

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191397

# 基于实测数据的电动汽车充电站电能质量分析方法

孙可慧<sup>1</sup>, 刘国鹏<sup>2</sup>, 李少雄<sup>3</sup>, 邢强<sup>1</sup>, 陈中<sup>1</sup>

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 南京能瑞电力科技有限公司, 江苏 南京 211100;  
3. 国网天津市电力公司, 天津 300000)

**摘要:** 电能质量检测分析是研究电动汽车与电网互动的前提和基础。而现有工作大都没有采用真实的数据进行充电站电能质量评估研究, 已有的实测数据研究中时间分析尺度多为分钟级, 且缺乏对不同类型充电站进行差异性对比分析。为此提出一种基于实测数据的电动汽车充电站电能质量分析方法。首先通过充电平台数据可视化, 提取综合充电站和公交充电站的实际到站充电车辆的时序特性。其次通过仿真建模奠定充电机拓扑对谐波特性影响的理论基础, 并给出了仿真与实测数据的对比。然后结合相关国家标准对两站实测电能质量指标进行定性和定量评估并比较其优劣。最后基于实测数据设计不同实验场景深入挖掘影响充电站谐波特性的关联因素。结果表明: 综合充电站的谐波水平优于公交充电站; 电动私家车相比电动巴士车对充电站造成的电流谐波更小。此外充电总功率大小、多台充电桩谐波源之间的谐波相消幅度、电动汽车的入断事件、不同负荷组合等因素都会对充电站电能质量产生影响。该方法为电动汽车充电站谐波监测与治理提供了一种新思路。

**关键词:** 电动汽车; 充电站; 谐波分析; 实测数据; 数据挖掘; 时序分析

## Power quality analysis method of an electric vehicle charging station based on measured data

SUN Kehui<sup>1</sup>, LIU Guopeng<sup>2</sup>, LI Shaoxiong<sup>3</sup>, XIN Qiang<sup>1</sup>, CHEN Zhong<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Nanjing NengRui Electric Power Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, China; 3. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300000, China)

**Abstract:** The detection and analysis of power quality is the purpose and basis for studying the interaction between electric vehicles and the power grid. However, most existing work has not used real-world data to evaluate the power quality of charging stations. The time analysis scale of the existing measured data research is mostly at minute level, and there is a lack of comparative analysis on the different characteristics of different types of charging stations. Given this, this paper presents a power quality analysis method for an electric vehicle charging station based on measured data. First, through the visualization of the charging platform data, the time sequence characteristics of the actual arrival of charging vehicles at the integrated charging station and the bus charging station are extracted. Secondly, the theoretical basis of the influence of charger topology on harmonic characteristics is established by simulation modeling, and the comparison between simulation data and measured data is given. Then, the measured power quality indices of the above two types of station are qualitatively and quantitatively evaluated in combination with relevant national standards, and their advantages and disadvantages are compared. Finally, based on the measured data, different experimental scenarios are designed to deeply mine the related factors affecting the harmonic characteristics of charging stations. The results show that the harmonic level of an integrated charging station is better than that of a bus charging station. Compared with electric buses, electric private vehicles cause less current harmonics to charging stations. In addition, factors such as the total charging power, harmonic cancellation amplitudes between harmonic sources of multiple charging piles, access and disconnection event of electric vehicles, and different load combinations etc., all have impact on the power quality of the charging station. This approach provides a novel idea for harmonic monitoring and treatment of electric vehicle charging stations.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900602) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGTJBH00YXJS1902795).

**Key words:** electric vehicle; charging station; harmonic analysis; measured data; data mining; time series analysis

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900602); 国家电网公司科技项目资助(SGTJBH00YXJS1902795)

## 0 引言

新能源作为时代发展的必由之路, 正被广泛应用于各个领域。新能源在汽车领域的应用催生了电动汽车(Electric Vehicle, EV)的磅礴发展<sup>[1]</sup>。根据工业和信息化部报告显示, 2018年我国新能源汽车的产销分别达到了127.0 万辆和125.6 万辆, 已成为全球电动汽车产销第一大国<sup>[2]</sup>。而大规模电动汽车的行驶和充电必然与电网与交通网产生融合交互。

在规模化电动汽车发展的背景下, 电动汽车充换电站作为电动汽车充能的配套设施, 其规划布局成为了电动汽车产业友好发展的研究重点<sup>[3]</sup>。在电动汽车充电设施中存在大量电力电子换流器及非线性负载, 这必然会对配电网电能质量产生影响, 导致诸如电压暂降、电网谐波、电压闪变以及三相不平衡等电能质量问题的发生<sup>[4]</sup>。因此对电动汽车充电站的电能质量扰动进行识别<sup>[5]</sup>, 并对其进行有效评估, 能够为电动汽车有序充电和充电站运行调度提供前提和基础, 有利于电动汽车与电网友好互动的普及与推广<sup>[6-7]</sup>。

目前, 国内外学者已开展了诸多针对电动汽车充电谐波特性的研究。文献[8-9]通过搭建不同拓扑结构的充电机模型, 仿真分析充电机整流装置对谐波特性的影响。文献[10]研究了不同类型的电动汽车(如常规乘用车和电动公交车)对低频和高频网络谐波失真的影响, 并通过实测证明电动汽车充电对谐波失真水平的影响程度有限。文献[11]研究了不同充电模式(快充、半快充、慢充)下电动汽车充电功率及谐波特征量的变化特性, 并通过实测数据分析了电动汽车工作在车-网互动模式(Vehicle to Grid, V2G)下谐波特征量的变化特性。文献[12]在不同充电场景下探讨了不同充电模式(快充、慢充)同时工作时的谐波规律, 给出了充电机组合配置的方案。文献[13]通过搭建单台和多台充电机的仿真模型, 分析了各次谐波含有率、电流总谐波畸变率和功率因数等谐波特征量随充电功率变化的规律及充电机台数对谐波特征量的影响。文献[14]仿真对比了单相与三相配电网模式下不同数量电动汽车接入电网后的谐波变化规律, 并结合配变阻抗测算理论研究了变压器容量对谐波的影响。

虽然上述文献对电动汽车充电过程中的谐波特性进行了有效分析和研究, 但此类文献多围绕电动汽车单体或充电桩级的电能质量展开。而在充电站实际运行中多台充电桩间存在谐波叠加相消现象等多机间的交互影响, 因此对站级充电过程谐波特征

参数的有效检测与提取更符合实际运行规律。为此, 文献[15]在综合考虑充电模式、电池特性、用户驾驶习惯等因素的基础上建立了快充电站的功率时序概率密度函数, 并建立计及时序特性的电动汽车快充电站谐波分析模型, 结合实际数据分析的结果表明谐波总畸变率呈现明显的时序特性。文献[16]通过仿真实例比较了几种典型谐波叠加算法的误差度, 提出了一种基于谐波相位分布规律的叠加算法, 仿真结果表明该方法简便高效且检测精度较高。文献[17]考虑了分时电价、离开时间和等待时间等随机影响因素, 对电动汽车充电站谐波电流的概率分布进行建模, 通过谐波潮流的概率计算, 分析了电动汽车充电站对配电网的影响。文献[18-19]考虑了电动汽车规模化充电对系统电压稳定的影响, 并提出了充电站选址方案。

然而上述文献多基于仿真建模分析, 缺失实测数据来有效验证充电谐波对电网的冲击, 随着电动汽车以及充电设施数据互联互通性质的逐步完善, 有必要采用实测数据挖掘电动汽车充电过程的谐波特性规律。

为此, 文献[20-21]结合充电站级的监测数据, 定量分析了电动汽车充电站运行过程中的各项电能质量问题。文献[22]分析了大规模电动汽车充电对波黑城市中压配电网的影响, 并得出电动汽车大规模充电会使峰值负荷增加、能量损失增多、改变电压分布及导致变压器过载的结论。文献[23]基于芬兰某地电动汽车充电的测试数据, 从不同类型电动汽车充电电流形成的谐波分布规律出发, 研究电动汽车充电对芬兰配电网的影响, 但该数据形式不够直观, 没有定量分析。文献[24]利用台湾电力公司配电系统的实测充电数据, 建立了电动汽车的随机谐波模型及其使用场景的随机模型。基于这些模型, 提出了一种考虑电动汽车充电不确定性的电能质量分析方法, 并研究了它们对配电系统的影响。

综上, 针对现有研究的不足, 本文从数月时间段的站级实测数据入手, 从数据驱动<sup>[25]</sup>着手提出了一种基于实测数据的电动汽车充电站电能质量分析方法。该方法首先通过电能质量监测平台数据, 提取了不同类型充电站(综合站与公交站)的到站充电车辆时序特性。其次参考充电站充电设施的实际情况建立不控整流充电桩的结构拓扑, 在Matlab/Simulink中仿真探究充电桩拓扑对谐波特性的影响, 并给出了仿真与实测数据的对比, 为后续研究提供理论基础。然后结合实测数据对比两类充

电站的各项电能质量指标，并参考相关国家标准进行定量评估。最后，结合实测数据深入挖掘影响充电站谐波特性的关联因素，例如充电桩拓扑、电动汽车入断事件、负荷组合等与充电站谐波特性之间的关系。分析结果表明，上述因素对充电站谐波水平都会造成影响。因此在充电站建设过程中需要综合考虑各项因素，对谐波治理提出不同程度的要求。

本文为充电站建设过程中的谐波预防、提高电动汽车充电系统的电能质量水平提供了指导意义。

## 1 试验场景

### 1.1 场地配置

本文以南京某公司正在运营的两座电动汽车充电站作为试验场地。其中A站为综合站，既为电动私家车(包含营运车)提供充电服务，又为电动巴士车提供充电服务；而B站为电动公交场站，仅为固定线路的电动公交车提供充电服务。两站充电桩入网示意图如附录A中图A1所示，由图A1可知，A站采用80 kW交流充电桩与60 kW直流充电桩混合入网的工作模式；B站采用一台充电总机控制四台充电桩的入网模式，直流充电总机额定功率240 kW，每台充电机额定功率60 kW。试验仪器选用PQube 3512电能质量分析仪，安装位置为变压器低压侧，测量时间持续3个月。仪器具体配置见表1。

