

# 新能源并网下谐波责任定量评估方法研究现状与展望

刘子腾,徐永海,陶 顺

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206)

**摘要:**新能源并网逆变器的输出电流常存在谐波不能达标的问题,且各逆变器间谐波相互作用复杂,给谐波责任评估带来了新问题。首先对谐波责任定量评估模型进行介绍;然后对现有谐波阻抗估计方法进行归类,明确各方法的适用条件;进而讨论谐波电压评估指标及其他评估指标的合理性;基于现有方法的局限性,探讨了新能源并网条件下的谐波新特性和谐波责任评估面临的新问题及难点;最后,对未来谐波责任评估研究进行了展望。

**关键词:**新能源并网;并网逆变器;谐波责任;谐波阻抗;评估指标

**中图分类号:**TM 72

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202010012

## 0 引言

新能源并网发电带来许多电能质量问题,其中谐波问题也成为制约其发展的重要因素<sup>[1-2]</sup>。新能源发电通过并网逆变器将发出的电能逆变后再馈送到电网,而逆变器输出电流常存在谐波不能达标的问题,我国标准GB/T 14549—1993《电能质量:公用电网谐波》对谐波电压畸变率、谐波电压含有率、各电压等级下的谐波电流允许值进行了限制<sup>[3]</sup>,GB/T 24337—2009《电能质量:公用电网间谐波》也对间谐波的谐波电压含有率进行了限制<sup>[4]</sup>,逆变器谐波不能达标会导致大规模新能源发电系统不能正常并网运行。同时,逆变器的谐波特性较复杂,即使单台逆变器输出谐波电流未超标,多台逆变器并网运行时也有可能发生谐波叠加或谐波放大等问题<sup>[5]</sup>。有研究表明并网逆变器反馈控制系统会令逆变器自身发射谐波随着网侧谐波的增大而增大<sup>[6]</sup>,即符合标准的逆变器并入电网后,由于电网中谐波较大而导致自身谐波电流超标。新能源并网引起的谐波与电网中原有非线性负荷引起的谐波的叠加,使得电网中的谐波问题更趋复杂。

谐波对电力系统的危害不可忽视,如损坏电气设备、产生通信干扰、使电网的各类保护及自动装置产生误动或拒动等,严重时将引发停电甚至威胁到人身安全<sup>[7-8]</sup>。对于已经投入运行的电气设备,明确谐波来源并实施奖罚措施有利于控制电网谐波<sup>[9]</sup>。对于谐波污染源,应当按照其对公共连接点PCC(Point of Common Coupling)谐波的贡献程度承担对应的责任,对于受到影响的非谐波用户应当给予一定的补偿。随着大量新能源电源的并网和用户的

维权意识增加,如果不进行合理的谐波责任定量评估,一方面会引发电气设备损坏、停电甚至危及人身安全的事故,另一方面也会出现越来越多的用户投诉、要求索赔的问题。因此,准确地定量评估谐波责任,从源头控制和治理谐波,有利于减少用电事故和不必要的经济损失。

本文首先介绍了谐波责任定量评估模型;其次,为了明确何种谐波责任评估方法更适用于新能源并网的条件,对现有谐波阻抗估计方法进行归类和总结,明确了各种方法的适用条件,并探讨了各谐波责任评估指标的合理性;然后,分析了新能源并网条件下谐波责任定量评估方法面临的问题;最后,对新能源并网下的谐波责任评估进行了展望。

## 1 谐波责任定量评估模型

谐波责任评估模型主要可以分为单谐波用户责任评估模型和多谐波用户责任评估模型2类。

以 $h$ 次谐波为例,将关注用户等效为用户侧,其他部分都等效为系统侧,单谐波用户责任评估模型可以等效为图1所示的诺顿等效电路。图中, $U_{pcc}$ 和 $I_{pcc}$ 分别为PCC处的谐波电压和谐波电流; $I_s$ 和 $I_c$ 分别为系统侧和用户侧等效谐波电流源; $Z_s$ 和 $Z_c$ 分别为系统侧和用户侧等效谐波阻抗。记系统侧谐波电压 $U_s = I_s Z_s$ , $U_s$ 又被称为背景谐波电压。为了方便各方法计算,该模型也可转化为戴维南等效模型。

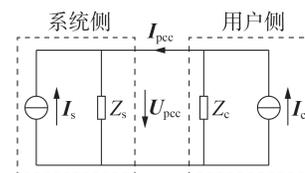


图1 诺顿等效电路图

Fig.1 Norton equivalent circuit diagram

评估多个用户的谐波责任,需要进行多谐波用户责任评估。假设存在 $n$ 个谐波用户,分别向系统

收稿日期:2020-06-05;修回日期:2020-08-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777066)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777066)

注入矢量为 $I_i(i=1,2,\dots,n)$ 的谐波电流,同时PCC上存在背景谐波源(即系统侧谐波源),其等效谐波电压矢量值为 $U_s$ ,多谐波用户责任评估模型又可分为集中式和分散式,分别如图2(a)、(b)所示。

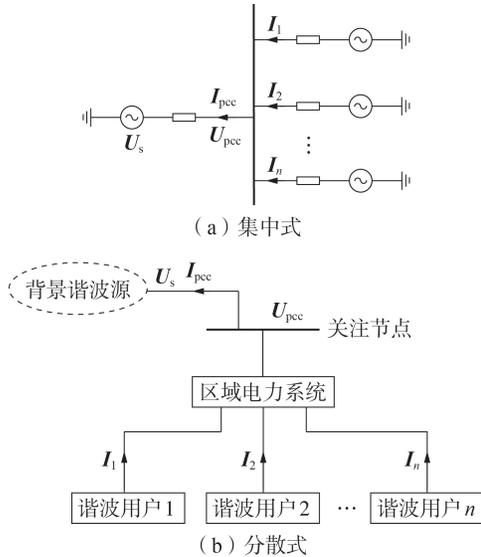


图2 多谐波源等效电路

Fig.2 Multi-harmonic source equivalent circuit

多谐波用户模型可以同时评估出多个谐波源的谐波贡献,但谐波阻抗估计难度高于单谐波用户责任评估,往往需要选取 $I_1, I_2, \dots, I_n$ 同时波动的数据段,且同样易受背景谐波电压波动的影响。

## 2 谐波阻抗估计方法

谐波阻抗估计是谐波责任评估的关键步骤,故现有研究多集中于谐波阻抗尤其是系统谐波阻抗的求解上。新能源并网电网相较于传统电网有了许多谐波新特征,现有谐波阻抗估计方法多是针对传统电网提出的,本节通过对现有方法进行归纳总结,明确各方法的适用条件,以便后文判断该方法是否适用于新能源并网的电网。

