

AMI数据驱动的电动汽车充电设施计量运行误差状态评估方法

刘 炜,王朝亮,肖 涛,陆春光

(国网浙江省电力有限公司营销服务中心,浙江 杭州 311121)

摘要:电动汽车充电设施作为强制计量管理器具,其计量性能的准确性和可靠性直接关系消费者的权益。依据现行检定规程,采用传统的充电设施计量现场检定方法存在检定人员投入大、检定效率低的问题,无法满足数量庞大的充电设施计量检测需求。为此,提出了一种高级量测体系(AMI)数据驱动的电动汽车充电设施计量运行误差状态评估方法。建立了充电设施计量运行误差模型,利用源自电力公司AMI的高频充电数据求解模型,实现对在运充电设施计量运行误差的状态评估。现场试点应用结果验证了所提方法的有效性,能实现电动汽车充电设施计量性能的在线监测与异常预警,保障充电设施的精准计量。

关键词:电动汽车;充电设施;高级量测体系;计量运行误差;计量检测;状态评估;数据驱动

中图分类号:U 491.8;TM 910.6

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202204078

0 引言

电动汽车及其充电设施的产业化、规模化发展是践行我国“双碳”战略目标和构建新型电力系统的重要举措。我国已将电动汽车充电设施的建设纳入国家“新型基础设施建设”工作的核心领域之一,目前围绕充电设施的装置设计^[1-2]、充电需求预测^[3-5]、协同优化规划^[6-8]、有序充电及负荷调度^[9-11]等方面已经进行了一系列的研究,为电动汽车产业在全球市场的快速迅猛发展做出了重要贡献。

随着电动汽车在全球市场所占份额的逐步提升,对电动汽车充电设施运营服务提出了更高的要求与挑战,充电设施作为计量计费器具已于2019年被国家市场监督管理总局纳入《实施强制管理的计量器具目录》,其电能计量的准确、可靠以及计费的公平、公正直接关乎广大充电用户的切身利益,因此需对使用中的充电设施开展强制检定。目前,对充电设施的计量检定方法主要是由专业的计量检定人员携带多台充电设施现场检定装置,采用实负荷检定的方式对待检充电设施的计量性能逐一开展检定,存在检定损耗大、效率低、成本高等劣势^[12]。考虑到充电设施具有分布散、面广、数量多、质量参差不齐等特点,现有的检定方法无法完全满足开展周期检定的需求,亟需探索新型技术和方法以实现对在运充电设施计量性能的高效监督与管控。

针对上述问题,文献[13]提出了一种基于实时脉冲周期比较法的电动汽车充电桩直流计量装置的

远程校验方法,通过计算机远程控制和多路切换的现场校验装置实现对多台电动汽车充电桩直流计量装置的远程校验;文献[14]在分析了充电桩工作原理和计量误差来源的基础上,研发了一套直流充电桩远程检测系统,对远程检测系统的总体架构、软硬件结构以及通信手段进行了设计,检测结果验证了所开发的远程检测系统实现直流充电桩计量检定的有效性;文献[12]提出了一种适用于虚负荷检定的非车载充电机检定装置,采用外部功率源与标准电能表一体化设计,在保障计量检定的高准确度与高可靠性的前提下,实现了检定装置的轻量便携化,提高了现场检定的工作效率;文献[15]设计了一种新型交流充电桩现场测试仪,相较于传统的接口电路模拟器方案,所研制的仪器可减少设备搬运和接线,有效提升了现场检测效率;文献[16]开发了一种基于LabVIEW的便携式直流充电桩自动检测系统,能方便快捷地对直流充电桩进行常规测试,提高了充电桩的检测效率。

上述文献从硬件装置的角度提出了电动汽车充电设施计量规模化、高效检测的解决方法,在实际应用中验证了检测装置的有效性及推广应用的價值,但考虑到目前数量庞大并快速增长的待检在运充电设施,单靠检定人员携带检定装置开展现场计量检测,仍无法实现对全部在运电动汽车充电设施计量的性能状态进行有效评估与管控。为此,本文提出了一种高级量测体系(AMI)数据驱动的电动汽车充电设施计量运行误差状态评估方法,根据充电站的树形拓扑结构,建立了电动汽车充电设施计量运行误差模型,并利用海量充电数据,在不增加硬件改造成本的基础上,实现对在运充电设施计量性能的状态评估与监测,有效地提升了电动汽车充电设施的