表 1 电能质量分析仪配置

Table 1 Configuration of power quality analyzer

电力配置	标称 线电压	标称 相电压	标称 频率	电压互感 器变比	电流互感 器变比
Wye/Star	400 V	231 V	50 Hz	1:1	5 A:0.333

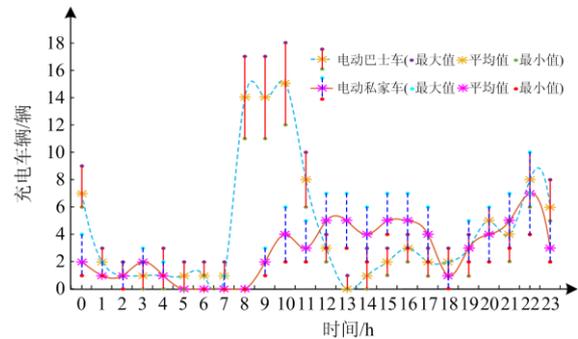
注：变压器接线为星型，实际标称线电压为400 V而非380 V，实际标称相电压为231 V而非220 V，后续涉及电压偏差计算时标准值采用实际标称值。

### 1.2 充电平台数据可视化

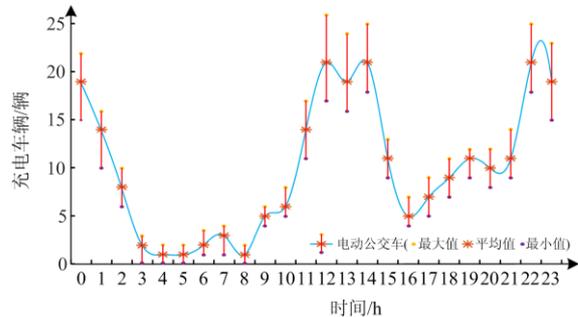
在数据可视化之前，由于数据记录和传输过程中存在坏点数据，因此需要对数据进行清洗。剔除充电时长小于5 min、充电容量小于1 kW、充电记录字段为空的无效数据。其次以一个月的数据为测量样本并按天取平均值，得到如图1所示的每日到站充电车辆时序特性图。本文根据参与充电过程的电动汽车的功能用途，将其划分为电动私家车、电动巴士车、电动公交车。其中，电动私家车包含电动出租车、电动私家车和电动公用车等，电动巴士车则为不具有固定线路的客运大巴。

由图1可知，A站作为综合站，整体上充电高峰时段集中在白天，充电高峰分布在8:00—11:00和20:00—24:00时段。电动私家车的主要充电时段为

9:00—23:00，且充电车次在一天之中时间分布相对平稳；电动巴士车的充电高峰时段分布在8:00—11:00和20:00—24:00，与整站负荷高峰相重合。可见综合站的充电规律受大容量电动巴士车的影响较大。而B站作为电动公交场站，整体上充电时段夜间多于白天，充电高峰集中在11:00—15:00和22:00—1:00时段，这与B站公交场站的公交出行运营规律相吻合：夜间公交车结束运营停放在场站进行电能补给，日间按照公交线路安排进行工作，并在中午时段进行集中快速充电。



(a) A站充电车辆时序特性



(b) B站充电车辆时序特性

图 1 每日到站充电车辆时序特性

Fig. 1 Timing characteristics of daily on-site charging vehicles

## 2 充电站谐波特性仿真分析

充电桩的非线性结构导致其接入电网后产生大量谐波，引发波形畸变。因此先参考充电站充电设施的实际拓扑建立充电桩谐波测量模型，为后续针对实测数据研究充电站的谐波特性奠定理论基础。

### 2.1 充电桩建模

目前市场使用率较高的充电桩，其拓扑主要由AC-DC整流器及其配套的LC滤波器和DC-DC变换电路组成。三相交流电经整流器和滤波电路后，为后级DC-DC变换器提供稳定的直流输入，DC-DC变换器的输出经滤波后再为电动汽车的动力电池提供能量。充电桩结构拓扑如图2所示。

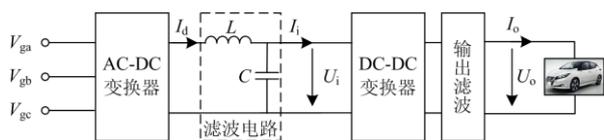


图2 充电桩结构拓扑

Fig. 2 Structural topology of charging pile

由图2, 本文参考试验场景充电设施的实际运行情况设计谐波测量模型。电网供电等级设置为10 kV, 变压器等级设置为10/0.4 kV, Dyn11接法, 额定容量500 kVA。滤波电感 $L=1.5$  mH, 滤波电容 $C=0.2$  mH。选择站内使用率较高的60 kW直流充电桩作为研究对象, 其相关参数见表2。

表2 充电桩参数

Table 2 Parameters of charging pile

最大充电功率/kW	输出电压范围/V	输出电流范围/A	效率/%
60	250~750	0~80	≥93.5

$$R = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i^2}{P_i} = \frac{\eta U_i^2}{P_o} = \frac{\eta U_i^2}{U_o I_o} \quad (1)$$

式中:  $U_i$ 、 $I_i$ 、 $P_i$ 分别为DC-DC变换器的输入电压、输入电流和输入功率;  $U_o$ 、 $I_o$ 、 $P_o$ 分别为动力电池的输出电压、输出电流和输出功率;  $\eta$ 为DC-DC变换电路的转换效率。

目前电动汽车充电一般采用定电流与定电压相结合的方式, 前期定电流使电池深度充电, 当电池端电压达到额定电压后变为定电压充电, 避免发生过充现象。文献[26]将直流充电桩输出功率拟合式(2)形式, 其中,  $m$ 为定电流充电时间, 经验取值 $m=150$ ,  $P_{\text{omax}}$ 为充电机最大输出功率, 对于本文研究的直流充电桩而言,  $P_{\text{omax}}=60$  kW。

$$P_o(t) = \begin{cases} 0.79P_{\text{omax}}t^{0.048}, & 0 < t \leq m \\ P_{\text{omax}}e^{-0.03 \times (t-m)}, & t > m \end{cases} \quad (2)$$

根据充电桩拓扑按照整流装置的不同, 可分为不控整流充电桩、PWM全控整流充电桩、十二脉冲整流充电桩等。

## 2.2 不控型充电桩接入系统的谐波特性分析

常规充电站采用典型不控整流充电桩, 因此进行重点分析。不控型充电桩的整流装置为三相不控整流器, 其结构简单且无需控制电路。简化后的等效拓扑结构如图3所示。

因三相不控整流器的脉动数 $p=6$ , 因而主要产生 $6k \pm 1$ 次谐波。对交流侧a相电流进行傅里叶分解可以得到各次谐波电流的叠加式如式(3)所示, 其中 $I_n$ 代表各次谐波电流有效值, 其值如式(4)所示;  $U_d$ 为直流侧电压有效值, 其计算过程如式(5)所示。

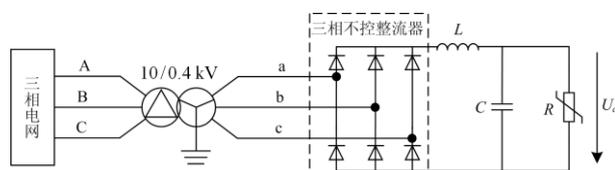


图3 不控型充电桩等效结构图

Fig. 3 Equivalent structure diagram of uncontrolled charging pile

$$i_a = \sqrt{2}I_1 \sin \omega t + \sum_{k=1,2,3,\dots}^{\infty} (-1)^k \sqrt{2}I_n \sin \omega t \quad (3)$$

$$I_n = \frac{\sqrt{6}}{n\pi} I_d (n=6k \pm 1, k=1, 2, 3, \dots) \quad (4)$$

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/3}^{\pi/3} \sqrt{2}U_{ab} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot 231 = 540 \text{ V} \quad (5)$$

在Matlab/Simulink中搭建不控型充电桩拓扑, 并根据式(1)选择等效电阻值 $R=0.935 \times 540^2 / 60000 \approx 5 \Omega$ , 仿真得到一个工频周期内变压器高压侧电流波形的FFT谐波分析结果如图4所示。

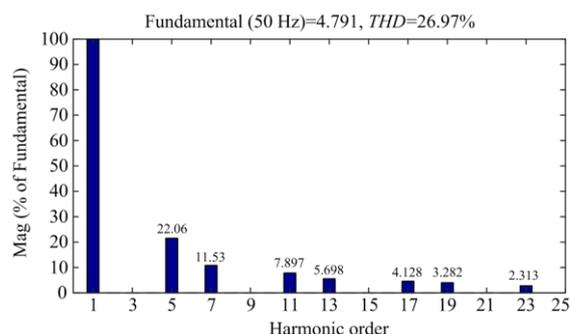


图4 不控型充电桩FFT谐波分析

Fig. 4 FFT harmonic analysis of uncontrolled charging pile

结合图3和图4, 从仿真结果可以看出, 电流总谐波畸变率 $THD_i=26.97\%$ , 其中5、7、11、13次谐波严重, 且谐波次数越高, 谐波幅值越小, 谐波分布特性与式(4)的理论推导相符。仿真结果验证了不控型充电桩主要产生 $6k \pm 1$ 次谐波的理论, 但不控整流型充电桩的谐波总含量过高, 需要采用相应的谐波治理措施提高电能质量。

## 2.3 充电站接入系统的谐波特性分析

将2.2节典型不控型充电桩并联接入变压器二次侧, 构成充电站简化等效模型如图5所示。

在Matlab/Simulink中搭建两桩并联的充电站模型, 在充电总功率均为 $P=80$  kW的情况下, 使两台充电桩分别运行在等功率和不等功率两种模式下(参数见表3), 仿真得到一个工频周期内变压器低压侧电流的FFT谐波分析如图6所示。

