

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231414

基于多源数据的馈线谐波频谱估计方法

张逸¹, 林楠¹, 张良羽¹, 张妍², 刘必杰³

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108; 2. 国网吉林省电力有限公司营销服务中心, 吉林 长春 130600; 3. 国网福建省电力有限公司宁德供电公司, 福建 宁德 352100)

摘要: 随着分布式电源和非线性负荷的投运规模不断增加, 电网谐波污染愈加重和复杂, 有必要对各馈线谐波电流进行监测。但基于经济性考虑, 对变电站所有馈线均进行谐波电流监测并不可行。针对上述问题, 提出了基于多源数据的馈线谐波频谱估计方法。该方法基于电网现有电能质量监测系统、调度系统、营销业务应用系统等多源数据, 只需对母线谐波电压和进线谐波电流开展监测, 即可估计出变电站所有馈线的谐波电流情况。首先, 根据馈线谐波电流的相量运算关系和功率关系构建馈线谐波频谱估计的目标函数。其次, 基于多源数据利用改进粒子群算法求解目标函数, 进而得到各馈线的各次谐波电流含有率及馈线谐波电流间的相角差, 实现了各馈线谐波电流频谱的估计。最后, 通过仿真算例和实测算例验证了方法的可行性。算例表明该方法仅需在变电站母线处安装一台电能质量监测终端, 结合现有业务系统的基本电气数据等信息, 可实现馈线谐波频谱的估计, 有助于节约变电站监测装置的配置成本。

关键词: 谐波监测; 电能质量; 粒子群算法; 多源数据; 谐波频谱

Harmonic spectrum estimation method for feeders based on multi-source data

ZHANG Yi¹, LIN Nan¹, ZHANG Liangyu¹, ZHANG Yan², LIU Bijie³

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Marketing Service Center of State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Changchun 130600, China; 3. Ningde Power Supply Company, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Ningde 352100, China)

Abstract: With the increasing scale of distributed power generation and non-linear load, power grid harmonic pollution is becoming more and more serious. However, for economic reasons, it is unrealistic to monitor harmonic current of all feeders of a substation. Given this, this paper proposes a harmonic spectrum estimation method of feeder lines based on multi-source data. This method uses multi-source data obtained from the power quality monitoring, dispatching and marketing business application systems, and can estimate the harmonic current content of each feeder by only monitoring data of bus harmonic voltage and incoming line harmonic current. First, the objective function of spectrum estimation is constructed according to the phasor operation relationship of feeder harmonic current and power relationship. Then, the improved particle swarm optimization algorithm is used to analyze the objective function based on multi-source data, and after that the harmonic current content of each feeder and the phase angle difference between the harmonic currents of the feeders are obtained. Finally, the feasibility of the proposed method is verified by simulation and measurement examples. The examples show that this method only requires the installation of a power quality monitoring terminal at the busbar of the substation. By combining basic electrical data from existing business systems, it can estimate the harmonic spectrum of the feeder, helping to save the configuration cost of substation monitoring devices.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51777035).

Key words: harmonic monitoring; power quality; particle swarm optimization; multi-source data; harmonic spectrum

0 引言

近年来, 电弧炉、电力机车、大型变流型设备

等非线性负荷仍不断地大量接入电力系统; 同时, 光伏和风电为主的新能源在电网中的渗透率迅速提升^[1-3]。这些因素导致电网的谐波问题愈加重和复杂。谐波监测能获取系统内重要节点和线路的谐波数据, 是谐波评估、治理等工作的基础^[4-6], 但实际

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777035)

中实施谐波监测的变电站母线和馈线较为有限^[7-8]。随着分布式光伏的大量并网和居民负荷的非线性不断提升^[9]，包含谐波源的馈线越来越多，为了实现谐波准确评估、责任划分和精准治理，理论上有必要对各馈线谐波电流均进行监测，但实际中鉴于成本原因，对变电站的所有馈线进行谐波监测是不现实的。因此，如何通过有限的谐波监测数据估计出不可观节点或线路的谐波污染情况，是目前亟待解决的问题^[10]。

谐波状态估计是解决上述问题的重要方法之一，其技术路线可以大致分为两大类：一类通过系统的拓扑参数和阻抗参数得到谐波导纳与阻抗矩阵，再结合监测装置的数量、位置和类型构建量测矩阵，通过求解量测方程获取全网的谐波状态^[11-12]；另一类基于独立分量分析法，该类方法仅需量测节点的谐波电压和谐波电流即可估计出所有谐波源节点的注入谐波电流，适用于缺乏谐波阻抗和网络拓扑的情况^[13-15]。此外，也有通过生成对抗网络等数据驱动的方法学习各节点的耦合关系，实现谐波状态估计^[16]。但现有的谐波状态估计方法大多关注变电站母线的谐波电压和注入上一级系统的谐波电流，尚未涉及变电站母线所接馈线谐波电流的估计问题。

针对上述问题，基于电力系统现有的电能质量监测系统、调度系统、营销业务应用系统等多源数据，提出一种各馈线谐波频谱的估计方法。首先，根据馈线谐波电流的相量运算关系和功率关系构建频谱估计的目标函数。其次，基于多源数据利用改进粒子群算法求解目标函数，进而得到各馈线的各次谐波电流含有率及馈线谐波电流间的相角差，实现了各馈线谐波电流频谱的估计。最后，通过仿真和实测算例验证了本文方法的可行性，算例表明本文方法能够在仅有变电站母线谐波电压及其进线谐波电流等电能质量数据的情况下，结合现有业务系统的基本电气数据估计出馈线的各次谐波电流含有率及馈线间谐波电流的相角差。

1 馈线谐波频谱估计方法的目标函数

1.1 多源数据类型及其来源

受限于谐波监测终端的采购和运维成本，目前国内外均未实现对每条馈线的谐波监测^[8]，一般较关注公共连接点的谐波电压畸变情况以及向上级电网注入的谐波电流水平，且单通道电能质量监测终端成本较低^[17]，因此可对变电站母线的谐波电压及其进线的谐波电流实施监测，如图 1 所示^[8,18]。需要说明的是，变电站中同样有常规的监测装置来监

测基本的电气量如电压电流有效值、功率因数等。

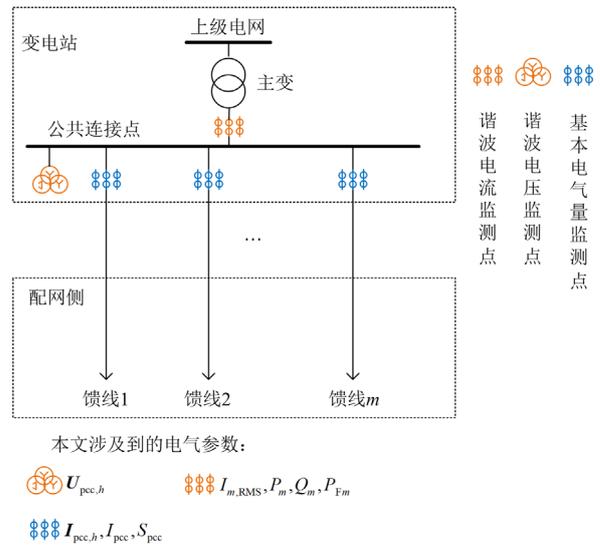


图 1 某变电站母线示意图

Fig. 1 Bus diagram of a substation

图 1 中： $U_{pcc,h}$ 、 $I_{pcc,h}$ 分别为公共连接点处测得的第 h 次谐波电压相量、谐波电流相量； I_{pcc} 为公共连接点处的电流有效值； S_{pcc} 为公共连接点处的总视在功率有效值； $I_{m,RMS}$ 、 P_m 、 Q_m 、 P_{fm} 分别为该母线所连第 m 条馈线的电流、有功、无功和功率因数有效值。

