

# 基于互信息数据优选的系统侧谐波阻抗估计

徐方维, 王朝浩, 周全, 王川, 刘凯, 张颖严

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 准确求解谐波阻抗是谐波治理和合理划分谐波责任的前提。现有谐波阻抗估计方法须满足背景谐波波动小且用户侧谐波阻抗远大于系统侧谐波阻抗的条件, 但大量电力电子设备在电力系统中的使用导致这些条件可能难以被满足, 因此文中提出一种基于互信息数据优选的系统侧谐波阻抗估计方法。首先通过独立分量分析 (independent component analysis, ICA) 求解系统侧谐波电流, 然后筛选公共连接点 (point of common coupling, PCC) 处谐波电流与系统侧谐波电流互信息小的数据段, 最后利用筛选出的数据段对应的 PCC 处谐波电流与系统侧谐波电压协方差为 0 的特性对谐波阻抗进行估计。仿真和实际案例分析表明: 与现有方法相比较, 在用户侧谐波阻抗非远大于系统侧谐波阻抗时, 文中所提方法的系统侧谐波阻抗估计结果更准确, 适用范围更广泛。

**关键词:** 谐波; 互信息数据优选; 独立分量分析 (ICA); 相关性分析; 谐波阻抗估计; 谐波责任划分; 电能质量; 独立随机矢量法

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)02-0067-08

## 0 引言

随着光伏、风电等高比例新能源接入电网以及大量电力电子装置等非线性元件在电网中的深入应用, 电力系统中的谐波污染问题日益严重。谐波导致的供电电压波形畸变以及电网谐振, 可能会引起电网出现大范围、大幅度的过电压和过电流。愈发严重的谐波污染问题亟待解决, 合理评估公共连接点 (point of common coupling, PCC) 处系统侧和用户侧的谐波发射水平是有效管控谐波的重要环节, 而其前提是准确估计系统侧谐波阻抗。因此准确求解系统侧谐波阻抗是谐波溯源以及有效治理的关键<sup>[1-2]</sup>。

目前现有谐波阻抗计算方法主要为不影响电网正常工作运行的非干预法, 包括波动量法<sup>[3-4]</sup>、独立随机矢量法<sup>[5-9]</sup>、线性回归法<sup>[10-14]</sup>、独立分量分析 (independent component analysis, ICA) 算法<sup>[15-23]</sup> 等。上述方法通常要求用户侧谐波阻抗远大于系统侧谐波阻抗, 当该条件不满足时, 现有方法的应用受到限制, 原因如下: (1) 系统侧谐波电流与 PCC 处谐波电压呈较强相关性, 导致线性回归法估计误差增大; (2) 相较于用户侧, 系统侧的谐波电流波动程度可能更高, 这将导致波动量法精度降低; (3) PCC 处谐波电流与系统侧谐波电流之间的协方差不再近似为 0, 导致独立随机矢量法失效; (4) 电力系统中通常含有大量电力电子设备, 其中换流器的滤波

装置在滤波频次的阻抗小, 并联在用户侧时将导致用户侧阻抗并非远大于系统侧阻抗, 且电网中 PCC 两侧谐波电流相关性增强, 无法再将其视作相互独立, 使得 ICA 算法精度下降<sup>[23]</sup>。

综上, 文中提出基于互信息<sup>[24]</sup> 数据优选的系统侧谐波阻抗估计方法, 该方法适用于用户侧谐波阻抗非远大于系统侧谐波阻抗的情况。首先, 通过重复 ICA 算法得到系统侧谐波电流的估计值; 然后, 利用系统侧谐波电流和 PCC 处谐波电流的互信息对 PCC 处谐波电压、电流数据进行筛选; 最后, 将筛选出的数据集利用独立矢量协方差为 0 的特性计算系统侧谐波阻抗。所提方法能在用户侧谐波阻抗和系统侧谐波阻抗大小接近的情况下, 准确求解谐波阻抗。

## 1 谐波分析等效电路

为划分电网 PCC 处系统侧和用户侧的谐波责任, 可将 PCC 两侧均等效为诺顿等效电路, 如图 1 所示。

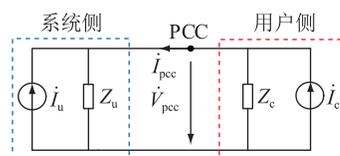


图 1 PCC 处的诺顿等效电路

Fig.1 Norton equivalent circuit of PCC

图 1 中,  $i_u$ 、 $i_c$  分别为系统侧和用户侧的谐波电流;  $Z_u$ 、 $Z_c$  分别为系统侧和用户侧的谐波阻抗;  $i_{pcc}$ 、 $V_{pcc}$  分别为 PCC 处的谐波电流和谐波电压。

由图 1 可得:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{\text{pcc},h} \\ \dot{I}_{\text{pcc},h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_{u,h}Z_{c,h}}{Z_{u,h} + Z_{c,h}} & \frac{Z_{u,h}Z_{c,h}}{Z_{u,h} + Z_{c,h}} \\ -Z_{u,h} & Z_{c,h} \\ \frac{Z_{u,h}}{Z_{u,h} + Z_{c,h}} & \frac{Z_{c,h}}{Z_{u,h} + Z_{c,h}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{u,h} \\ \dot{I}_{c,h} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $h$  为谐波次数。式(1)在任意次谐波都适用,为表述简洁,后文各相关变量将省略下标  $h$ 。