收稿日期:2022-01-28;修回日期:2022-04-06

在线出版日期:2022-04-28

基金项目:国网浙江省电力有限公司科技项目(5211YF200053)

Project supported by the Science and Technology Program of State Grid Zhejiang Electric Power Co.,Ltd.(5211YF200053)

智能运维水平,确保充电设施计量的准确、可靠。

1 电动汽车充电设施计量运行误差的数学模型

以目前市场上最常见的直流充电站为例,典型的拓扑结构见图1(交流充电站拓扑结构与之相同),其呈现典型的树形拓扑结构。图中: M_{Σ} 为台区总表; $M_1, M_2, \dots, M_n$ 为非车载充电机(下文简称为充电机)内部的直流计量模块; $R_0, R_1, \dots, R_n$ 为充电站内部的线路等效电阻; n 为充电站内的充电机数量。

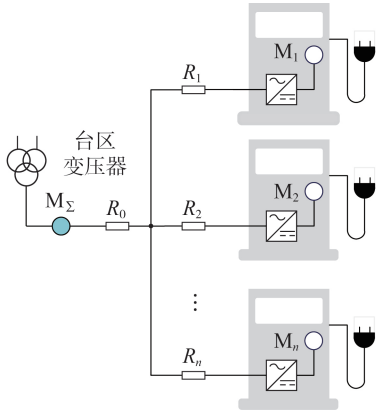


图1 典型直流充电站的拓扑结构

Fig.1 Topology structure of typical DC charging station

根据能量守恒定律,图1中台区总表接收的交流侧电量等于各充电桩、站内设备消耗的电量与线路损耗之和,据此可建立整个充电站台区的能量守恒方程,如式(1)所示。

$$\psi_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n (\psi_{DC,i} + \psi_{\eta,i}) + \psi_s + \psi_l \quad (1)$$

式中: ψ_{Σ} 为台区总表的供电量; $\psi_{DC,i}$ 为充电机*i*内部直流计量模块的电量; $\psi_{\eta,i}$ 为充电机*i*内部AC/DC电源模块的损耗电量; ψ_s 为站内监控、通信等设备的用电量; ψ_l 为站内线路损耗。

根据式(1)可得到充电站的有功功率守恒方程为:

$$P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n P_i \eta + P_s + P_l \quad (2)$$

式中: P_{Σ} 为台区总表的功率; P_i 为充电机*i*的功率; P_s, P_l 分别为站用设备的功率、站内线路损耗功率; η 为AC/DC电源模块的转换效率。

根据图1,站内线路损耗功率 P_l 可表示为:

$$P_l = R_0 \sum_{i=1}^n I_i I_i^* + R_0 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n I_i I_j^* + \sum_{i=1}^n R_i I_i I_i^* \quad (3)$$

式中: I_i 为充电机*i*支路上的电流;上标“*”表示矢量的共轭。将 I_i, I_j 分别用各自所在支路上的有功功率和无功功率表示,则式(3)可改写为:

$$P_l = \sum_{i=1}^n (R_0 + R_i) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} + 2R_0 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{P_i P_j + Q_i Q_j}{U_i U_j} \quad (4)$$

式中: P_i, Q_i 分别为充电机*i*支路上的有功功率、无功功率; U_i, U_j 分别为充电机*i, j*所在节点的端电压。

1.1 AC/DC电源模块的转换效率

充电机内部AC/DC电源模块的转换效率在不同的充电功率下会发生变化,从而影响充电设施计量运行误差数学模型的准确性,因此需要建立不同充电功率下AC/DC电源模块的转换效率模型。AC/DC电源模块的损耗功率 P_{η} 可表示为:

$$P_{\eta} = (1 - \eta(P_{AC})) P_{AC} \quad (5)$$

式中: $\eta(P_{AC})$ 为AC/DC电源模块在输出功率为 P_{AC} 时的转换效率。根据文献[17],AC/DC电源模块的转换效率 η 可表示为:

$$\eta = (C_0 + C_1 P_{AC} + C_2 P_{AC}^2) / P_{AC} \quad (6)$$

式中:系数 C_0, C_1, C_2 需根据现场实测数据,通过数据拟合方法进行确定。

在充电机内部安装边缘计算模块(其现场测试示意图如附录A图A1所示),将充电桩正常充电过程中AC/DC电源模块交流侧和直流侧采集到的电压、电流、功率等关键电气量转换为数字信号,并对已有数据进行拟合计算,得到电压、电流、功率-时间曲线以及输入、输出端总功率等关键数据。其中交流侧电压互感器、电流互感器的准确度等级分别为0.2、1.0级,直流侧电压互感器、电流互感器的准确度等级分别为0.5、1.0级,边缘计算模块的采样频率为10 kHz,监测某充电桩24 h内AC/DC电源模块交、直流侧功率的变化曲线,如图2所示。需要指出的是,对于同一桩企生产的同一型号充电桩而言,可以认为其AC/DC电源模块的转换效率是保持一致的,因此边缘计算模块只需在模型建模前期部署1次,在后续状态评估中无需部署,所以不会增加额外的硬件改造成本。

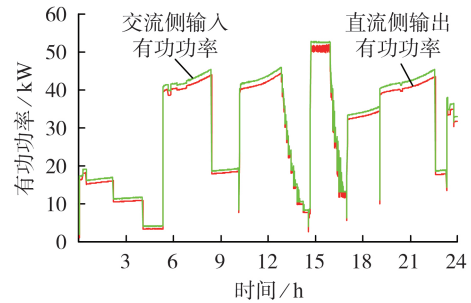


图2 AC/DC电源模块的功率曲线

Fig.2 Power curves of AC/DC power module

根据图2计算相应充电功率下的转换效率,拟合得到充电机的转换效率曲线如图3所示,由此确定式(6)中系数 C_0, C_1, C_2 的取值分别为 $7.56948693 \times 10^2, 9.94796287 \times 10^{-1}, 5.85326901 \times 10^{-2}$ 。

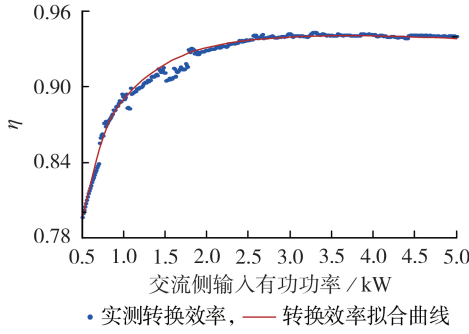


图3 AC/DC电源模块的转换效率曲线

Fig.3 Conversion efficiency curve of AC/DC power module

将式(5)和式(6)代入式(2)并对其进行积分,可得到充电站的电量守恒方程为:

$$\psi_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \int_0^T P'_i dt + \sum_{i=1}^n (R_0 + R_i) \left[\int_0^T \frac{(P'_i)^2}{U_i^2} dt + \int_0^T \frac{Q_i^2}{U_i^2} dt \right] + 2R_0 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \left(\int_0^T \frac{P'_i P'_j}{U_i U_j} dt + \int_0^T \frac{Q_i Q_j}{U_i U_j} dt \right) + \varepsilon_0 \quad (7)$$

式中: $P'_i = C_0 + C_1 P_{DC,i} + C_2 P_{DC,i}^2$, $P_{DC,i}$ 为充电机 i 输出的直流有功功率; ε_0 为站内监控、通信等设备的固定损耗; T 为电能表的一个计量周期。

根据功率性质的不同, ψ_{Σ} 包含所有充电机消耗的直流电量 $\psi_{\Sigma DC}$ 、由有功电量贡献的线路损耗分量 $\psi_{\Sigma LP}$ 、由无功电量贡献的线路损耗分量 $\psi_{\Sigma LQ}$ 以及固定损耗 ε_0 , $\psi_{\Sigma DC}$ 、 $\psi_{\Sigma LP}$ 、 $\psi_{\Sigma LQ}$ 的计算式为:

$$\begin{cases} \psi_{\Sigma DC} = \sum_{i=1}^n \int_0^T (C_0 + C_1 P_{DC,i} + C_2 P_{DC,i}^2) dt \\ \psi_{\Sigma LP} = \sum_{i=0}^n (R_0 + R_i) \int_0^T \frac{(P'_i)^2}{U_i^2} dt + 2R_0 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{P'_i P'_j}{U_i U_j} dt \\ \psi_{\Sigma LQ} = \sum_{i=0}^n (R_0 + R_i) \int_0^T \frac{Q_i^2}{U_i^2} dt + 2R_0 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{Q_i Q_j}{U_i U_j} dt \end{cases} \quad (8)$$

