

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201146

## 谐波源责任划分技术的工程应用

王焰宇<sup>1,2</sup>, 随慧斌<sup>1</sup>

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 中铁电气化局集团有限公司, 北京 100036)

**摘要:** 基于线性回归的谐波源责任划分方法大多数是在电压和电流瞬时值的基础上完成的, 与目前电能质量日常监测系统主要提供电压、电流有效值等统计值的现状不符。针对这种现状, 提出了一种基于母线处短路容量以及可测量的电压和电流参数的可用于工程上近似估算多谐波责任划分的方法。该方法基于电能质量测试设备, 获得关注 PCC 处的电压和各谐波源用户及系统侧对应的馈线电流数据。通过傅里叶分解分别得到 PCC 处进出线的基波、谐波电压, 通过各谐波源单独作用时在 PCC 处电压上的投影作为谐波责任划分的依据。同时将该方法应用于电能质量监测分析系统的研发, 实现了 PQDIF 格式转换功能以及谐波源辨识功能。

**关键词:** 谐波责任划分; 谐波源辨识; 电能质量监测分析系统; PQDIF 格式转换; 工程应用

### Engineering application of harmonic source responsibility division technology

WANG Zhaoyu<sup>1,2</sup>, SUI Huibin<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. China Railway Electrification Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100036, China)

**Abstract:** Most linear regression based harmonic source responsibility division methods are based on the instantaneous values of voltage and current. This is inconsistent with the situation that the power quality daily monitoring system mainly provides statistical values such as voltage and current RMS. In view of this, this paper proposes a method that can be used to estimate multi-harmonic division of responsibilities on the engineering and is based on the short-circuit capacity at the busbar and the measurable voltage and current parameters. In this method, the voltage value at the PCC and the feeder current data of each harmonic producer on the system side will be measured from power quality test equipment. These data will be Fourier decomposed into the fundamental and harmonic voltage in PCC incoming and outgoing. The projection of the voltage on the PCC when each harmonic source acts alone is used as the basis for the division of harmonic responsibility. This paper also applies this method to the research and development of power quality monitoring and analysis system and realizes PQDIF format conversion and harmonic source identification.

This work is supported by the Science Research Project of Shandong Science and Technology Department: Research on High-order Robustness Dispatch Theory Accommodating High-proportion Renewable Energy Generation (No. ZR2018MEE041).

**Key words:** division of harmonic responsibility; harmonic source identification; power quality monitoring and analysis system; PQDIF format conversion; engineering application

## 0 引言

随着用电负荷的增加, 电网用户对电能质量的要求越来越高。谐波是评价电能质量的重要指标之一, 然而各种非线性设备的迅速普及并广泛使用, 向

电网注入了大量谐波, 导致电网电压和电流畸变, 对电力系统安全稳定运行造成较大危害, 可能引起电力电缆容量减小, 损耗增加, 甚至造成单相接地, 三相短路等故障, 严重影响通信设备、自动和远动装置、继电保护、测量设备和仪表的准确性<sup>[1-6]</sup>。

为控制公用电网中的谐波水平, 国际上普遍采用一种“奖惩性方案”。它的基本思想是: 电力公司对谐波污染水平不符合规定指标的用户收取适当的

**基金项目:** 山东省科技厅科研项目资助“接纳高比例可再生能源发电的高阶鲁棒调度理论研究”(ZR2018MEE041)

惩罚费用;对吸收电网中谐波功率的用户给予适当奖励<sup>[4]</sup>。因此,对各谐波污染源进行责任划分是进一步完善电能质量管理以及实现“奖惩性方案”的前提,对保障用户和供电企业的利益都具有重要意义。

谐波责任划分是根据用户侧和系统侧对公共耦合节点(PCC)处谐波电压或电流的贡献值进行责任区分<sup>[7-10]</sup>,主要依据的是在已知区域电网等效阻抗的前提下,利用三角形法则进行划分<sup>[11]</sup>。为获得谐波阻抗并进一步对其谐波责任进行划分,国内外学者提出了“干预式”法和“非干预式”法<sup>[12]</sup>。“干预式”法指向系统施加一定的扰动信号,如注入谐波电流、投切电容器等方式<sup>[13-14]</sup>,实时精准地实现对谐波阻抗的测量;“非干预式”是利用系统自身扰动,通过数学建模和数值计算的方法进行谐波阻抗频率特性的估算,主要有最小二乘法、稳健回归法、独立随机矢量协方差法、二元线性回归法等分析方法<sup>[15-19]</sup>。

上述方案可用于不同场景或需求下的谐波责任划分,然而,现有划分方法大多是以电压和电流的瞬时值来进行计算,而电力公司电能质量监测系统主要提供电压和电流的有效值,且电网电能质量监测数据通常为电能质量数据交换格式(Power Quality Data Interchange Format, PQDIF),因此,为更好地实现谐波责任划分技术的工程应用,本文基于PQDIF的谐波责任划分方法,依据母线处短路容量以及可测量的电压和电流参数,给出了一种工程上近似估算多谐波责任划分的方法,并通过仿真分析和研发电能质量监测系统相应功能模块,验证了本文所提出方案的正确性和实用性。

## 1 基本方案

通常情况下,公共母线处接有多个谐波源用户,见图1。母线的一侧通过变压器与电力系统供电端相连,称其为系统侧;母线的另一侧接有 $n$ 个用户称为用户侧,如图1所示<sup>[20-23]</sup>。