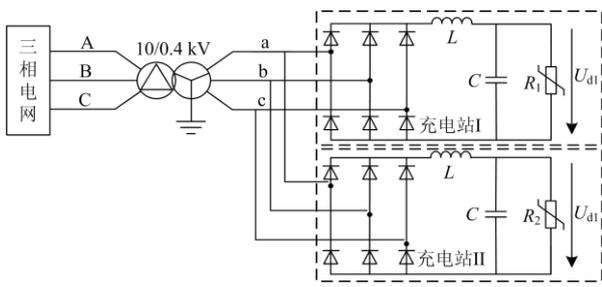


图 5 充电站简化等效结构图

Fig. 5 Equivalent structure diagram of charging station

表 3 充电站仿真参数

Table 3 Simulation parameters of charging station

仿真参数	模式一：等功率		模式二：不等功率	
	充电桩 I	充电桩 II	充电桩 I	充电桩 II
充电功率/kW	40	40	20	60
等效电阻/ $\Omega$	7.5	7.5	15	5

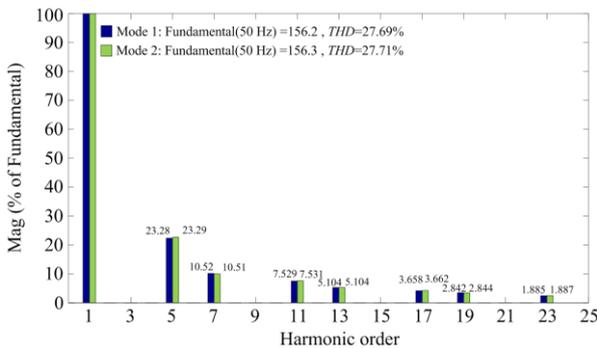


图 6 充电站 FFT 谐波分析

Fig. 6 FFT harmonic analysis of charging station

可以观察到，在充电总功率相等的前提下，充电桩功率不同对各次谐波电流与电流总谐波畸变率大小影响不大。

进一步，把仿真数据与实测充电站的数据结合后进行对比分析。在实测充电站投入两台充电桩，且充电总功率  $P = 81.02 \text{ kW}$  时记录谐波数据，得到仿真与实测对比数据如表 4 所示。

表 4 仿真与实测谐波电流含量对比

Table 4 Comparison of simulated and measured harmonic current content

类别	$I/A$	$THD_i / \%$	H5/ $\%$	H7/ $\%$	H11/ $\%$	H13/ $\%$	H17/ $\%$	H19/ $\%$
仿真	156.2	27.7	23.3	10.5	7.53	5.10	3.66	2.54
实测	131.3	5.24	3.75	2.83	1.55	1.18	0.97	0.81

由表 4 可知，在仿真数据与实测数据中，均有谐波幅值随谐波次数升高而减小的规律，但各次谐

波电流及电流总谐波畸变率存在误差。原因在于：

1) 仿真所用充电桩模型为等效模型，等效可变电阻忽略了后级 DC-DC 变换器及动力电池差异对充电桩谐波相角造成的影响，存在一定误差。

2) 实测充电桩作为谐波源，当不同谐波相角的谐波源并联时存在谐波相消事件，使  $HRI_n$  和  $THD_i$  相比于仿真值有所减小。

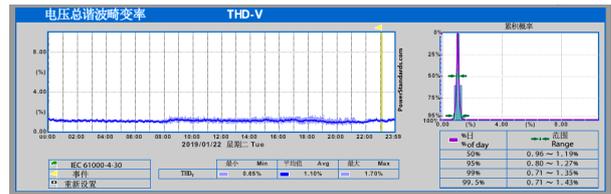
因此通过仿真与实测数据对比可知，仿真环境存在一定的局限性，且不同充电机厂家在电力电子电路及控制系统方面的差异会对充电站电能质量产生较大的影响，因此使用实测数据进行电能质量分析具有一定的必要性。

### 3 实测电能质量指标

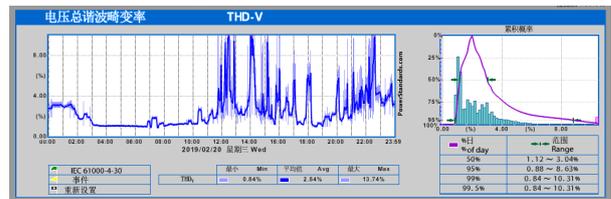
在仿真建模的基础上，为了评估充电站实际电能质量分布特性，结合国标要求，采用实测数据检测分析。

1) 国家标准 GB/T 14549-1993《电能质量 公用电网谐波》对电压总谐波畸变率  $THD_v(\%)$  作出了规定(附录 A 表 A1)，标称电压 0.38 kV 等级的电网需满足  $THD_v \leq 5\%$ 。

仪器实测电压总谐波畸变率如图 7 所示，由图 7 可知，在测量时间内 A 站  $THD_{vmax} = 1.7\%$ ，符合国家标准；B 站  $THD_{vmax} = 13.74\%$ ，超过国家标准。



(a) A 站电压总谐波畸变率



(b) B 站电压总谐波畸变率

图 7 实测电压总谐波畸变率

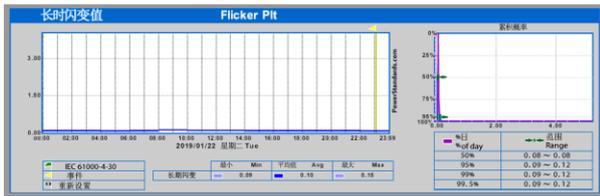
Fig. 7 Measured voltage total harmonic distortion rate

2) 国家标准 GB/T 29316-2012《电动汽车充换电设施电能质量技术要求》对各次谐波电压与谐波电流的限值也作出了要求，具体参见另一国标文件 GB/T 14549-1993《电能质量 公用电网谐波》(附录 A 表 A1、A2)。A 站与 B 站实测奇次谐波电压、谐波电流趋势图分别见附录 B 中图 B1、B2 与图 B3、B4。

从图中可知 A 站  $< 10 \text{ kHz}$  的奇次谐波电压含有量与谐波电流值均符合国家标准; B 站  $< 10 \text{ kHz}$  的奇次谐波电压与谐波电流中 11、13 次谐波电压含有量超过国家标准, 11、13、15、17 次谐波电流值超过国家标准。

3) 国家标准 GB/T 12326-2008 《电能质量电压波动和闪变》对电压长时闪变值  $P_{lt}$  作出了规定(附录 A 中表 A3), 在测量时间一周以上, 采样间隔 2 h 情况下, 电压等级  $\leq 110 \text{ kV}$  的电网需满足  $P_{lt} \leq 1$ 。

仪器实测电压长时闪变值如图 8 所示。由图 8 可知在测量时间内 A 站  $P_{lmax} = 0.15$ , B 站  $P_{lmax} = 0.43$ , 均符合国家标准。



(a) A 站电压长时闪变



(b) B 站电压长时闪变

图 8 实测电压长时闪变

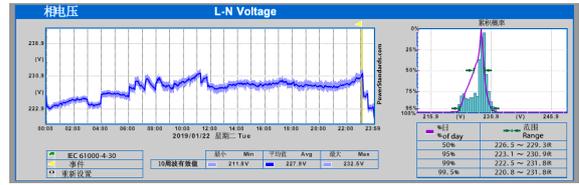
Fig. 8 Measured long-term flicker of voltage

4) 国家标准 GB/T 29316-2012 《电动汽车充换电设施电能质量技术要求》对电动汽车充换电设施的供电电压偏差值作出了具体规定(附录 A 中表 A4)。标称电压  $0.38 \text{ kV}$  等级的充换电站供电电压正、负偏差需要维持在  $-7\% \sim +7\%$  以内。

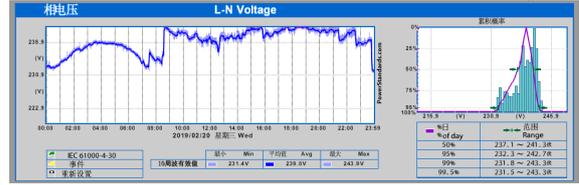
仪器实测变压器低压侧相电压如图 9 所示, 由图 9 可知在测量时间内 A 站  $U_{max} = 232.5 \text{ V}$ ,  $U_{min} = 211.8 \text{ V}$ , 电压偏差  $-8.3\% \sim +0.65\%$ , 超过国家标准; B 站  $U_{max} = 243.9 \text{ V}$ ,  $U_{min} = 231.4 \text{ V}$ , 电压偏差  $+0.17\% \sim +5.6\%$ , 符合国家标准。

5) 国家标准 GB/T 29316-2012 《电动汽车充换电设施电能质量技术要求》对负序电压不平衡度作出了规定, 要求电网正常运行时其值不能超过 2%, 短时不得超过 4%。

仪器实测电压负序不平衡度如图 10 所示, 可知在测量时间内 A 站  $V_{\_UnbalNegseq_{max}} = 0.53\%$ , B 站  $V_{\_UnbalNegseq_{max}} = 0.43\%$ , 均符合国家标准。



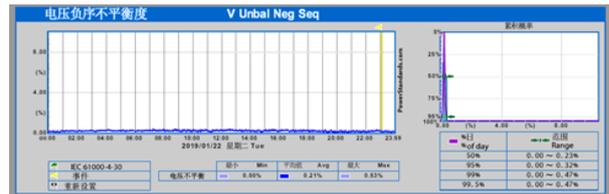
(a) A 站低压侧相电压



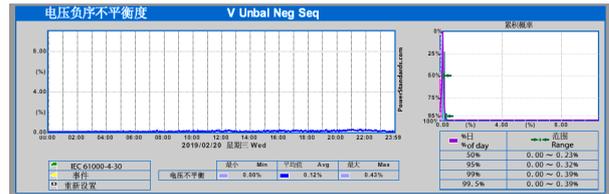
(b) B 站低压侧相电压

图 9 实测变压器低压侧相电压

Fig. 9 Measured phase voltage on the low voltage side of the transformer



(a) A 站负序电压不平衡度



(b) B 站负序电压不平衡度

图 10 实测负序电压不平衡度

Fig. 10 Measured negative sequence voltage imbalance

通过对比不难发现, B 站的电压与电流谐波含量远大于 A 站。通过后文分析可知, 在单个充电站层面, 充电总功率越大, 各次谐波电流越小。理论上 B 站充电总功率更大, 其谐波含量应小于 A 站, 而实际正相反, 进一步可知是充电站性质对谐波水平产生影响。因而得出结论: 综合充电站的谐波水平相对于公交场站的更好。由此可知在进行充电站建设时, 需要考虑充电站性质的差别, 对谐波治理提出不同程度的要求。