1.2 基于AMI数据的充电站计量运行误差模型

依托电力公司已建成的AMI所提供的海量充电设施用电数据,并考虑数据的离散性,对式(8)中的各项进行离散化处理并用电表电量数据进行表示。其中,充电机 i 实际消耗的电量 $\psi_{\Sigma DC,i}$ 在采样间隔 ΔT_p 内可表示为:

$$\psi_{\Sigma DC,i} = C_0 T + \sum_{p=1}^{N_j} \left(C_1 \psi_{DC,i,p} + \frac{C_2 \psi_{DC,i,p}^2}{\Delta T_p} \right) \quad (9)$$

式中: $T = \sum_{p=1}^{N_j} \Delta T_p$; $\psi_{DC,i,p}$ 为充电机 i 在第 p 个采样间隔内的真实电量; N_j 为该计量周期内充电过程中的采样次数。

利用充电过程中的数据计算有功电量产生的线路损耗,并考虑到充电站内总表与分表之间的压降

较小,对各充电机交流侧端电压 U_i 进行合理简化,存在 $U_i \approx U_0$ (U_0 为台区总表端电压),则 $\psi_{\Sigma LP}$ 可以表示为:

$$\begin{cases} \psi_{\Sigma LP} = \sum_{i=0}^n (R_0 + R_i) \sum_{j=k}^{N_k} \frac{(\psi'_{i,k})^2}{U_0^2 \Delta T_j} + 2R_0 \sum_{i=1}^n \sum_{j=k, j \neq i}^{N_k} \frac{\psi'_{i,k} \psi'_{j,k}}{U_0^2 \Delta T_j} \\ \psi'_{i,k} = C_0 + C_1 \psi_{DC,i,k} + C_2 \psi_{DC,i,k}^2 \end{cases} \quad (10)$$

式中: N_k 为第 k 个计量周期内的数据个数; ΔT_j 为第 j 个计量周期内的采样时间间隔; $\psi'_{i,k}$ 为第 k 个计量周期内充电机 i 的交流有功真实电量。

考虑到直流充电站内各充电机内部的直流计量模块不具备无功功率的计量功能,相同型号的充电机正常工作时由电网提供的无功功率需求特性趋同,充电站的线路损耗主要由线路电阻产生,正常运行时充电站的功率因数维持在0.9以上,因此由无功电量贡献的线路损耗可用台区总表的无功电量 $\psi_{\Sigma Q}$ 进行表示,如式(11)所示。

$$\sum_{i=0}^n (R_0 + R_i) \int_0^T \frac{Q_i^2}{U_i^2} dt + 2R_0 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \int_0^T \frac{Q_i Q_j}{U_i U_j} dt = \beta_0 \psi_{\Sigma Q}^2 \quad (11)$$

式中: β_0 为由无功功率引起的线路损耗系数。

结合式(7)~(11),可建立基于AMI数据的充电站流量守恒方程为:

$$\begin{cases} \psi_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^{N_j} \psi'_{i,p} + \sum_{i=0}^n (R_0 + R_i) \sum_{j=k}^{N_k} \frac{(\psi'_{i,k})^2}{U_0^2 \Delta T_j} + 2R_0 \sum_{i=1}^n \sum_{j=k, j \neq i}^{N_k} \frac{\psi'_{i,k} \psi'_{j,k}}{U_0^2 \Delta T_j} + \beta_0 \psi_{\Sigma Q}^2 + \varepsilon_0 \\ \psi'_{i,p} = C_0 + C_1 \psi_{DC,i,p} + C_2 \psi_{DC,i,p}^2 \end{cases} \quad (12)$$