馈线的基本电气数据可以从调度系统获取，非线性用户的台账信息可以从营销业务应用系统获取。同时，大容量非线性用户在向电力公司申请供电时，一般需要第三方具有资质的电能质量测试公司对其进行电能质量预测评估，并提交评估报告，从所提交报告中可获取非线性用户向电网注入的谐波电流估计值^[19]。本文方法具体涉及到的数据及其来源如表 1 所示。

表 1 本文方法所涉及数据及其来源

Table 1 Data involved in the method and its sources

数据来源	数据类型	数据用途
电能质量监测系统	母线谐波电压相量、主变低压侧谐波电流相量	构建谐波频谱估计目标函数
	主变视在功率、馈线有功/无功功率、馈线功率因数、主变电流有效值、线路电流有效值	
营销业务应用系统	非线性用户台账信息(包括谐波源类型、容量)	为粒子群算法初始粒子位置的选取提供先验信息
电能质量预测评估结果	用户注入公共连接点的谐波电流估计值	

本文以上述多源数据为基础, 推导了各馈线之间的谐波叠加/抵消关系、各馈线的谐波功率关系, 建立了馈线谐波频谱估计方法的目标函数。

1.2 谐波电流相量的目标函数

由公共连接点汇入上级系统的谐波电流可由式(1)表示。

$$I_{pcc,h} = \sum_{m=1}^M I_{m,h} \quad (1)$$

式中: $I_{m,h}$ 为该母线所连第 m 条馈线的第 h 次谐波电流相量; M 为该母线所连的馈线总数。进一步地, 将各次谐波电流相量改写成虚实部的形式, 如式(2)所示。

$$\begin{cases} I_{pcc,h, \text{re}} = \sum_{m=1}^M I_{m,h} \cos \theta_{m,h} \\ I_{pcc,h, \text{im}} = \sum_{m=1}^M I_{m,h} \sin \theta_{m,h} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $I_{pcc,h, \text{re}}$ 和 $I_{pcc,h, \text{im}}$ 分别为公共连接点第 h 次谐波电流的实部和虚部; $\theta_{m,h}$ 为该母线所连第 m 条馈线的第 h 次谐波电流的相角。为了分析出各条支路的谐波频谱, 将式(2)中的谐波电流幅值用谐波含有率的形式表达, 如式(3)所示。

$$\begin{cases} I_{pcc,h, \text{re}} = \sum_{m=1}^M I_{m,h} H_{R1m,h} \cos \theta_{m,h} \\ I_{pcc,h, \text{im}} = \sum_{m=1}^M I_{m,h} H_{R1m,h} \sin \theta_{m,h} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $H_{R1m,h}$ 为第 m 条馈线的第 h 次谐波电流含有率。但考虑到馈线所监测的电流指标通常为有效值, 因此还需实现电流总有效值和基波有效值之间的转换, 它们之间的关系如式(4)和式(5)所示。

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{h=2}^H I_h^2} \quad (4)$$

$$T_{\text{HDI}} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H I_h^2}}{I_1} \times 100\% = \sqrt{\sum_{h=2}^H H_{R1h}^2} \quad (5)$$

式中: I_{RMS} 为电流有效值; I_1 为电流基波有效值; I_h 为各次谐波电流有效值; H 为电子式电能表能够监测到的最高谐波次数; T_{HDI} 为电流总谐波畸变率; H_{R1h} 为第 h 次的谐波电流含有率。联立式(4)和式(5), 便可以得到两者的转换公式, 如式(6)所示。

$$I_1 = \frac{I_{\text{RMS}}}{\sqrt{\sum_{h=2}^H H_{R1h}^2 + 1}} \quad (6)$$

将式(6)代入式(3), 可得到谐波电流相量的目标

函数为

$$\begin{cases} I_{pcc,h, \text{re}} = \sum_{m=1}^M \frac{I_{m, \text{RMS}}}{\sqrt{\sum_{h=2}^H H_{R1m,h}^2 + 1}} H_{R1m,h} \cos \theta_{m,h} \\ I_{pcc,h, \text{im}} = \sum_{m=1}^M \frac{I_{m, \text{RMS}}}{\sqrt{\sum_{h=2}^H H_{R1m,h}^2 + 1}} H_{R1m,h} \sin \theta_{m,h} \end{cases} \quad (7)$$

只需求解出式(7)中的 $H_{R1m,h}$ 和 $\cos \theta_{m,h}$, 即可得到各馈线谐波电流的频谱。但是仅凭求解式(7)来估计各馈线的谐波电流频谱存在两个问题, 本文将结合图2来具体阐述, 以2条馈线的第 h 次谐波电流的叠加方式为例, 分别用 $I_{m,h}$ 、 $I'_{m,h}$ 和 $I''_{m,h}$ ($m=1,2$) 来表示3种叠加方式。一方面, 求解出来的馈线谐波含有率可能不唯一, 如图2中的叠加方式一与叠加方式二, 虽然在两种方式下各馈线的谐波电流不同, 但是合成的公共连接点谐波电流相量却相同; 另一方面, 即使确定了馈线的各次谐波含有率, 其相角也存在不确定性, 如图2中的叠加方式一和叠加方式三, 各馈线的谐波电流幅值相同, 且各自关于公共连接点谐波电流相量轴对称, 同时存在两种相角叠加情况能够合成公共连接点谐波电流相量。

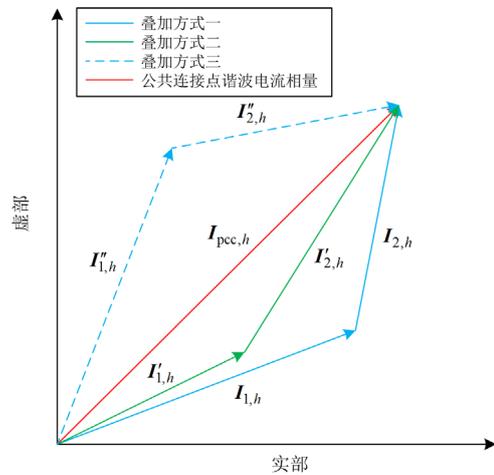


图2 谐波电流合成示意图

Fig. 2 Harmonic current synthesis schematic

因此, 针对上述各馈线谐波含有率可能不唯一的问题, 本文额外引入了各馈线的功率关系来约束馈线的谐波含有率的非唯一性。针对相角的不确定性, 从图2可以看出, 虽然求解出的各馈线谐波电流的相角可能存在不同, 但各馈线之间谐波电流的相角差是唯一确定的, 且相角差足以反映各馈线谐波电流间的叠加/抵消关系, 可用于判断各馈线谐波电流对注入系统的总谐波电流是呈现助增还是助减