传统配电网中,用户侧谐波阻抗远大于系统侧谐波阻抗,PCC 处的谐波电流主要由用户侧注入,背景谐波波动较小。但对于现代电力系统而言,大量电力电子设备中小阻抗的滤波器并联在用户侧,导致用户侧谐波阻抗不再远大于系统侧谐波阻抗,PCC 处谐波电流和系统侧谐波电流的相关性增强。这一现象使得现有谐波阻抗计算方法无法满足现代电力系统谐波阻抗估计准确性的要求。

## 2 基于互信息的数据优选原理

由式(1)可知,PCC 处的谐波电流  $\dot{I}_{\text{pcc}}$  由系统侧谐波电流  $\dot{I}_u$  和用户侧谐波电流  $\dot{I}_c$  组成,但  $\dot{I}_{\text{pcc}}$  主要是通过  $\dot{I}_c$  注入,  $\dot{I}_u$  仅作为背景谐波电流。  $\dot{I}_u$  与  $\dot{I}_{\text{pcc}}$  的相关性越强,则谐波阻抗计算越不准确。文中提出基于互信息原理筛选出  $\dot{I}_{\text{pcc}}$  与  $\dot{I}_u$  互信息较小的数据集,进而进行谐波阻抗计算,该方法可以提升谐波阻抗估计的精度。

实际工程中能获得的数据只有 PCC 处的谐波电压和电流,无法直接筛选出  $\dot{I}_u$  和  $\dot{I}_{\text{pcc}}$  互信息较小的数据段,而复 ICA 算法只需  $\dot{I}_{\text{pcc}}$  和 PCC 处谐波电压  $\dot{V}_{\text{pcc}}$  的数据就能估计出  $\dot{I}_c$  和  $\dot{I}_u$  的近似解。因此可将复 ICA 算法和互信息算法相结合对数据段进行优选。

### 2.1 复 ICA 算法估计系统侧谐波电流

复 ICA 算法是一种可在复数域中使用的盲源分离算法,式(1)对应的盲源分离数学模型为:

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

式中:  $\mathbf{X}$  为观测信号即 PCC 处的谐波电压和电流;  $\mathbf{S}$  为源信号即用户侧和系统侧的谐波电流;  $\mathbf{A}$  为混合矩阵。

ICA 通过迭代得到分离矩阵  $\mathbf{W}$ ,进而得到  $\mathbf{S}$ ,由式(3)求出源信号最优估计值。

$$\mathbf{S} = \mathbf{W}\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \dot{I}_u & \dot{I}_c \\ k_1 & k_2 \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

式中:  $k_i (i = 1, 2)$  为源信号缩放倍数。

通过多元线性回归计算混合矩阵  $\mathbf{A}$ 。

$$\mathbf{A} = \mathbf{X}\mathbf{S}^T(\mathbf{S}\mathbf{S}^T)^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{k_1 Z_u Z_c}{Z_u + Z_c} & \frac{k_2 Z_u Z_c}{Z_u + Z_c} \\ -k_1 Z_u & k_2 Z_c \\ \frac{Z_u}{Z_u + Z_c} & \frac{Z_c}{Z_u + Z_c} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ICA 算法存在顺序和大小不确定性的固有缺陷,即源信号顺序不确定和源信号缩放倍数  $k_i$  不确定。根据源信号放大  $k_i$  倍,则混合矩阵对应列向量缩小  $k_i$  倍的特性,可通过式(5)一式(7)消除大小不确定性。

$$\begin{cases} Z_1 = \frac{(\mathbf{A})_{11}}{(\mathbf{A})_{21}} \\ Z_2 = \frac{(\mathbf{A})_{12}}{(\mathbf{A})_{22}} \end{cases} \quad (5)$$

实际工况中,阻抗的实部恒为正。通过式(1)可以知道:当  $Z_i > 0 (i = 1, 2)$  时,  $Z_i = Z_u$ ; 当  $Z_i < 0$  时,  $Z_i = Z_c$ 。因此,可通过式(6)消除顺序不确定性。

$$Z_i = \begin{cases} Z_u & \text{Re } Z_i > 0 \\ -Z_c & \text{Re } Z_i < 0 \end{cases} \quad (6)$$

可得到源信号缩放倍数  $k_i$  为:

$$\begin{cases} k_1 = \frac{(\mathbf{A})_{11}(Z_u + Z_c)}{Z_u Z_c} \\ k_2 = \frac{(\mathbf{A})_{12}(Z_u + Z_c)}{Z_u Z_c} \end{cases} \quad (7)$$

用户侧和系统侧的谐波电流为:

$$\begin{cases} \dot{I}_u = k_1 \times (\mathbf{S})_{21} \\ \dot{I}_c = k_2 \times (\mathbf{S})_{11} \end{cases} \quad (8)$$

ICA 算法受背景谐波波动影响较小,且能得到 PCC 两侧的谐波电流。因此可以通过复 ICA 算法得到 PCC 处系统侧谐波电流数据,再基于互信息筛选  $\dot{I}_{\text{pcc}}$  与  $\dot{I}_u$  相关性较弱的的数据段,进而估计系统侧谐波阻抗。

