

# 一种新能源公共连接点系统谐波阻抗计算方法

晏 坤<sup>1</sup>, 甘景福<sup>1</sup>, 赵 昕<sup>1</sup>, 李昕溯<sup>2</sup>, 潘建铭<sup>2</sup>

(1. 国网冀北电力有限公司唐山供电公司, 河北 唐山 063000;

2. 华北电力大学 电力工程系, 河北 保定 071000)

**摘要:**针对新型电力系统中谐波责任划分及谐波放大问题研究中的谐波阻抗获取这一关键环节,提出一种改进的基于快速独立分量分析的公共连接点系统谐波阻抗估算方法。通过对公共连接点处电压和电流快速变化分量进行快速独立分量分析,得到四个独立分量及混合矩阵,推导了混合矩阵各元素与谐波阻抗间的线性关系,并基于系统侧和电源侧谐波电流、阻抗的关系及特性,根据独立分量与混合信号间的相关性求取变换矩阵并重新确定独立分量的正确次序和对应的混合矩阵,进而通过该混合矩阵各元素间的关系,推导系统谐波阻抗计算公式。搭建了仿真模型对所提方法进行仿真验证,仿真结果表明,改进的谐波阻抗估算方法可准确估算系统谐波阻抗值,在系统谐波电流幅值小于电源谐波电流幅值且差距较大时,具有较高的估算精度及稳定性。

**关键词:**新型电力系统;系统谐波阻抗;快速独立分量分析;谐波责任;谐波放大

**中图分类号:**TM743

**文章编号:**1000-0682(2024)01-0076-07

**文献标识码:**B

**DOI:**10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.01.017

## System harmonic impedance estimation method of new energy access point

YAN Kun<sup>1</sup>, GAN Jingfu<sup>1</sup>, ZHAO Xin<sup>1</sup>, LI Xinsu<sup>2</sup>, PAN Jianming<sup>2</sup>

(1. State Grid Jibei Electric Power CO., LTD Tangshan Power Supply Company, Hebei Tangshan 063000, China;

2. Department of Electric Power Engineering, North China Electric Power University, Hebei Baoding 071000, China)

**Abstract:** This paper proposes an improved harmonic impedance estimation method for access point systems based on fast independent component analysis (FastICA), which is a key step in the study of harmonic responsibility division and harmonic amplification in new power systems. By using FastICA for the rapidly changing components of the common connection point, mixing matrices and independent components are obtained, then the linear relationship between the elements of the mixing matrix and the harmonic impedance is derived. Based on the relationship and characteristics of the harmonic current and impedance on the system side and power supply side, then according to the correlation between independent components and mixed signals, a transformation matrix is obtained and the correct order of independent components and the relative mixed matrix are obtained. Finally the calculation formula of harmonic impedance of the system is deduced through the relationship between the elements of the mixed matrix. A simulation model was built to verify the proposed method. The simulation results show that the improved harmonic impedance estimation method can accurately estimate the harmonic impedance of the system. When the amplitude of the system harmonic current is smaller than that of the power supply harmonic current and the gap is large, the proposed method gain higher estimation accuracy and stability.

**Keywords:** new power systems; system harmonic impedance; FastICA; harmonic responsibility; harmonic amplification

收稿日期:2023-08-31

基金项目:国家电网有限公司科技项目(52010320019L);国网唐山供电公司新型电力系统研究项目(B3010322000N)

第一作者:晏坤(1988—),男,湖北人,硕士,工程师,研究方向为电网调度与负荷预测及电力设备故障识别。

E-mail:kunyanhb@126.com

## 0 引言

随着国家“双碳”战略的不断深入,以太阳能、风能为主的多种发电形式构成的高比例新能源新型电力系统建设也在加速建设中<sup>[1-2]</sup>。由于新能源发

电本身具有一定的随机性和间歇性,大量非线性变流装置的使用,并网后导致系统内的谐波问题日益突出,不仅影响电网的供电质量,还会造成电力设备损坏、保护装置误动等一系列问题。因此,有效划分各新能源场站谐波输入责任,强化新能源站端及电网接入侧的谐波特性分析及针对性治理,具有十分重要的现实意义<sup>[3-5]</sup>。

新能源公共连接点系统侧谐波阻抗计算是划分多谐波源责任,实现接入点不同串抗率电容器选择性投切,防止谐波放大等谐波研究治理的重要环节,目前常用的谐波阻抗计算方法主要有谐波注入测量法、波动量法以及独立分量分析法等。文献[6]提出一种基于 BP 神经网络预测的微网系统 dq 轴谐波阻抗的主动测量方法,通过引入 BP 神经网络减少系统参数在线测量时间并提高谐波阻抗的计算精度,但该方法需要向系统内注入特定次数的谐波,是一种干预式的测量方法。文献[7]针对传统波动量法公中谐波电压与谐波电流波动量之间存在一定的非线性关系,在某些情况可能导致计算误差较大这一问题,提出一种基于最小二乘拟合算法估计系统侧谐波阻抗幅值的改进的波动量法,克服了电流波动特性的影响,但仅能对谐波阻抗幅值进行估计,不能获取谐波阻抗相角。文献[8]提出一种基于快速独立分量分析计算系统侧谐波阻抗的方法,通过对公共连接点处的谐波电压、电流快速分量的虚部和实部进行解混得到四个独立分量,并根据最小二乘法求出混合系数最终得到系统谐波阻抗,该方法计算精度高且无需先验数据匹配,前提是需要获得准确的混合系数次序,文中对混合系数次序与谐波阻抗的关系未作具体研究。