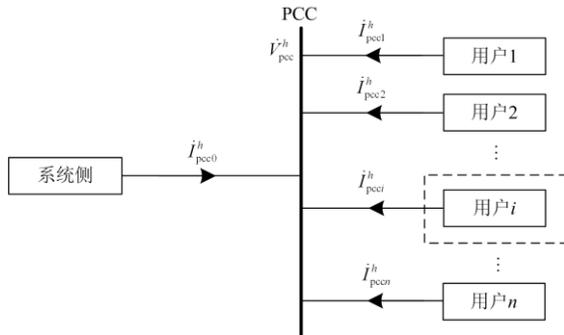


图1 PCC处多谐波源用户示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-harmonic source users at PCC

针对关注谐波源用户 $i$ ,以PCC为分界点,看向PCC处,将系统侧和除用户 $i$ 以外的其他用户称为“等效系统侧”,谐波源用户 $i$ 为用户侧,得到图2所示等效电路。图2中, $i_{si}^h$ 和 $i_{ci}^h$ 分别为等效系统侧和用户侧的 $h$ 次等值谐波电流源; $Z_{si}^h$ 和 $Z_{ci}^h$ 分别为等效系统侧和用户侧的 $h$ 次等值谐波阻抗; $V_{pcc}^h$ 为PCC点的 $h$ 次谐波电压, $i_{pcc_i}^h$ 为关注谐波源用户 $i$ 对应的馈线电流。

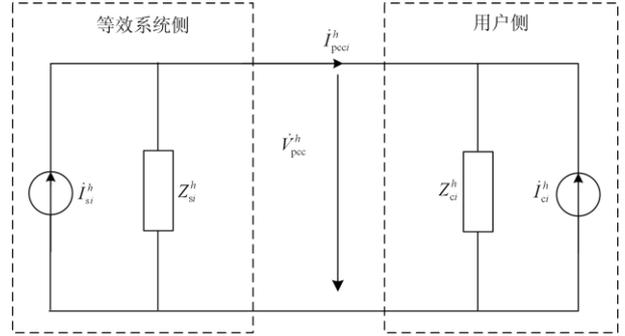


图2 关注谐波源用户 $i$ 等值电流源等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of  $i$  equivalence current source of harmonic source

图2中等效系统侧的谐波阻抗可表示为

$$Z_{si}^h = \frac{1}{1/Z_{s0}^h + \sum_{j=1, j \neq i}^n 1/Z_{cj}^h} \quad (1)$$

式中, $Z_{s0}^h$ 为系统侧谐波阻抗。

基于电能质量测试设备,获得关注PCC处的电压和各谐波源用户及系统侧对应的馈线电流数据。通过傅里叶分解得到PCC处的基波电压 $V_{pcc}^1$ 以及谐波电压 $V_{pcc}^h$  ( $h=2,3,\dots,7$ );获得PCC处进线基波电流 $i_{pcc0}^1$ 以及谐波电流 $i_{pcc0}^h$  ( $h=2,3,\dots,7$ );获得PCC处出线基波电流 $i_{pcc_i}^1$  ( $i=1,2,\dots,n$ )以及谐波电流 $i_{pcc_i}^h$  ( $h=2,3,\dots,7$ )。

根据图1,有:

$$\dot{V}_{si}^h = \dot{i}_{pcc_i}^h Z_{si}^h + \dot{V}_{pcc}^h \quad (2)$$

$$\dot{V}_{si}^h = \dot{i}_{si}^h Z_{si}^h \quad (3)$$

等效系统侧单独作用时,在PCC处产生的谐波电压为

$$\dot{V}_{s-pcc_i}^h = \frac{Z_{ci}^h}{Z_{si}^h + Z_{ci}^h} \dot{V}_{si}^h = \frac{Z_{ci}^h}{Z_{si}^h + Z_{ci}^h} (\dot{i}_{pcc_i}^h Z_{si}^h + \dot{V}_{pcc}^h) \quad (4)$$

关注谐波源用户 $i$ 单独作用时在PCC处产生的谐波电压为

$$\dot{V}_{c-pcc}^h = \frac{Z_{si}^h}{Z_{si}^h + Z_{ci}^h} \dot{V}_{ci}^h \quad (5)$$

根据叠加原理,有:

$$\dot{V}_{s-pcc}^h + \dot{V}_{c-pcc}^h = \dot{V}_{pcc}^h \quad (6)$$

对于谐波责任划分的指标选取有电流指标、电压指标及功率指标,考虑到电力系统的责任是向用户提供合格的电能质量,因此,本文选取电压指标,以各谐波源单独作用时在PCC处电压 $\dot{V}_{pcc}^h$ 上的投影作为谐波责任划分的依据,如图3所示。

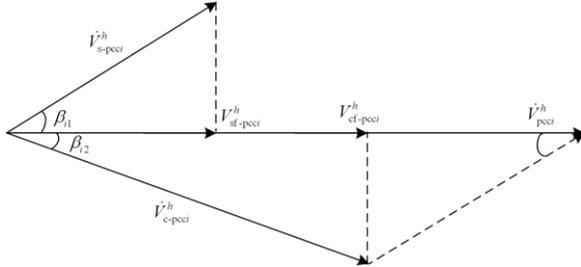


图3  $h$ 次谐波电压投影示意图

Fig. 3  $h$ -order harmonic voltage projection diagram

关注谐波源用户  $i$  对 PCC 处谐波电压的贡献则为

$$V_{cf-pcc}^h = V_{c-pcc}^h \cos \beta_{i2} = \frac{(V_{c-pcc}^h)^2 + (V_{pcc}^h)^2 - (V_{s-pcc}^h)^2}{2V_{pcc}^h} \quad (7)$$