## 4 充电站谐波特性分析

电动汽车充电站实际运行中的谐波分布受很多因素的影响, 例如充电桩拓扑、电动汽车接入及断开动作、不同负荷组合等。本节结合 A、B 充电站的实际数据分析各谐波影响因素与充电站谐波特性之间的关系。

#### 4.1 不同充电桩组合接入系统的谐波特性

选取采样间隔 10 min、时长 24 h 的数据为研究样本。针对两站不同的电气拓扑归纳提取了两种实测情景，探究不同的充电桩组合接入对总谐波畸变率、各次谐波含量等谐波特征量的影响。

方案一(A 站): 60 kW 直流桩与 80 kW 交流桩组合接入

为了研究充电总功率与电流总谐波畸变率之间的关系，将充电总电流作为两者的中间桥梁，先建立充电总功率与充电总电流之间的关系，其次建立充电总电流与电流总谐波畸变率之间的关系。为此给出了某天的充电总有功功率  $P$ 、变压器低压侧总电流  $I$ 、变压器低压侧总电压  $U$  与真功率因数  $PF_{\text{true}}$  等基础充电数据，其实时对应关系如图 11 所示。

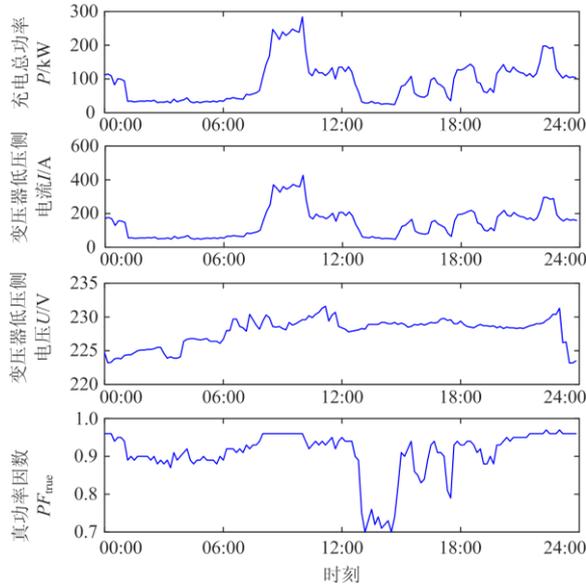


图 11 A 站基础充电数据趋势图

Fig. 11 Trend chart of basic charging data of station A

由图可知，A 站变压器低压侧电压  $U$  最高值为 231.6 V，最低值为 223.2 V，因为受电网电压钳制所以无明显变化规律。充电总功率  $P$  的高峰时段出现在 8:30—10:00，低谷时段出现在 1:10—7:00 和 13:00—14:40，峰谷差达到 259.6 kW。充电总电流  $I$  的高峰时段为 8:30—10:00，低谷时段为 1:00—7:00 和 13:00—14:40。可知  $P$  和  $I$  的峰谷时段重合，且变化趋势近乎一致，两者都可以反应负荷变化的趋势。

此外，在充电桩使用率较高的白天(9:00—20:00)，真功率因数  $PF_{\text{true}}$  的变化趋势与充电总功率及总电流变化趋势呈正相关，即  $PF_{\text{true}}$  随着充电总功率的增大而增大，随着充电总功率的减小而减小；

而在充电桩闲置的夜晚(1:00—7:00)， $PF_{\text{true}}$  的变化与充电总功率无关，保持在 0.9 左右。

值得注意的是，本文讨论的功率因数特指真功率因数  $PF_{\text{true}}$ ，区别于普通的基波功率因数  $\cos\varphi$ ，其计算过程考虑了谐波的影响， $PF_{\text{true}}$  与  $\cos\varphi$  的关系式为

$$PF_{\text{true}} = \frac{1}{\sqrt{1+(THD_i)^2}} \cdot \cos\varphi \quad (6)$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{V_{\text{rms}} \cdot I_{\text{rms}}} = \frac{P}{S} \quad (7)$$

式中， $THD_i$  为电流总谐波畸变率，表示谐波总电流有效值与基波电流有效值的比值，它的值包含了各次谐波电流值  $I_n$  在内，代表了电流波形相对于正弦波产生的畸变幅度，能反映谐波对电网的危害程度。各次谐波电流含有率  $HRI_n$  代表了各次谐波电流相对基波电流的大小。 $THD_i$  和  $HRI_n$  之间的数量关系如式(8)所示。

$$THD_i = \sqrt{\sum_{k=2}^n HRI_k^2} \quad (8)$$

为精细化分析谐波电流特性，建立充电电流与电流总谐波畸变率的关系，提取  $THD_i$  和  $HRI_n$  作为谐波电流特征量，定量分析其随电流实时变化的趋势如图 12 所示。 $HRI_n$  只选取了含量较高的 5、7、11、13 次谐波。

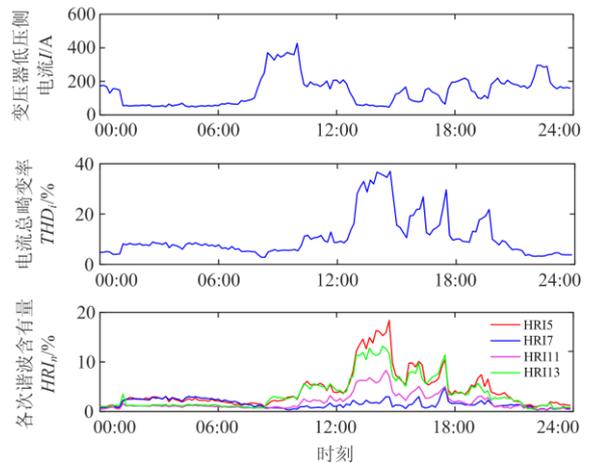


图 12 A 站谐波电流特征量变化趋势图

Fig. 12 Trend chart of harmonic current characteristic of station A

由图 12 可知：在充电桩使用率较高的白天， $THD_i$  的高峰时段出现在 13:00—14:40，和  $I$  的低谷时段重合，进一步发现， $THD_i$  随着  $I$  的增大而减小，两者呈负相关；此外，各次谐波电流含量  $HRI_n$  呈现

相同的变化趋势, 都在 13:00—14:40 出现峰值时段, 在 1:10—7:00 出现低谷时段, 且上升沿和下降沿均重合; 进一步观察发现,  $HRI_n$  与  $THD_i$  增减趋势相同, 符合式(8)的理论推导。至此可知, 在充电站正常工作的情况下,  $P$  与  $I$  呈正相关,  $THD_i$  与  $I$  呈负相关, 因此  $THD_i$  和  $HRI_n$  与  $P$  呈负相关。

值得注意的是, 在前一节对不控整流充电桩的建模中得出了理想状况下谐波次数越高时谐波含量越小的结论, 而实测数据显示 11、13 次谐波含量反而大于 7 次谐波含量。原因为实际充电站在运行过程中, 不同功率的谐波源之间存在谐波叠加抵消现象。工作中的充电桩作为谐波源, 即便额定功率相同, 在实际运行时提供的充电功率也受接入时间以及 SOC 等因素的影响。不同充电功率的单机谐波源之间存在谐波矢量角  $\angle\theta_{h1} - \theta_{h2}$ , 多谐波源公共连接点处的总谐波电流不仅受单谐波源的谐波电流  $I_h$  幅值影响, 亦与谐波矢量角有关, 矢量迭加导致谐波相消。此处 11、13 次谐波源之间的矢量迭加相消幅度较小, 导致测量点处的 11 次、13 次谐波总电流大于 5、7 次谐波总电流。国家标准 GB/T 14549-1993《电能质量 公用电网谐波》中规定了多谐波源之间同次谐波电流矢量迭加的具体方法。受限于本次测量仪器的实际条件, 并未获得各次谐波相位的详细数据, 无法具体计算谐波抵消程度, 这将为后续研究提供方向。

此外, 电动汽车的频繁接入和断开对充电站电压谐波的产生也造成了一定影响, 这种接入及断开动作带来的频繁负荷波动也导致了电压闪变的发生。为了具体分析电动汽车充电过程中的负荷波动对谐波电压的影响, 绘制了电压总谐波畸变率  $THD_v$  随充电总功率  $P$  实时变化的趋势, 同时将衡量负荷波动的特征量: 电压短时闪变  $P_{st}$  (测量间隔 10 min)、电压长时闪变  $P_{lt}$  (测量间隔 2 h) 的变化趋势也相应给出, 并绘制图 13 所示趋势图。

初步观察图 13 发现, A 站  $THD_v$  随  $P$  变化的规律并不明显。但进一步观察 7:30—10:00(时段①)和 14:30—19:30(时段②)发现: 在白天负荷较高即 EV 集中充电的时段, 充电功率  $P$  的变化导致  $THD_v$  出现相似变化趋势: 7:40 时  $P$  陡增 307.1%, 导致  $THD_v$  突增 25.6%, 18:30 时  $P$  陡降 57.9%, 导致  $THD_v$  突降 15.6%。在夜间(1:00—7:00)负荷较低即充电桩闲置, 此时电压畸变现象虽然依旧存在, 但  $THD_v$  不会出现突变现象。此外, 本文充电站的电压短时闪变  $P_{st}$  主要有两个影响因素, 上一级电网的负荷波动及这一级电网的负荷波动。上一级电网的负荷波动

并不可获得, 而这一级的负荷波动事件中 EV 的入断动作影响最大。观察 22:30—23:20(时段③)发现此时刻  $P_{st}$  出现一个值为 1.5 的尖峰, 而  $P$  陡降 46.11%,  $THD_v$  也出现尖峰值 1.24%, 意味着此时刻存在 EV 断开动作, 并且断开动作会造成电压总谐波畸变率的突变。