该文基于公共连接点 (Public of Common Coupling, PCC) 处系统侧与电源侧贡献的谐波分量近乎相互独立这一特性,研究并提出一种基于快速独立分量分析 (Fast Independent Components Analysis, FastICA) 和相关性分析的系统谐波阻抗估算方法。利用 FastICA 对 PCC 点谐波电压、电流虚实分量中的快速变化分量解混以获得各独立分量,通过计算和比较独立分量与谐波快速变化分量的相关系数来确定混合系数的正确次序,分析并推导了快速变化分量与独立分量间的复数关系式及混合矩阵表达式,并根据混合矩阵各元素间的关系推导系统谐波阻抗的计算公式。该方法在非干预情况下便可准确估算系统谐波阻抗,并且解决了 FastICA 解混后独立分量和混合系数次序不确定影响谐波阻抗计算的问题。

## 1 新能源公共连接点谐波特性

### 1.1 系统谐波阻抗计算的必要性

分布式电源接入电网电路如图 1 所示,各支路经公共连接点与大电网耦合,系统谐波电压会对各支路电流造成影响,同时各支路也经 PCC 点向电网注入谐波电流。

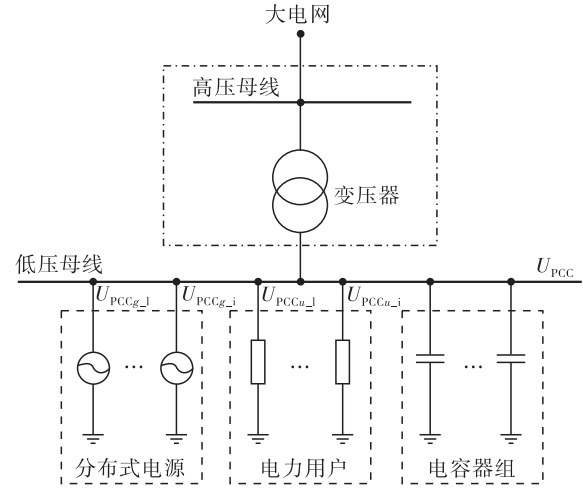


图 1 新能源公共连接点等效电路图

分布式电源谐波注入责任可分依据谐波源在 PPC 点处对该次谐波电压的贡献值来确定,根据叠加定理,PCC 处谐波电压等于所需研究的分布式电源所在支路谐波源产生的谐波电压  $U_{PCCg-i}$  与系统侧所有谐波源产生谐波电压  $U_{PCC,0}$  的相量之和,其谐波电压合成矢量图如图 2 所示。

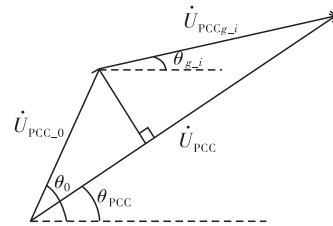


图 2 谐波电压合成矢量图

因此,分布式电源  $i$  在 PCC 点处的谐波贡献值可表示为其在 PCC 点谐波电压  $U_{PCC}$  上的投影<sup>[9]</sup>,则对应的谐波责任可表示为:

$$\begin{aligned} \mu_{PCC-i} &= \frac{U_{PCCg-i} \cos(\theta_{g-i} - \theta_{PCC})}{U_{PCC}} \times 100\% \\ &= \frac{I_{PCCg-i} Z_{g-i} \cos(\theta_{g-i} - \theta_{PCC})}{I_{PCC,0} Z_0 \cos(\theta_0 - \theta_{PCC}) + I_{PCCg-i} Z_{g-i} \cos(\theta_{g-i} - \theta_{PCC})} \times 100\% \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $\theta_0$  和  $\theta_{g-i}$  分别为系统侧和分布式电源  $i$  的谐波电压相角, $\theta_{PCC}$  为 PCC 点谐波电压相角; $Z_0$  和

$Z_{g-i}$  分别为系统侧和分布式电源  $i$  的谐波阻抗;  $I_{PCC,0}$  和  $I_{PCCg-i}$  分别为系统侧和分布式电源  $i$  产生的谐波电流。