关注谐波源用户  $i$  对 PCC 处谐波电压承担的谐波责任则为

$$\psi_i = \frac{V_{cf-pcc}^h}{V_{pcc}^h} \times 100\% \quad (8)$$

通过上述分析知,关注谐波源用户  $i$  的谐波责任划分的关键在于谐波阻抗的估算。从工程实际出发,基于目前大多数电能质量测试装置得到的 PQDIF 格式数据,进行谐波阻抗的近似估算,以实现谐波责任的最终定量划分。

通常情况下 PCC 处的母线短路容量已知或者可以计算获得,记为  $S_k$ 。系统侧的谐波阻抗工程估算公式为

$$Z_{s0}^h = h \frac{U_N^2}{S_k} \quad (9)$$

基于基波电压和电流估算用户侧的基波阻抗为

$$Z_{ci}^1 = \frac{\dot{V}_{pcc}^1}{\dot{I}_{pcc}^1} = R_{ci}^1 + jX_{ci}^1 \quad (10)$$

将负荷等效为串联模型,则对应的谐波源用户  $i(i=1,2,\dots,n)$  的谐波阻抗近似为

$$Z_{ci}^h = R_{ci}^1 + jhX_{ci}^1 \quad (11)$$

无论是将负荷等效为串联模型,或者是并联模

型,估算结果的幅值与理论值基本接近,误差主要来自于相位。因此,本文采用串联模型。对估算结果基本无影响。

从实际工程的可靠性及准确性角度讲,本方案仅适用于 2、3、4、5、6、7 次谐波进行责任划分,不适用于高次谐波的责任划分。对于谐波责任的划分,本文从不同的叠加角度入手,给出了 4 个方案的探讨。

采用 IEC 61000-3-6 中谐波叠加的第二求和法则,关注谐波源用户  $i$  的 PCC 处的谐波电压是其对应的谐波电压和其等值电压源单独作用时,在 PCC 处产生的谐波电压叠加的结果,见式(5)。

第  $h$  次合成谐波电压的求和法则为

$$U_h = \left( \sum_i U_{hi} \right)^{1/\alpha} \quad (12)$$

式中:  $U_h$  为对所考虑的一组谐波源计算出的合成谐波电压的值;  $U_{hi}$  为要进行合成的各单个谐波电压的值;  $\alpha$  为一个指数,取值见表 1。

表 1 谐波求和指数的取值

Table 1 Values of harmonic summation exponents

$\alpha$	谐波次数
1	$h < 5$
1.4	$5 \leq h \leq 10$
2	$h > 10$

基于上述方法,列出 4 种可能的工程应用方案进行分析。

### 1.1 方案 1

首先根据式(6)估算关注谐波源用户  $i$  对应的等效系统侧单独作用时在 PCC 处产生的谐波电压  $\dot{V}_{s-pcc}^h$ ,考虑到估算结果  $\dot{V}_{s-pcc}^h$  的幅值与真实值相差较小,相位与真实值之间的误差交大。若根据式(6)直接估算关注谐波源单独作用于 PCC 时产生的谐波电压  $\dot{V}_{c-pcc}^h$ ,估算结果将产生较大的误差。因此,在得到  $\dot{V}_{s-pcc}^h$  的幅值  $V_{s-pcc}^h$  的情形下,根据 IEC 61000-3-6 中关于谐波的叠加方法估算关注谐波源单独作用于 PCC 时产生的谐波电压的幅值。

$$V_{c-pcc}^h = (V_{pcc}^h)^\alpha - V_{s-pcc}^h \quad (13)$$

将得到的  $V_{c-pcc}^h$  和  $V_{s-pcc}^h$  代入式(7)即可得到关注谐波源用户  $i$  对 PCC 处谐波电压的贡献。

### 1.2 方案 2

根据式(4)估算关注谐波源  $i$  对应的等效系统侧单独作用时在 PCC 处产生的谐波电压  $\dot{V}_{s-pcc}^h$ 。

$$\dot{V}_{s-pcc}^h \approx \dot{I}_{pccih}^h Z_{s0}^h + \dot{V}_{pcc}^h \quad (14)$$

考虑到估算结果  $\dot{V}_{s-pcc}^h$  的幅值与真实值相差较小, 相位与真实值之间的误差较大。若根据式(6)直接估算关注谐波源单独作用于 PCC 时产生的谐波电压  $\dot{V}_{c-pcc}^h$ , 估算结果将产生较大的误差。因此, 在得到  $\dot{V}_{s-pcc}^h$  的幅值  $V_{s-pcc}^h$  的情形下, 根据 IEC 61000-3-6 中关于谐波的叠加方法估算关注谐波源单独作用于 PCC 时产生的谐波电压的幅值。

