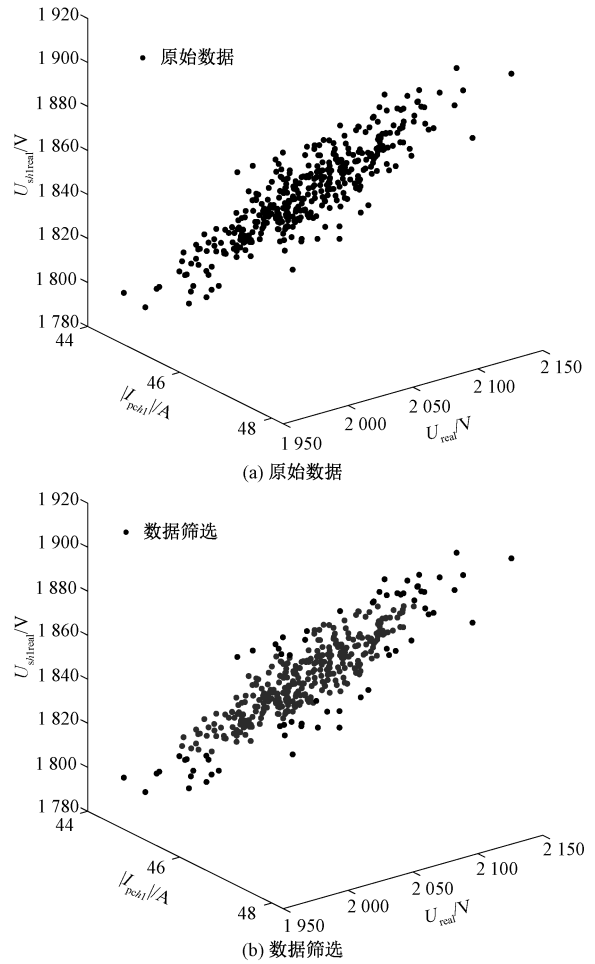


图5 背景谐波电压、PCC 谐波电压和电流数据分布  
Fig. 5 Distribution of background harmonic voltage, PCC harmonic voltage and current data

比之下, 当谐波源间相关性较强, 背景谐波波动较大时所提方法仍具有较好的准确性。

根据2.4节所提方法实现谐波责任划分, 图8为谐波源用户1在3个数据区段筛选出的谐波电流  $I_{pch1j}^r (j=1, 2, 3)$  良好数据。

图8中蓝色、绿色和紫色实线分别代表关注谐波用户1在1、2、3数据段的有效数据, 其有效数据个数分别为  $N_1 = 323, N_2 = 282, N_3 = 300$ , 通过式(45)构建的指标因子计算谐波源1的谐波责任。

采用文献[20]方法筛选关注谐波源用户1在3个数据区段内的有效数据, 结果如图9所示, 图中蓝色、绿色和紫色方形实点代表关注谐波用户1在1、2、3数据段的有效数据, 有效数据个数分别为  $N_1 = 306, N_2 = 329, N_3 = 318$ 。