由于 PCC 点的谐波电压和电流是系统侧和电源侧谐波共同作用的结果,因此在划分谐波责任时需要对各侧贡献的谐波电流进行分离,且由式(1)可知划分谐波责任需要得到各侧的谐波电流及阻抗值,电源各支路的阻抗  $Z_{g-i}$  可根据支路参数直接获得,但系统侧结构非常复杂,其谐波阻抗  $Z_0$  往往需通过估算获得。

### 1.2 谐波简化分析模型

为了研究某一分布式电源在公共连接点处产生的谐波影响,可将上述电路等效简化为诺顿电路形式,等效简化后的电路如图 3 所示,其中 PCC 点为分布式电源与电网系统的公共耦合点<sup>[12]</sup>。

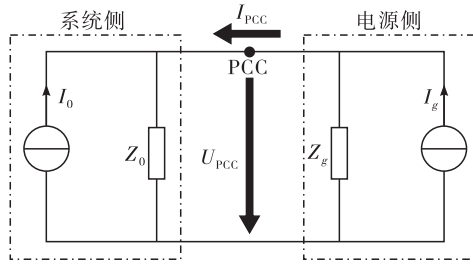


图 3 诺顿等效分析电路图

根据等效电路有如下方程组:

$$\begin{cases} U_{PCC} = \frac{Z_g}{Z_0 + Z_g} Z_0 I_g + \frac{Z_0}{Z_0 + Z_g} Z_g I_0 \\ I_{PCC} = \frac{1}{Z_0 + Z_g} (Z_g I_g - Z_0 I_0) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $Z_0$  和  $I_0$  分别为系统侧谐波阻抗和谐波电流源电流;  $Z_g$  和  $I_g$  分别为分布式电源侧谐波阻抗和谐波电流源电流;  $U_{PCC}$  和  $I_{PCC}$  分别为公共耦合点的谐波电压和电流。

为了便于分析两侧谐波电流、谐波阻抗与 PCC 点谐波电压间的关系,可令  $C_a = Z_g / (Z_0 + Z_g)$ ,  $C_b = Z_0 / (Z_0 + Z_g)$ , 则式(2)可简化表示为:

$$\begin{cases} U_{PCC} = Z_0 C_a I_g + Z_g C_b I_0 \\ I_{PCC} = C_a I_g - C_b I_0 \end{cases} \quad (3)$$

从上式可以看出公共连接点电压  $U_{PCC}$  与系统侧谐波电流贡献量  $C_a I_g$  和电源侧谐波电流贡献量  $C_b I_0$  存在线性关系,其系数为两侧的谐波阻抗,因此可通过分离并得到各侧谐波电流贡献量来求得系统谐波阻抗值。各次谐波电流中除包含对应正弦谐波分量外,还包含快速变化的随机扰动分量,根据叠加定理可知,对于 PCC 点处谐波电压和电流中包含的快速

变化分量  $\tilde{U}_{PCC}$ 、 $\tilde{I}_{PCC}$ , 与谐波电流源快速变化分量  $\tilde{I}_g$ 、 $\tilde{I}_0$  之间应同样满足上述关系。

## 2 谐波阻抗计算方法

### 2.1 快速独立分量分析算法

因系统侧及电源侧谐波电流贡献量是独立的,其快速变化分量也近乎相互独立,因此可采用快速独立分量算法分析对 PCC 点处的电压和电流快速变化分量中包含的独立分量进行分离,从而得到两侧谐波电流的贡献量,并根据式(3)推导出系统侧谐波阻抗值。需要进行 FastICA 分析的信号集合  $Y$  与分离出的独立变量集合  $X$  间的关系为:

$$Y = MX \quad (4)$$

式中:  $M$  为混合矩阵;集合  $Y$  中信号个数大于或等于集合  $X$  中信号的个数。

由于实际信号一般都是非零均值的,为了避免因不同信号数值尺度差异较大引起误差,并减少计算量,需要对上述信号进行零均值处理,处理方法依据下式:

$$\tilde{Y} = Y - E(Y) \quad (5)$$

式中:  $\tilde{Y}$  为零均值化后的信号;  $E$  为对信号取均值。

FastICA 算法基于信号的非高斯性实现,对于高斯信号则不适用,若信号中包含高斯信号不仅使算法效率降低,还会对分析结果产生干扰,因此需要对原信号进行白化处理<sup>[13]</sup>。信号的白化依据下式:

$$Z = H[\text{diag}(d_1^{-1/2}, \dots, d_n^{-1/2})]H^T \tilde{Y} \quad (6)$$

式中:  $Z$  为  $\tilde{Y}$  白化后的信号;  $H$  为  $\tilde{Y}\tilde{Y}^T$  协方差矩阵特征向量的正交阵;  $d_1 \sim d_n$  为  $\tilde{Y}\tilde{Y}^T$  协方差矩阵的特征值。