### 2.2 互信息判断信号独立的原理

度量信号间相关性的方法有 Pearson 相关系数法与 Spearman 相关系数法等,其只能在两向量本就线性相关的情况下去度量信号间的相关性。电力系统中各非线性设备间的相互作用可能导致 PCC 处谐波电流与系统侧谐波电流非线性相关,而互信息作为一种信息熵,用于反映两离散随机变量  $X$  和  $Y$  联合分布之间的内在依赖性,在两信号非线性相关时也可度量其相关性。  $X$  和  $Y$  的互信息可以定义为:

$$M(X;Y) = \sum_{y \in Y} \sum_{x \in X} p(x,y) \ln \left( \frac{p(x,y)}{p(x)p(y)} \right) \quad (9)$$

式中:  $p(x,y)$  为  $X$  和  $Y$  的联合概率密度函数;  $p(x)$ 、 $p(y)$  分别为  $X$ 、 $Y$  的边缘概率密度函数。

$\dot{I}_{\text{pec}}$  和  $\dot{I}_{\text{u}}$  的数据满足以下条件:(1) 对样本分布并未充分了解,无法事先给出概率密度函数形式;(2) 基于大数据的  $\dot{I}_{\text{pec}}$  和  $\dot{I}_{\text{u}}$  样本点足够多。因此  $\dot{I}_{\text{pec}}$  与  $\dot{I}_{\text{u}}$  的边缘概率密度函数  $p(x)$ 、 $p(y)$  及其联合概率密度函数  $p(x,y)$  可以通过核密度估计(kernel density estimation, KDE) 获得。KDE 基于大样本性质,直接利用样本估计出整个函数,属于非参数检验方法之一,其采用平滑的峰值函数拟合观察到的数据点,进而对真实的概率分布曲线进行模拟。

由式(9)可知,互信息用于度量两离散信号  $X$  和  $Y$  中一个信号造成另一个信号不确定度减少的程度。二者相关性越小,  $p(x,y)$  与  $p(x)p(y)$  的比值越小,即  $X$  与  $Y$  的互信息越小。若互信息为 0,则两信号相互独立。因此,可以依靠两信号的互信息判断其相互间的独立性。

### 2.3 基于互信息数据优选的谐波阻抗估计流程

文中计算  $Z_{\text{u}}$  的步骤如下:

(1) 将获得的 PCC 数据分成  $o$  段,通过对数据多次使用复 ICA 算法求得混合矩阵  $\mathbf{A}$ 。

(2) 通过式(5)得到  $Z_1$ 、 $Z_2$ ,选取满足式(10)或式(11)的数据集,通过式(6)得到谐波阻抗的近似解,再通过式(7)和式(8)得到  $\dot{I}_{\text{u}}$  的近似解。

$$\begin{cases} Z_1 > 0 \\ Z_2 < 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} Z_1 < 0 \\ Z_2 > 0 \end{cases} \quad (11)$$

(3) 估计  $\dot{I}_{\text{u}}$  和  $\dot{I}_{\text{pec}}$  的边缘概率密度函数及其联合概率密度函数<sup>[24-25]</sup>。

(4) 将所得的概率密度函数  $p(\dot{I}_{\text{u}})$ 、 $p(\dot{I}_{\text{pec}})$ 、 $p(\dot{I}_{\text{u}}, \dot{I}_{\text{pec}})$  代入式(9)计算出第  $j$  ( $j \leq o$ ) 段  $\dot{I}_{\text{u}}$  和  $\dot{I}_{\text{pec}}$  的互信息值  $M_j$ ,利用式(12)筛选出互信息较小的数据集  $Q$ 。

$$Q = \{(\dot{V}'_{\text{pec}}, \dot{I}'_{\text{pec}}) \mid M_j < \delta, \dot{V}'_{\text{pec}} \in Q_{\text{pec},\text{v}}, \dot{I}'_{\text{pec}} \in Q_{\text{pec},\text{l}}\} \quad (12)$$

式中:  $\dot{V}'_{\text{pec}}$ 、 $\dot{I}'_{\text{pec}}$  分别为筛选出的 PCC 处谐波电压和谐波电流;  $Q_{\text{pec},\text{v}}$ 、 $Q_{\text{pec},\text{l}}$  分别为谐波测量装置获得的 PCC 处谐波电压、谐波电流数据集;  $\delta$  为互信息阈

值,根据实验数据,一般设为 0.2,此时谐波阻抗估计精度高,且不会因  $\delta$  太低导致不存在满足式(12)的数据集。

(5) 由于数据集  $Q$  中  $\dot{I}'_{\text{pec}}$  与筛选出来的系统侧谐波电流数据集  $\dot{I}'_{\text{u}}$  呈弱相关性,令  $\dot{V}'_{\text{u}} = Z_{\text{u}} \dot{I}'_{\text{u}}$ ,则  $\dot{I}'_{\text{pec}}$  与  $\dot{V}'_{\text{u}}$  呈弱相关性,利用弱相关向量协方差为 0 的特性可估计系统侧谐波阻抗。针对图 1 电路可得:

$$\dot{V}'_{\text{pec}} - Z_{\text{u}} \dot{I}'_{\text{pec}} = \dot{V}'_{\text{u}} \quad (13)$$