采用本文和文献[20]方法进行比较, 以相关系数  $\rho$  的变化分析对责任划分结果的影响, 仿真

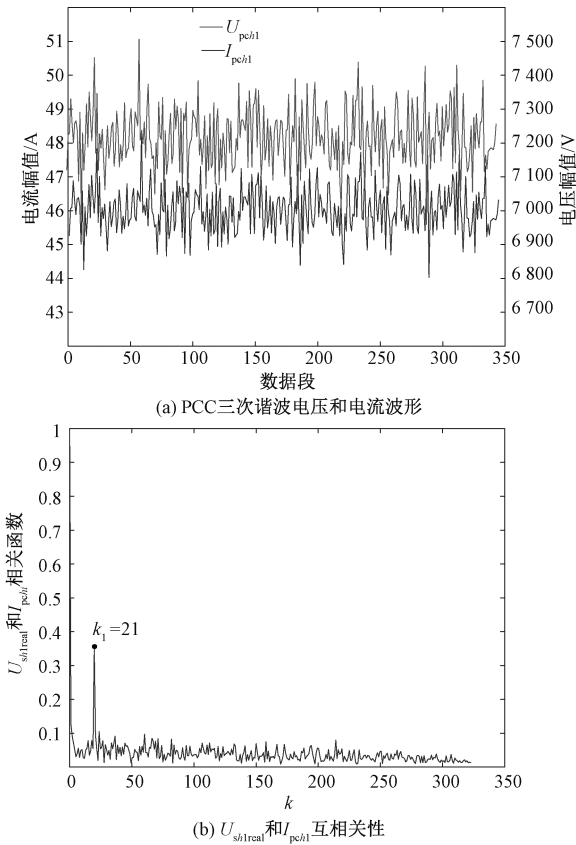


图6 背景谐波电压实部和PCC谐波电流相关系数  
Fig. 6 Correlation coefficients between background harmonic voltage real part and PCC harmonic current

结果见表2。

表2 相关系数与谐波责任划分关系

Tab. 2 Relationship between correlation coefficient and harmonic responsibility division

| 相关系数        | 方法   | 谐波责任划分/% |       |
|-------------|------|----------|-------|
|             |      | 系统侧      | 用户1   |
| $\rho=0.07$ | 本文方法 | 6.12     | 19.43 |
|             | 文献方法 | 5.34     | 19.21 |
|             | 理论值  | 6.25     | 19.56 |
| $\rho=0.23$ | 本文方法 | 6.25     | 18.34 |
|             | 文献方法 | 6.69     | 17.93 |
|             | 理论值  | 6.12     | 18.51 |
| $\rho=0.5$  | 本文方法 | 5.37     | 18.12 |
|             | 文献方法 | 5.02     | 19.32 |
|             | 理论值  | 5.74     | 18.27 |
| $\rho=0.78$ | 本文方法 | 5.13     | 17.34 |
|             | 文献方法 | 4.61     | 15.94 |
|             | 理论值  | 5.46     | 17.20 |

由表2可知,两种方法均能较好的实现谐波责任划分,本文方法最大误差为0.33%,文献[20]方法为1.26%,但是当谐波源之间相关性增大时文献[20]的计算误差逐渐变大,而本文方法仍能保证计算的准确性,说明了本文方法的有效性。

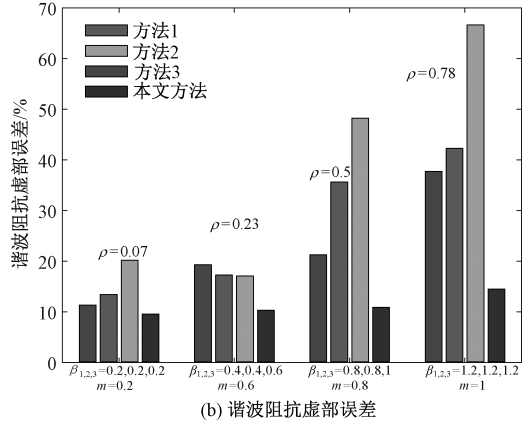
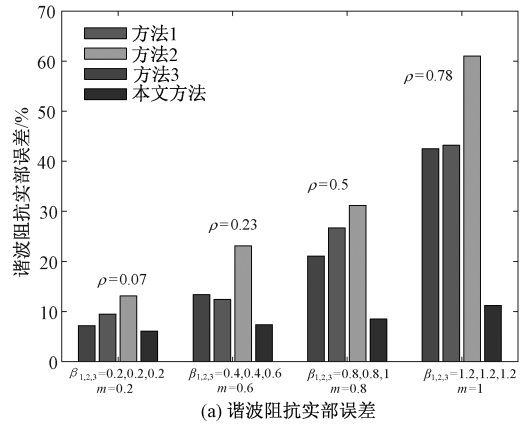


图7 相关性和谐波阻抗计算误差间关系

Fig. 7 Correlation coefficient between correlation and harmonic impedance calculation errors