由于信号服从高斯分布时其负熵最小,根据这一特性可对信号非高斯性采用负熵进行度量,当信号间的负熵最大时,认为其非高斯性达到最大,即此时信号间的独立性也最大<sup>[14-15]</sup>。负熵的近似计算公式为:

$$J(X) = \{E[G(X)] - E[G(V_{\text{gauss}})]\}^2 \quad (7)$$

式中:  $V_{\text{gauss}}$  为单位方差高斯信号;  $g(x)$  为非线性函数,取  $G(x) = -e^{-x^2}/2$ 。

根据 FastICA 算法分离信号独立性度量依据可知,要得到最优分离结果需找到一个解混矩阵  $W$  使  $X = WZ$  时上式中负熵值取最大。根据 Kuhn - Tucker 条件可知,当  $E\{G(W^T Z)^2\} = 1$  时,可通过求

解下式实现上述目标:

$$\begin{cases} E[F(\mathbf{W})] + E\{\mathbf{W}_0^T [F(\mathbf{W}_0)]\} \mathbf{W} = 0 \\ F(\mathbf{W}) = \partial [G(\mathbf{W}^T \mathbf{Z})] / \partial (\mathbf{W}^T) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{W}_0$  为  $\mathbf{W}$  的初值。

根据牛顿迭代法对上述方程进行求解并进行简化, 最终得到迭代公式为:

$$\mathbf{W}(k+1) = \frac{E\{F[\mathbf{W}(k)]\} - E\{F'[\mathbf{W}(k)]\} \mathbf{W}(k)}{\|E\{F[\mathbf{W}(k)]\} - E\{F'[\mathbf{W}(k)]\} \mathbf{W}(k)\|} \quad (9)$$

式中:  $k$  为迭代次数。

当  $\mathbf{W}$  收敛或达到误差要求时, 停止迭代并将对应的  $X$  作为分离的独立分量。

## 2.2 系统谐波阻抗计算改进算法

$$\begin{bmatrix} \tilde{U}_{PCCx} \\ \tilde{U}_{PCCy} \\ \tilde{I}_{PCCx} \\ \tilde{I}_{PCCy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (Z_{0x} C_{ax} - Z_{0y} C_{ay}) & (Z_{0x} C_{ay} + Z_{0y} C_{ax}) \\ -(Z_{0x} C_{ay} + Z_{0y} C_{ax}) & (Z_{0x} C_{ax} - Z_{0y} C_{ay}) \\ (Z_{gx} C_{bx} - Z_{gy} C_{by}) & (Z_{gx} C_{by} + Z_{gy} C_{bx}) \\ -(Z_{gx} C_{by} + Z_{gy} C_{bx}) & (Z_{gx} C_{bx} - Z_{gy} C_{by}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{ax} & C_{ay} \\ -C_{ay} & C_{ax} \\ -C_{bx} & -C_{by} \\ C_{by} & -C_{bx} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \tilde{I}_{gx} \\ \tilde{I}_{gy} \\ \tilde{I}_{0x} \\ \tilde{I}_{0y} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中:  $\tilde{I}_{gx}$ 、 $\tilde{I}_{gy}$  分别为  $\tilde{I}_g$  的实部和虚部;  $\tilde{I}_{0x}$ 、 $\tilde{I}_{0y}$  分别为  $\tilde{I}_0$  的实部和虚部;  $Z_{gx}$ 、 $Z_{gy}$  分别为  $Z_0$  的实部和虚部;  $Z_{0x}$ 、 $Z_{0y}$  分别为  $Z_0$  的实部和虚部;  $C_{ax}$ 、 $C_{ay}$  分别为  $C_a$  的实部和虚部;  $C_{bx}$ 、 $C_{by}$  分别为  $C_b$  的实部和虚部。

令上式中的系数矩阵为  $\mathbf{M}_0$ , 对测量得到的  $U_{PCCx}$ 、 $U_{PCCy}$ 、 $I_{PCCx}$ 、 $I_{PCCy}$  四个分量采用 FastICA 算法进行解混, 令  $\mathbf{E}_s = [U_{PCCx}, U_{PCCy}, I_{PCCx}, I_{PCCy}]^T$ , 解混得到的独立分量  $\mathbf{E}_c = [S_{gx}, S_{gy}, S_{0x}, S_{0y}]^T$ , 则  $\mathbf{E}_s$  与  $\mathbf{E}_c$  之间的关系可表示为:

$$\mathbf{E}_s = \mathbf{M}_0^T [\text{diag}(k_1, \dots, k_4)] \mathbf{E}_c \quad (12)$$

其中,  $I_{gx} = k_1 S_{gx}$ 、 $I_{gy} = k_2 S_{gy}$ 、 $I_{0x} = k_3 S_{0x}$ 、 $I_{0y} = k_4 S_{0y}$ 。

结合(11)(12)式, 对比混合矩阵中各元素可知, 混合矩阵前两行元素可由后两行元素与两侧阻抗线性表示, 前提是量测值与独立分量满足式(12)中的对应关系, 但采用 FastICA 解混得到的独立分量一般情况下具有顺序的不确定性, 往往不能满足上述关系, 因此要对混合矩阵进行一定的处理<sup>[16]</sup>。