设图1中交流总表的有功电量为 y ,总表的电量计量误差为 ε_y ,充电机 i 计量点的电量计量误差为 ε_i ,电量计量值为 ϕ_i ,真实值为 ψ_i 。考虑到在正常工况下 ε_i 数值很小,因此存在如下关系:

$$\psi_i = \left(1 - \frac{\varepsilon_i}{1 + \varepsilon_i} \right) \phi_i \approx (1 - \varepsilon_i) \phi_i \quad (13)$$

根据式(12)和式(13)建立电动汽车充电设施计量运行误差的数学模型,如式(14)所示。

$$y = \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^{N_j} \psi'_{i,p} (1 - \varepsilon_i) + \sum_{i=0}^n (R_0 + R_i) \sum_{j=k}^{N_k} \frac{[\psi'_{i,k} (1 - \varepsilon_i)]^2}{U_0^2 \Delta T_j} + 2R_0 \sum_{i=1}^n \sum_{j=k, j \neq i}^{N_k} \frac{\psi'_{i,k} (1 - \varepsilon_i) \psi'_{j,k} (1 - \varepsilon_j)}{U_0^2 \Delta T_j} + \beta_0 \psi_{\Sigma Q}^2 + \varepsilon_0 \quad (14)$$

式中: ΔT_j 和 y 、 $\psi_{\Sigma Q}$ 、 U_0 分别为充电过程数据和总表数据; ε_0 、 R_0 、 ε_i 、 R_i ($i=1, 2, \dots, n$)、 β_0 为待求解参数。

2 充电设施计量性能状态评估方法

2.1 数据预处理

对电动汽车充电设施计量性能状态评估所需的台区交流总表数据来自电力公司现有的用电信息采

集系统,其数据采集频率为 15 min / 次;充电桩数据来自电力公司现有的车联网平台,其数据采集频率为 10 s / 次。相较于传统的状态评估方法,本文所提计量运行误差状态评估方法的优势在于充分利用了电力公司已有的 AMI 数据(包括充电过程数据、订单数据),具体数据格式如附录 A 表 A1 和表 A2 所示,无需在充电站内额外增加硬件设备投入。

根据广义流量守恒,在任意时段充电站的台区总表电量等于站内各充电桩在该时段内消耗的电量与站内其他电量损耗之和。针对海量来自车联网平台和用电信息采集系统的档案数据、曲线数据、充电站数据,需对原始数据进行时钟对齐数据预处理,从而为第 1 节建立的数学模型计算提供完备、准确、高质量的数据。数据预处理流程如图 4 所示,具体处理步骤如下。

1)异常数据检测。剔除原始数据中明显不符合实际充电桩充电使用规律的异常数据,以提高原始数据的质量。

2)数据缺失检测。由于台区总表和充电桩计量模块数据的采集频率不同,在整个电动汽车的充电过程中可能会有某些充电阶段的数据缺失,如充电起始阶段、充电结束阶段以及不同充电过程中的转换阶段所对应的表计电量。通过对齐原始数据的时

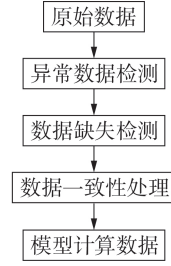


图 4 数据预处理流程

Fig.4 Data preprocessing process

钟信号,确定充电过程中缺失的数据。

3)数据一致性处理。针对步骤 2)确定的缺失数据进行数据一致性处理,具体方法如下:首先,根据电量-功率曲线,识别每次电动汽车充电过程的不同充电阶段并根据各恒流阶段的功率曲线(近似为直线)和恒压阶段的功率曲线,采用插值或神经网络^[18]等数学处理方法得到各阶段的转换时间点和前后间隔的电量,将其加入电量曲线数据,得到模型计算所需的在时间上保持一致的台区总表和充电桩计量模块的电量数据。