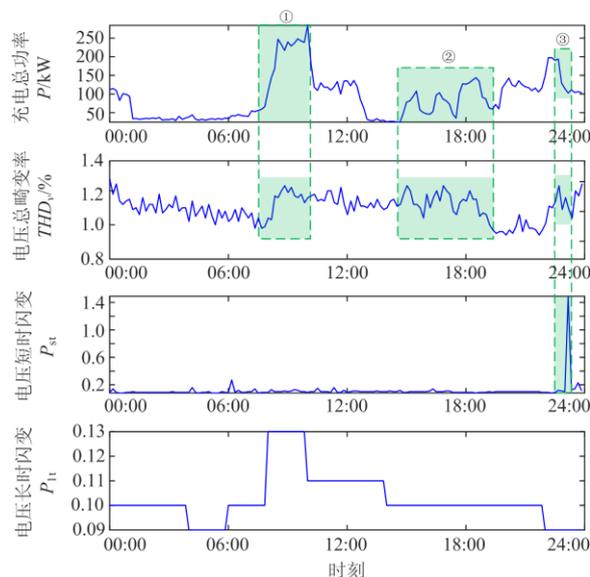


图 13 A 站谐波电压特征量变化趋势图

Fig. 13 Trend chart of harmonic voltage characteristic of station A

方案二(B 站): 单一功率 60 kW 直流桩接入  
同理, 通过图 14 研究 B 站充电总功率与电流总谐波畸变率之间的关系。

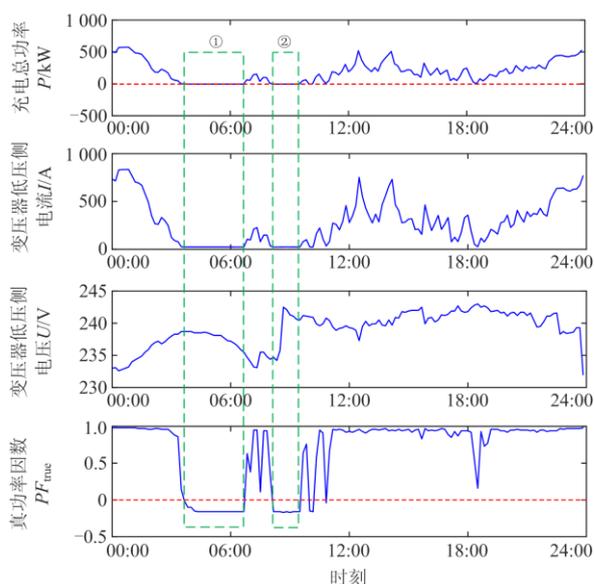


图 14 B 站基础充电数据趋势图

Fig. 14 Trend chart of basic charging data of station B

由图 14 可知, B 站低压侧相电压  $U$  最大值为 243 V, 最小值 232 V,  $U$  受电网钳制, 无明显变化规律。充电总功率  $P$  的高峰时段出现在 11:00—15:00 和 22:00—1:30, 低谷时段出现在 3:30—6:30(时段①)和 8:10—9:30(时段②)。充电总电流  $I$  的峰谷时段与  $P$  一致, 进一步观察发现  $I$  的变化趋势与  $P$  一致, 此结论与 A 站相同。值得注意的是, B 站的真功率因数  $PF_{\text{true}}$  变化范围较大, 甚至出现了  $PF_{\text{true}} < 0$  (时段①和时段②)。通过分析发现, 在时段①和时段②有  $P \approx 0$ , 充电站近似空载, 此时电容柜退出不及时导致无功功率过补偿, 功率因数超前,  $PF_{\text{true}}$  出现负值。过补偿使多余的无功倒流回电网, 对电力系统造成危害。为避免这种现象的发生, 可采用 APF 有源滤波器进行动态跟踪补偿。

其次, 通过图 15 的趋势图具体分析 B 站谐波电流特性。同样,  $HRI_n$  只选取了普遍分析较多的 5、7、11、13 次谐波。

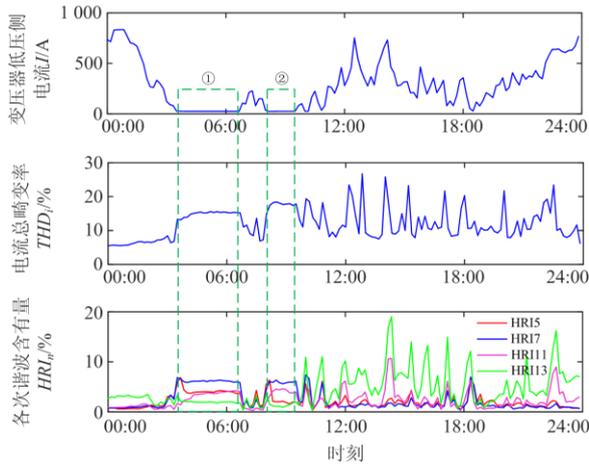


图 15 B 站谐波电流特征量变化趋势图  
Fig. 15 Trend chart of harmonic current characteristic of station B

由图 15 可知, 与 A 站特性相似:  $THD_i$  与  $I$  的变化趋势呈负相关,  $HRI_n$  呈相同变化趋势,  $HRI_n$  作为  $THD_i$  的组成部分, 与  $THD_i$  同增减。值得注意的是, 在 3:30—6:30(时段①)和 8:10—9:30(时段②), 充电站近似空载, 大致存在  $HRI_7 > HRI_5 > HRI_{11} > HRI_{13}$  的数量关系; 而在其他时段, 则有  $HRI_{13} > HRI_{11} > HRI_5 > HRI_7$  的数量关系。由此可知充电桩的投入数量变化对各次谐波电流大小会产生不同程度的影响。这与 A 站分析得出的谐波叠加抵消结论相符。

为了具体分析 B 站谐波电压特性, 绘制图 16 所示谐波电压特征量趋势图。提取时段①和时段②

进行对比发现 EV 负荷的变化引起了  $THD_v$  的变化, 当 EV 负荷增大 15% 的时候  $THD_v$  上升 20%; EV 负荷减小 61.5% 时  $THD_v$  下降 43.5%, B 站  $THD_v$  和  $P$  表现出了相同的变化规律。观察 21:45—23:00(时段③)发现此时刻  $P_{st}$  出现一个 0.9 的尖峰值,  $P$  陡升 205 kW,  $THD_v$  也出现一个 8.8 的尖峰值, 表明此时刻存在 EV 接入动作, 并且这种接入动作也会造成电压总谐波畸变率的突变。至此可知, EV 的接入和断开动作都会造成电压总谐波畸变率发生突变。

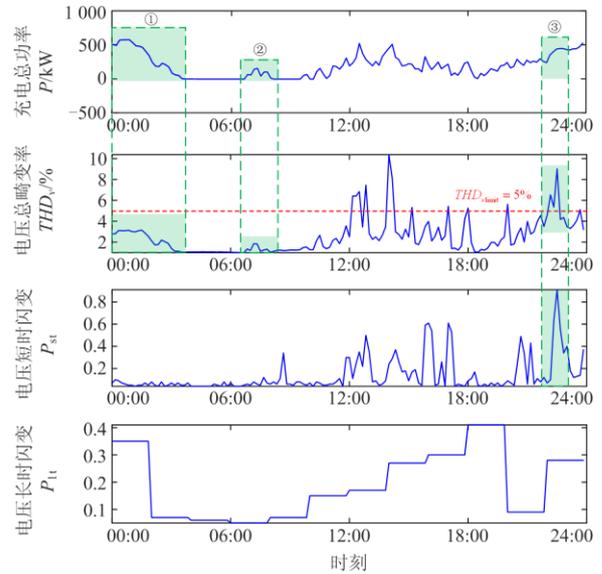


图 16 B 站谐波电压特征量变化趋势图  
Fig. 16 Trend chart of harmonic voltage characteristic of station B

#### 4.2 不同负荷组合接入系统的谐波特性

由前文分析可得: 充电站谐波情况受充电总功率大小影响。因此在上一节基础上, 选取 A 站某天的监测数据为研究样本, 分析在充电总功率近似相等的情况下不同负荷组合接入对系统谐波的影响。针对 A 站综合站的性质, 进一步将负荷组合分为以下三种: I. 仅私家车; II. 仅巴士车; III. 私家车+巴士车。

提取两个场景对不同负荷组合进行比较。考虑到实际充电站充电功率波动较大, 因此选取 10 min 为对比时长, 只对仪器采集频率较高且反应谐波综合情况的  $THD_i$ 、 $THD_v$  及  $PF_{\text{true}}$  三个谐波特征量进行对比。

场景一: 负荷组合 I 与负荷组合 III 对比(表 5)

表 5 场景一负荷信息

Table 5 Load information of scenario one

时间段	负荷组合	具体负荷	充电总功率/kW
1:10—1:20	III	1*巴士车+1*私家车	27~33
13:25—13:35	I	2*私家车	27~33

由图 17 可知, 在充电总功率近似相等的情况下, 负荷组合 I 的电流总谐波畸变率  $THD_i$  近似为负荷组合 III 的 4 倍, 远高于负荷组合 III; 负荷组合 I 的真功率因数  $PF_{true}$  范围在(0.73,0.8), 负荷组合 III 的真功率因数  $PF_{true}$  范围在(0.89,0.91), 负荷组合 I 的  $PF_{true}$  明显低于负荷组合 III; 而两个组合的电压总谐波畸变率  $THD_v$  数值范围均稳定在(1,1.2)。负荷组合 I 的  $THD_i$  值过大, 一定程度上使其  $PF_{true}$  值减小, 这与式(6)的理论推导相符。

场景一的对比结果显示, 与仅私家车的负荷组合相比, 私家车+巴士车的负荷组合电流谐波仅为前者的 25%, 谐波水平更好。

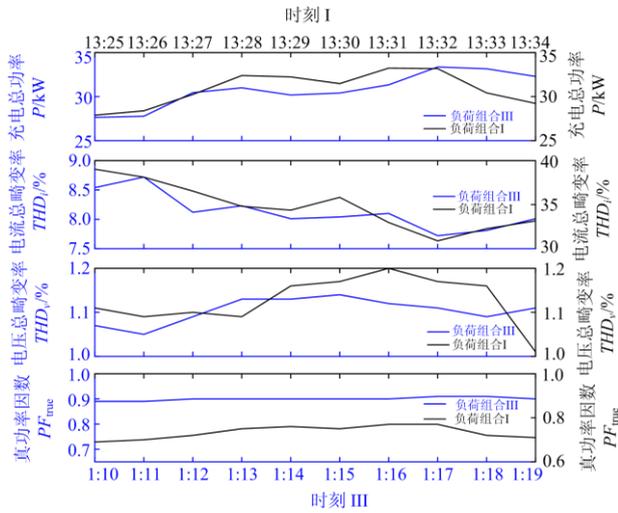


图 17 场景一谐波特性对比图

Fig. 17 Harmonic characteristics comparison chart of scenario one

场景二: 负荷组合 II 与负荷组合 III 对比(表 6)  
表 6 场景二负荷信息

Table 6 Load information of scenario two

时间段	负荷组合	具体负荷	充电总功率/kW
8:08—8:18	II	3*巴士车	140~152
20:05—20:15	III	3*巴士车+1*私家车	137~151