效应, 对于谐波的准确评估和精确治理同样具有参考价值。综上, 本文将求解目标确定为各馈线的谐波电流含有率和馈线间的各次谐波电流相角差。

1.3 考虑谐波功率的各馈线功率目标函数

在非正弦电路中, 电网中电压、电流的波形偏离正弦波形发生畸变, 畸变波形可用一系列不同频率的正弦波近似叠加。在此情况下, 采用电子式电能表进行数据采集, 有功功率和无功功率分别如式(8)和式(9)所示^[20-21]。

$$P_m = \sum_{h=1}^H I_{m,h} U_{m,h} \cos \delta_{m,h} = P_{m,1} + \sum_{h=2}^H P_{m,h} \quad (8)$$

$$Q_m = \sum_{h=1}^H I_{m,h} U_{m,h} \sin \delta_{m,h} = Q_{m,1} + \sum_{h=2}^H Q_{m,h} \quad (9)$$

式中: P_m 和 Q_m 分别为第 m 条支线的有功功率和无功功率; $P_{m,h}$ 和 $Q_{m,h}$ 分别为第 m 条支线的第 h 次谐波有功功率和无功功率; $I_{m,h}$ 和 $U_{m,h}$ 分别为第 m 条支线的第 h 次谐波电流和谐波电压; $\delta_{m,h}$ 为第 h 次谐波电流滞后谐波电压的角度。由于母线监测点处测得的谐波电压相量等于各馈线基本电气量监测点处的谐波电压相量, $\delta_{m,h}$ 和 $\theta_{m,h}$ 可互相转化。

但式(8)和式(9)相较于式(7), 多了基波分量, 因此还需求解基波有功/无功功率, 本文从功率因数角度求解基波功率。在工程实际中, 一般电压畸变率相较于电流畸变率较小, 忽略电压畸变率所造成的误差损失较小, 因此功率因数可由式(10)近似表达^[22-23]。

$$P_F = \frac{P}{S} \approx \frac{U_{\text{RMS}} I_1 \cos \delta_1}{U_{\text{RMS}} I_{\text{RMS}}} = \frac{I_1 \cos \delta_1}{I_{\text{RMS}}} = \frac{\cos \delta_1}{\sqrt{\sum_{h=2}^H H_{\text{Rlh}}^2 + 1}} \quad (10)$$

式中: P_F 为功率因数; U_{RMS} 为电流有效值; $\cos \delta_1$ 为基波功率因数。如图 1 所示, 各馈线的功率因数可测得, 将式(6)、式(10)代入式(8)和式(9), 结合基波功率的定义, 可以得到各馈线功率目标函数, 即

$$P_m = \sum_{h=2}^H I_{m,h} U_{m,h} \cos \delta_{m,h} + U_{m,1} P_{Fm} I_{m,\text{RMS}} \quad (11)$$

$$Q_m = \sum_{h=2}^H I_{m,h} U_{m,h} \sin \delta_{m,h} + \text{Sgn}(Q_m) U_{m,1} I_{m,\text{RMS}} \sqrt{\frac{1}{\sum_{h=2}^H H_{\text{Rlh}}^2 + 1} - P_{Fm}^2} \quad (12)$$

式中, $\text{Sgn}(\cdot)$ 为符号函数。通常情况下, 基波无功功率远大于总谐波无功功率, 因此, 本文认为总无功功率与基波无功功率同号。故在式(12)中, 当

$Q_m > 0$ 时, $\text{Sgn}(Q_m) = 1$; 当 $Q_m < 0$, $\text{Sgn}(Q_m) = -1$ 。

1.4 馈线谐波频谱估计方法的目标函数与约束

首先, 将 1.2、1.3 节中的谐波电流相量和各馈线功率的目标函数改写成式(13)的形式。

$$\begin{cases} f_1 = (I_{\text{pcc},h,\text{re}} - \sum_{m=1}^M I_{m,h} \cos \theta_{m,h}) + (I_{\text{pcc},h,\text{im}} - \sum_{m=1}^M I_{m,h} \sin \theta_{m,h}) \\ f_2 = \sum_{m=1}^M \left\{ \left[P_m - \sum_{h=2}^H P_{m,h} - P_{m,1} \right] + \left[Q_m - \sum_{h=2}^H Q_{m,h} - Q_{m,1} \right] \right\} \end{cases} \quad (13)$$

式中: f_1 、 f_2 分别为谐波电流相量和各馈线功率的目标函数; $I_{m,h}$ 、 $P_{m,h}$ 、 $P_{m,1}$ 、 $Q_{m,h}$ 和 $Q_{m,1}$ 如式(14)所示。

$$\begin{cases} I_{m,h} = \frac{I_{m,\text{RMS}}}{\sqrt{\sum_{h=2}^H H_{\text{Rlh}}^2 + 1}} H_{\text{Rlm},h} \\ P_{m,h} = I_{m,h} U_{m,h} \cos \delta_{m,h} \\ P_{m,1} = U_{m,1} P_{Fm} I_{m,\text{RMS}} \\ Q_{m,h} = I_{m,h} U_{m,h} \sin \delta_{m,h} \\ Q_{m,1} = \text{Sgn}(Q_m) U_{m,1} I_{m,\text{RMS}} \sqrt{\frac{1}{\sum_{h=2}^H H_{\text{Rlh}}^2 + 1} - P_{Fm}^2} \end{cases} \quad (14)$$

然后, 考虑到电流和功率的量纲不同, 因此需要归一化, 本文以对应时刻的电流有效值和视在功率的有效值为归一化基准, 构建了馈线谐波频谱估计方法的目标函数, 即

$$F = f_1 / I_{\text{pcc}} + f_2 / S_{\text{pcc}} \quad (15)$$

上述分析中, 已知的量测量集合为 $\{I_{\text{pcc}}, I_{\text{pcc},h,\text{re}}, I_{\text{pcc},h,\text{im}}, I_{m,\text{RMS}}, P_m, Q_m, P_{Fm}, U_{m,h}, S_{\text{pcc}}\}$, 即公共连接点处的谐波数据和各馈线的基础电气量数据; 待求解参数集合为 $\{H_{\text{Rlm},h}, \theta_{m,h}\}$, 即馈线的各次谐波含有率及其相角。

最后, 本文通过最小化目标函数的方式求解 $H_{\text{Rlm},h}$ 和 $\theta_{m,h}$, 即

$$\begin{cases} \min F \\ \text{s.t.} \begin{cases} 0 \leq H_{\text{Rlm},h} \leq 100\% \\ -\pi \leq \theta_{m,h} \leq \pi \end{cases} \end{cases} \quad (16)$$