电源侧谐波电流在 PCC 点贡献及谐波阻抗均远大于系统侧, 新能源支路阻抗一般呈感性, 且电网中感性负载居多, 根据这一规律, 可知系统侧谐波阻抗  $Z_0$  呈感性, 当电源侧谐波阻抗  $Z_g$  呈感性时,  $Z_e$  呈感性, 反之为容性, 且  $Z_e$  实部和虚部均远小于 1。因

将 PCC 点处的谐波电压  $U_{PCC}$  和谐波电流  $I_{PCC}$  分别分离出实部和虚部信号, 并进行线性滤波, 可得到  $\tilde{U}_{PCCx}$ 、 $\tilde{U}_{PCCy}$ 、 $\tilde{I}_{PCCx}$ 、 $\tilde{I}_{PCCy}$  四个快速变化分量, 根据复数的特性可知, 复数形式下电压、电流及阻抗的实部和虚部关系满足下式:

$$\begin{cases} U_x = I_x Z_x - I_y Z_y \\ U_y = I_x Z_y + I_y Z_x \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $U_x$ 、 $U_y$  分别为电压的实部和虚部;  $I_x$ 、 $I_y$  为对应电流的实部和虚部;  $Z_x$ 、 $Z_y$  分别为阻抗的实部和虚部。

结合式(10)和式(3), 可得到快速变化分量与独立分量间的复数关系式为:

此, 根据式(11)可确定各独立分量对 PCC 点电压电流各分量贡献大小及对应关系, 当  $Z_g$  呈感性时,  $\mathbf{E}_s = [I_{PCCx}, I_{PCCy}, U_{PCCx}, U_{PCCy}]^T$ , 当  $Z_g$  呈容性时,  $\mathbf{E}_s = [I_{PCCy}, I_{PCCx}, U_{PCCy}, U_{PCCx}]^T$ , 通过比较  $\mathbf{E}_c$  各独立分量与  $\mathbf{E}_s$  中各分量间的相关系数来获取一个变换矩阵  $\mathbf{T}$ , 来确定独立分量及混合矩阵的正确次序, 其步骤为:

- (1) 求  $\mathbf{E}_c$  中各元素与  $\mathbf{E}_s$  中各元素的相关系数矩阵  $\mathbf{R}$ ,  $R_{ij} = r[\mathbf{E}_c(i), \mathbf{E}_s(j)]$ ,  $(i, j = 1, 2, 3, 4)$ ;
- (2) 令变换矩阵  $\mathbf{T}$  为  $\mathbf{R}$  的同型零矩阵;
- (3) 获取矩阵  $\mathbf{R}$  的最大值并返回其坐标  $(a, b)$  ( $a, b \in \{1, 2, 3, 4\}$ );
- (4) 令  $R_{aj}(j = 1, 2, 3, 4) = 0$ ,  $R_{ib}(i = 1, 2, 3, 4) = 0$ ,  $T_{ab} = 1$ ;

(5) 重复执行(2)、(3)步, 直到矩阵  $\mathbf{M}$  为零矩阵结束, 并输出变换矩阵  $\mathbf{T}$ 。

根据输出的变换矩阵, 则独立分量及混合矩阵变换为:

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{cf} = [S_{gx}, S_{gy}, S_{0x}, S_{0y}] \mathbf{T} \\ \mathbf{M} = \mathbf{M}_0^T [\text{diag}(k_1, \dots, k_4)] \mathbf{T} \end{cases} \quad (13)$$

结合式(11)(12)(13)可知, 系统侧谐波阻抗与混合矩阵中元素关系可表示为:

$$\begin{cases} M_{1j} = M_{3j} Z_{0x} - M_{4j} Z_{0y} \\ M_{2j} = M_{4j} Z_{0y} + M_{3j} Z_{0x} \end{cases} \quad j = 1, 2 \quad (14)$$

根据上式可求得系统谐波阻抗为:

$$\begin{cases} Z_{0x} = \frac{1}{2} \left( \frac{M_{11}M_{31} + M_{21}M_{41}}{M_{31}^2 + M_{41}^2} + \frac{M_{12}M_{32} + M_{24}M_{42}}{M_{32}^2 + M_{42}^2} \right) \\ Z_{0y} = \frac{1}{2} \left( \frac{M_{21}M_{31} - M_{11}M_{41}}{M_{31}^2 + M_{41}^2} + \frac{M_{22}M_{32} - M_{12}M_{42}}{M_{32}^2 + M_{42}^2} \right) \end{cases} \quad (15)$$