由图 18 可知, 在  $P$  近似相等的情况下, 两组  $THD_v$  数值范围均稳定在(0.95,1.12); 负荷组合 III 的  $THD_i$  虽约为负荷组合 II 的 2 倍, 但其数值均低于 10%, 因此  $THD_i$  的大小对  $PF_{true}$  的数值影响不大, 由图 18 可知两组  $PF_{true}$  数值范围都稳定在(0.94,0.97), 近似相等。

场景二的对比结果显示, 与私家车+巴士车的负荷组合相比, 仅巴士车的负荷组合电流谐波为前者的 50%, 谐波水平更好。通过场景一和场景二的对比可以得出结论: 在充电功率相同的情况下, 不

同组合的负荷存在电流总谐波畸变率  $THD_{iII} > THD_{iIII} > THD_{iI}$  的关系, 说明相比私家车而言, 巴士车对充电站造成的电流谐波更小。

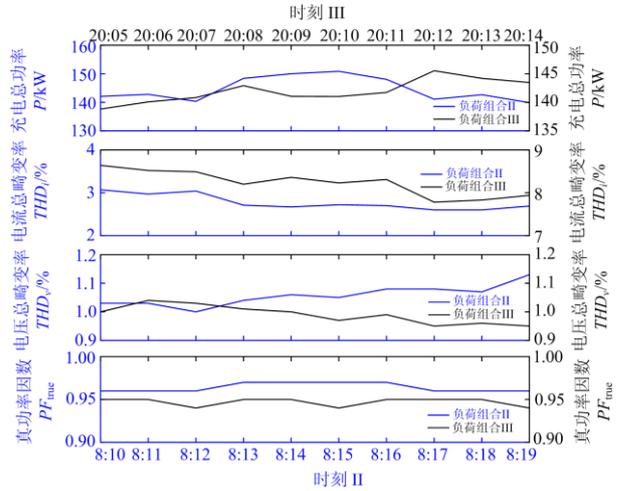


图 18 场景二谐波特性对比图

Fig. 18 Harmonic characteristics comparison chart of scenario two

## 5 结论

本文从两个不同类型充电站的电能质量实测数据入手, 提出了一种基于实测数据的电动汽车充电站电能质量分析方法。通过相关仿真建模、指标对比以及对实测数据的特性分析, 得到如下结论:

1) 综合充电站的谐波水平优于公交场站, 因此在建设充电站时需要考虑充电站的性质对谐波治理提出不同程度的要求。

2) 电流总谐波畸变率与充电总功率变化趋势呈负相关, 各次谐波电流含量与  $THD_i$  变化趋势相同, 但因谐波源之间存在谐波叠加相消现象, 导致各次谐波含量大小与谐波次数的对应关系不符合理论分析。各谐波源之间存在谐波角导致谐波电流叠加相消幅度不确定, 需要深入挖掘以进行定量分析。

3) 电压总谐波畸变率随充电总功率的变化受负荷大小的影响。当负荷大即集中充电的时候, 充电总功率的上升和下降都会引起  $THD_v$  出现相同变化规律; 而负荷小即充电桩闲置的时候,  $THD_v$  不发生突变。此外, 作为电动汽车充电站最常见的负荷波动, 电动汽车的接入和断开会导致电压闪变及  $THD_v$  发生突变。

4) 在总负荷近似相等的情况下, 电压总谐波畸变率大小受不同负荷组合的影响不显著, 但对电流总谐波畸变率而言存在  $THD_{iI} > THD_{iIII} > THD_{iII}$  的

关系,说明相比私家车而言,巴士车对充电站造成的电流谐波更小。

此外,由于数据采集成本和工程规模的局限,本文只选用了两个典型电动汽车充电站作为数据来

源,数据样本数量存在一定局限性。在今后的工作中,随着测量数据的进一步聚集,海量的实测数据有助于更为详细的规律和特征挖掘,以增强所得结论的支撑力度。

附录 A

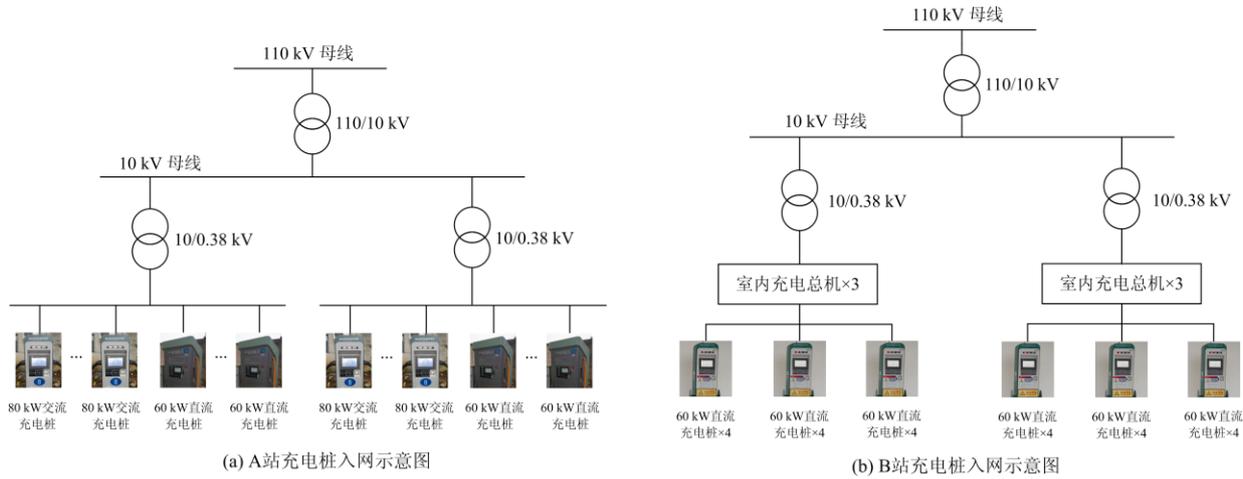


图 A1 充电桩并网示意图

Fig. A1 Schematic diagram of charging piles connected to power grid

表 A1 公共电网谐波电压(相电压)限值

Table A1 Limit of harmonic voltage (phase voltage) of public power grid

电网标称电压 kV	电压总谐波畸变率/%	各次谐波电压含有率/%	
		奇次	偶次
0.38	5.0	4.0	2.0

表 A2 注入公共联接点的谐波电流允许值

Table A2 Allowable value of harmonic currents injected into the point of common coupling

标称电压 kV	基准短路容量 MVA	谐波次数及谐波电流允许值 A											
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0.38	10	78	62	39	62	26	44	19	21	16	28	13	24
		14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
		11	12	9.7	18	8.6	16	7.8	8.9	7.1	14	6.5	12

表 A3 长时闪变限值

Table A3 Limit of long-term flicker

≤110 kV	>110 kV
1	0.8

表 A4 电动汽车充换电设施的供电电压偏差要求

Table A4 Requirements for power supply voltage deviation of electric vehicle charging and replacing facilities

充电站及换电站电压等级	35 kV 及以上	10(20) kV	380 V	220 V
供电电压正、负偏差	绝对值之和不超过标称电压的 10%	-7%~+7%	-7%~+7%	-10%~+7%