目前,谐波阻抗估算主要有干预式和非干预式2类方法。干预式方法会破坏原有系统的运行方式,需要通过开断系统某一支路、向系统强迫注入谐波或间谐波电流,测量相应产生的谐波电压以计算谐波阻抗,一般不推荐应用。非干预式方法的主要类别有波动量类<sup>[10-14]</sup>、线性回归类<sup>[15-26]</sup>、独立矢量协方差类<sup>[27-29]</sup>和盲源分离类<sup>[30-35]</sup>,其中波动量类、协方差类和盲源分离类都是基于单谐波用户责任评估提出的,线性回归类方法可以用于单谐波用户和多谐波用户的责任评估。这些方法通常需要满足1种或多种前提条件,如:①背景谐波电压波动范围总体较小;②有足够多用户侧主导波动段;③系统侧谐波阻抗远小于用户侧谐波阻抗;④PCC处谐波电流主要来源于用户侧;⑤谐波阻抗不变化或仅小范围波

动;⑥仅有系统侧或用户侧谐波源一侧谐波源波动。

常用的谐波阻抗估计方法及其适用条件总结如附录中的表A1所示,表中适用条件的编号对应上述条件的编号,星标表示该方法需要通过一些数据筛选方法来提高估计精度。

### 2.1 波动量法及其改进方法

波动量法是典型的单谐波用户责任评估方法。文献[10]提出波动量法,利用谐波电压和谐波电流波动量的比值计算系统侧谐波阻抗,该方法的应用前提是仅考虑系统侧或用户侧等效谐波源的单独波动情况。

如图1所示,由于系统运行方式变化和用户负荷波动,可能引起PCC处谐波电压和谐波电流波动,记其波动量为 $\Delta U_{pcc}, \Delta I_{pcc}$ 。文献[10]认为系统侧等效谐波阻抗 $Z_s$ 主要取决于系统短路容量,在较短时间内可认为不变,而用户侧等效谐波阻抗 $Z_c$ 的变化可等效为 $I_c$ 的变化,因此,考虑系统和用户侧波动时,可仅考虑系统侧谐波电流波动量 $\Delta I_s$ 和用户侧谐波电流波动量 $\Delta I_c$ ,则PCC处的谐波电压、谐波电流波动量为:

$$\begin{cases} \Delta U_{pcc} = \frac{Z_s Z_c (\Delta I_c + \Delta I_s)}{Z_c + Z_s} \\ \Delta I_{pcc} = \frac{\Delta I_c Z_c - \Delta I_s Z_s}{Z_c + Z_s} \end{cases} \quad (1)$$

当仅考虑系统和用户侧单侧波动时,可获得谐波波动量比值 $K$ 为:

$$K = \frac{\Delta U_{pcc}}{\Delta I_{pcc}} = \frac{Z_s Z_c (\Delta I_c + \Delta I_s)}{\Delta I_c Z_c - \Delta I_s Z_s} = \begin{cases} Z_s & \Delta I_s = 0 \\ -Z_c & \Delta I_c = 0 \end{cases} \quad (2)$$

传统的波动量法仅考虑 $\Delta I_c$ 和 $\Delta I_s$ 单独波动的情况,并依据符号判别法区分系统侧或用户侧谐波阻抗,是一种较理想状态下的谐波阻抗估计方法。

文献[11]对符号判别法的局限性进行了分析,指出了符号判别法只能排除一部分相角不正确的结果,却剔除了一部分相对误差较小的结果,同时误保留了一些实部为正但误差较大的结果。文献[11]提出了一种基于阻抗归一化趋势判别的谐波发射水平估计方法,其根据谐波阻抗估计结果判断谐波阻抗聚合区,筛选出 $\Delta I_c \gg \Delta I_s$ 或 $\Delta I_c \ll \Delta I_s$ 的波动量样本,以减小阻抗计算的相对误差。该方法相比传统波动量法估算精度有了很大提升,但在判定聚合区时存在一定的主观性,聚合区选择不合适或者聚合区较小都可能导致估算精度降低。

文献[12]在波动量法的基础上提出主导波动量法,该法通过筛选用户侧主导波动量来提高精度。该方法的应用前提是:系统侧谐波阻抗远小于用户侧谐波阻抗,波动量的分布规律服从正态分布。该研究认为系统侧和用户侧谐波阻抗分别取决于系统

短路容量和负荷容量,一般负荷容量远小于系统短路容量,所以  $Z_c \gg Z_s$ , 可得:

$$\Delta I_{\text{pec}} = \frac{\Delta I_c Z_c - \Delta I_s Z_s}{Z_c + Z_s} = \frac{1}{1 + Z_s/Z_c} \left( \Delta I_c - \Delta I_s \frac{Z_s}{Z_c} \right) = \frac{1}{1 + Z_s/Z_c} \Delta I_c + \frac{-Z_s}{Z_s + Z_c} \Delta I_s = \Delta I_c + \varepsilon_s \quad (3)$$

其中,  $\varepsilon_s$  为系统侧波动等引起的误差。采用统计学中的奈尔(Nair)检验法筛选出用户主导波动量样本。主导波动量可以在一定程度上抑制背景谐波电压的波动带来的影响,提高谐波阻抗估计的精度。该方法也存在一定的局限性:在背景谐波电压整体波动较大时,满足该筛选条件的样本点可能会较少,且该方法需要在  $Z_c \gg Z_s$  的前提下实现。

## 2.2 线性回归法及其改进方法

线性回归类方法同时适用于单谐波用户和多谐波用户的责任评估,由图1和图2可得PCC处有:

$$U_{\text{pec}} = Z_s I_{\text{pec}} + U_s \quad (4)$$

$$U_{\text{pec}} = Z_1 I_1 + Z_2 I_2 + \dots + Z_n I_n + U_s \quad (5)$$

其中,  $Z_i (i=1, 2, \dots, n)$  为谐波用户  $i$  和 PCC 之间的等效谐波阻抗。

文献[15]和文献[16]分别提出偏最小二乘法和稳健回归法,首先采集谐波电压 ( $U_{\text{pec}}$ ) 和谐波电流 ( $I_{\text{pec}}$  或  $I_i$ ) 在一段时间内的数据组,并通过式(4)和(5)估计谐波阻抗值,一般采样点越多则估计结果越精确;文献[17]和文献[18]在此基础上分别提出复数域偏最小二乘法和复数域稳健回归法,进一步提高阻抗估算精度。文献[19]和文献[20]分别提出基于岭回归和部分岭回归的方法,岭回归具有较高的数值稳定性,适用于存在共线性问题和病态数据偏多的研究中,是一种有偏估计。