### 3 仿真及分析

基于 MATLAB 搭建诺顿等效电路进行仿真, 仿真步长设置为  $2 \times 10^{-5}$  秒, 系统侧和电源侧三次谐波阻抗分别设置为  $Z_0 = (5 + j15) \Omega$  和  $Z_g = (50 + j80) \Omega$ , 系统侧三次谐波电流源  $I_0$  幅值为 20 A, 初相角为 45 度, 并分别叠加  $\pm 20\%$  的正弦和随机幅值及相位扰动; 电源侧三次谐波电流源电流  $I_g$  为  $I_0$  幅值的  $n$  倍, 初相角为  $-30$  度, 同样分别叠加  $\pm 20\%$  正弦和随机幅值及相位扰动, 两侧电源的随机扰动互不相关。

以  $n = 10$  为例, 取 100 毫秒内共 5000 组仿真数据, PCC 处谐波电压电流虚实分量如图 4 所示, 对图中谐波电流进行线性滤波, 得到对应的快速变化分量如图 5 所示。

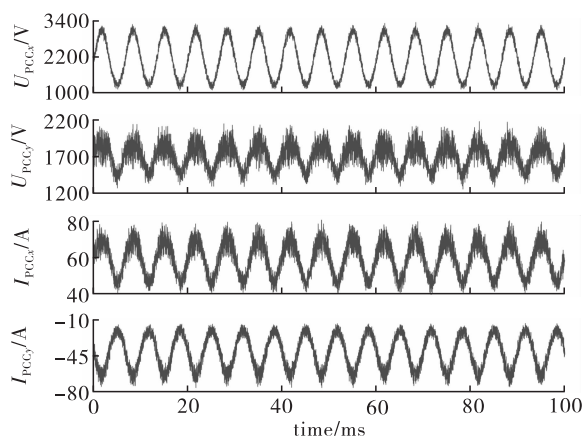


图 4 PCC 点谐波电压和电流的虚实部波形

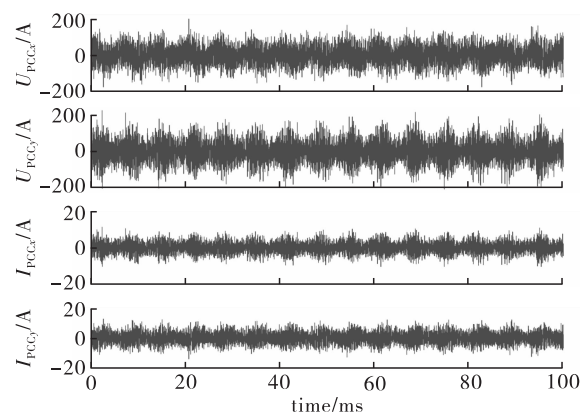
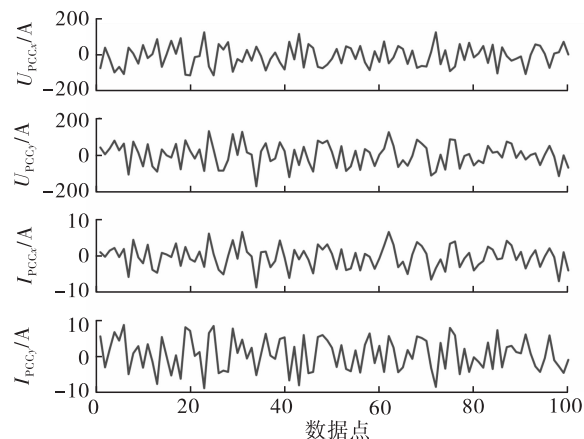
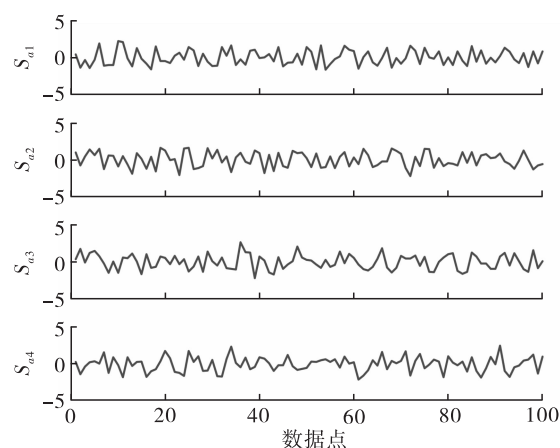


图 5 PCC 点电压电流快速变化分量

将上图所示数据分为 50 个数据段, 每个数据段包含 100 组数据点, 以图 6 所示的一个数据段为例, 对其采用 FastICA 进行两次解混得到的独立分量如图 7 所示。