进一步地, 在求出 $\theta_{m,h}$ 的基础上便可求解出各馈线之间谐波电流的相角差 $\Delta \theta_{ij,h}$, 如式(17)所示。

$$\Delta \theta_{ij,h} = |\theta_{i,h} - \theta_{j,h}| \quad (17)$$

式中, $\theta_{i,h}$ 、 $\theta_{j,h}$ 分别为馈线 i 、 j 的第 h 次谐波电流

的相角。

2 基于改进粒子群算法的馈线频谱估计

2.1 改进粒子群算法原理

在第1节中, 本文建立了馈线谐波频谱估计方法的目标函数, 接下来将采用改进粒子群算法进行求解。粒子群优化是一种成熟、高效、简单的优化算法, 其本质是基于群体协作的随机搜索算法。传统的粒子群算法容易出现陷入局部最优的问题, 因此本文采用改进粒子群算法, 其主要改进为通过动态调节认知系数和社会学习系数让粒子渐渐地少向局部最优学习, 而多向全局最优学习, 使粒子尽可能摆脱局部极值的干扰, 从而提高解的精度, 其关键公式如式(18)和式(19)所示^[24]。

$$\begin{cases} v_i(k+1) = \omega(k)v_i(k) + [r_1c_1(k)p_{ibest} - x_i(k)] + \\ \quad [r_2c_2(k)g_{best} - x_i(k)] \\ x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k+1) \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \omega(k) = \omega_{min} + \frac{(n_{gen} - k)(\omega_{max} - \omega_{min})}{n_{gen}} \\ c_1(k) = c_{1max} + \frac{k(c_{1min} - c_{1max})}{n_{gen}} \\ c_2(k) = c_{2min} + \frac{k(c_{2max} - c_{2min})}{n_{gen}} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $v_i(k)$ 、 $x_i(k)$ 分别为第 k 次迭代时粒子 i 对应的速度和位置; $\omega(k)$ 为第 k 次迭代时的惯性权重, ω_{max} 、 ω_{min} 分别为惯性权重的最大值和最小值; p_{ibest} 、 g_{best} 分别为粒子 i 的历史最优位置和所有粒子的最优位置; r_1 和 r_2 为 $[0,1]$ 之间的随机数; n_{gen} 为总迭代次数; c_1 、 c_2 分别为认知系数和社会学习系数; c_{1max} 、 c_{2max} 和 c_{1min} 、 c_{2min} 分别为 c_1 、 c_2 的最大、最小值。

2.2 基于营销台账和电能质量预测评估结果的初始粒子位置选取方法

在粒子群算法中, 初始粒子位置的选取至关重要, 合乎实际情况的初始粒子位置有助于加快收敛速度、保证粒子向全局最优收敛。因此, 本文利用营销业务应用系统中提供的非线性用户台账和电能质量预测评估的结果, 结合工程实际中常用的谐波估算方法, 制定了如下的初始粒子位置选取策略。

首先, 确定各馈线下的非线性用户, 估计其向电网注入的各次谐波电流幅值, 具体方法为: 若该用户开展过电能质量预测评估, 则通过其评估报告获取用户向系统注入的各次谐波电流幅值^[25]; 若该用户

未开展电能质量预测评估, 则根据营销业务应用系统的非线性用户台账中的谐波源类型、容量等信息, 结合文献[26]中提供的典型谐波源频谱进行估算。

然后, 利用《GB/14549-93 电能质量公用电网谐波》中附录 C 所提供的方法估算馈线下各非线性用户叠加后的各次电流谐波幅值, 记为 $I_{m,h}^{ES}$, 则初始粒子的谐波含有率 $H_{Rlm,h}^{ini}$ 可以近似设置为

$$H_{Rlm,h}^{ini} = \alpha \left(I_{m,h}^{ES} / I_{m,RMS} \right) \times 100\% \quad (20)$$

式中, α 为随机数, $\alpha \in [0.5, 1.5]$ 。由于估算出的结果可能和实际结果有所出入, 因此需要引入 α 来使生成的粒子覆盖真实值的取值范围。实际运用中可以依据台账的完整性和谐波用户的动态特性来确定 α 的范围, 如果初始谐波含有率估算较准, α 的范围就取小一点, 以加快收敛速度; 如果初始谐波含有率估算得离真实值较远, α 的范围就取大一点, 避免陷入局部最优解。此外, 需要说明的是, 由式(6)可知想要求解出馈线的基波电流需要各次谐波含有率作为先验条件, 因此, 此处用电流有效值来近似求解初始谐波含有率。

最后, 假设短时间内各馈线的谐波电流及其相角近似不变, 可利用最小二乘法获得粒子的初始谐波相角 $\theta_{m,h}^{ini}$, 即

$$\begin{cases} I_{pcc,h,rc} = \sum_{m=1}^M I_{m,h}^{ES} \cos \theta_{m,h}^{ini} \\ I_{pcc,h,im} = \sum_{m=1}^M I_{m,h}^{ES} \sin \theta_{m,h}^{ini} \end{cases} \quad (21)$$

为保证种群的多样性, 本文取 70% 的粒子在式(16)的约束范围内采用佳点集策略^[27]选取初始位置, 使得初始粒子尽可能均匀分布在整個范围内, 剩下 30% 的粒子通过上述策略选取初始位置。

3 算例分析

3.1 仿真算例分析

3.1.1 多类型谐波源负荷算例分析

本文在 Matlab/Simulink 上搭建如图 1 所示的用户变电站模型以验证本文方法的有效性, 其母线共有 4 条馈线, 所接负荷类型分别为线性负荷、电弧炉、六脉波整流器和十二脉波整流器。本文认为各馈线的主要负荷类型为已知信息(实际工程可通过营销业务应用系统的非线性用户台账获取), 并在此基础上结合理论得到各馈线的特征谐波次序, 例如: 电弧炉的特征谐波次序为 2~8 次、六脉波整流器的特征谐波次序为 $6k \pm 1$ 次 ($k = 1, 2, 3, \dots$)、十二脉波整流器的特征谐波次序为 $12k \pm 1$ 次^[26] ($k = 1, 2, 3, \dots$)。

再结合如图3所示的PCC处各次谐波电流含有率可以看出,上述次序的谐波确实为该用户向电网注入谐波的特征次序(此处的谐波次序仅考虑到国标要求的25次及以下)。因此,为降低问题的维度和复杂度,本文仅将各馈线特征次谐波电流的含有率和馈线间谐波电流的相角差作为待求解量,通过改进粒子群算法进行求解。改进粒子群算法的参数如附录A表A1所示。

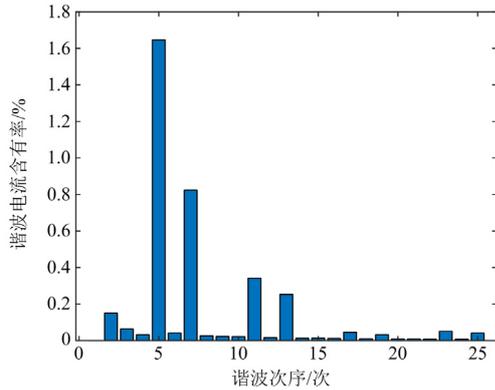


图3 PCC处谐波电流含有率

Fig. 3 H_{Rlh} of PCC

粒子群算法属于启发式算法,每次执行的收敛结果都不一定相同,为避免试验的偶然性,因此本文重复100次改进粒子群算法,其估计结果如图4所示,与估计结果中位数的含有率误差和相角误差分别如表2和表3所示,其中:截断点估计区间为通过计算估计数据的四分位数(Q_1 、 Q_3)和四分位距(I_{QR}),得到的排除数据异常值的数据区间,其区间为 $[Q_1 - 1.5I_{QR}, Q_3 + 1.5I_{QR}]$ 。谐波次序5、7次为电弧