线性回归法的估算误差会随着背景谐波电压波动的增大而增大,为了提高估算精度,现有研究通常增添数据筛选步骤。文献[21]提出一种基于背景谐波最小波动能量的系统侧谐波阻抗估计方法,利用最小波动能量目标函数筛选出背景谐波波动最小的波动量样本。文献[22]首先采用主导波动量法计算系统侧谐波阻抗,然后对不同的背景谐波电压利用分层K均值聚类算法进行分段,使得每一段背景谐波电压波动较小。文献[23]采用均值漂移算法对背景谐波电压数据进行聚类处理,按照电压值分为不同的数据段以减小背景谐波电压波动的影响。文献[24]提出利用峰度检测原理筛选出背景谐波电压波动较小的有效数据段。文献[25]提出基于动态窗宽线性显著性校验的筛选算法,通过校验消除回归中产生的异常值,筛选出误差最小、线性度最高的结果。

数据筛选方法都是建立在采样数据中存在足够

多用户侧主导波动段的基础上进行的,由于系统侧和用户侧的谐波波动程度具有独立性,多数条件下可以筛选到符合条件的数据段。但如果系统侧谐波源始终在较大范围内波动,可能会导致难以筛选出符合条件的数据段,进而影响谐波阻抗的估计精度。

## 2.3 独立随机矢量协方差法及其改进方法

独立随机矢量协方差法适用于单谐波用户谐波评估,是为抑制背景谐波电压波动提出的方法,该方法的适用前提仍是系统侧谐波阻抗远小于用户侧谐波阻抗。

文献[28]所提协方差法的应用前提是系统侧谐波阻抗远小于用户侧谐波阻抗、PCC处谐波电流主要来源于用户侧,通过协方差消去背景谐波电压波动量,将系统侧谐波阻抗估计公式转化为:

$$\left\{ \begin{aligned} Z_{s-x} &= \frac{\sum_{i=1}^N (\Delta I_{\text{pec-xi}} \Delta U_{\text{pec-xi}} + \Delta I_{\text{pec-yi}} \Delta U_{\text{pec-yi}})}{\sum_{i=1}^N (\Delta I_{\text{pec-xi}}^2 + \Delta I_{\text{pec-yi}}^2)} \\ Z_{s-y} &= \frac{\sum_{i=1}^N (\Delta I_{\text{pec-xi}} \Delta U_{\text{pec-yi}} - \Delta I_{\text{pec-yi}} \Delta U_{\text{pec-xi}})}{\sum_{i=1}^N (\Delta I_{\text{pec-xi}}^2 + \Delta I_{\text{pec-yi}}^2)} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta I_{\text{pec-xi}} &= I_{\text{pec-xi}} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{\text{pec-xi}} \\ \Delta I_{\text{pec-yi}} &= I_{\text{pec-yi}} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{\text{pec-yi}} \\ \Delta U_{\text{pec-xi}} &= U_{\text{pec-xi}} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{\text{pec-xi}} \\ \Delta U_{\text{pec-yi}} &= U_{\text{pec-yi}} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{\text{pec-yi}} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

其中,  $N$  为样本数;  $i=1, 2, \dots, N$ , 表示第  $i$  个样本;  $Z_{s-x}$  和  $Z_{s-y}$  分别为  $Z_s$  的实部和虚部;  $I_{\text{pec-xi}}$  和  $I_{\text{pec-yi}}$  分别为  $I_{\text{pec}}$  的实部和虚部;  $U_{\text{pec-xi}}$  和  $U_{\text{pec-yi}}$  分别为  $U_{\text{pec}}$  的实部和虚部。

文献[29]提出修正随机独立矢量协方差法,相对于传统协方差法,该方法不需要满足系统侧谐波阻抗远小于用户侧谐波阻抗的假设,在原有方法基础上根据谐波电压和谐波电流的相关性增加数据筛选步骤,求解得到系统侧谐波阻抗。该方法同样需要采样数据中存在足够多的用户侧主导波动段。

## 2.4 盲源分离法

盲源分离法适用于单用户谐波源责任评估,由图1可得:

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta U_{\text{pec}} &= \frac{Z_s Z_c}{Z_s + Z_c} \Delta I_c + \frac{Z_s Z_c}{Z_s + Z_c} \Delta I_s \\ \Delta I_{\text{pec}} &= \frac{Z_c}{Z_s + Z_c} \Delta I_c - \frac{Z_s}{Z_s + Z_c} \Delta I_s \end{aligned} \right. \quad (8)$$

将实部和虚部分开可得关系式:

$$\begin{cases} \Delta U_{\text{pcc-x}} = a_{11} \Delta I_{\text{c-x}} + a_{12} \Delta I_{\text{c-y}} + a_{13} \Delta I_{\text{s-x}} + a_{14} \Delta I_{\text{s-y}} \\ \Delta U_{\text{pcc-y}} = a_{21} \Delta I_{\text{c-x}} + a_{22} \Delta I_{\text{c-y}} + a_{23} \Delta I_{\text{s-x}} + a_{24} \Delta I_{\text{s-y}} \\ \Delta I_{\text{pcc-x}} = a_{31} \Delta I_{\text{c-x}} + a_{32} \Delta I_{\text{c-y}} + a_{33} \Delta I_{\text{s-x}} + a_{34} \Delta I_{\text{s-y}} \\ \Delta I_{\text{pcc-y}} = a_{41} \Delta I_{\text{c-x}} + a_{42} \Delta I_{\text{c-y}} + a_{43} \Delta I_{\text{s-x}} + a_{44} \Delta I_{\text{s-y}} \end{cases} \quad (9)$$

其中,系数  $a_{ij}$  ( $i, j=1, 2, 3, 4$ ) 只与谐波阻抗有关;  $\Delta U_{\text{pcc-x}}$ 、 $\Delta U_{\text{pcc-y}}$  分别为  $\Delta U_{\text{pcc}}$  的实部和虚部,其他参数定义依此类推。

设  $\mathbf{S}=[s_1, s_2, \dots, s_n]^T$  由  $n$  个均值为 0、统计独立的源信号组成,  $\mathbf{X}=[x_1, x_2, \dots, x_m]^T$  由  $m$  个观测信号组成,  $m \geq n$ 。存在一个  $m \times n$  阶的列满秩矩阵  $\mathbf{A}$  使得:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{S} \quad (10)$$

盲源分离法能够在混合矩阵  $\mathbf{A}$  未知的前提下从观测信号  $\mathbf{X}$  中分离出信号  $\mathbf{I}=[I_1, I_2, \dots, I_n]^T$ , 使得  $\mathbf{I}$  与源信号  $\mathbf{S}$  高度相似,  $\mathbf{I}$  又被称为估计信号。结合式(8)和式(9)可知,盲源分离能从观测信号  $\mathbf{X}=[\Delta U_{\text{pcc}}, \Delta I_{\text{pcc}}]^T$  (复数域解法) 或  $\mathbf{X}=[\Delta U_{\text{pcc-x}}, \Delta U_{\text{pcc-y}}, \Delta I_{\text{pcc-x}}, \Delta I_{\text{pcc-y}}]^T$  (实数域解法) 中分离出信号  $\mathbf{I}$ , 使得  $\mathbf{I}$  与源信号  $\mathbf{S}=[\Delta I_{\text{c}}, \Delta I_{\text{s}}]^T$  或  $\mathbf{S}=[\Delta I_{\text{c-x}}, \Delta I_{\text{c-y}}, \Delta I_{\text{s-x}}, \Delta I_{\text{s-y}}]^T$  中的信号高度相似,再根据  $\mathbf{X}$  和  $\mathbf{S}$  求解出谐波阻抗。实数域解法更能适用于相角波动较大的情况,且稳健性相较于复数域解法更高。