附录 B

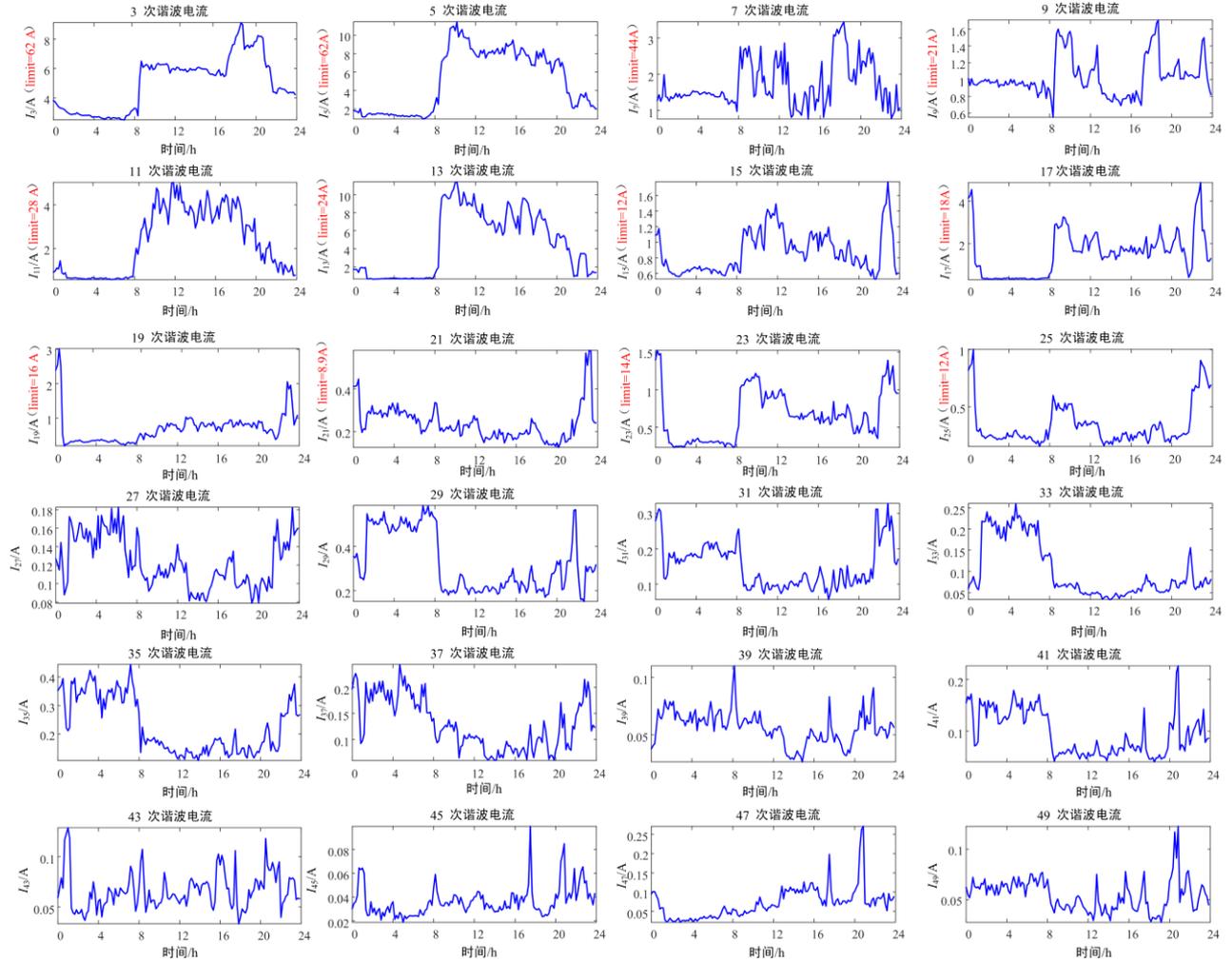
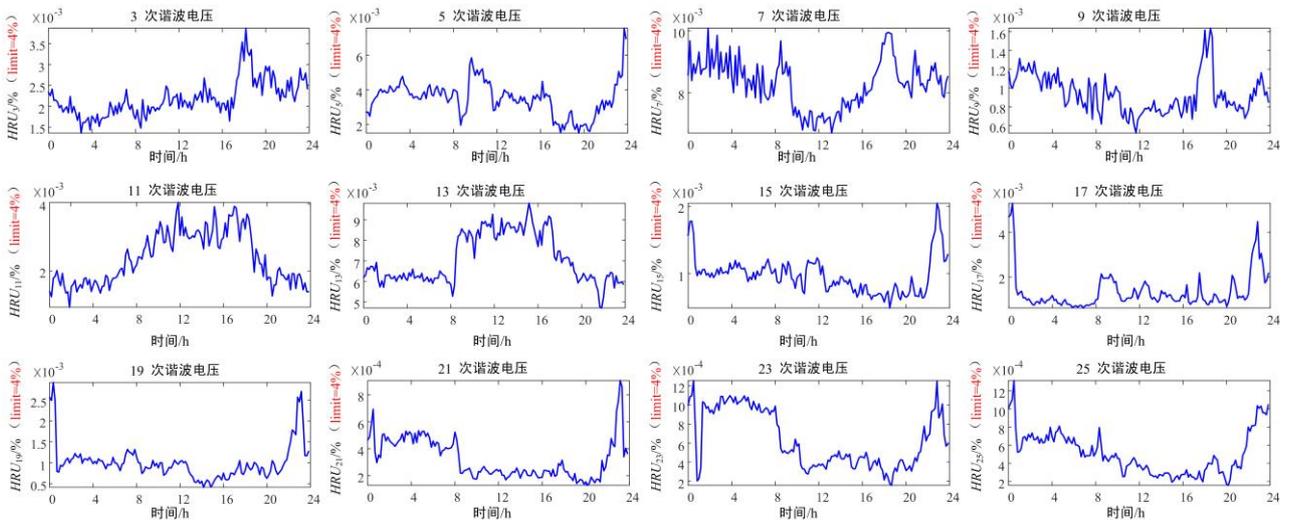