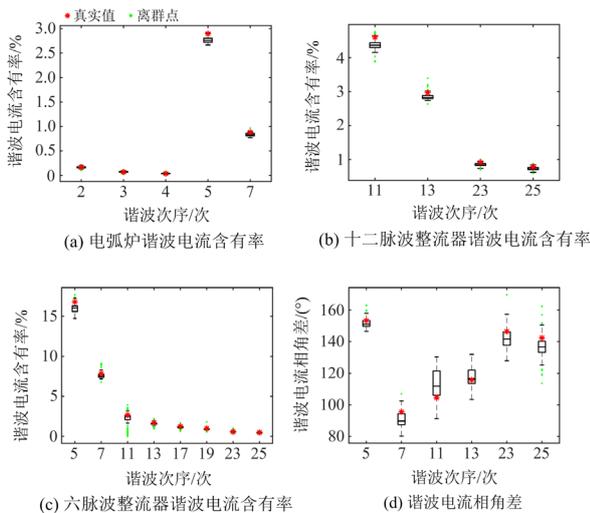


图4 多类型谐波源仿真算例估计结果

Fig. 4 Estimation results of simulation case of multiple types of harmonic sources

炉和六脉波整流器之间的谐波电流相角差,谐波次序11、13、23、25次为六脉波整流器和十二脉波之间的谐波电流相角差。

从表2和图4可以看出,在不涉及多负荷谐波电流叠加的谐波次序情况下,谐波电流含有率的估计结果与真实值相差无几。在涉及谐波电流叠加的谐波次序的情况下,通过粒子群算法多次计算,虽然有部分估计结果与真实值相差较大,但是通过箱型图(图4)和表2可以看出,多次谐波电流含有率的估计结果中位数与真实值相近,绝对误差最多不超过0.8%,且真实值均位于其估计的截断点区间内。从表3可以看出,估计出的谐波相角差情况与谐波含有率情况类似,其估计中位数与真实值的绝对误差不超过7.4°。上述算例验证了本文算法的可行性和有效性。

表2 谐波电流含有率估计结果及误差

Table 2 Estimation result of H_{Rlh} and its error

馈线负荷类型	谐波次序	截断点估计区间/%	估计中位数/%	真实值/%	绝对误差/%
电弧炉	2	[0.12,0.21]	0.17	0.17	0.00
	3	[0.05,0.10]	0.07	0.07	0.00
	4	[0.02,0.06]	0.04	0.03	0.01
	5	[2.59,2.93]	2.76	2.89	0.13
	7	[0.74,0.93]	0.83	0.88	0.05
十二脉波整流器	11	[4.08,4.65]	4.37	4.60	0.23
	13	[2.65,3.02]	2.82	2.97	0.15
	23	[0.73,0.97]	0.84	0.91	0.07
	25	[0.60,0.87]	0.73	0.79	0.06
六脉波整流器	5	[14.55,17.37]	16.07	16.81	0.74
	7	[6.80,8.32]	7.52	7.84	0.32
	11	[1.35,3.27]	2.48	2.65	0.17
	13	[1.28,1.87]	1.60	1.71	0.11
六脉波整流器	17	[1.00,1.31]	1.16	1.25	0.09
	19	[0.79,1.03]	0.91	0.98	0.07
	23	[0.41,0.73]	0.56	0.59	0.03
	25	[0.34,0.61]	0.47	0.49	0.02

表3 谐波电流相角差估计结果及误差

Table 3 Estimation result of harmonic current phase angle difference and its error

谐波次序	截断点估计区间/(°)	估计中位数/(°)	真实值/(°)	绝对误差/(°)
5	[144.16,159.06]	151.10	153.45	2.35
7	[77.02,104.75]	89.74	95.60	5.86
11	[82.86,144.56]	111.88	104.50	7.38
13	[100.76,134.70]	116.47	115.6	0.87
23	[124.84,159.21]	141.69	146.44	4.75
25	[122.72,150.66]	136.54	142.39	5.85

但是由于在推导和求解过程中, 做了一定的化简与取舍, 因此估计结果与真实值一定存在误差, 具体导致误差的原因如下: 一方面, 电能质量监测终端计量谐波存在误差, 如当计量的 h 次谐波电流小于额定电流的 3% 时, 即 $I_h < 3\%I_N$, A 级监测终端的最大允许误差为 $0.15\%I_N$ ^[17], 因此当谐波电流含有率较小时, 监测终端的采集误差会影响到真实值的精度; 另一方面, 为了降低问题的维度和复杂度, 本文忽略了含有率不高的谐波次序, 仅考虑各馈线的特征次谐波电流, 因此在计算式(6)的基波电流有效值和式(10)的基波功率因数时会出现偏差, 进而导致式(13)的等式左右两侧并不完全相等, 只是近似相等, 使得当真实值代入目标函数式(15)时, 其函数值并不会最小, 因此估计结果一般不会准确收敛到真实值, 而是在真实值附近。

3.1.2 同类型谐波源负荷算例分析

由于上述算例仅涉及至多 2 个同次序谐波电流的叠加, 因此本文又设计了一个由 3 条负荷类型均为十二脉波整流器的馈线构成的变电站模型, 其结构与图 1 类似。3 条馈线下十二脉波整流器的容量比为 1:2:4, 分别记为馈线 1、2、3。同样地, 重复 100 次改进粒子群算法, 其估计结果如图 5 所示, 与估计结果中位数的含有率误差和相角误差如表 4 和表 5 所示, 其中 $\Delta\theta_{12}$ 表示馈线 1 和馈线 2 的谐波电流相角差, 以此类推。

从表 4 和表 5 可以看出, 当多于 2 个同次序谐波电流叠加时, 本文所提方法估计结果的中位数与真实值相近, 但是从图 5 可以看出, 在此情况下, 部分离群估计结果的分布范围较至多 2 个同次序谐波电流叠加情况时的估计结果分布范围更大。上述两个仿真算例验证了本文所提算法在不同情景下的适用性。

表 4 谐波电流含有率估计结果及误差

Table 4 Estimation result of H_{Rlh} and its error

馈线	谐波次序	截断点估计区间/%	估计中位数/%	真实值/%	绝对误差/%
馈线 1	11	[6.99,7.71]	7.41	7.43	0.02
	13	[5.58,6.16]	5.84	5.84	0.00
	23	[1.75,2.40]	1.87	1.84	0.03
	25	[1.39,1.57]	1.51	1.48	0.03
馈线 2	11	[5.99,6.47]	6.25	6.26	0.01
	13	[4.40,4.92]	4.60	4.59	0.01
	23	[0.92,3.35]	1.08	1.04	0.04
	25	[0.78,2.71]	0.93	0.89	0.04
馈线 3	11	[4.33,4.64]	4.51	4.50	0.01
	13	[2.86,3.24]	2.99	2.97	0.02
	23	[0.81,1.99]	0.91	0.87	0.04
	25	[0.66,2.34]	0.77	0.73	0.04

表 5 谐波电流相角差估计结果及误差

Table 5 Estimation result of harmonic current phase angle difference and its error