盲源分离的方法很多,如独立分量分析(ICA)、快速独立分量分析(FastICA)、核独立分量分析、联合对角化等方法。文献[30]提出基于FastICA方法的系统谐波阻抗估计方法, FastICA方法相较于传统ICA方法具有收敛速度快、分离效果好和迭代稳定的优点;文献[31]在FastICA方法的基础上提出改进FastICA方法,其与原有算法过程相似,只改变了迭代公式以加快收敛速度,估算精度与FastICA方法相近;文献[32]提出核独立分量分析方法,该方法与传统ICA方法相比更加稳健且估计精度更高,但与FastICA方法相比没有明显优势。文献[33]和文献[34]分别提出基于联合对角化法和快速近似联合对角化的谐波责任评估,进一步证实了盲源分离法在谐波责任评估中的有效性。

### 3 谐波责任评估指标

#### 3.1 谐波电压评估指标

合理的评估指标是谐波责任评估的依据,最常用的评估方法是在谐波阻抗估算完成后按照谐波电压评估指标进行定责<sup>[23,26,33]</sup>。谐波电压评估指标通过量化PCC处的谐波电压贡献度来量化责任,具体方法如下。

对于单谐波用户责任评估,由图1可得,当  $I_s$  和  $I_c$  单独作用时,由叠加定理可得系统侧贡献电压  $U_{\text{pcc-s}}$  和用户侧贡献电压  $U_{\text{pcc-c}}$  如式(11)所示。

$$\begin{cases} U_{\text{pcc-s}} = \frac{Z_s Z_c}{Z_s + Z_c} I_s \\ U_{\text{pcc-c}} = \frac{Z_s Z_c}{Z_s + Z_c} I_c \\ U_{\text{pcc}} = U_{\text{pcc-s}} + U_{\text{pcc-c}} \end{cases} \quad (11)$$

谐波电压责任即为  $U_{\text{pcc-s}}$  和  $U_{\text{pcc-c}}$  在  $U_{\text{pcc}}$  方向上的贡献比,如图3所示。

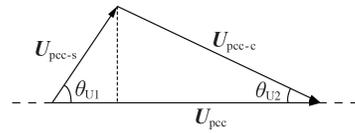


图3 单谐波用户责任评估示意图

Fig.3 Schematic diagram of harmonic responsibility evaluation for single customer

则系统侧谐波电压责任  $D_{\text{Us-h}}$  和用户侧谐波电压责任  $D_{\text{Uc-h}}$  如式(12)所示。

$$\begin{cases} D_{\text{Us-h}} = \frac{|U_{\text{pcc-s}}| \cos \theta_{U1}}{|U_{\text{pcc}}|} \times 100 \% \\ D_{\text{Uc-h}} = \frac{|U_{\text{pcc-c}}| \cos \theta_{U2}}{|U_{\text{pcc}}|} \times 100 \% \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $\theta_{U1}$  和  $\theta_{U2}$  分别为  $U_{\text{pcc-s}}$  和  $U_{\text{pcc-c}}$  与  $U_{\text{pcc}}$  之间的夹角。由于用户侧谐波阻抗值不易获取,部分文献以系统侧谐波阻抗远小于用户侧谐波阻抗、PCC处谐波电流主要来源于用户侧(即  $Z_s \ll Z_c$  和  $I_{\text{pcc}} \approx I_c$ ) 为前提条件,将式(11)等效为:

$$\begin{cases} U_{\text{pcc-c}} = \frac{Z_s Z_c}{Z_s + Z_c} I_c \approx Z_s I_{\text{pcc}} \\ U_{\text{pcc-s}} = U_{\text{pcc}} - U_{\text{pcc-c}} \end{cases} \quad (13)$$

再根据式(12)求解谐波电压责任,本文将该指标称为近似谐波电压评估指标,由于用户阻抗参数不易获取,所以近似谐波电压评估指标成为最常用的评估指标。

对于多谐波用户责任评估,由图2可得:

$$U_{\text{pcc}} = Z_1 I_1 + Z_2 I_2 + \dots + Z_n I_n + U_s \quad (14)$$

$n$  个用户在该节点产生的谐波电压分别为  $Z_i I_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ), 系统侧在该节点产生的谐波电压为  $U_s$ , 与总谐波电压  $U_{\text{pcc}}$  的关系如图4所示。

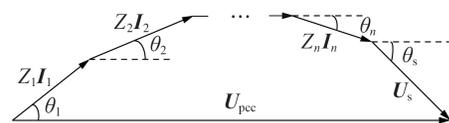


图4 多谐波用户责任评估示意图

Fig.4 Schematic diagram of harmonic responsibility evaluation for multiple customers

则各谐波用户的谐波电压责任为:

$$D_i = \frac{|Z_i I_i| \cos \theta_i}{|U_{\text{pec}}|} \times 100\% \quad i=1, 2, \dots, n \quad (15)$$

系统谐波电压责任为:

$$D_s = \frac{|U_s| \cos \theta_s}{|U_{\text{pec}}|} \times 100\% \quad (16)$$

其中,  $\theta_i$  为  $Z_i I_i$  与  $U_{\text{pec}}$  的夹角;  $\theta_s$  为  $U_s$  与  $U_{\text{pec}}$  的夹角。

### 3.2 其他谐波责任评估指标

除了最常用的谐波电压评估指标外,国内外学者也从不同角度提出了多种用于衡量谐波责任的指标,包括临界阻抗判定法<sup>[36]</sup>、功率方向法<sup>[37]</sup>、非有功功率判定法<sup>[38]</sup>、畸变功率指标<sup>[39]</sup>、谐波功率分解指标<sup>[40]</sup>、谐波发射水平指标<sup>[41]</sup>、谐波电压和谐波电流评估指标<sup>[42-43]</sup>等。其中,文献[36-38]仅能定性判定主谐波源,无法量化责任;文献[39]提出从畸变功率的角度评估系统侧和用户侧的谐波贡献度;文献[40]提出通过谐波功率分解进行奖惩性电能计量;文献[41]提出依据谐波发射水平加权的谐波责任定量评估。