式(13)对应的数学期望表示为:

$$E(\dot{V}'_{\text{pec}}) - Z_{\text{u}} E(\dot{I}'_{\text{pec}}) = E(\dot{V}'_{\text{u}}) \quad (14)$$

式中:  $E(\cdot)$  为数学期望函数。

式(13)减去式(14)可得:

$$(\dot{V}'_{\text{pec}} - E(\dot{V}'_{\text{pec}})) - Z_{\text{u}} (\dot{I}'_{\text{pec}} - E(\dot{I}'_{\text{pec}})) = \dot{V}'_{\text{u}} - E(\dot{V}'_{\text{u}}) \quad (15)$$

将式(15)等号两边同时乘以  $(\dot{I}'_{\text{pec}} - E(\dot{I}'_{\text{pec}}))$  并计算数学期望:

$$\begin{aligned} & E((\dot{I}'_{\text{pec}} - E(\dot{I}'_{\text{pec}})) \times (\dot{V}'_{\text{pec}} - E(\dot{V}'_{\text{pec}}))) - \\ & E((\dot{I}'_{\text{pec}} - E(\dot{I}'_{\text{pec}})) \times Z_{\text{u}} (\dot{I}'_{\text{pec}} - E(\dot{I}'_{\text{pec}}))) = \\ & E((\dot{I}'_{\text{pec}} - E(\dot{I}'_{\text{pec}})) \times (\dot{V}'_{\text{u}} - E(\dot{V}'_{\text{u}}))) \end{aligned} \quad (16)$$

由于  $\dot{I}'_{\text{pec}}$  与  $\dot{V}'_{\text{u}}$  协方差为 0,则式(16)等号右边为 0,可得系统侧谐波阻抗为:

$$\begin{cases} \text{Re } Z_{\text{u}} = \\ \frac{E((\text{Re } \dot{V}'_{\text{pec}})(\text{Re } \dot{I}'_{\text{pec}}) + (\text{Im } \dot{V}'_{\text{pec}})(\text{Im } \dot{I}'_{\text{pec}}))}{E((\text{Re } \dot{I}'_{\text{pec}})^2 + (\text{Im } \dot{I}'_{\text{pec}})^2)} \\ \text{Im } Z_{\text{u}} = \\ \frac{E((\text{Im } \dot{V}'_{\text{pec}})(\text{Re } \dot{I}'_{\text{pec}}) - (\text{Re } \dot{V}'_{\text{pec}})(\text{Im } \dot{I}'_{\text{pec}}))}{E((\text{Re } \dot{I}'_{\text{pec}})^2 + (\text{Im } \dot{I}'_{\text{pec}})^2)} \end{cases} \quad (17)$$

将数据分为  $o$  段计算阻抗再取平均值,该方法可避免因某次计算结果误差较大而造成计算精度降低。筛选互信息较小的数据集可减小用户侧谐波阻抗非远大于系统侧谐波阻抗场景下谐波阻抗的估计误差。

基于互信息数据优选的系统侧谐波阻抗估计流程如图 2 所示。

## 3 仿真分析

### 3.1 基于诺顿等效电路的谐波阻抗估计

电网中任一节点两端的电路均可分别等效为诺顿等效电路,且影响谐波阻抗估计精度的因素为等效电路两侧谐波阻抗的相对大小、两侧谐波电流

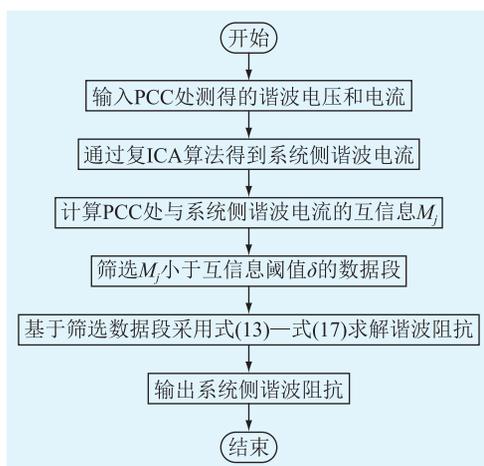


图2 基于互信息数据优选的系统侧谐波阻抗估计流程图  
Fig.2 Flow chart of utility harmonic impedance estimation based on mutual information and data optimization

及电流波动量大小。文中采用诺顿等效电路模型进行仿真,通过控制仿真过程中影响谐波阻抗估计精度的因素衡量所提方法的效果<sup>[5-8]</sup>。对图1所示诺顿等效电路设置仿真数据,用户侧谐波电流 $\dot{I}_c$ 幅值设置为100 A,初始相角设置为 $-30^\circ$ 。系统侧谐波电流 $\dot{I}_u$ 幅值设置为 $\dot{I}_c$ 的 $k$ 倍, $k$ 分别取0.3、0.5、0.7、1.0,初始相角设置为 $10^\circ$ ,通过改变 $k$ 的取值控制背景谐波电流大小。由于实际工程中谐波电流并非恒定不变,分别给 $\dot{I}_c$ 、 $\dot{I}_u$ 幅值叠加 $\pm 20\%$ 正弦波动和 $\pm 15\%$ 随机波动,给 $\dot{I}_u$ 、 $\dot{I}_c$ 相角均叠加 $\pm 20\%$ 随机扰动。