将得到的  $V_{c-pcc}^h$  和  $V_{s-pcc}^h$  代入式(7), 即可得到关注谐波源用户  $i$  对 PCC 处谐波电压的贡献。

### 1.3 方案 3

系统短路容量和其相应的负荷容量决定了系统侧和各谐波源用户的等值谐波阻抗。实际中, 负荷容量一般远小于系统短路容量, 因此有。则式(4)可近似表示为

$$\dot{V}_{s-pcc}^h \approx \dot{V}_{si}^h \quad (15)$$

由式(2)、式(15)可知, 关注谐波源用户  $i$  单独作用时在 PCC 处产生的谐波电压的幅值表示为

$$V_{c-pcc}^h = |\dot{i}_{pcc}^h| |Z_{s0}^h| \quad (16)$$

因此, 在得到  $\dot{V}_{c-pcc}^h$  的幅值的情形下, 根据 IEC 61000-3-6 中关于谐波的叠加方法估算关注谐波源单独作用于 PCC 时产生的谐波电压的幅值。

$$V_{s-pcc}^h = (V_{pcc}^h)^\alpha - V_{c-pcc}^h \quad (17)$$

将得到的  $V_{c-pcc}^h$  和  $V_{s-pcc}^h$  代入式(7), 即可得到关注谐波源用户  $i$  对 PCC 处谐波电压的贡献。

### 1.4 方案 4

在方案 3 的基础上, 将各谐波源用户的谐波阻抗考虑进来, 利用  $Z_{si}^h$  代替式(16)中的  $Z_{s0}^h$  估算注谐波源用户  $i$  单独作用时在 PCC 处产生的谐波电压的幅值, 则有

$$V_{c-pcc}^h = |\dot{i}_{pcc}^h| |Z_{si}^h| \quad (18)$$

因此, 在得到的幅值  $V_{c-pcc}^h$  的情形下, 根据 IEC 61000-3-6 中关于谐波的叠加方法估算关注谐波源单独作用于 PCC 时产生的谐波电压的幅值。

将得到的  $V_{c-pcc}^h$  和  $V_{s-pcc}^h$  代入式(7), 即可得到关注谐波源用户  $i$  对 PCC 处谐波电压的贡献。

## 2 仿真分析

基于 Matlab 软件进行仿真分析, 并设定仿真参数: 短路容量  $S_k = 125 \text{ MVA}$ ; 系统侧 3 次等值谐波电压源  $\dot{V}_s^h$  为  $200 \angle 45^\circ \text{ V}$ ; 谐波源用户 1 的 3 次等值谐波电压源  $\dot{V}_{c1}^h$  为  $7003 \angle 25.96^\circ \text{ V}$ , 谐波源用户 1 对应的 3 次谐波等值阻抗为  $50 + j350 \Omega$ ; 谐波源用户

2 的 3 次等值谐波电压源  $\dot{V}_{c2}^h$  为  $8331 \angle 42.82^\circ \text{ V}$ , 谐波源用户 2 对应的 3 次谐波等值阻抗为  $55 + j380 \Omega$ ; 谐波源用户 3 的 3 次等值谐波电压源  $\dot{V}_{c3}^h$  为  $7630 \angle 48.17^\circ \text{ V}$ , 谐波源用户 3 对应的 3 次谐波等值阻抗为  $56 + j400 \Omega$ 。

为模拟用户侧扰动, 分别向 3 个谐波源用户加入均值为 0, 方差分别为  $\sigma_{c51}^2 = 2.1$ 、 $\sigma_{c51}^2 = 2.3$ 、 $\sigma_{c51}^2 = 2.4$ , 满足高斯分布的噪声, 为了模拟负荷的波动, 在各谐波源负荷加入满足正态分布的高斯噪声。模拟 1 天的数据, 28 800 个采样点。以 3 次谐波为例进行分析, 得到的结果如图 4—图 6 所示。