谐波电压责任和谐波电流责任是2个比较认可的评估指标,但这2个指标具有不等价性,且往往给出不一致的结论<sup>[44]</sup>。现有研究多认为由于电压是电能质量的主要方面,故多以谐波电压评估指标定责。但文献[45]指出谐波电压指标并不适用于所有情况,如当用户采用谐波治理措施,投入滤波器组后,外界谐波电流除注入系统外,还有部分电流会流入滤波支路,此时外界谐波电流的注入会造成各谐波用户责任分摊的判别不准确,该文献采用谐波电流指标对谐波电流进行源头的贡献度分解以获得谐波责任。

虽然谐波电压评估指标被广泛应用,但有时电网中会存在谐波电压或电流的放大或谐振等现象,单一地从电压、电流或功率角度评估责任都未必合理。文献[46]从各频次电压、各频次电流、非基波视在功率和畸变率角度给出不同的指标方案,虽然评估结果较为全面,但最终应依据哪个指标进行定责在该文献中没有体现。文献[47]提出综合评估指标,通过对各频次谐波加权以及谐波电压和谐波电流责任加权获得综合评估,更有利于奖惩方式的实施,但

其权重值如何设定得更合理还需进一步的探究。

## 4 新能源并网条件下的谐波责任评估

第2、3节对现有谐波阻抗估计方法以及谐波责任评估指标方法进行了归纳总结,明确了各方法的适用条件。由第2、3节的分析可知,各方法的应用都有一定的假设条件,而有些条件在新能源并网条件下是不能满足的。新能源并网下的谐波新特征与传统电网的谐波特征对比如表1所示。

基于表1中的谐波新特征,本文对现有方法适用性进行了分析,同时提出新能源并网条件下谐波责任评估面临的难点。

### 4.1 用户侧谐波阻抗不再远大于系统侧谐波阻抗

第2节中部分方法和第3节近似谐波电压评估指标都需要满足用户谐波阻抗远大于系统谐波阻抗的前提条件,这种假设对于典型工业非线性用户(工业整流负荷、电弧炉等)成立,但是对于新能源并网可能会失效。现有研究表明,由于光伏和风机等逆变器出口往往配置滤波器、集电点配置无功补偿装置,其谐波阻抗并非远大于系统侧谐波阻抗,因此不能忽略光伏或者风机侧谐波阻抗的影响,这给谐波责任评估带来2个难点:

(1)当新能源电源作为用户侧时,其谐波阻抗并非远大于系统侧谐波阻抗,而系统和用户谐波发射电流大小具有可比性,导致用户侧可能不再主导波动,而目前的谐波责任评估方法大多建立在用户侧谐波源主导波动的基础上,对于第2节中假设条件为背景谐波电压波动范围总体较小、系统侧阻抗远小于用户侧阻抗和PCC处谐波电流主要来源于用户侧的方法可能不再适用;

(2)用户侧谐波参数成为必要条件,对于单用户谐波责任评估,很多方法是通过3.1节的近似谐波电压评估指标进行责任评估的,此时只需要计算系统阻抗就能定责,而由于系统阻抗不再远大于用户阻抗,近似指标就不再成立了,用户侧参数成为求解谐波责任的必要条件,而现有文献中对用户侧谐波参数求解方法的探究还较少。

### 4.2 谐波发射具有更大的波动性

对于风力发电而言,风力发电机的输出功率与

表1 传统电网与新能源并网电网谐波特性对比

Table 1 Comparison of harmonic characteristics between traditional power grid and new energy grid

谐波特征	谐波特征比较	
	传统电网	新能源并网电网
系统侧谐波阻抗和用户侧谐波阻抗的关系	一般负荷容量远小于系统短路容量,可认为用户侧谐波阻抗远大于系统侧谐波阻抗	由于逆变器与滤波装置并网,其等效输出谐波阻抗不再远大于系统侧谐波阻抗
谐波电流	具有一定的波动性	相比传统电网波动性更大
谐波阻抗	短时间内可认为是定值	时变参数
谐波源间相互作用	相互作用较弱	新能源电源往往数量多且分布广泛,谐波源间电气距离较近、耦合作用增强

风速的大小有关,而自然界的风速是极不稳定的,导致风力发电机的输出功率变化很大;对于光伏发电而言,光伏方阵的输出功率与光照的强度有关,受天气和气温的影响较大,和风力发电一样易出现波动。大量的易波动的风力发电和光伏发电并入传统的电网中使得谐波发射具有间歇性、波动性、随机性等特点,当部分新能源电源计入系统侧时,相较于传统的谐波源,其背景谐波的波动性往往更大。虽然现有研究对背景谐波电压波动下的谐波责任评估进行了大量研究,但也存在一定的局限性,本文对背景谐波电压波动下的谐波责任评估方法进行分析,总结出这些方法主要采用2种思路消除背景谐波电压波动的影响:一是直接消除背景谐波电压波动方法,二是数据筛选类方法。

直接消除背景谐波电压波动方法有协方差法、盲源分离法等,协方差法需要满足系统侧阻抗远小于用户侧阻抗、PCC处谐波电流主要来源于用户侧的前提条件,盲源分离法能消除部分噪声,其实数域解法更适用于相角波动较剧烈的情况。但这些方法随着背景谐波电压波动的增大,误差也在不断增大,只适用于背景谐波电压波动不太大的情况,且协方差法、盲源分离法都只能应用在单谐波用户责任评估中。

数据筛选类方法有主导波动量法、基于数据筛选的线性回归方法、修正随机独立矢量协方差法等。当计算系统阻抗时,数据筛选的目的是找出用户主导波动段,当计算用户阻抗时,数据筛选的目的是找出系统主导波动段。这类方法的缺点是必须保证所采样的数据中有足够多满足条件的数据段,如当系统侧和用户侧都在较大幅度的波动时,没有满足筛选条件的数据段,该方法就不再适用。

通过以上分析可以看出,新能源并网下的谐波责任评估面临以下难点:新能源并网谐波发射具有间歇性、波动性、随机性,部分新能源电源会计入系统侧,使得背景侧谐波电压总体波动较大,难以准确地评估谐波责任。

#### 4.3 谐波阻抗值不再恒定

现有谐波责任评估方法多建立在系统阻抗恒定的基础上,新能源并网下谐波阻抗不再为定值,文献[48]指出光伏受光照强度的影响,由于电池阵列中分流电阻的存在且分流电阻是时变的,当光伏接入配电网后,会导致谐波阻抗也发生变化。而第2节的方法都是建立在系统阻抗恒定的基础上进行的,这给谐波责任评估带来了困难。

文献[49]认为在晴天条件下一天内的光照强度类似正弦的正半周变化,可认为光伏电源的输出功率在该时间段内也呈现类似正弦正半周变化的规律。由于系统侧也存在光伏电源,所以系统阻抗也