系统侧谐波阻抗 $Z_u$ 设置为 $(15+j20)\ \Omega$ 。对用户侧阻抗设置如下2种场景:(1)用户侧阻抗远大于系统侧阻抗,即 $Z_c=(80+j120)\ \Omega$ ;(2)系统侧阻抗和用户侧阻抗相差不大,即 $Z_c=(15+j20)\ \Omega$ 。在实际工程中,电网的运行方式不断变化,导致 $Z_c$ 实时波动,因此文中针对以上2种场景的 $Z_c$ 叠加 $\pm 20\%$ 随机扰动。

按上述方式生成10 000组数据,设定短时间内 $Z_u$ 恒定不变。为了防止样本量较大导致 $Z_u$ 发生变化进而影响计算精度,设数据组 $j \sim j+99$ 为一段数据段,其中 $j=1,11,21,\dots,9\ 901$ ,则共产生991段数据段。采用4种方法分别估计场景1和场景2下的系统侧谐波阻抗 $Z_u$ ,方法1为独立随机矢量法,方法2为二元回归法,方法3为复ICA方法,方法4为文中所提方法,其中方法4的互信息阈值 $\delta$ 设为0.2。场景1、场景2系统侧谐波阻抗估计值相对误差的方均根值分别如表1和表2所示。

由表1可知,在场景1下,各方法估计的系统侧

表1 场景1系统侧谐波阻抗估计值  
相对误差的方均根值

Table 1 Root-mean-square value of utility harmonic impedance estimation relative error value in scenario 1

$k$	幅值相对误差方均根值/%				相位相对误差方均根值/%			
	方法1	方法2	方法3	方法4	方法1	方法2	方法3	方法4
0.3	5.27	6.86	6.99	1.26	0.45	7.25	9.46	0.45
0.5	12.60	25.90	15.70	2.40	4.48	12.20	16.90	4.38
0.7	24.20	40.70	22.50	7.61	5.12	26.80	28.20	4.67
1.0	46.10	46.80	33.50	13.30	6.32	36.00	31.80	6.26

表2 场景2系统侧谐波阻抗估计值  
相对误差的方均根值

Table 2 Root-mean-square value of utility harmonic impedance estimation relative error value in scenario 2

$k$	幅值相对误差方均根值/%				相位相对误差方均根值/%			
	方法1	方法2	方法3	方法4	方法1	方法2	方法3	方法4
0.3	34.60	36.00	2.67	2.22	11.40	31.40	7.87	6.06
0.5	71.50	54.00	4.04	2.84	18.60	69.70	17.30	12.60
0.7	96.20	62.80	16.60	10.90	37.30	85.60	47.40	18.30
1.0	96.50	70.00	36.70	16.10	81.10	96.60	33.30	24.50

谐波阻抗误差较小。随着背景谐波增加即 $k$ 增大,方法1—方法3的估计误差均增大并表现出一定的不适用性,而文中方法即方法4在背景谐波增大时仍能保持一定的准确性。

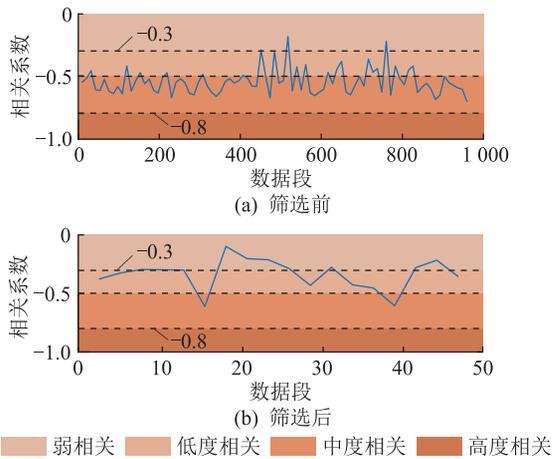
由表2可知,在场景2下,方法1和方法2估计误差较大。且随着背景谐波增加,其误差增幅较大,不再适用于场景2下的谐波阻抗计算。方法3和方法4在场景2下表现出更高的计算精度,但随着背景谐波增加,方法3的估计误差增加,且计算精度相比文中方法即方法4要低。方法4的误差随背景谐波增加而缓慢增大,在场景2下表现出更高的计算精度。

对场景2下背景谐波较大( $k=1.0$ )的情况进行仿真,验证互信息对 $\dot{I}_{\text{pcc}}$ 、 $\dot{I}_u$ 弱相关数据段的筛选效果。筛选数据段前后 $\dot{I}_{\text{pcc}}$ 与 $\dot{I}_u$ 的相关系数如图3所示。

对比图3(a)、(b)可知,数据筛选前后 $\dot{I}_{\text{pcc}}$ 与 $\dot{I}_u$ 相关性降低。可见,所提方法数据筛选效果良好,且能在信号非线性相关时对数据进行筛选,有较广泛的适用性。

### 3.2 基于IEEE 14节点系统的谐波阻抗估计

为进一步验证文中方法的有效性,针对5次谐波,基于IEEE 14节点系统对3.1节中的4种方法进行仿真。该系统含有2台发电机,分别接于母线

图3  $i_{pcc}$  与  $i_u$  的相关系数Fig.3 Correlation coefficient between  $i_{pcc}$  and  $i_u$ 