(a) 第1次解混



(b) 第2次解混

图 6 混合电压电流信号

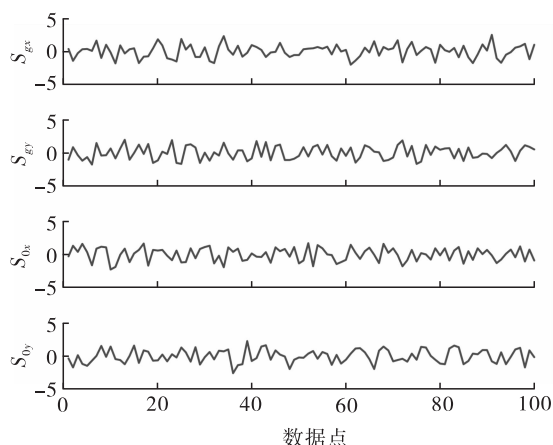


图 7 FastICA 解混后的独立分量

从图 7 可以看出, FastICA 两次解混得到的独立分量在次序上是变化的, 根据两组独立分量的相关性可知,  $S_{a1}$ 、 $S_{a2}$  分别对应  $S_{b2}$ 、 $S_{b1}$ , 且同一形态的独立分量不仅次序不固定, 其数值也可能互为相反数, 如  $S_{a1}$ 、 $S_{a2}$ 、 $S_{a3}$  与  $S_{b2}$ 、 $S_{b1}$ 、 $S_{b3}$  分别关于  $x=0$  对称。为了得到准确的谐波阻抗值, 需确定上述独立分量的次序, 基于第二次解混的独立分量及混合矩阵, 根据本文所提方法, 可求得变换矩阵矩阵各元素为  $T_{12}$ 、 $T_{24}$ 、 $T_{33}$ 、 $T_{41}$  为 1, 其他元素为零, 则根据式 (15) 得到变换后变换后的独立分量如图 8 所示。

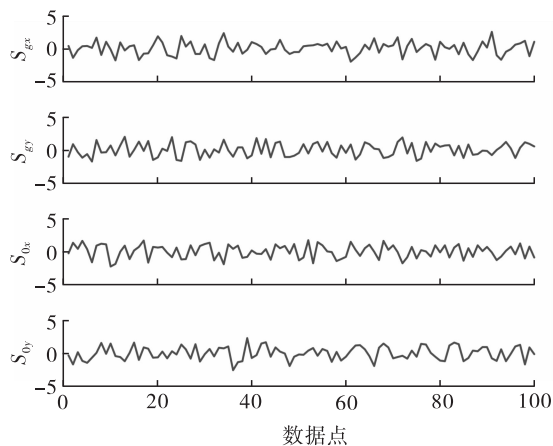


图 8 经次序变换后的独立分量

根据上述求得的混合矩阵, 结合式 (15) 可计算出此数据段下系统谐波阻抗的估计值  $Z_0 = (4.88 + 15.08) \Omega$ 。由该数据段的仿真结果可知, 经 FastICA 解混和次序变换后, 计算得到的谐波阻抗值与设定值相近, 说明本文所提方法具有可行性。

由已有研究可知, 电源侧谐波电流与系统侧谐波电流幅值对谐波阻抗估计精度有较大影响, 为进一步分析评估该方法的估计精度及稳定性, 针对  $n$  的不同取值进行仿真, 每个  $n$  值下均仿真得到 5000 组数据, 同样将其分为 50 个数据段并采用本文所提

方法估算系统谐波阻抗, 各组数据下的估计值及其误差统计如表 1 所示, 各  $n$  值下的谐波阻抗对比如图 9 所示, 误差对比如图 10 所示。

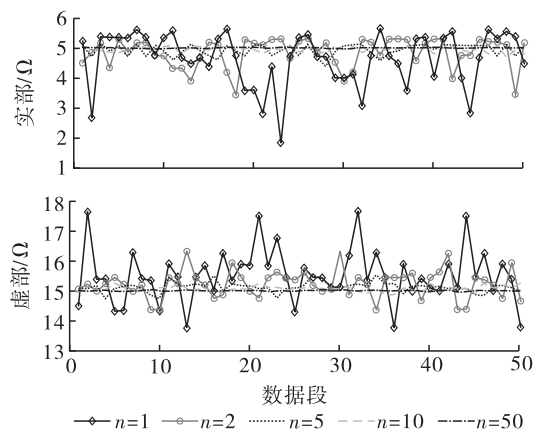


图 9 谐波阻抗实部虚部估计值

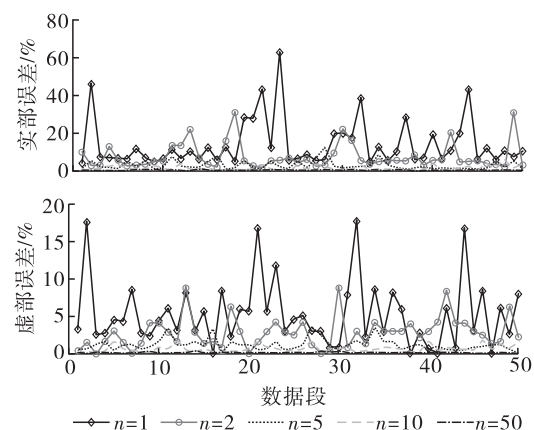


图 10 谐波阻抗实部虚部估计绝对误差

表 1 系统谐波阻抗估计结果统计

$n$	平均值/ $\Omega$		平均误差/%		均方根误差/%	
	$Z_{0x}$	$Z_{0y}$	$Z_{0x}$	$Z_{0y}$	$Z_{0x}$	$Z_{0y}$
1	4.65	15.52	14.26	5.29	19.09	6.87
2	4.84	15.23	7.85	2.81	10.45	3.49
5	4.92	15.13	3.20	1.21	4.02	1.45
10	4.95	15.07	1.73	0.67	2.19	0.83
50	4.99	15.01	0.29	0.1	0.36	0.13