2.2 充电设施计量运行误差

将 M 个计量周期内的交流侧总表电量和充电桩计量模块电量代入式(14),得到式(15)所示矩阵形式。

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(\varepsilon_{1,1}) & f_2(\varepsilon_{2,1}) & \cdots & f_n(\varepsilon_{n,1}) & h_1(R_{0,1}) & h_2(R_{1,1}) & \cdots & h_n(R_{n,1}) & \psi_{\Sigma Q,1}^2 & 1 \\ f_1(\varepsilon_{1,2}) & f_2(\varepsilon_{2,2}) & \cdots & f_n(\varepsilon_{n,2}) & h_1(R_{0,2}) & h_2(R_{1,2}) & \cdots & h_n(R_{n,2}) & \psi_{\Sigma Q,2}^2 & 1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_1(\varepsilon_{1,M}) & f_2(\varepsilon_{2,M}) & \cdots & f_n(\varepsilon_{n,M}) & h_1(R_{0,M}) & h_2(R_{1,M}) & \cdots & h_n(R_{n,M}) & \psi_{\Sigma Q,M}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \\ R_0 \\ R_1 \\ \vdots \\ R_n \\ \beta_0 \\ \varepsilon_0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: $f_i(\varepsilon_{i,j})$ 、 $h_i(R_{i,j})$ ($i=1, 2, \dots, n$; $i'=0, 1, \dots, n$; $j=1, 2, \dots, M$) 为式(14)中与 ε_i 和 R_i 相关的系数; y_j 为第 j 个计量周期的电动汽车充电设施计量运行误差,可根据式(14)求得。

当计量周期数量 M 大于代求的未知变量个数时,可通过数学方法计算得到各充电桩的计量误差,具体求解过程如下。

将式(14)重写为:

$$y = \sum_{i=1}^n \varphi_i (1 - \varepsilon_i) + \beta_{\parallel} \varphi_{\parallel} + \beta_0 \psi_{\Sigma Q}^2 + \varepsilon_0 \quad (16)$$

$$\varphi_i = \sum_{p=1}^{N_j} \psi'_{i,p} \quad (17)$$

$$\beta_{\parallel} \varphi_{\parallel} = \sum_{i=0}^n (R_0 + R_i) \sum_{j=k}^{N_k} \frac{[\psi'_{i,k} (1 - \varepsilon_i)]^2}{U_0^2 \Delta T_j} + 2R_0 \sum_{i=1}^n \sum_{j=k}^{N_k} \frac{\psi'_{i,k} (1 - \varepsilon_i) \psi'_{j,k} (1 - \varepsilon_j)}{U_0^2 \Delta T_j} \quad (18)$$

定义函数 $F = \sum_{i=1}^n \varphi_i - y$, 根据式(16)——(18)可得:

$$F = \sum_{i=1}^n \varphi_i \varepsilon_i - \beta_{\parallel} \varphi_{\parallel} - \beta_0 \psi_{\Sigma Q}^2 - \varepsilon_0 \quad (19)$$

将式(19)写成矩阵形式为:

$$\begin{cases} F = X\beta \\ F = [F(1) \ F(2) \ \cdots \ F(M)]^T \\ X = \begin{bmatrix} \varphi_1(1) & \cdots & \varphi_n(1) & \varphi_{\parallel}(1) & 1 \\ \varphi_1(2) & \cdots & \varphi_n(2) & \varphi_{\parallel}(2) & 1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ \varphi_1(M) & \cdots & \varphi_n(M) & \varphi_{\parallel}(M) & 1 \end{bmatrix} \\ \beta = [\varepsilon_1 \ \cdots \ \varepsilon_n \ -\beta_{\parallel} \ -(\beta_0 \psi_{\Sigma Q}^2 + \varepsilon_0)]^T \end{cases} \quad (20)$$

根据式(20),定义目标函数为预测值 $\hat{F}$ 与真实值 F 之间的残差平方和 $\gamma_{\text{SEE}} = \sum_{k=1}^M (F(k) - \hat{F}(k))^2$ 最小,同时考虑函数的共线性及充电设施计量运行误差的

正常数值很小且接近于0(例如1级电能表的正常误差应在1%以内),在残差平方和的基础上引入岭回归修正系数 λ ,可得到目标函数的表达式为:

$$\begin{cases} \min \left\{ (F - \hat{F})^T (F - \hat{F}) + \lambda \beta^T \beta \right\} \\ \text{s.t. } \varepsilon_0 \geq 0, \beta_{11} \geq 0 \end{cases} \quad (21)$$

式中: $\hat{F} = [\hat{F}(1) \ \hat{F}(2) \ \cdots \ \hat{F}(M)]$ 。式(21)为一个数学上典型的二次规划问题,本文采用Python的开源二次规划包qpssolvers对其进行求解。