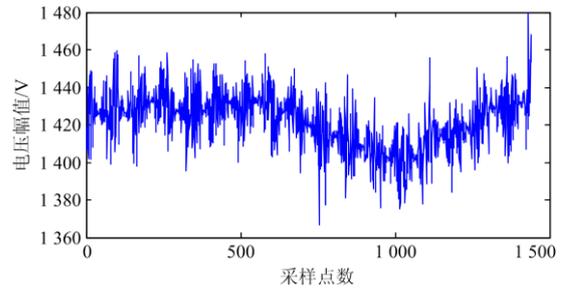


图 4 PCC 处母线 3 次谐波电压幅值

Fig. 4 Third harmonic voltage amplitude of bus at PCC

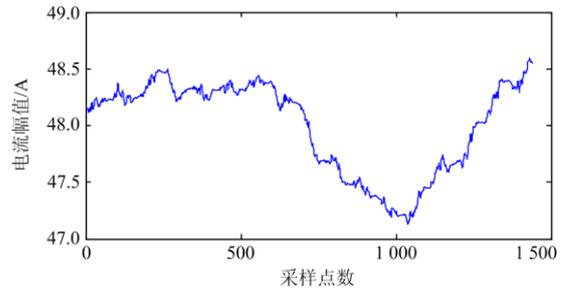


图 5 PCC 处系统侧进线 3 次谐波电流幅值

Fig. 5 Third harmonic current amplitude of system side incoming line at PCC

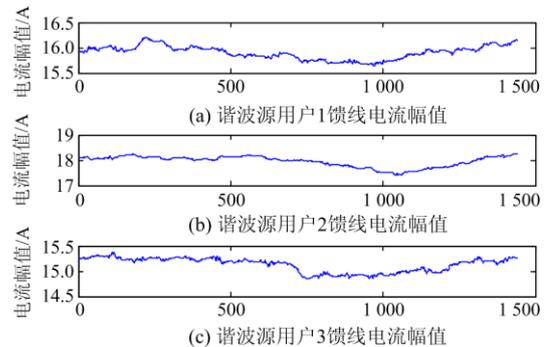


图 6 PCC 处谐波源用户馈线 3 次谐波电流幅值

Fig. 6 Third harmonic current amplitude of harmonic sources customers at PCC

方案 1 到方案 4 的责任划分结果如图 7—图 10 所示。

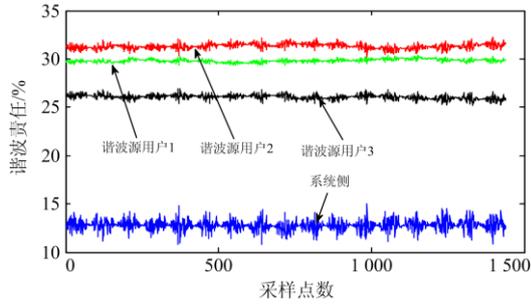


图 7 方案 1 谐波责任划分结果

Fig. 7 Harmonic responsibility division results of scheme 1

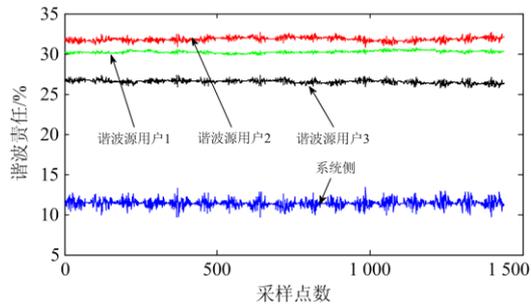


图 8 方案 2 谐波责任划分结果

Fig. 8 Harmonic responsibility division results of scheme 2

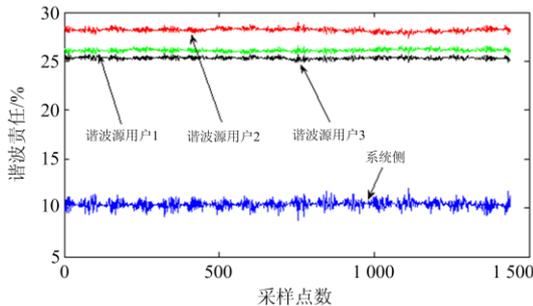


图 9 方案 3 谐波责任划分结果

Fig. 9 Harmonic responsibility division results of scheme 3

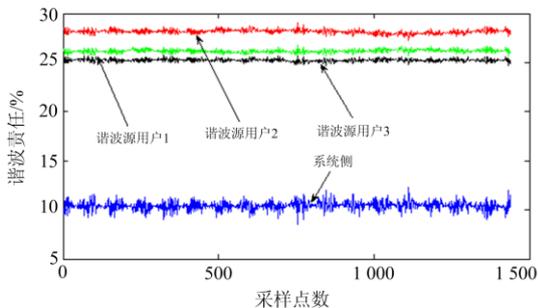


图 10 方案 4 谐波责任划分结果

Fig. 10 Harmonic responsibility division results of scheme 4

理论值划分结果如图 11 所示。

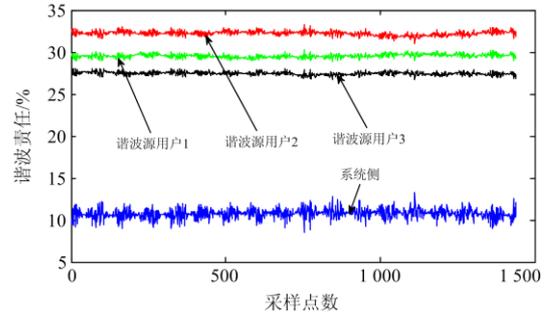


图 11 谐波责任划分结果理论值

Fig. 11 Theoretical value of harmonic responsibility division result

3 个谐波源用户谐波责任划分结果见表 2, 相对误差谐波责任分析结果见表 3。

表 2 4 种方案谐波源用户谐波责任划分结果

Table 2 Harmonic responsibility division results of harmonic sources customers of 4 schemes

仿真结果/%	系统侧	用户 1	用户 2	用户 3
方案 1	13.02	29.86	30.48	26.64
方案 2	12.26	29.91	32.03	25.80
方案 3	10.69	25.24	29.39	26.36
方案 4	10.85	25.26	28.96	25.84
理论值	13.12	28.80	31.65	26.43

表 3 4 种方案相对误差谐波责任分析结果

Table 3 Analysis results of relative error and harmonic liability of the 4 schemes

相对误差/%	系统侧	用户 1	用户 2	用户 3
方案 1	2.57	1.57	3.98	5.74
方案 2	1.65	2.65	2.56	4.63
方案 3	9.14	9.13	12.58	11.77
方案 4	9.19	9.79	13.05	11.08

4 种方案的谐波源责任划分结果与理论值基本接近, 系统侧承担的谐波责任理论上为 4.12%。谐波源用户 1 承担的谐波责任理论上为 27.80%; 谐波源用户 2 承担的谐波责任理论上为 31.65%; 谐波源用户 3 承担的谐波责任理论上为 36.43%。