随时间呈正弦变化,在该情况下,采用变系数回归法估算系统谐波阻抗,能够较好地跟踪系统阻抗的正弦变化。

由于电网结构日益复杂,对于系统阻抗的变化规律的探究较少,实际中系统阻抗变动幅度是否大、变动趋势如何都是值得进一步探究的问题。部分研究还认为电力系统运行方式改变、故障后切负荷、投切电容器组或无功补偿方式的变化等都可能系统阻抗发生突变。当系统谐波阻抗发生突变时,文献[50]提出一种基于斜率辨识谐波阻抗变化的方法,在谐波电压和谐波电流散点图中,通过计算斜率值区分阻抗值,但仅适用于背景谐波电压较为平稳的条件。文献[51]利用小波变换模极大值法检测出系统谐波阻抗发生改变的时间点,但当背景谐波电压波动较大时,可能会干扰突变点的检测。文献[52]和文献[47]采用先筛选用户主导波动段再聚类的方法区分不同的系统阻抗值,分别采用DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise)方法和OPTICS(Ordering Points To Identify the Clustering Structure)方法区别不同系统阻抗值对应的数据段。

由上述分析可知,谐波阻抗值不再恒定给现有的谐波责任评估方法带来了以下难点:

(1)当谐波阻抗为变量时,第2节所提出的谐波责任评估方法不再适用,使得可用的谐波责任评估的方法非常局限,因此,需要对原方法进行改进,如上文所述的2种改进思路,一种是直接跟踪系统阻抗的变化趋势,另一种则是把不同系统阻抗值对应的数据段分开;

(2)虽然上述研究分别对系统阻抗呈正弦半周趋势变化和突变2种情况提出了几种解决方法,但是实际中系统阻抗真实值往往难以获取,了解系统阻抗变化趋势是进行谐波责任评估的前提,然而新能源并网下系统阻抗变化趋势的相关研究较少,当系统阻抗变化规律性不强、突变与缓慢变化相结合或突变程度较小时,是否还能准确跟踪谐波阻抗的大小是有待研究的问题,因此新能源并网系统阻抗的变化趋势研究同样必要。

#### 4.4 谐波源间相互作用复杂

文献[53]指出某些谐波发射源在接入谐波较小的电网时,发射的谐波电流不大,但接入有谐波污染的配电网时,其谐波电流会明显增大。实际上,由于电路中电感与电容的共同作用,可能造成谐波电流放大或谐波电压放大,甚至产生谐波谐振等现象。由于谐波源分布广泛、相互作用较复杂,传统谐波责任评估的标准和方法可能不再适用。这给谐波责任评估带来以下2个难点。

(1)如何对谐波耦合关系进行解耦。新能源电

源往往数量多且分布广泛,谐波源间电气距离较近、耦合作用增强,且新能源并网逆变器发射谐波与网侧谐波之间存在一定的相关性,无法将其视为独立源。这种现象可能造成原本用户 1—3 的谐波水平均未超标,但由于谐波用户 4 的并入,使得用户 1—3 的谐波责任突然增大,此时如何对 4 个用户的谐波责任进行解耦是谐波责任更合理评估的关键。

(2) 新能源并网条件下如何选取合适的谐波评估指标。由于新能源电压数量多且分布广,更容易发生谐波放大等现象,现有谐波责任评估主要各谐波源对 PCC 处谐波电压的贡献程度来定责,对于存在谐波电压放大的情况,单纯地从电压的角度评估责任未必合理。在第 3 节讨论的其他评估指标中,也有从电流和功率等角度进行定责,但不同角度的评估结果并不具有等价性,可能会出现某一指标判定的责任高而另一指标判定的责任低的现象;如果从综合责任的角度考虑问题,如何确定各指标的权重使得最终的评估结果更合理,还有待进一步的探究。

## 5 结论与展望

基于第 4 节的分析可知,新能源并网下出现了很多谐波新特征,这给谐波责任评估带来了困难,主要体现在以下方面。

(1) 背景谐波波动较大时的责任评估。相较于传统的谐波源,新能源并网谐波的波动性往往更大,系统阻抗不再远大于用户阻抗,这使得背景谐波电压存在较大波动。如何在背景谐波电压波动较大时准确评估谐波责任,还需要进一步的研究。

(2) 变谐波阻抗下的谐波责任评估。由于新能源电源等效谐波阻抗为一个时变参数,因此对实际系统中谐波阻抗的变动趋势需要进一步的探究,在不同变动条件下变系数回归等方法是否仍然适用有待进一步验证。

(3) 谐波责任评估指标合理性探究。新能源电源相互作用复杂,适用于新能源并网条件下的谐波责任评估往往需要考虑更多的因素,如耦合关系、谐波放大和谐波谐振等,因此,如何改进谐波责任评估指标以更适用于新能源并网的条件需要进一步的探究。

(4) 长短时谐波责任评估。新能源并网发电谐波具有间歇性、波动性、随机性等特点,导致谐波责任波动性大,其间歇性可能导致在某些时段谐波发生水平较低甚至不再是谐波源。这会导致谐波责任波动较大甚至忽高忽低,如何更合理衡量一段时间(如一天、一周等)的谐波责任,获取较长时段和较短时段的谐波责任以便实施奖惩方案是有待研究的问题。

除此之外,无论是传统配电网还是新能源并网配电网,谐波责任评估中如下几点都需要进一步探究。

(1) 无谐波相位信息时的谐波责任评估研究。谐波评估参数往往同时需要 PCC 处谐波电压和电流的幅值和相位信息,而一般电能质量监测仪只能提供量测点的谐波电压、电流幅值及相互间的相位差而非谐波电压、电流相量值,且相位差数据也可能存在测量不准确的问题。目前关于无谐波相位的谐波责任评估研究较少,文献[54]在随机独立向量法的基础上,提出了一种在监测数据无相位情况下的系统侧谐波阻抗估计方法,适用于系统侧阻抗远小于用户侧阻抗、PCC 处电流主要来源于用户侧的情况,尚不满足新能源并网的应用条件,且该法的估计精度还有待进一步提高。进一步开展无相位谐波责任评估研究是非常必要的。

(2) 超高次谐波责任评估。目前的谐波责任评估主要探究的是低频次谐波责任,新能源并网还会产生开关频率及其倍频的谐波成分(超高次谐波);对于传统配电网,电动汽车充电装置、开关电源、照明装置,以及电磁炉、洗衣机、电吹风等家用电器等也都可能是超高次谐波发射源。超高次谐波存在一些新特征,如具有原生与次生的特性等,对于超高次谐波是否需要责任划分,如果需要,现有评估方法是否还适用是需要进一步探究的问题。

(3) 间谐波责任评估。大规模新能源的接入为电网注入了大量间谐波<sup>[55]</sup>,如光照或风力的随机变化将导致光伏或风机输出的直流电压随机波动,通过逆变器交直流侧相互作用,在交流侧产生复杂的间谐波分量;对于普通配电网,由于如电弧炉与电焊机等波动负荷、变频装置、感应电机、通断控制的电气设备等也都有可能产生间谐波,为系统的稳定性带来了新的问题。间谐波与谐波有着不同特征,如间谐波与基波的频率不存在同步关系、随机性更大甚至波形无规律且缺乏周期性等。间谐波的责任如何评估,现有谐波责任评估方法是否适用于间谐波是有待研究的问题。