图 B1 A 站奇次谐波(<10 kHz)电流趋势图

Fig. B1 Odd harmonic (<10 kHz) current trend graph of station A



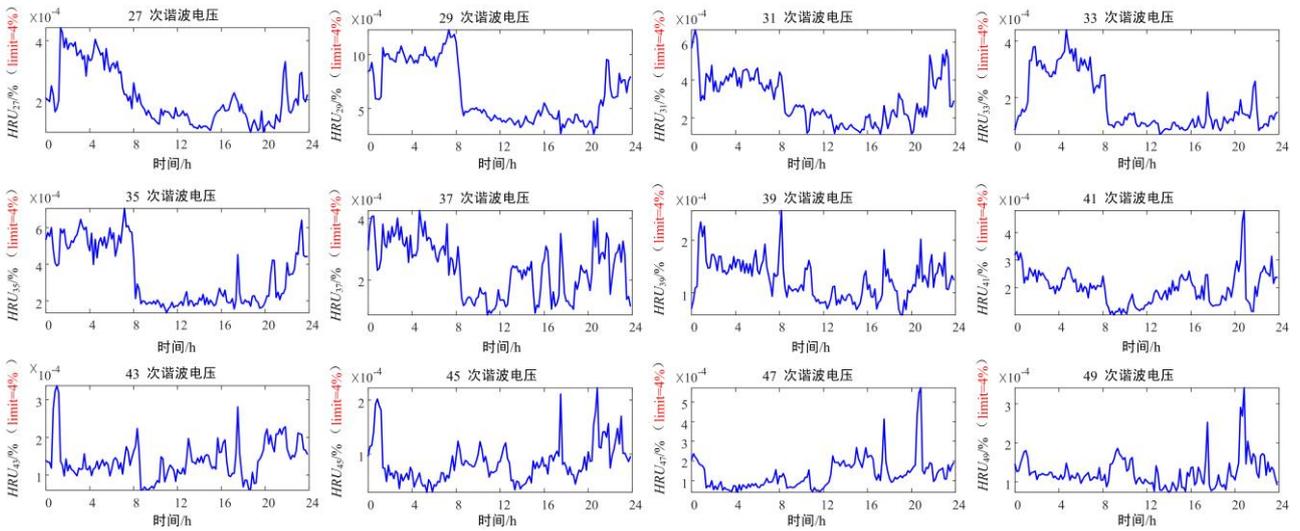


图 B2 A 站奇次谐波(<10 kHz)电压趋势图

Fig. B2 Odd harmonic (<10 kHz) voltage trend graph of station A

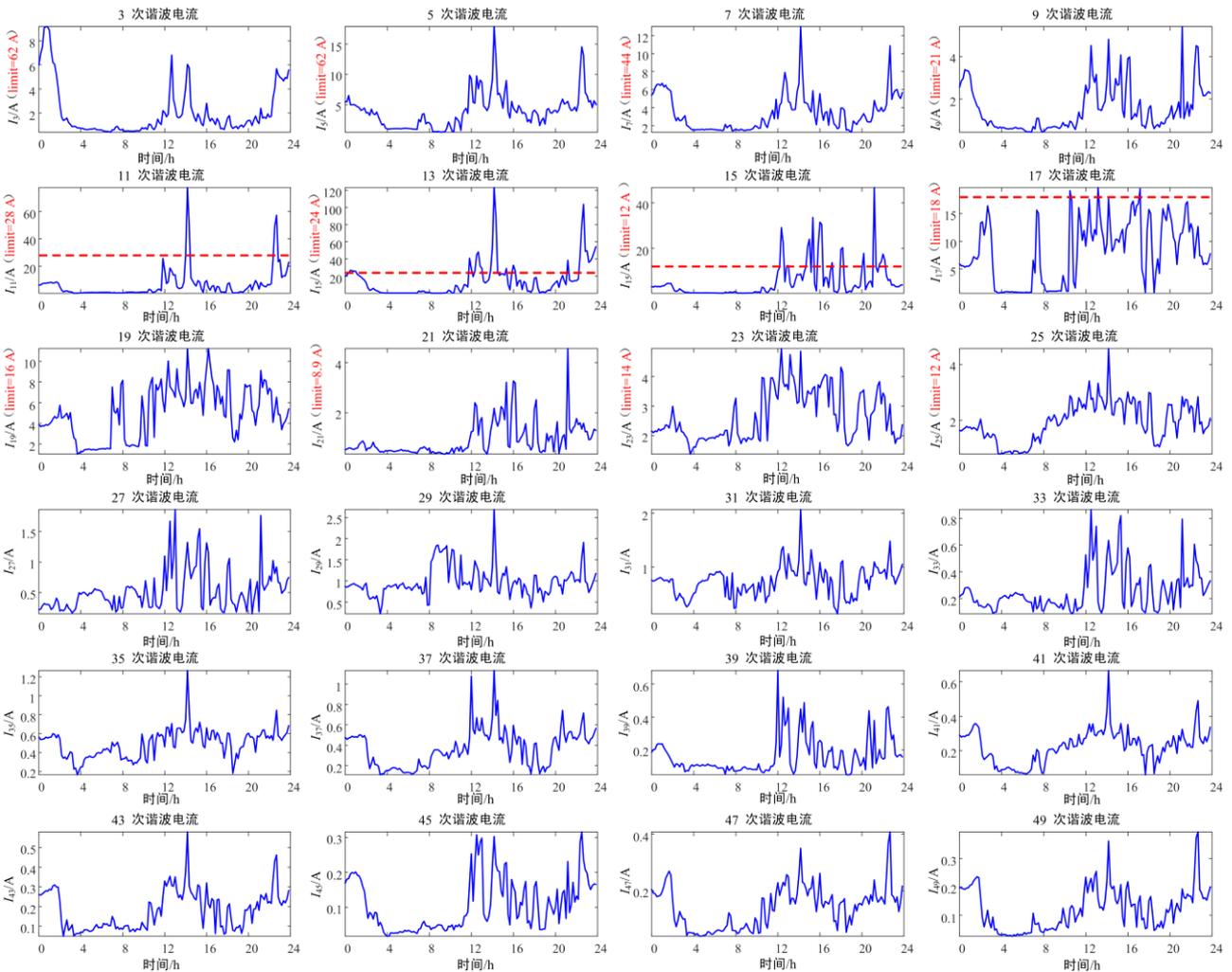


图 B3 B 站奇次谐波(<10 kHz)电流趋势图

Fig. B3 Odd harmonic (<10 kHz) current trend graph of station B

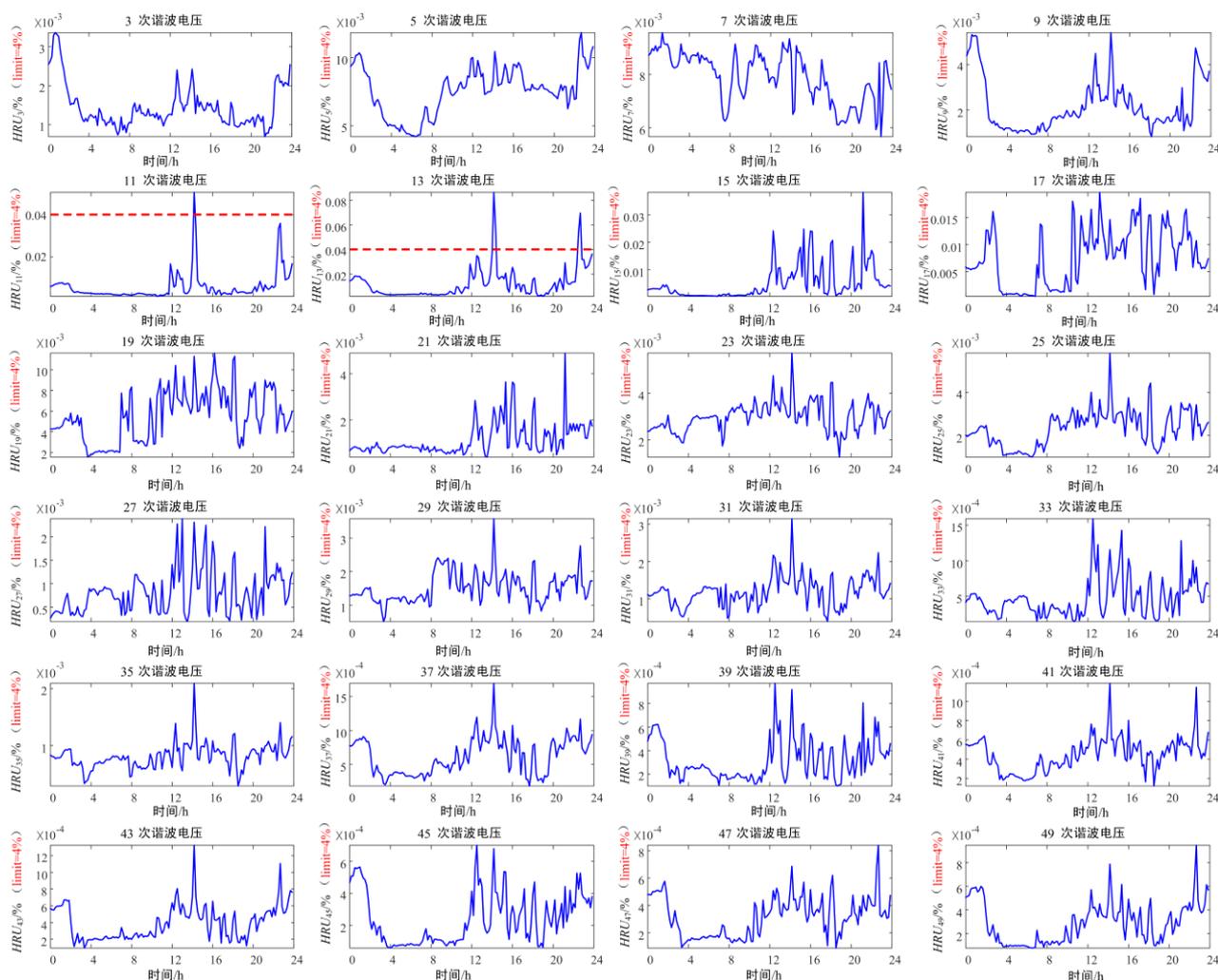


图 B4 B 站奇次谐波(&lt;10 kHz)电压趋势图

Fig. B4 Odd harmonic (&lt;10 kHz) voltage trend graph of station

## 参考文献

- [1] JI Z, HUANG X. Plug-in electric vehicle charging infrastructure deployment of China towards 2020: policies, methodologies, and challenges[J]. Renewable and Sustainable Energy Re-views, 2018, 90: 710-727.
- [2] DU J, OUYANG M, CHEN J. Prospects for Chinese electric vehicle technologies in 2016–2020: ambition and rationality[J]. Energy, 2017, 120: 584-596.
- [3] 肖湘宁, 温剑锋, 陶顺, 等. 电动汽车充电基础设施规划中若干关键问题的研究与建议[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 1-10.  
XIAO Xiangning, WEN Jianfeng, TAO Shun, et al. Study and recommendations of the key issues in planning of electric vehicles' charging facilities[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 1-10.
- [4] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 1-10.  
HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10.
- [5] 杨剑锋, 姜爽, 石戈戈. 基于分段改进 S 变换的复合电能质量扰动识别[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 64-71.  
YANG Jianfeng, JIANG Shuang, SHI Gege. Classification of composite power quality disturbances based on piecewise-modified S transform[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 64-71.
- [6] 高赐威, 张亮. 电动汽车充电对电网影响的综述[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 127-131.  
GAO Ciwei, ZHANG Liang. A survey of influence of electric vehicle charging on power grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 127-131.
- [7] LU Y X, ZHANG X M, PU X W. Harmonic study of electric vehicle chargers[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 3(3): 2404-2407.
- [8] 李娜, 黄梅. 不同类型电动汽车充电机接入后电力系统的谐波分析[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 170-174.  
LI Na, HUANG Mei. Analysis on harmonics caused by connecting different types of electric vehicle chargers

- with power network[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 170-174.
- [9] 岳云飞. 针对电动汽车充电桩接入小区电网的工程理论分析[D]. 天津: 天津理工大学, 2018.  
YUE Yunfei. Engineering theory analysis of electric vehicle charger access to residential power grid[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2018.
- [10] TRINDADE F C L. Comparative study of the harmonic impact of different plug-in electric vehicles and charging stations — a Brazilian case study[C] // International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2016, At Belo Horizonte, Brazil.
- [11] PINTO D R, ARIOLI V T, HAX G R T, et al. Analysis of the impact on power quality during the recharge of electric vehicles and vehicle-to-grid functionality[C] // 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), September 26-29, 2017, Torino, Italy: 1-6.
- [12] 邓磊, 刘敏, 应丽云, 等. 不同充电模式下电动汽车充电站的仿真与谐波分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 87-95.  
SHI Lei, LIU Min, YING Liyun, et al. Simulation and harmonic analysis of electric vehicle charging station under different charging modes[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 87-95.
- [13] 张谦, 韩维健, 俞集辉, 等. 电动汽车充电桩仿真模型及其对电网谐波影响[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 159-164.  
ZHANG Qian, HAN Weijian, YU Jihui, et al. Simulation model of electric vehicle charging station and the harmonic analysis of power grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 159-164.
- [14] 魏大钧, 孙波, 张承慧. 电动汽车车载充电桩接入住宅区配电网谐波研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 13-18.  
WEI Dajun, SUN Bo, ZHANG Chenghui. Optimal time-of-use price model considering satisfaction degree[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 13-18.
- [15] 胡畔, 吴斌, 胡羽川, 等. 计及时序特性的电动汽车快充充电站谐波分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3645-3655.  
HU Pan, WU Bin, HU Yuchuan, et al. Harmonic analysis of electrical vehicle fast-charging station considered sequence behavior of load[J]. High Voltage Engineering, 高电压技术, 2019, 45(11): 3645-3655.
- [16] 郭静. 电动汽车充电桩(站)的谐波特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.  
GUO Jing. Research on harmonic characteristics of electric vehicle charger and charging stations[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [17] WANG J, CUI Y, ZHU M. Probabilistic harmonic calculation in distribution networks with electric vehicle charging stations[J]. Journal of Applied Mathematics, 2014: 1-11.
- [18] DHARMAKEERTHI C H, MITHULANANTHAN N, SAHA T K. Impact of electric vehicle fast charging on power system voltage stability[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 57(5): 241-249.
- [19] 程杉, 吴思源, 孙伟斌. 考虑电压稳定性和充电服务质量的电动汽车充电桩规划[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 12-21.  
CHENG Shan, WU Siyuan, SUN Weibin. Optimal planning of charging stations for electric vehicles considering voltage stability of distribution system and the quality of service[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 12-21.
- [20] LI Q, TAO S, XIAO X, et al. Monitoring and analysis of power quality in electric vehicle charging stations[C] // 2013 1st International Future Energy Electronics Conference (IFEEC), November 3-6, 2013, Taiwan, China.
- [21] PINTO R J C, POMBO J, CALADO M R A, et al. An electric vehicle charging station: monitoring and analysis of power quality[C] // 2015 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE), June 24-26, 2015, Costa da Caparica, Portugal.
- [22] BOSOVIC A, MUSIC M, SADOVIC S. Analysis of the impacts of plug-in electric vehicle charging on the part of a real medium voltage distribution network[C] // IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference October 12-15, 2014, Istanbul, Turkey.
- [23] SUPPONEN A, RAUTIAINEN A, MARKKULA J, et al. Power quality in distribution networks with electric vehicle charging—a research methodology based on field tests and real data[C] // 2016 Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2016.
- [24] LEOU R C, TENG J H, LU H J, et al. Stochastic analysis of electric transportation charging impacts on power quality of distribution systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(11): 2725-2734.
- [25] ASHA K S, JAYA L A. Data mining for classification of power quality problems using WEKA and the effect of attributes on classification accuracy[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 303-314. DOI: 10.1186/s41601-018-0103-3.
- [26] 杜学龙. 电动汽车充电桩谐波特性及抑制[D]. 济南: 山东大学, 2013.  
DU Xuelong. The harmonic characteristics and suppression of EV charging station[D]. Jinan: Shandong University, 2013.

收稿日期: 2019-11-07; 修回日期: 2019-12-29

作者简介:

孙可慧(1995—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车与电网互动关系; Email: 220172734@seu.edu.cn

刘国鹏(1972—), 男, 高级工程师, 研究方向为新能源汽车充电技术; E-mail: lgp@nengrui.com

李少雄(1991—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电动汽车充电技术. E-mail: shaoxiongli@163.com

(编辑 葛艳娜)