1 和母线 2; 同步调相机接于母线 6; 2 个谐波源 HS1、HS2 分别设置于母线 3 和母线 8。其中发电机和同步调相机等值为次暂态阻抗, 双绕组变压器等值为阻抗, 输电线路采用  $\pi$  型等值电路。IEEE 14 节点系统模型如图 4 所示<sup>[26]</sup>。

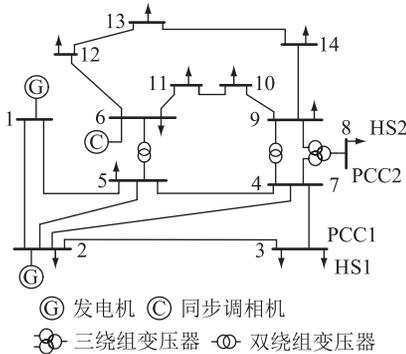


图4 IEEE 14 节点系统模型

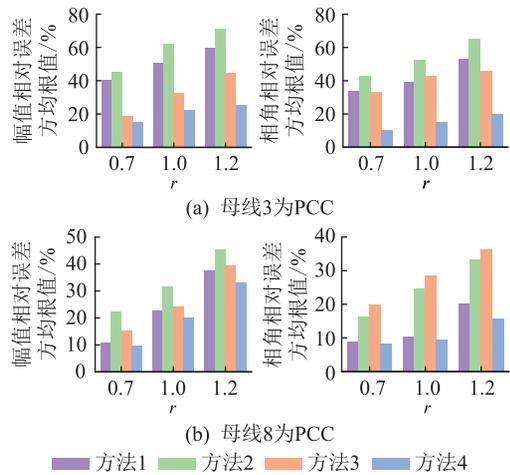
Fig.4 IEEE 14-bus system model

各节点的谐波阻抗参考值见文献[26], 其中母线 3 的用户侧谐波阻抗非远大于系统侧谐波阻抗, 母线 8 的用户侧谐波阻抗远大于系统侧谐波阻抗。采用 4 种方法分别估计母线 3 和母线 8 为 PCC 时的系统侧谐波阻抗, 估计值相对误差的方均根值如图 5 所示,  $r$  为 PCC 处系统侧谐波电流相较于用户侧谐波电流的倍数。

由图 5 分析可知, 在两侧谐波阻抗相差不大的场景下或在用户侧谐波阻抗远大于系统侧谐波阻抗的场景下, 随着背景谐波增大, 文中方法即方法 4 均能取得更好的谐波阻抗评估效果。

#### 4 实际案例分析

实测数据取自某风电场 110 kV 并网点, 测量时长为 10 min, 每 0.2 s 采集一个谐波数据点, 共 3 000

图5 系统侧谐波阻抗估计值相对误差的方均根值  
Fig.5 Root-mean-square value of utility harmonic impedance estimation relative error value

个数据点, 其中 5 次谐波的含量最高, 所有谐波数据由电能质量监测装置对录波数据进行快速傅里叶变换所得。所测 5 次谐波电压和电流幅值及电压电流间相位差如图 6 所示。

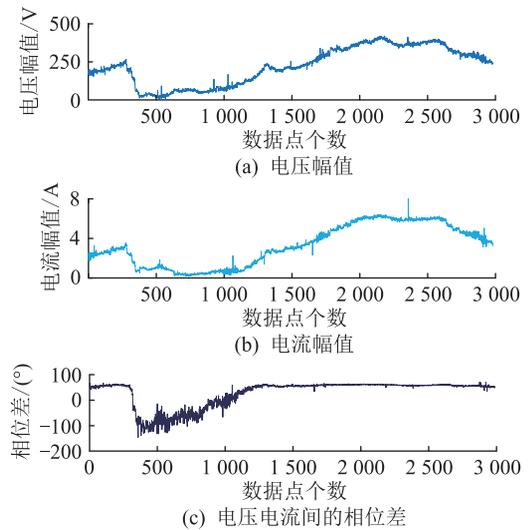


图6 5 次谐波波形

Fig.6 Waveform of the fifth harmonic

由并网点系统短路容量可粗略估计系统侧 5 次谐波阻抗幅值为  $68 \Omega$ <sup>[27]</sup>。为避免谐波阻抗在采样区间发生波动导致计算精度下降, 将数据按采样时间分为 10 个区间, 并采用 3.1 节所述分段法将各区间数据分为 291 段。为防止谐波阻抗估计算法陷入局部最优, 对各区间数据采用 3.1 节所述 4 种方法重复进行 10 次计算后取平均值得到系统侧 5 次谐波的谐波阻抗, 计算所得系统侧谐波阻抗如图 7 所示。