由仿真结果可知, 在  $n \geq 5$  时, 实部平均估计误差在 3.2% 以内, 虚部平均误差在 1.21% 以内, 均方根误差与平均误差比较接近, 可见此区间内估计值基本接近实际值, 且各数据段估计值均比较稳定, 未出现大幅波动, 此时系统谐波阻抗估计精度均较高。而随着  $n$  值减小, 平均误差及均方根误差均快速增大, 且两者差距扩大, 表明此时估计精度及稳定性均在迅速变差, 而在实际情况中  $n$  值一般较大, 因此该方法具有较高的可靠性。

## 4 结论

新能源的大量接入改变了电网的谐波特性,会导致一定程度的谐波污染,各支路谐波责任划分需基于系统谐波阻抗可靠估算开展,采用独立分量分析的谐波阻抗估算具有以下特点:

(1)根据独立分量的混合矩阵各元素间的关系可推导得到谐波阻抗计算公式,但正确计算谐波阻抗的前提是混合信号与独立分量具有正确的对应关系;

(2)基于 FastICA 算法解混后的独立分量具有次序的不确定性,其混合矩阵不能直接用于系统阻抗的计算,该问题可通过计算独立分量与混合信号间相关性求取变换矩阵的方法来解决,通过变换矩阵可得到独立分量的正确次序及对应混合矩阵,确保系统谐波阻抗计算公式有效;

(3)采用 FastICA 算法估算系统谐波阻抗基于电源谐波电流远大于系统谐波电流这一前提,仿真结果表明当两者幅值大小差距增大时,其估算结果更趋精确稳定,反之差距减小时,估算误差增大且稳定性亦迅速降低。

### 参考文献:

- [1] 盛戈皞,钱勇,罗林根,等.面向新型电力系统的电力设备运行维护关键技术及其应用展望[J].高电压技术,2021,47(09):3072-3084.
- [2] 邱伟强,王茂春,林振智,等.“双碳”目标下面向新能源消纳场景的共享储能综合评价[J].电力自动化设备,2021,41(10):244-255.
- [3] 李晖,刘栋,姚丹阳.面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J].中国电机工程学报,2021,41(18):6245-6259.
- [4] 韩肖清,李廷钧,张东霞,等.双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J].高电压技术,2021,47(09):3036-3046.
- [5] 王彩霞,时智勇,梁志峰,等.新能源为主体电力系统的需求侧资源利用关键技术及展望[J].电力系统自动化,2021,45(16):37-48.
- [6] 王胜,冯兴明,周宇,等.基于BP神经网络预测的微网系统dq轴谐波阻抗的主动测量策略[J].电测与仪表,2021,58(03):118-125.
- [7] 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(03):65-70.
- [8] 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.
- [9] 王清亮,高梅,梁佩佩,等.含光伏发电系统的配电网谐波责任评定方法[J].电工电能新技术,2020,39(11):73-80.
- [10] 黄伟明.某10kV并联电容器组频繁故障的分析与处理[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(04):115-119.
- [11] 朱建华,徐刚刚,刘鹏飞,等.并联电容器装置接地和电抗率选取建议[J].电力电容器与无功补偿,2017,38(05):7-11.
- [12] 刘子腾,徐永海,陶顺.新能源并网下谐波责任定量评估方法研究现状与展望[J].电力自动化设备,2020,40(11):203-213.
- [13] 张程,刘佳静,匡宇,等.基于FastICA技术与TLS-ESPRIT方法的电力系统低频振荡模态辨识[J].高电压技术,2021,47(06):2214-2222.
- [14] 杜文龙,杨洪耕,马晓阳.基于快速独立分量分析的谐波间谐波频谱分离算法[J].电力系统自动化,2020,44(13):115-122.
- [15] OLIVEIRA D, LIMA M, SILVA L, et al. Second order blind identification algorithm with exact model order estimation for harmonic and interharmonic decomposition with reduced complexity[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 125:106415.
- [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(08):3007-3013.

# 欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎刊登广告!

国内邮发代号:52-49 国际发行代号:BM529 定价:18.00元/期 108.00元/年  
地址:西安市高新区沣惠南路8号 邮编:710075 电话:029-81871277  
网址:<http://yb-zdh.shaangu-group.com> 电子邮箱:gyybbjb@126.com