### 3 误差分析

系统侧谐波责任相对误差如图 12 所示。

3 个谐波源用户对应的谐波责任相对误差分析结果如图 13—图 15 所示。

通过比较, 上述方案谐波责任划分结果基本一

致, 均可以用来作为谐波责任划分的方法。方案 1 和方案 2 的结果基本一致, 方案 3 和方案 4 的结果基本一致。

#### 4 功能模块开发

电能质量监测网最基本的功能就是实现监测终端(装置)与监测系统之间的数据交换, 然而目前国内已建的监测网在终端与系统的数据交换上没有统一的通信协议。PQDIF 是 IEEE 1159 规定的一种通

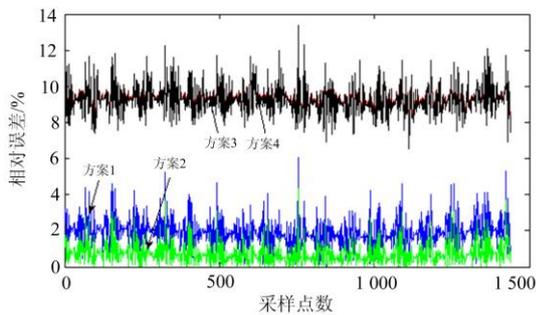


图 12 系统侧谐波责任相对误差结果分析

Fig. 12 Analysis of the results of the relative error of the system side harmonic responsibility

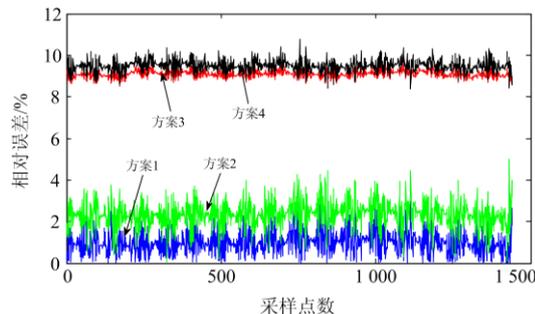


图 13 谐波源用户 1 对应的谐波责任相对误差分析结果  
Fig. 13 Results of relative error of harmonic responsibility of harmonic sources customers 1

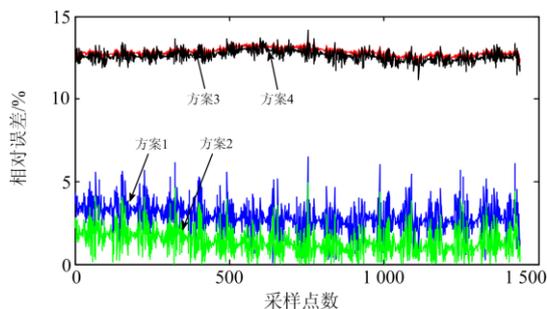


图 14 谐波源用户 2 对应的谐波责任相对误差分析结果  
Fig. 14 Results of relative error of harmonic responsibility of harmonic sources customers 2

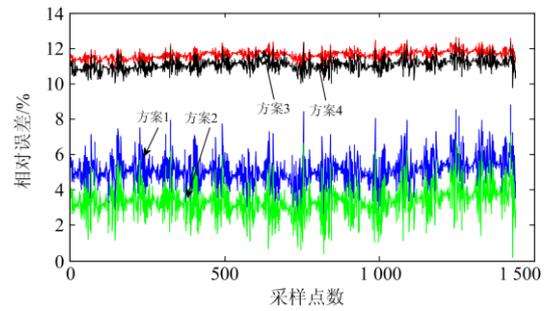


图 15 谐波源用户 3 对应的谐波责任相对误差分析结果  
Fig. 15 Results of relative error of harmonic responsibility of harmonic sources customers 3

用电能质量数据转换格式, 可以作为异构系统之间数据交换的标准格式, 具有很好的通用性。本文研发的多通道便携式电能质量监测仪, 具备 16 通道电压、电流检测功能, 在 LabWindows 平台上使用 IEEE 提供的标准 COM 组件, 实现了自定义数据格式向 PQDIF 数据格式的转换, 可作为电能质量监测系统的数据补充<sup>[20]</sup>。

数据存储按照自定义的二进制数据格式存储各项数据, 并生成相应的以时间命名的文件, 如图 16 所示。其中包含有谐波数据、功率数据等存储文件。



图 16 电能质量数据储存文件

Fig. 16 Power quality data storage document

在 Lab Windows/CVI 中可通过 ActiveX 控件调用生成组件, 包含其中的有新建对象、打开对象、激活对象、获得和设置 MW 标志的函数。这些函数可以直接在 Lab Windows/CVI 编程中使用。函数在 Lab Windows/CVI 中使用流程如图 17 所示。

自定义存储数据通过 PQDIF 转换模块全部解析成对应的\*.pqd 文件, 如图 18 所示。使用 PQDIF Utility Application 工具打开\*.pqd 文件, 可以显示文件的结构, 如图 19 展示了数据源记录的一个通道定义以及与之对应的观测值记录的通道实例。