## 4 结论

针对PCC处多谐波源情形,本文提出一种考虑谐波源相关性的谐波源责任划分的方法,得到结论如下:

(1)谐波源之间的相关性将导致现有的系统谐波阻抗估计方法出现较大的误差。本文提出了一种方法,可以通过构造和测量数据来抑制不可测量的谐波源之间的相关性的影响。当两侧谐波源的相关性较强时,所提出的方法可以得到较好的计算结果,同时,对背景谐波数据的处理使得该方法可以抵抗明显的背景谐波波动。

(2)依据相关系数作为筛选良好采样点数据的指标,在谐波源相关性较大的情形下,仍能保证数据的合理与完整性;综合考虑了各个数据段的筛选,通过综合指标对谐波责任划分,仿真验证了该方法的有效性。

(3)谐波阻抗在一个谐波责任划分周期内变化是下一步的研究重点。

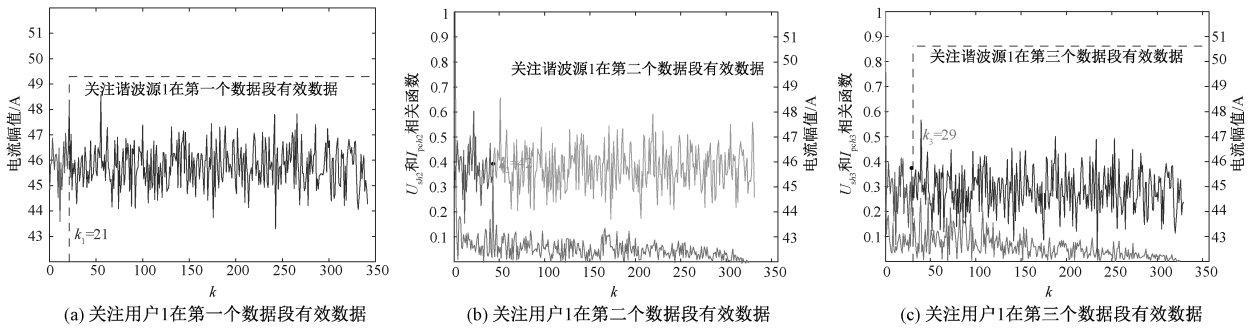


图8 关注用户1各数据段筛选

Fig. 8 Harmonic source 1 filtering of each data segment

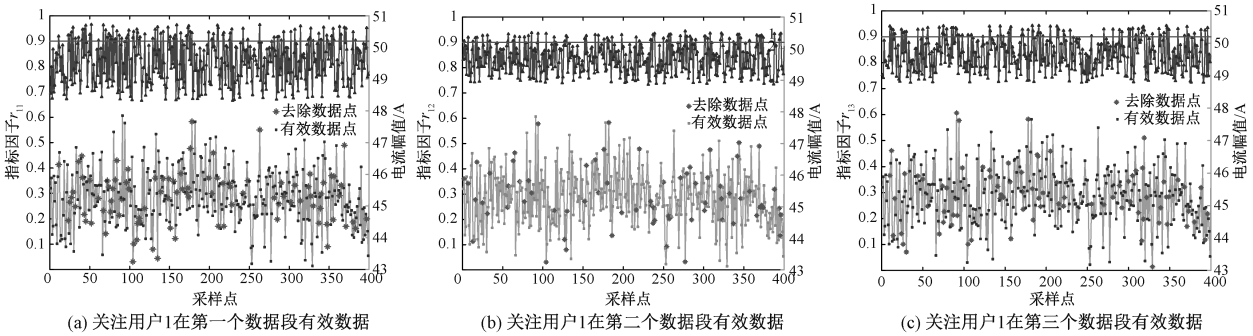


图9 文献方法对关注用户1在各数据段筛选

Fig. 9 Harmonic source 1 filtering of each data segment by reference

参考文献:

[ 1 ] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38 (7): 1893-1904.  
 ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38 (7): 1893-1904 (in Chinese).