实际工况下, 风电场大量电力电子设备中滤波器的存在导致用户侧谐波阻抗不再远大于系统侧

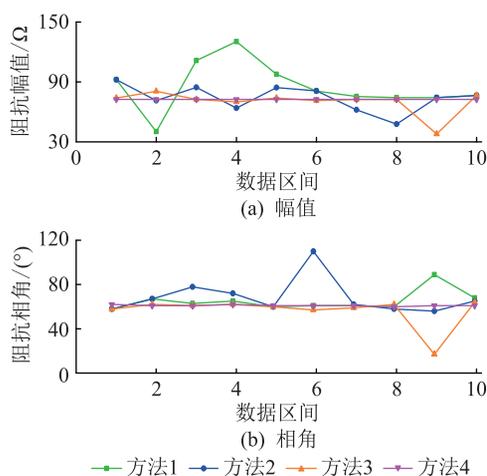


图7 系统侧谐波阻抗

Fig.7 Utility harmonic impedance

谐波阻抗,进而影响谐波阻抗估计的准确性<sup>[28-33]</sup>。由图7可知,方法1和方法2的谐波阻抗估计结果波动很大,失去参考价值。方法3的估计结果虽基本稳定,但在某些时段仍波动很大。相较于其他方法,文中方法即方法4的幅值及相角估计值都更为稳定且更接近参考阻抗。

## 5 结语

文中提出一种基于互信息数据优选的系统侧谐波阻抗估计方法,在采用复ICA算法初步得到系统侧谐波电流后,筛选PCC处谐波电流和系统侧谐波电流互信息较小的数据段,再通过独立随机矢量法估计系统侧谐波阻抗。仿真和实际案例分析证明,文中方法可以提高用户侧谐波阻抗非远大于系统侧谐波阻抗场景下谐波阻抗的估计精度。

在样本量较少时如何提高谐波阻抗估计精度是今后的重点研究方向。大样本情况下系统侧谐波阻抗变化问题也同样值得深入研究。

### 参考文献:

[1] 丁同,陈红坤,吴斌,等. 多谐波源定位及谐波责任量化区分方法综述[J]. 电力自动化设备,2020,40(1):19-30.  
DING Tong, CHEN Hongkun, WU Bin, et al. Overview on location and harmonic responsibility quantitative determination methods of multiple harmonicsources[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 19-30.

[2] 阮正鑫,张逸,张嫣,等. 高比例光伏与配电网超高次谐波交互影响研究[J]. 电力工程技术,2021,40(2):18-25.  
RUAN Zhengxin, ZHANG Yi, ZHANG Yan, et al. Interaction of high proportion photovoltaic and supraharmonic in distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 18-25.

[3] 张华赢,朱明星,时亨通,等. 对称性和波动性约束的居民负荷谐波发射水平评估[J]. 中国电力,2020,53(11):60-68.

ZHANG Huaying, ZHU Mingxing, SHI Hengtong, et al. Assessment on harmonic emission level of residential loads with symmetry and volatility constraints [J]. Electric Power, 2020, 53(11): 60-68.

[4] 邱思语,杨洪耕. 基于泛正态阻抗云的谐波发射水平估计[J]. 电测与仪表,2016,53(15):89-94,100.  
QIU Siyu, YANG Honggeng. Assessment method of harmonic emission level based on pan-normal harmonic impedance cloud [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(15): 89-94, 100.

[5] 徐方维,王川,郭凯,等. 基于无相位实测数据的系统侧谐波阻抗估计方法改进[J]. 中国电机工程学报,2021,41(9):3149-3158.  
XU Fangwei, WANG Chuan, GUO Kai, et al. An improved utility harmonic impedance estimation method based on measurement data without phase angle [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 3149-3158.

[6] 徐方维,郑鸿儒,杨洪耕,等. 基于无相位实测数据的系统侧谐波阻抗估计方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(21):170-176,212.  
XU Fangwei, ZHENG Hongru, YANG Honggeng, et al. Harmonic impedance estimation method on system side based on measurement data without phase angle [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 170-176, 212.

[7] 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 vectors [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(20): 146-152.

[8] SHU Q, WU Y Y, XU F W, 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.

[9] 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 Honggeng. Evaluation of harmonic emission level of permanent magnet direct-drive wind farm based on improved covariance characteristics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(3): 603-611.

[10] 谭鹏,杨洪耕,马晓阳,等. 计及风电场侧谐波阻抗影响的谐波发射水平评估[J]. 电力自动化设备,2019,39(4):167-173.  
TAN Peng, YANG Honggeng, MA Xiaoyang, et al. Assessment of harmonic emission level considering influence of harmonic impedance of wind farm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 167-173.

[11] 夏焰坤,唐文张,林欣懿. 基于LS-SVM的谐波阻抗估计方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2022,34(2):94-99.  
XIA Yankun, TANG Wenzhang, LIN Xinyi. Harmonic impedance estimation method based on least squares support vector