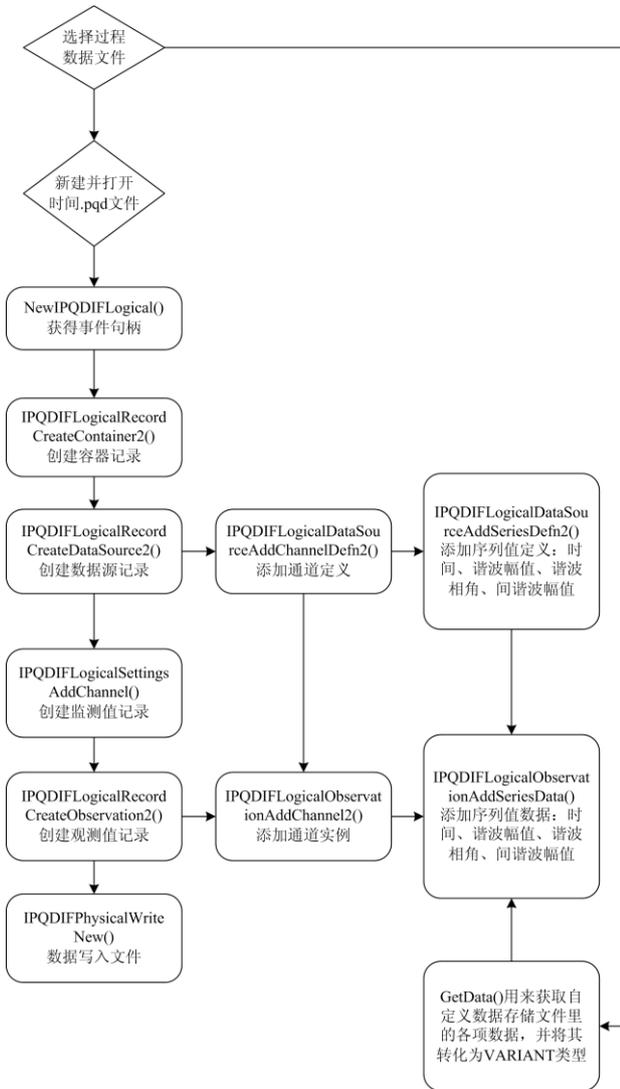


图 17 过程数据文件转换流程

Fig. 17 Process data file conversion process



图 18 PQDIF 转换模块

Fig. 18 PQDIF conversion module

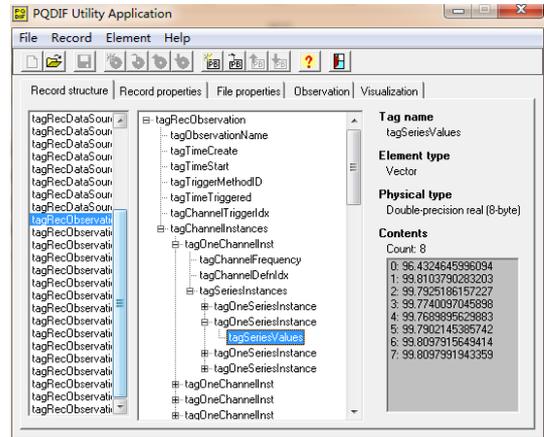


图 19 PQDIF 文件主结构

Fig. 19 PQDIF document main structure

电网中任何一点的谐波电流和谐波电压都是所有谐波源共同作用的结果，它们之间相互影响，相互作用。其中一些非线性负荷是谐波源，理应承担相应的谐波责任。而一些线性负荷不是谐波发生源，则是其他谐波源发出的谐波受害者，根本没必要承担任何的谐波责任。谐波源辨识模块就是为对其进行谐波源辨识，给出谐波责任划分的依据。

该模块能够对多用户的 3、5、7 次典型谐波进行波形分析以及特征参数的统计。计算各用户 3、5、7 次谐波功率趋势，定量地评估各用户的主要谐波源。对于谐波责任划分，软件提供了两种不同的评估划分原则，使得谐波责任划分更加明确。

### 1) 功能算法

① 检测方法：通过检测公共连接点处的谐波有功功率方向来定位主谐波源。

② 计算方案：定义谐波功率正方向为从系统侧流向用户侧的潮流方向，等效电路如图 1 所示。PCC 处的有功功率为

$$P = \text{Re}(\dot{U}_h \dot{I}_h^*) = U_h I_h \cos(\theta_{uh} - \theta_{ih}) \quad (19)$$

③ 判断依据： $P > 0$  时，系统侧比用户侧产生更多的谐波功率，则系统侧为主要谐波源； $P < 0$  时，用户侧比系统侧产生更多的谐波功率，则负荷侧为主要谐波源。

### 2) 谐波责任划分

对于谐波责任的划分，可以参考方案一和方案二。

## 5 总结

基于线性回归的谐波源责任划分方法大多数是在电压和电流瞬时值的基础上完成的，与目前电能质量日常监测系统主要提供电压、电流有效值等统

计值的现状<sup>[24-25]</sup>不符。考虑到电网电能质量监测数据往往表示成电能质量数据交换格式(Power Quality Data Interchange Format, PQDIF)的实际情况,针对 PQDIF 数据格式下的数据,进行谐波污染责任划分具有重要意义。通过对比分析目前提出的基于 PQDIF 的谐波责任划分方法,基于母线处短路容量以及可测量的电压和电流参数给出了一种工程上近似估算多谐波源责任划分的方法。并通过分析研究目前电能质量软件测试数据格式不统一、不具备谐波源辨识等问题,研发了电能质量监测分析系统,介绍了其特色功能模块,包括 PQDIF 格式转换功能以及谐波源辨识功能等,在很大程度上丰富了系统功能。