[ 2 ] 田铭兴, 李俊, 徐金阳. 考虑谐波责任的奖罚性电费调整方案 [J]. 电网技术, 2018, 42 (8): 2712-2718.  
 TIAN Mingxing, LI Jun, XU Jinyang. An adjustment scheme of rewarding-penalizing electricity charge considering harmonic responsibility [J]. Power System Technology, 2018, 42 (8): 2712-2718 (in Chinese).

[ 3 ] 李天楚, 伍智鹏, 朱明星. 配电网谐波电流限值计算与评估的若干问题探讨 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37 (6): 7-11.  
 LI Tianchu, WU Zhipeng, ZHU Mingxing. Study on several issues concerning the calculation and evaluation of harmonic current limit value in distribution network [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensa-

tion, 2016, 37 (6): 7-11 (in Chinese).

[ 4 ] 王攸然, 张逸, 邵振国, 等, 张伟骏. 谐波责任划分研究现状及在分布式电源并网条件下的展望 [J]. 电工电能新技术, 2019, 38 (1): 61-69.  
 WANG Youran, ZHANG Yi, SHAO Zhenguo, et al. Method current status of harmonic responsibility division and prospects under grid-connected distributed generations condition [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38 (1): 61-69 (in Chinese).

[ 5 ] KHAJEHODDIN S, KARIMI-GHARTEMANI M, JAIN P, et al. DC-bus design and control for a single-phase grid-connected renewable converter with a small energy storage component [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28 (7): 3245-3254.

[ 6 ] SHU Q, LIU T, XU F. A new algorithm for calculating utility harmonic impedance [J]. Electric Power Systems Research, 2021, 191 (Feb.): 1-8.

[ 7 ] 黄舜, 徐永海. 基于偏最小二乘回归的系统谐波阻抗与谐波发射水平的评估方法 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (1): 93-97.  
 HUANG Shun, XU Yonghai. Assessing harmonic impedance and the harmonic emission level based on partial least-squares regression method [J]. Proceedings