- machine[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(2): 94-99.
- [12] 刘苏婕,肖先勇,刘亚梅,等. 基于 IGG 权重函数复数域多元线性回归算法的谐波责任分摊方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 160-166.
- LIU Sujie, XIAO Xianyong, LIU Yamei, et al. Harmonic responsibility allocation method based on complex field multiple linear regression algorithm with IGG weight function[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 160-166.
- [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] 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 Ziteng, et al. Estimation of system harmonic impedance based on DBSCAN clustering and data filtering[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1): 93-98.
- [15] 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, 41(4): 170-176.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 刘子腾,徐永海,陶顺. 基于 SHIBSS 方法和数据优选的系统侧谐波阻抗估算方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(2): 193-199.
- LIU Ziteng, XU Yonghai, TAO Shun. Estimation method of harmonic impedance on system side based on SHIBSS method and data optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2): 193-199.
- [19] 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.
- [20] ZHAO X, YANG H G. A new method to calculate the utility harmonic impedance based on FastICA[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 381-388.
- [21] KARIMZADEH F, ESMAEILI S, HOSSEIN HOSSEINIAN S. Method for determining utility and consumer harmonic contributions based on complex independent component analysis[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(2): 526-534.
- [22] KARIMZADEH F, ESMAEILI S, HOSSEINIAN S H. A novel method for noninvasive estimation of utility harmonic impedance based on complex independent component analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4): 1843-1852.
- [23] 赵劲帅,杨洪耕,徐方维,等. 基于稀疏成分分析的多直流馈入城市电网直流落点系统侧谐波阻抗计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(7): 2016-2025.
- ZHAO Jinshuai, YANG Honggeng, XU Fangwei, et al. Method of calculating system-side harmonic impedance for DC drop point in city grid with multi-infeed DC system based on sparse component analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(7): 2016-2025.
- [24] KRASKOV A, STÖGBAUER H, GRASSBERGER P. Estimating mutual information[J]. Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2004, 69: 066138.
- [25] MOON Y I, RAJAGOPALAN B, LALL U. Estimation of mutual information using kernel density estimators[J]. Physical Review E, Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics, 1995, 52(3): 2318-2321.
- [26] ABU-HASHIM R, BURCH R, CHANG G, et al. Test systems for harmonics modeling and simulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(2): 579-587.
- [27] 吴竟昌. 供电系统谐波[M]. 北京:中国电力出版社, 1998.
- WU Jingchang. Power supply system harmonics[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [28] 蔡晖,张文嘉,彭竹弈,等. 基于大规模风电机组的虚拟惯量控制技术对江苏电网频率稳定性的影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(4): 41-46.
- CAI Hui, ZHANG Wenjia, PENG Zhuyi, et al. Influence of large scale wind turbine-based virtual inertia control technology on frequency stability of Jiangsu power grid[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(4): 41-46.
- [29] XU Y, GAO T. Sub-synchronous frequency domain-equivalent modeling for wind farms based on rotor equivalent resistance characteristics[J]. Global Energy Interconnection, 2022, 5(3): 293-300.
- [30] 罗红梅,申旭辉,董立,等. 采用交流海缆接入的海上风电场无功配置方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(6): 1-10.
- LUO Hongmei, SHEN Xuhui, DONG Li, et al. Reactive power

configuration method of offshore wind power with access of AC submarine cable[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(6):1-10.

[31] WANG C, LI Y, FAN Y, et al. Development of wind-energy modeling technology and standards[J]. Global Energy Interconnection, 2022, 5(2):206-216.

[32] 吴倩, 韩笑, 叶昊亮, 等. 海上风电场经 220 kV 交流海缆送出系统的无功配置方案[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(4):22-30.

WU Qian, HAN Xiao, YE Haoliang, et al. Reactive power compensation configuration of offshore wind farm transmission system with 220 kV AC submarine cable[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(4):22-30.

[33] 刘侃, 贾祺, 翟文超, 等. 面向次同步振荡的直驱风电机组

阻抗频率响应特性辨识[J]. 智慧电力, 2021, 49(9):39-46.

LIU Kan, JIA Qi, ZHAI Wenchao, et al. Identification of impedance frequency response characteristics of PMSG for sub-synchronous oscillation[J]. Smart Power, 2021, 49(9):39-46.

作者简介:



徐方维

徐方维(1978),女,博士,副教授,研究方向为电能质量及谐波治理等(E-mail:xufangwei@scu.edu.cn);

王朝浩(1998),男,硕士在读,研究方向为电能质量问题及谐波责任划分;

周全(1999),男,硕士在读,研究方向为电能质量。

### Utility harmonic impedance estimation based on mutual information and data optimization

XU Fangwei, WANG Chaohao, ZHOU Quan, WANG Chuan, LIU Kai, ZHANG Haoyan  
(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Accurate calculation of harmonic impedance is the premise of harmonic control and reasonable division of harmonic responsibility. The existing harmonic impedance estimation methods should meet the conditions that the background harmonic fluctuations are small and the customer harmonic impedance is much larger than the utility harmonic impedance. However, the use of a large number of power electronics in power system makes those conditions are not be satisfied. Therefore, a utility harmonic impedance estimation method based on mutual information and data optimization is proposed. Firstly, the utility harmonic currents are solved by independent component analysis (ICA), and the data segments with small mutual information between the harmonic currents at the point of common coupling (PCC) and the utility harmonic currents are selected. Finally, the harmonic impedance of the screened data segment is estimated using the characteristic of zero covariance between the harmonic current at the PCC and the harmonic voltage on the utility. The effectiveness of the proposed method is tested by simulation and actual case analysis. Compared with existing methods, the proposed method is more accurate and widely applicable when the customer harmonic impedance is not much larger than the utility harmonic impedance.

**Keywords:** harmonic; mutual information and data optimization; independent component analysis (ICA); correlation analysis; harmonic impedance estimation; division of harmonic responsibility; power quality; independent random vectors

(编辑 吴楠)