### 参考文献

- [1] 吴建章, 梅飞, 陈畅, 等. 基于经验小波变换的电力系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 136-143.  
WU Jianzhang, MEI Fei, CHEN Chang, et al. Power system harmonic detection method based on empirical wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 136-143.
- [2] 张强, 王海云, 王维庆. 一种新型组合优化谐波分析方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 156-163.  
ZHANG Qiang, WANG Haiyun, WANG Weiqing. Research on a new combination optimized harmonic analysis method[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 156-163.
- [3] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [4] 段慧. 交流系统谐波阻抗等值与背景谐波分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.  
DUAN Hui. Analysis of AC system harmonic impedance equivalent and background harmonic[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [5] 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. Quantification method of multi-harmonic source pollution responsibility based on robust regression in complex number domain[J]. Acta Solar Energy, 2019, 40(5): 1309-1315.
- [6] XU W, LIU Y. A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 804-811.
- [7] 马晓兰. 计及背景谐波及背景负序影响的牵引供电系统谐波与负序评估[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.  
MA Xiaolan. Harmonic and negative sequence evaluation of traction power supply system considering background harmonics and background negative sequence effects[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [8] 李尚盛, 吴楠, 查晓明. 基于电容器分组投切的电网谐波阻抗特性研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3354-3360.  
LI Shangsheng, WU Nan, ZHA Xiaoming. Research on harmonic impedance characteristics of power grid based on capacitor group switching[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3354-3360.
- [9] 吴命利, 吴丽然, 杨少兵, 等. 交流电气化铁道牵引网阻抗频率特性测试装置, 中国: CN104090182A[P]. 2014-06-23.  
WU Mingli, WU Liran, YANG Shaobing, et al. Testing device for impedance frequency characteristics of traction network of AC electrified railway: CN104090182A[P]. 2014-06-23.
- [10] 姜昊. 电网阻频特性测试与辨识[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.  
JIANG Hao. Test and identification of frequency resistance characteristics of power grid[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [11] 师洪涛, 卓放, 杨祯, 等. 基于改进正弦调制电流注入的三相交流电源系统谐波阻抗测量研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 257-264.  
SHI Hongtao, ZHUO Fang, YANG Zhen, et al. Research on harmonic impedance measurement of three-phase AC power system based on improved sinusoidal modulation current injection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 257-264.
- [12] 惠锦, 杨洪耕, 叶茂清. 基于阻抗归一化趋势判别的谐波发射水平估计[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 73-80.  
HUI Jin, YANG Honggeng, YE Maoqing. Estimation of harmonic emission level based on impedance normalization trend discrimination[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 73-80.
- [13] 王诗超, 沈沉, 李洋, 等. 基于波动量法的系统侧谐波阻抗幅值估计精度评价方法[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 145-149.  
WANG Shichao, SHEN Chen, LI Yang, et al. Evaluation method of system-side harmonic impedance amplitude estimation accuracy based on fluctuation method[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 145-149.
- [14] 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): 65-69.
- WANG Shichao, SHEN Chen, CHENG Jianzhou. System-side harmonic impedance estimation method considering current fluctuation characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 65-69.
- [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. The evaluation method of harmonic impedance and harmonic emission level of the system based on partial least two-way regression[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 93-97.
- [16] XU W, LIU Y. A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 804-811.
- [17] 孙媛媛, 李树荣, 石访, 等. 含分布式谐波源的配电网多谐波源责任划分[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5389-5398, 5586.
- SUN Yuanyuan, LI Shurong, SHI Fang, et al. Division of responsibility of multiple harmonic sources in distribution network containing distributed harmonic sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5389-5398, 5586.
- [18] 李丽, 马宏忠. 基于改进偏最小二乘法的系统谐波阻抗及谐波发射水平估算[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 92-95.
- LI Li, MA Hongzhong. Estimation of system harmonic impedance and harmonic emission level based on improved partial least square method[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 92-95.
- [19] 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.
- [20] 康婕, 谢绍锋, 刘晓菊, 等. 基于支持向量机的谐波阻抗估计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 131-134.
- KANG Jie, XIE Shaofeng, LIU Xiaojun, et al. Harmonic impedance estimation method based on support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 131-134.
- [21] 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.
- [22] 崔梦雨, 刘炜, 马超, 等. 基于PQDIF格式的多通道便携式电能质量监测装置开发[J]. 测控技术, 2017, 36(2): 115-119.
- CUI Mengyu, LIU Wei, MA Chao, et al. Development of multi-channel portable power quality monitoring devices based on PQDIF data format[J]. Measurement and Control Technology, 2017, 36(2): 115-119.
- [23] 李振华, 胡廷和, 杜亚伟, 等. 一种优化窗函数及其在电网谐波检测中的应用分析[J]. 高压电器, 2020, 56(10): 239-246, 252.
- LI Zhenhua, HU Tinghe, DU Yawei, et al. Optimal window function and its application in harmonic detection of power grid[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10): 239-246, 252.
- [24] 李炜, 仇志华, 隋国正, 等. 配电网谐波量测装置最优配置方法[J]. 电力工程技术, 2018, 37(6): 109-114.
- LI Wei, ZHANG Zhihua, SUI Guozheng, et al. The Optimal allocation method of harmonic measuring device in distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(6): 109-114.
- [25] 郭敏, 陈卫东, 金庆忍. 谐波有功功率责任指标定义与计算方法研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(1): 84-89, 95.
- GUO Min, CHEN Weidong, JIN Qingren. Index definition and calculation method of harmonic active power responsibility[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(1): 84-89, 95.

收稿日期: 2020-09-17; 修回日期: 2021-01-28

作者简介:

王熠宇(1993—), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向为电能质量治理。E-mail: kbu80589586@163.com

(编辑 葛艳娜)