3 电动汽车充电设施计量性能的在线监测系统

基于第1节建立的电动汽车充电设施计量运行误差模型,研发电动汽车充电设施计量性能的在线监测系统,系统总体框架如图5所示,主要包括设备层、通信网关层和应用层。

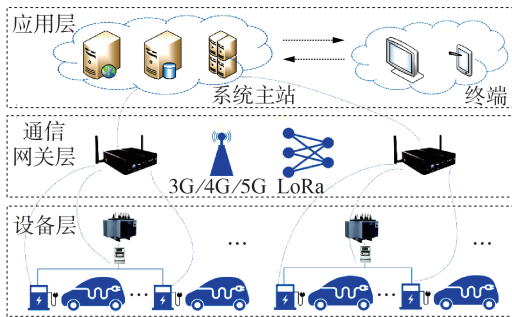


图5 电动汽车充电设施计量性能在线监测系统架构

Fig.5 Architecture of online measurement performance monitoring system for electric vehicle charging facilities

设备层主要包括充电站内各充电桩的计量模块、台区总表;通信网关层采用边缘能源网关,通过3G/4G/5G或远距离无线电(LoRa)采集充电桩计量模块、台区总表的电能数据并将其上传至系统主站;应用层包含系统主站与终端设备,系统主站根据上传的充电站用能数据,结合电动汽车充电设施计量运行误差数学模型,计算并评估各充电桩的计量运行误差,并将结果反馈至终端设备,实现对存在计量异常的充电桩的自动报警与准确定位,并及时下发工单通知运维人员进行现场维护。

4 应用验证

选取杭州市某直流充电站进行试点应用,其拓扑结构与图1类似,包含33台充电机,属于典型的树形拓扑结构,适合采用本文所提状态评估方法。充电站采集交流电表与充电机直流电表2021年9月9日至9月23日两周时间内的用电数据,并将其上传至电动汽车充电设施计量性能在线监测系统,可计算得到计量运行误差如表1所示,各充电机的计量

运行误差曲线如图6所示。为了验证模型计算结果的准确可靠性,采用盲测的方法分别对单一充电机的用电数据加入5%和-5%的偏差,模拟充电机发生计量异常的工况,并定义式(22)所示误差响应率 γ ,用于定量评估模型对充电设施计量运行误差异常工况的识别准确性。

$$\gamma = \frac{\Delta\sigma_0 - \Delta\sigma}{\Delta\sigma_0} \times 100\% \quad (22)$$

式中: $\Delta\sigma_0$ 为设定的电量偏差值; $\Delta\sigma$ 为根据设定的偏差值模型计算得到的充电机计量误差的变化值。 γ 的数值越大,表明模型识别充电机计量异常工况的准确性越高。

表1 试点充电站的计量运行误差

Table 1 Measurement operation error of test charging station

充电机	计量运行误差	不确定度	充电机	计量运行误差	不确定度
1	0.0004	0.0009	18	0	0
2	-0.0022	0.0009	19	-0.0004	0.0007
3	-0.0006	0.0009	20	-0.0010	0.0006
4	0.0024	0.0009	21	0.0027	0.0007
5	0.0010	0.0008	22	-0.0012	0.0007
6	0.0019	0.0006	23	0.0020	0.0007
7	0.0007	0.0006	24	0	0
8	-0.0016	0.0006	25	0	0
9	0.0002	0.0005	26	0	0.0001
10	-0.0013	0.0005	27	0	0
11	-0.0005	0.0003	28	0.0026	0.0007
12	0.0005	0.0003	29	0	0
13	0.0004	0.0003	30	0	0
14	0.0007	0.0003	31	-0.0001	0.0007
15	0	0.0003	32	-0.0034	0.0007
16	0.0003	0.0007	33	0.0004	0.0007
17	-0.0003	0.0006			

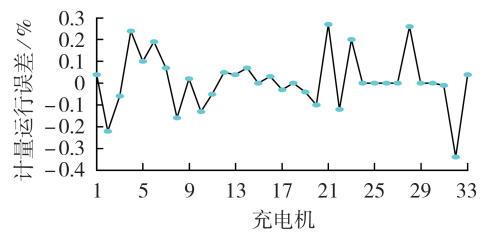


图6 试点充电站的计量运行误差曲线

Fig.6 Measurement operation error curve of test charging station

对整个试点充电站进行盲测,误差响应率结果如图7所示。由图可知,所有充电机的误差响应率均大于85%,表明本文所提计量运行误差状态评估方法对存在计量异常工况的充电设施具备较高的识别准确性。