相角差	谐波次序	截断点估计区间/(°)	估计中位数/(°)	真实值/(°)	绝对误差/(°)
$\Delta\theta_{12}$	11	[28.13,58.09]	41.16	40.82	0.34
	13	[41.49,57.67]	50.76	49.74	1.02
	23	[100.09,124.46]	117.38	119.03	1.65
	25	[122.83,145.25]	134.69	135.75	1.06
$\Delta\theta_{13}$	11	[92.68,107.74]	97.80	99.84	2.04
	13	[119.57,131.75]	125.09	125.22	0.13
	23	[71.10,95.29]	82.65	80.81	1.84
	25	[44.92,64.36]	55.77	54.73	1.04
$\Delta\theta_{23}$	11	[53.22,66.69]	59.64	59.02	0.62
	13	[67.80,81.57]	76.44	75.48	0.96
	23	[154.46,167.71]	160.92	160.16	0.76
	25	[164.38,174.49]	169.31	169.51	0.20

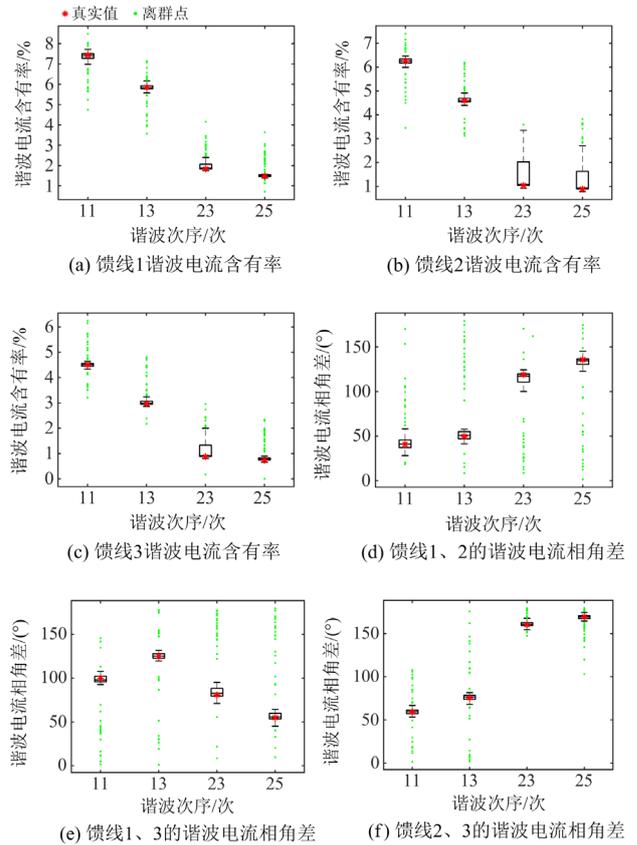


图 5 同类型谐波源算例估计结果

Fig. 5 Estimation results of similar harmonic source simulation examples

3.2 实测算例分析

本文对四川某变电站实测数据进行分析, 其电气主接线如图 6 所示, 在 10 kV 母线处有安装电能

质量在线监测终端，可通过触发录波获取变电站 10 kV 母线的电压及进线电流录波数据。从营销业务应用系统中获取该变电站下的非线性用户集中在金联线和金变线，且谐波源类型均为中频炉、整流变和分布式电源并网逆变器电力电子型负荷。在金联线和金变线使用便携式测试设备开展临时测试以获取两馈线的电流录波数据。

以上两种录波数据通过傅里叶变换，分解得到各次谐波电压电流的幅值和相角数据，作为实测真实值，用以进行算例分析。本文采用谐波污染主特征群筛选方法计算出该变电站的特征谐波污染次序为 3、5、7、11 次^[28]。同时，从图 7 也可以看出该用户的 3、5、7、11 次谐波电流含有率较大，因此，本文此处仅估计金变线和金联线的上述特征次谐波电流。

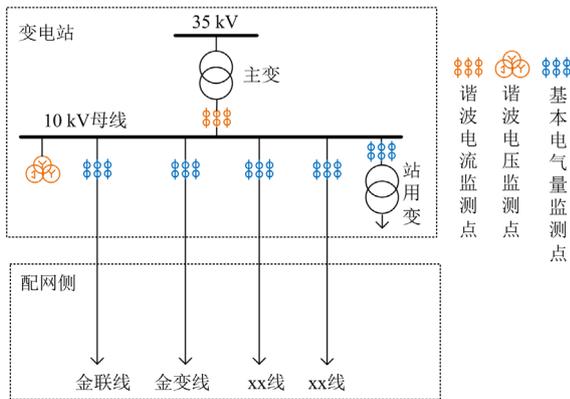


图 6 变电站电气主接线示意图

Fig. 6 Main electrical wiring diagram of substation

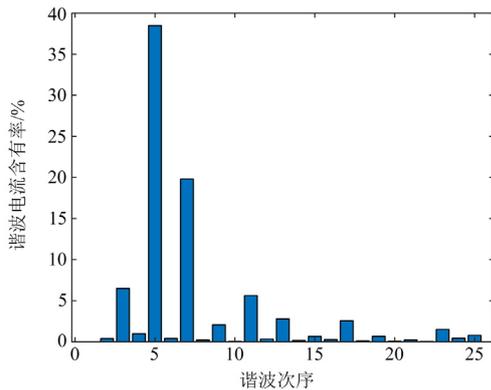
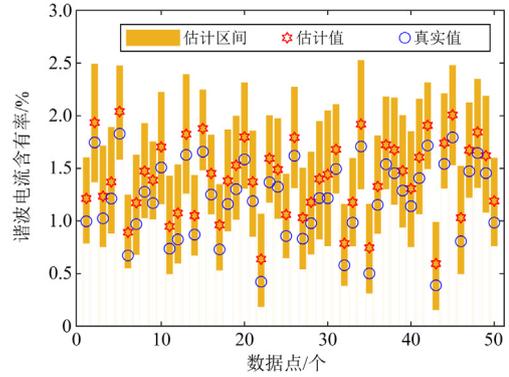


图 7 变电站 10 kV 进线处的谐波电流含有率

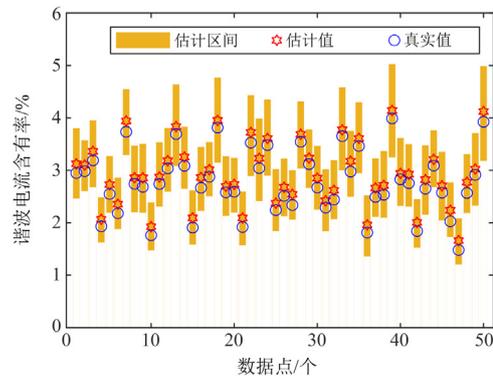
Fig. 7 H_{RTH} at 10 kV incoming line of the substation

图 8 展示了一段时间内金联线和金变线的 3 次谐波电流含有率及相角差的估计值与真实值，其余特征次序的估计结果见附录 A 图 A1—图 A3。需要说明的是，金联线下还含有大量分布式新能源接入，