- of the CSEE, 2007, 27 (1): 93-97 (in Chinese).
- [8] 范忠, 史明明, 张宸宇, 等. 基于三点筛选法与偏最小二乘法的系统谐波阻抗估计 [J]. 电测与仪表, 2020, 57 (17): 34-38.  
FAN Zhong, SHI Mingming, ZHANG Chenyu, et al. Estimation of system harmonic impedance based on three-point screening and partial least squares [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57 (17): 34-38 (in Chinese).
- [9] HUI J, YANG H, LIN S, et al. Assessing utility harmonic impedance based on the covariance characteristic of random vectors [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25 (3): 1778-1786.
- [10] 王诗超, 沈沉, 程建洲. 考虑电流波动特性的系统侧谐波阻抗估计方法 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (3): 65-70.  
WANG Shichao, SHEN Chen, CHENG Jianzhou. A power system harmonic impedance assessment method considering current's fluctuation characteristic [J]. Automation of Electric Power System, 2012, 36 (3): 65-70 (in Chinese).
- [11] 郑仙, 肖先勇, 王杨. 基于谐波阻抗矩阵约束的系统侧谐波阻抗估计方法 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41 (4): 170-176.  
ZHENG Xian, XIAO Xianyong, WANG Yang. Utility harmonic impedance estimation method based on harmonic impedance matrix constrain [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 40 (4): 170-176 (in Chinese).
- [12] 林顺富, 李扬, 汤波, 等. 基于改进 FastICA 及偏最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 [J]. Power System Technology, 2018, 42 (1): 308-314 (in Chinese).
- [13] ZHAO J, YANG H, PAN A, et al. An improved complex ICA based method for wind farm harmonic emission levels evaluation [J]. Electric Power Systems Research, 2020, 179 (Feb.): 1-14.
- [14] 孟思雨, 肖先勇, 张逸, 等. 基于有效数据段选取的多谐波源责任划分方法 [J]. 电网技术, 2017, 41 (6): 2006-2011.  
MENG Siyu, XIAO Xianyong, ZHANG Yi, et al. A valid data selection method in estimating harmonic impact of individual loads [J]. Power System Technology, 2017, 41 (6): 2006-2011 (in Chinese).
- [15] 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, (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, (18): 55-61 (in Chinese).
- [16] 顾伟, 邱海峰, 尹香, 等. 基于波形匹配的谐波责任划分方法 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41 (2): 129-134.  
GU Wei, QIU Haifeng, YIN Xiang, et al. Waveform matching based method for harmonic contribution determination [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41 (2): 129-134 (in Chinese).
- [17] 龚华麟, 肖先勇, 刘亚梅, 等. 基于主导波动能筛选原理的用户谐波发射水平估计方法 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (4): 22-27.  
GONG Hualin, XIAO Xianyong, LIU Yamei, et al. A method for assessing customer harmonic emission level based on the dominant fluctuation filtering principle [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30 (4): 22-27 (in Chinese).
- [18] 刘子腾, 徐永海, 丁一博, 等. 考虑背景谐波电压波动和阻抗变化的多谐波责任划分 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42 (3): 84-91.  
LIU Ziteng, XU Yonghai, DING Yibo, et al. Multi-harmonic responsibility division considering background harmonic voltage fluctuation and impedance variation [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42 (3): 84-91 (in Chinese).
- [19] 付慧, 张国江, 史明明, 等. 基于互近似熵数据筛选的谐波源责任划分方法 [J]. 电测与仪表, 2022, 59 (7): 145-151.  
FU Hui, ZHANG Guojang, SHI Mingming, et al. Determination method of the harmonic source contribution based on cross-approximation entropy data filtering [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59 (7): 145-151 (in Chinese).
- [20] 王辉, 刘炜, 李群湛, 等. 基于复数域偏最小二乘法与等值法的多谐波源责任划分 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41 (4): 78-85.  
WANG Hui, LIU Wei, LI Qunzhan, et al. Responsibility distinction for multiple harmonic sources based on partial least square in complex field and equivalent method [J]. Automation of Electric Power System, 2017, 41 (4): 75-85 (in Chinese).
- [21] 熊敏, 杨洪耕. 基于改进协方差特性的永磁直驱风电场谐波发射水平评估 [J]. 电工技术学报, 2020,

- 35 (3): 603-611.
- XIONG Min, YANG Hongeng. Assessment method of D-PMSG wind farm harmonic emission level based on the improved covariance characteristic [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35 (3): 63-611 (in Chinese).
- [22] XU F, WANG W, ZHENG H, et al. Harmonic impedance estimation considering the correlation between harmonic sources [J]. Electric Power Systems Research, 2022, 209 (Aug.): 1-10.
- [23] 雷达, 常潇, 刘子腾, 等. 基于 DBSCAN 聚类和数据筛选的系统谐波阻抗估算 [J]. 电测与仪表, 2022, 59 (1): 93-98.
- LEI Da, CHANG Xiao, LIU Zileng, et al. Estimation of system harmonic impedance based on DBSCAN clustering and data filtering [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59 (1): 93-98 (in Chinese).
- [24] SHU Q, ZHAO S, XU F. Novel estimation method of utility harmonic impedance based on short-term impedance minimum variance criterion [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2024, 14 (15): 2951-2958.
- [25] SHU Q, WU Y, XU F, et al. Estimate utility harmonic impedance via the correlation of harmonic measurements in different time intervals [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35 (4): 2060-2067.
- [26] 吴雅玥, 徐方维, 张伟骏, 等. 基于修正独立随机矢量的系统侧谐波阻抗估计 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43 (20): 146-152.
- WU Yayue, XU Fangwei, ZHANG Weijun, et al. System-side harmonic impedance estimation based on modified independent random vector [J]. Automation of Electric Power System, 2019, 43 (20): 146-152 (in Chinese).

---

#### 作者简介:

李昕朔(1998),男,硕士研究生,研究方向为电能质量分析,E-mail:lxsz19981212@163.com;

李永刚(1967),男,教授,博士生导师,通信作者,研究方向为新能源电力系统、大型电机故障诊断,E-mail:2191777878@qq.com。