本文首先介绍了谐波责任评估模型;其次,对现有谐波责任评估方法的相关研究进行对比和总结,按照波动量类、线性回归类、独立随机矢量协方差类和盲源分离类分析了各谐波阻抗估计方法的适用条件和局限性;然后,对谐波电压评估指标进行介绍并讨论了其他评估指标的合理性;进而,基于现有方法的局限性探讨了新能源并网条件下谐波新特征和谐波责任评估面临的新问题及难点;最后,对未来谐波责任评估研究进行了展望。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 黄涛,王胜利,谢华,等. 光伏逆变器短路电流3次谐波及其对保护的影响分析[J]. 电力自动化设备,2020,40(5):99-105.  
HUANG Tao, WANG Shengli, XIE Hua, et al. Analysis of third harmonic current of photovoltaic inverter and its influence on protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020,40(5):99-105.
- [2] 丁明,王伟胜,王秀丽,等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):1-14.  
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2014,34(1):1-14.
- [3] 国家技术监督局. 电能质量公用电网谐波:GB/T 14549—1993[S]. 北京:中国标准出版社,1993.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 电能质量公用电网间谐波:GB/T 24337—2009[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [5] 高菲,宋晓辉,李建芳,等. 谐波约束下的配电网接纳分布式电源能力分析[J]. 电力自动化设备,2018,38(10):13-18.  
GAO Fei, SONG Xiaohui, LI Jianfang, et al. DG integration capability of distribution network considering harmonic constraints[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(10):13-18.
- [6] 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 Xiaohua, 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.
- [7] SEZGIN E, GÖL M, SALOR Ö. State-estimation-based determination of harmonic current contributions of iron and steel plants supplied from PCC[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016,52(3):2654-2663.
- [8] 王守相,刘响,张颖. 多DG不确定性建模及其对配电网谐波潮流的影响[J]. 电力自动化设备,2018,38(10):1-6.  
WANG Shouxiang, LIU Xiang, ZHANG Ying. Uncertainty modeling of multiple DGs and their influence on harmonic power flow in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(10):1-6.
- [9] SUMNER M, PALETHORPE B, THOMAS D, et al. A technique for power supply harmonic impedance estimation using a controlled voltage disturbance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002,17(2):207-215.
- [10] YANG H, PIROTTE P, ROBERT A. Harmonic emission levels of industrial loads statistical assessment[C]//CIGRE Proceedings. Paris, France: International Council on Large Electric Systems, 1996:36-306.
- [11] 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评估[J]. 中国电机工程学报,2011,31(10):73-80.  
HUI Jin, YANG Honggeng, YE Maoqing. Assessing harmonic emission level based on the impedance gathering trend discrimination[J]. Proceedings of the CSEE, 2011,31(10):73-80.
- [12] 龚华麟,肖先勇,刘亚梅,等. 基于主导波动量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.
- [13] 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 Systems, 2012,36(3):65-70.
- [14] HUANG X, NIE P, GONG H. A new assessment method of customer harmonic emission level[C]//2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Chengdu, China: IEEE, 2010:1-5.
- [15] 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.
- [16] 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.  
SUN Yuanyuan, YIN Zhiming. Quantifying harmonic responsibilities of multiple harmonic sources based on M-estimation robust regression[J]. Proceedings of the CSEE, 2012,32(31):166-173.
- [17] 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):78-85,119.  
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 Systems, 2017,41(4):78-85,119.
- [18] 贾秀芳,董立峰. 基于复数域稳健回归的多谐波源污染责任量化方法[J]. 太阳能学报,2019,40(5):1309-1315.  
JIA Xiufang, DONG Lifeng. Quantifying harmonic pollution responsibilities of multiple harmonic sources based on robust regression in complex domain[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019,40(5):1309-1315.
- [19] 崔杨柳,马宏忠,唐一鸣,等. 基于部分岭估计的系统谐波阻抗与谐波发射水平的评估方法[J]. 中国电力,2015,48(4):137-140,146.  
CUI Yangliu, MA Hongzhong, TANG Yiming, et al. Assessing harmonic impedance and the harmonic emission level based on partial ridge estimate[J]. Electric Power, 2015,48(4):137-140,146.
- [20] 贾秀芳,岳娜. 基于岭估计方法的多谐波源责任划分[J]. 电力系统自动化,2015,39(21):87-92.  
JIA Xiufang, YUE Na. A method for determination of utility harmonic responsibility using ridge estimation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015,39(21):87-92.
- [21] 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.
- [22] ZANG T, HE Z, QIAN Q, et al. Adaptive method for harmonic contribution assessment based on hierarchical K-means clustering and Bayesian partial least squares regression[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016,10(3):3220-3227.
- [23] 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 back-