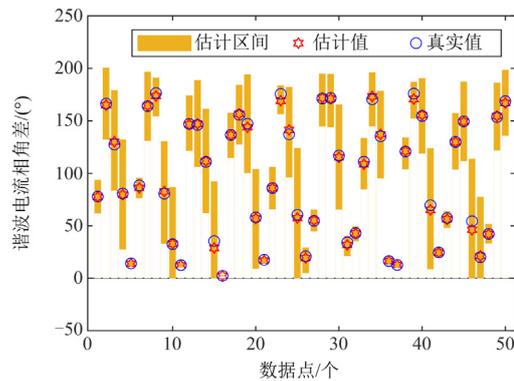
在测试时间段向母线倒送电能，使得 PCC 流向馈线的电流有效值小于两条馈线电流有效值的代数和，而谐波电流主要流向系统侧，因此 PCC 处的谐波电流含有率会大于各馈线的谐波电流含有率。



(a) 金变线3次谐波电流含有率估计结果



(b) 金联线3次谐波电流含有率估计结果



(c) 3次谐波电流相角差估计结果

图 8 3 次谐波电流估计结果

Fig. 8 Estimation results of 3rd harmonic current

表 6 给出了金联线和金变线的估计结果，可以看出各次谐波电流含有率(%)的估计值中位数和真实值的平均绝对偏差最大不超过 0.2%，且平均区间宽度最大不超过 3.8%，精度良好。两条馈线的谐波电流相角差估计结果中位数与真实值最大误差超

过 2° ,但是3次谐波电流相角差平均区间宽度较大,这是由于在分析时段内3次谐波电流相角波动较大,导致用最小二乘法计算的粒子初始谐波相角和真实值偏差较大,影响了粒子群算法的估计效果。

表6 谐波电流相角差估计结果及误差

Table 6 Estimation result of harmonic current phase angle difference and its error

馈线	评价指标	谐波次序			
		3	5	7	11
金联线谐波 电流含 有率/%	估计中位数平均	0.16	0.18	0.17	0.16
	绝对偏差				
	平均估计区间 宽度	1.22	3.74	1.55	0.99
金变线谐波 电流含 有率/%	估计中位数平均	0.20	0.20	0.20	0.19
	绝对偏差				
	平均估计区间 宽度	0.94	3.26	2.55	1.01
相角差/ $^\circ$	估计中位数平均	1.68	0.10	0.28	0.75
	绝对偏差				
	平均估计区间 宽度)	56.69	5.49	13.58	33.79

4 结论

本文针对分散式谐波污染愈加严重和馈线谐波电流监测难以全覆盖之间的矛盾,提出了一种基于

多源数据的馈线谐波频谱估计方法,获得了如下结论:本文所提方法利用从电能质量监测系统、调度系统、营销业务应用系统等平台获取的多源数据,仅需通过一台单通道电能质量监测终端获取母线谐波电压及其进线谐波电流,即可结合基本电气量数据推算出各馈线的各次谐波电流含有率及馈线间的谐波电流相角差,节约了变电站电能质量监测装置的配置成本,为谐波责任划分、谐波精准治理等工作提供了技术支撑。后续研究可以进一步优化初始值的选取方法或改进算法性能,以提高估计结果的稳定性,降低估计区间宽度的保守性。

附录 A

表A1 改进粒子群算法的参数

Table A1 Parameters of improved particle swarm optimization algorithm

参数名称	参数值
种群规模 N_{\max}	200
最大迭代次数 I_{itermax}	1000
ω_{\max}	0.8
ω_{\min}	0.2
$c_{1\max}$ 、 $c_{2\max}$	1.5、1.5
$c_{1\min}$ 、 $c_{2\min}$	0.5、0.5

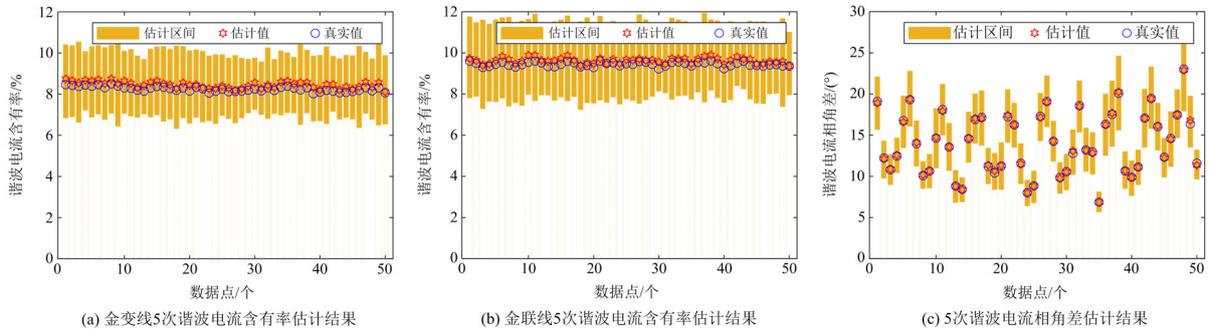


图 A1 5次谐波电流估计结果

Fig. A1 Estimation results of 5th harmonic current

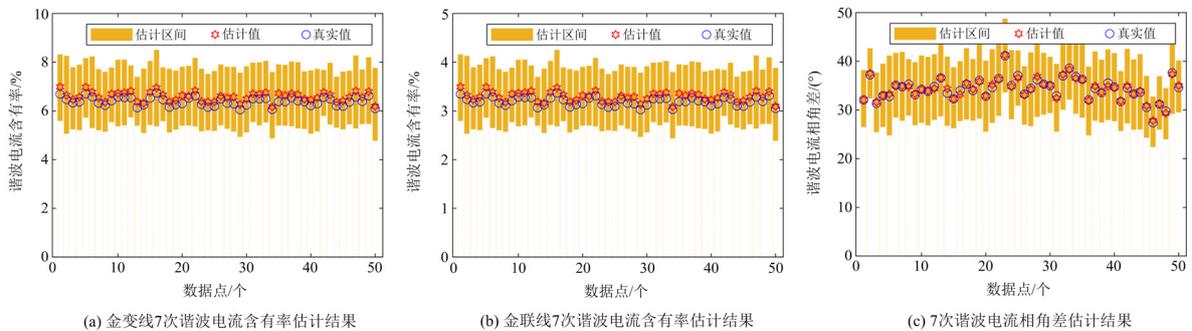


图 A2 7次谐波电流估计结果

Fig. A2 Estimation results of 7th harmonic current

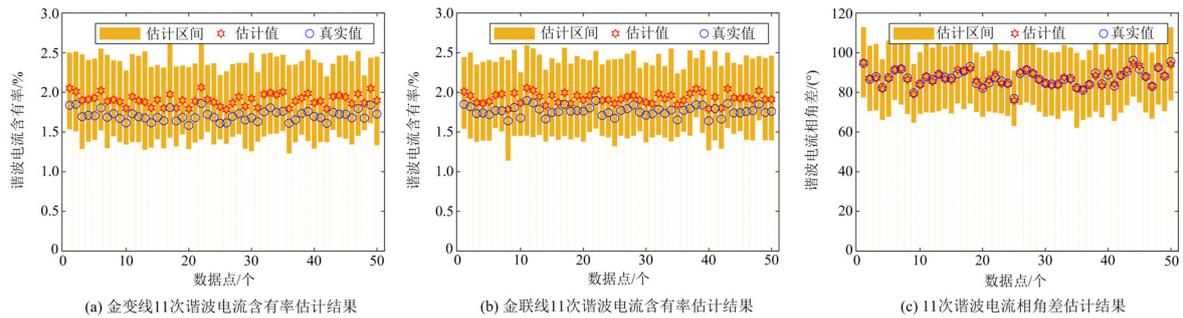


图 A3 11 次谐波电流估计结果

Fig. A3 Estimation results of 11th harmonic current

参考文献

[1] 黄远明, 张玉欣, 夏赞阳, 等. 考虑需求响应资源和储能容量价值的新型电力系统电源规划方法[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(4): 432-441.
HUANG Yuanming, ZHANG Yuxin, XIA Zanyang, et al. Power system planning considering demand response resources and capacity value of energy storage[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023, 57(4): 432-441.