- ground harmonic voltage fluctuation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(18):55-61.
- [24] WU J, QIU H, XU J, et al. Quantifying harmonic responsibilities based on kurtosis detection principle of amplitude fluctuations[J]. *IEEE Access*, 2018, 6:64292-64300.
- [25] 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): 1-11.  
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):1-11.
- [26] 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.
- [27] HUI J, YANG H, LIN S, et al. Assessing utility harmonic impedance based on the covariance[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, 25(3):1778-1786.
- [28] 吴雅萌,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.
- [29] 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. 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):603-611.
- [30] ZHAO X, YANG H. A new method to calculate the utility harmonic impedance based on FastICA[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 31(1):381-388.
- [31] 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 Fushun, LI Yang, YANG Bo. System harmonic impedance estimation based on improved FastICA and partial least squares[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(1):308-314.
- [32] 杨雪萍,杨洪耕,马晓阳,等. 基于核独立分量分析的谐波责任划分[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2016, 28(12):109-114.  
YANG Xueping, YANG Honggeng, MA Xiaoyang, et al. Determination of harmonic contributions based on kernel independent component analysis[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2016, 28(12):109-114.
- [33] 罗杰,符玲,臧天磊,等. 基于联合对角化法与数据筛选的谐波责任划分[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(11):79-84.  
LUO Jie, FU Ling, ZANG Tianlei, et al. Harmonic responsibility determination based on JADE and data filtering[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(11):79-84.
- [34] 袁林,杨洪耕,王智琦,等. 基于快速近似联合对角化的谐波发射水平评估方法[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(7):81-87.  
YUAN Lin, YANG Honggeng, WANG Zhiqi, et al. Assessment method of harmonic emission level based on fast approximate joint diagonalization[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(7):81-87.
- [35] 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.
- [36] 刘秀玲,王洪瑞,王永青,等. 临界阻抗法在配电网谐波源探测中的应用[J]. *电力系统自动化*, 2007, 31(14):76-80.  
LIU Xiuling, WANG Hongrui, WANG Yongqing, et al. Application of critical impedance method in harmonic source detecting in distribution systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(14):76-80.
- [37] AZOUAOU R, RABAHALLAH S, LEULMI S. Study of the direction of the harmonic injections in the electrical power systems[C]//39th International Universities Power Engineering Conference. Bristol, UK:IEEE, 2004:944-947.
- [38] FERRERO A, MENCHETTI A, SASDELLI R. Measurement of the electric power quality and related problems[J]. *European Transactions on Electrical Power*, 2006, 6(6):401-406.
- [39] 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.
- [40] 代双寅,杨君超,李琼林. 基于谐波功率分解的奖惩性电能计量方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(1):111-116.  
DAI Shuangyan, YANG Junchao, LI Qionglin. An incentive energy measurement method based on harmonic power decomposition strategy[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(1):111-116.
- [41] DIRIK H, DURAN İ U, GEZEGIN C. A computation and metering method for harmonic emissions of individual consumers[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019, 68(2):412-420.
- [42] 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.
- [43] HOOMAN E, WILSON X, BIAO H. Determining the harmonic impacts of multiple harmonic-producing load[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, 26(2):1187-1195.
- [44] 华回春,贾秀芳,曹东升,等. 电能质量数据交换格式下的谐波责任估计[J]. *电网技术*, 2013, 37(11):3110-3117.  
HUA Huichun, JIA Xiufang, CAO Dongsheng, et al. Harmonic contribution estimation under power quality data interchange format[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(11):3110-3117.
- [45] 杨雪萍,杨洪耕,曾巧燕,等. 基于采样数据的谐波电流责任评估[J]. *电测与仪表*, 2016, 53(9):13-18.  
YANG Xueping, YANG Honggeng, ZENG Qiaoyan, et al. Assessment of harmonic current responsibility based on sample data[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2016, 53(9):13-18.
- [46] 迟忠君,李玲,李国昌,等. 谐波责任评估指标及应用[J]. *电测与仪表*, 2018, 55(24):64-71.  
CHI Zhongjun, LI Ling, LI Guochang, et al. Harmonic responsibility evaluation indices and application[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2018, 55(24):64-71.
- [47] LIU Z, XU Y, JIANG H, et al. Study on harmonic impedance estimation and harmonic contribution evaluation index[J]. *IEEE Access*, 2020, 8:59114-59125.
- [48] 罗杰,臧天磊,符玲,等. 一种含光伏接入的配电网谐波责任划分方法[J]. *电网技术*, 2019, 43(11):4074-4079.  
LUO Jie, ZANG Tianlei, FU Ling, et al. A method of harmonic responsibility determination for power distribution network including photovoltaic[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(11):4074-4079.

- [49] 陈静. 时变参数条件下的配电网谐波责任划分研究[D]. 成都:西南交通大学,2017.  
CHEN Jing. Research on harmonic responsibility determination under conditions of time-varying parameters in the distribution network[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2017.
- [50] 马智远,许中,黄裕春,等. 背景谐波阻抗变化情况下的谐波责任划分[J]. 电测与仪表,2016,53(23):78-83,89.  
MA Zhiyuan, XU Zhong, HUANG Yuchun, et al. Harmonic contributions determination on condition of changing background harmonic impedance[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(23): 78-83, 89.
- [51] 陈静,符玲,臧天磊,等. 考虑系统谐波阻抗改变的谐波责任定量划分方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):215-222.  
CHEN Jing, FU Ling, ZANG Tianlei, et al. Harmonic contribution determination considering system harmonic impedance change[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 215-222.
- [52] SHA H, MEI F, ZHANG C, et al. Multi-harmonic sources harmonic contribution determination based on data filtering and cluster analysis[J]. IEEE Access, 2019, 7: 85276-85285.
- [53] 王攸然,张逸,邵振国,等. 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. 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.
- [54] 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 Rongru, 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.
- [55] 陶顺,姚黎婷,廖坤玉,等. 光伏逆变器直流电压扰动引起的间谐波电流解析模型[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 878-885.  
TAO Shun, YAO Liting, LIAO Kunyu, et al. Analytical model for inter-harmonic current caused by DC voltage disturbance of photovoltaic inverter[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 878-885.

#### 作者简介:



刘子腾

刘子腾(1996—),女,安徽亳州人,硕士研究生,研究方向为谐波源定位与责任评估(**E-mail**:t627123563@163.com);

徐永海(1966—),男,河南新野人,教授,博士研究生导师,通信作者,研究方向为电能质量分析与控制、电力电子变压器等(**E-mail**:yonghaixu@263.net);

陶顺(1972—),女,湖南长沙人,副教授,博士,主要研究方向为智能配电网与电能质量等(**E-mail**:tao\_shun@sina.com)。

(编辑 任思思)

## Research status and prospect of harmonic responsibility quantitative evaluation method under grid-connection of new energy

LIU Ziteng, XU Yonghai, TAO Shun

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** The output current of the grid-connected new energy inverter often has the problem that the harmonics cannot reach the standard, and the harmonic interaction among inverters is complex, which brings new problems to harmonic responsibility evaluation. Firstly, the quantitative evaluation model of harmonic responsibility is introduced. Then, the existing harmonic impedance estimation methods are classified and the applicable conditions of each method are clarified. Then the rationality of harmonic voltage evaluation index and other evaluation index is discussed. Based on the limitations of existing methods, the new harmonic characteristics and the new problems and difficulties of harmonic responsibility evaluation are discussed. Finally, the research of harmonic responsibility evaluation in the future is prospected.

**Key words:** grid-connection of new energy; grid-connected inverter; harmonic responsibility; harmonic impedance; evaluation indicators

# 附录

表 A1 谐波阻抗估计方法分类  
**Table A1 Classification of harmonic impedance estimation methods**

方法类别	方法	适用条件
波动量类	波动量法	⑤ ⑥
	阻抗归一化趋势判别法*	② ⑤
	主导波动量法*	② ③ ④ ⑤
	...	...
线性回归类	偏最小二乘法	① ⑤
	稳健回归法	① ⑤
	岭回归法	① ⑤
	最小波动能量筛选*	② ⑤
	分层 K-means 聚类*	② ⑤
	均值漂移聚类*	② ⑤
	峰度检测原理筛选*	② ⑤
	动态窗宽线性显著性校验筛选*	② ⑤
...	...	
独立随机矢量协方差法	协方差法	③ ④ ⑤
	修正独立随机矢量协方差法*	② ⑤
	...	...
盲源分离类	FastICA	① ⑤
	改进 FastICA	① ⑤
	核独立分量分析	① ⑤
	联合对角化	① ⑤
...	...	...

注：“\*”代表该方法包含数据筛选步骤。