[2] 张明, 徐诗露, 陆东亮, 等. 基于自适应 SRUKF 算法的电力系统动态谐波状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 102-111.
ZHANG Ming, XU Shilu, LU Dongliang, et al. Dynamic harmonic state estimation of a power system based on adaptive SRUKF[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 102-111.

[3] 周原冰, 杨方, 余潇潇, 等. 中国能源电力碳中和实现路径及实施关键问题[J]. 中国电力, 2022, 55(5): 1-11.
ZHOU Yuanbing, YANG Fang, YU Xiaoxiao, et al. Realization pathways and key problems of carbon neutrality in china's energy and power system[J]. Electric Power, 2022, 55(5): 1-11.

[4] 王清亮, 宋曦, 王旭东, 等. 背景谐波电压环境下的负载谐波电流检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 58-65.
WANG Qingliang, SONG Xi, WANG Xudong, et al. A load harmonic current detection method in a background harmonic voltage environment[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 58-65.

[5] 林顺富, 李育坤, 李寅, 等. 基于混合寻优算法及分离一致性判断的系统谐波阻抗估计[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 106-116.
LIN Shunfu, LI Yukun, LI Yin, et al. Harmonic impedance estimation based on a hybrid optimization algorithm and separation consistency screening[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 106-116.

[6] 林勇, 康佳乐, 余浩, 等. 大规模光伏发电电串补输电线路并网系统强迫次同步振荡机制[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(9): 1118-1127.
LIN Yong, KANG Jiale, YU Hao, et al. Mechanism of forced subsynchronous oscillation of large-scale photovoltaic power generation grid-connected system with series compensation transmission lines[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2022, 56(9): 1118-1127.

[7] WANG Yaojian, GU Jie, YUAN Lüzherui. Distribution network state estimation based on attention-enhanced recurrent neural network pseudo-measurement modeling[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(2): 1-16.

[8] 国家电网公司. 电能质量监测系统技术规范: Q/GDW 649—2011[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.

[9] 刘科研, 盛万兴, 秦梦雅, 等. 计及多种扰动源的有源配电网电能质量分析方法[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2303-2309.
LIU Keyan, SHENG Wanxing, QIN Mengya, et al. Power quality analysis for active distribution network considering multiple disturbance sources[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2303-2309.

[10] 罗淞泓, 舒勤, 刘勇, 等. 宽频域谐波谐振监测装置优化配置[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(4): 177-186.
LUO Songhong, SHU Qin, LIU Yong, et al. Optimized placement of wide-band frequency harmonic resonance monitoring device[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 177-186.

[11] 马思棋, 王忠. 基于贝叶斯优化弹性网络回归的谐波状态估计方法[J]. 中国电力, 2022, 55(8): 104-112.
MA Siqi, WANG Zhong. Harmonic state estimation method based on Bayesian optimized elastic network regression[J]. Electric Power, 2022, 55(8): 104-112.

[12] DE ARRUDA E F, KAGAN N, RIBEIRO P F. Harmonic distortion state estimation using an evolutionary strategy[J].

- IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 831-842.
- [13] GURSOY E, NIEBUR D. Harmonic load identification using complex independent component analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 24(1): 285-292.
- [14] 杨源, 臧天磊, 何正友. 一种谐波阻抗未知条件下的谐波源定位方法[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 222-226.
YANG Yuan, ZANG Tianlei, HE Zhengyou. A harmonic source location method under unknown harmonic impedance[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 222-226.
- [15] 王艳, 臧天磊, 何正友. 电网参数变化条件下的谐波状态分段估计方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 217-223.
WANG Yan, ZANG Tianlei, HE Zhengyou. Harmonic state segment estimation method under condition of power grid parameters change[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17): 217-223.
- [16] 马永硕, 齐林海, 肖湘宁, 等. 基于改进生成对抗网络的谐波状态估计方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(1): 139-145.
MA Yongshuo, QI Linhai, XIAO Xiangning, et al. Estimation method of harmonic state based on Improved generative adversarial network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(1): 139-145.
- [17] 国家电网公司. 电能质量监测终端技术规范: Q/GDW 650—2011 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [18] 刘艳章. 电能质量监测与辅助决策系统研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
LIU Yanzhang. Research on power quality monitoring and assistant decision-making system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [19] 国家能源局. 干扰性用户接入电力系统技术规范: DL/T 1344—2014[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [20] 王毅. 电能计量装置介绍[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(11): 119-121.
WANG Yi. Introduction to electric energy metering device[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(11): 119-121.
- [21] 章健, 栗鹏辉, 贺芳, 等. 非正弦电路无功功率及其对无功计量的影响[J]. 电测与仪表, 2007, 44(4): 9-12.
ZHANG Jian, LI Penghui, HE Fang, et al. Reactive power in nonsinusoidal electric circuit and its influence on reactive energy measurement[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2007, 44(4): 9-12.
- [22] 王兆安. 电力电子技术[M]. 5版. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [23] 肖湘宁, 徐永海, 陶顺. 电力系统电能质量[M]. 北京: 中国电力出版社, 2022: 54-55.
- [24] 孙彩, 李奇, 邱宜彬, 等. 余电上网/制氢方式下微电网系统全生命周期经济性评估[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4650-4660.
SUN Cai, LI Qi, QIU Yibin, et al. Economic evaluation of whole life cycle of the micro-grid system under the mode of residual power connection/hydrogen production[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4650-4660.
- [25] 国家电网公司. 电能质量评估技术导则: Q/GDW 10651—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [26] CIGRE W. 36-05. Harmonics, characteristic parameters, methods of study, estimates of existing values in the network[J]. Electra, 1981, 77: 35-54.
- [27] XIAO Chixin, CAI Zixing, WANG Yong. A good nodes set evolution strategy for constrained optimization[C] // 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation, September 25-28, 2007, Singapore, Singapore: 943-950.
- [28] 林坤杰, 潘夏, 张嫣, 等. 一种基于历史监测数据的谐波污染主特征群筛选方法[J]. 电气技术, 2017(1): 39-43.
LIN Kunjie, PAN Xia, ZHANG Yan, et al. The method for screening the principal characteristic group of harmonic pollution using the historical monitoring data[J]. Electrical Engineering, 2017(1): 39-43.

收稿日期: 2023-11-04; 修回日期: 2024-01-02

作者简介:

张逸(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电能质量、主动配电网、电力数据分析等; E-mail: zhangyi@fzu.edu.cn

林楠(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量分析与控制技术; E-mail: 1486925523@qq.com

刘必杰(1997—), 男, 通信作者, 硕士, 主要研究方向为电能质量分析与控制技术。E-mail: fzu-ee-liu@foxmail.com

(编辑 张颖)