为了进一步验证本文所建模型的适用性,选取杭州市31座交直流充电站的160台充电桩的用电数据进行计算,得到各充电桩的计量运行误差如图8

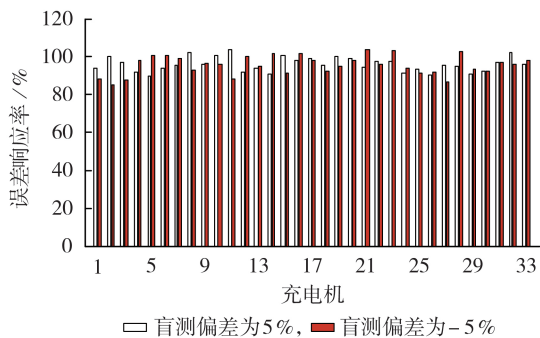


图7 试点充电站的盲测误差响应率

Fig.7 Blind error response rate of test charging station

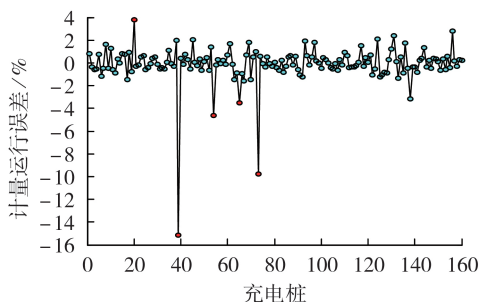


图8 充电桩的计量运行误差计算结果

Fig.8 Calculative results of charging piles' measurement operation error

所示,并从中筛选出5个计量运行误差计算结果超过3%的充电桩进行现场核验。

根据现场核验结果,上述有计量异常预警的充电桩存在充电机模块故障、绝缘监测故障和充电机其他故障,导致对应的充电桩无法正常工作,验证了本文所提计量运行误差评估方法在提升充电设施智能运维方面具备良好的应用成效和推广前景。

5 结论

电动汽车充电设施具有分布散、面广、数量多、质量参差不齐等特点,传统现场计量检定方法的检测效率低,根据现行规程开展现场检定的难度大。为此,本文提出了一种AMI数据驱动的电动汽车充电设施计量运行误差状态评估方法,根据电动汽车充电站的树形拓扑结构,建立了充电设施计量运行误差模型,利用海量AMI高频充电数据,采用大数据分析的方法实现对在运充电设施计量运行误差状态的精准评估与异常监测,相比传统充电设施计量性能检测方法具备如下性能:

1)可以在充电设施正常工作的场景下,完成对充电设施运行误差的检测,无需外接负载箱,实现了检测过程的节能减碳;

2)实现了在运充电设施运行计量误差的状态监测与异常预警,有效地提升了充电设施智能运维服务水平,解决了在运充电设施计量性能在线监控的

技术难题;

3)利用了现有的AMI数据,与传统的充电设施计量检测方法相比,无需增加额外的硬件设备投入,易于大规模推广应用,可以有效保障电动汽车充电设施的精准计量,维护消费者的权益。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 刘坤,葛佳蔚,杨富尧,等. 用于电动汽车无线充电的电压源型ICPT系统最优电容补偿参数选择方法[J]. 电力自动化设备, 2021,41(6):53-59.
LIU Kun, GE Jiawei, YANG Fuyao, et al. Selection method of optimal capacitance compensation parameter for voltage-source type ICPT system used in wireless charging of electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6):53-59.
- [2] 吴钟鸣,卢军锋,孙丽,等. 可移动式电动汽车充电桩的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2021,49(23):148-154.
WU Zhongming, LU Junfeng, SUN Li, et al. Design of a mobile electric vehicle charging pile[J]. Power System Protection and Control, 2021,49(23):148-154.
- [3] SUN S Y, YANG Q, YAN W J. A novel Markov-based temporal-SoC analysis for characterizing PEV charging demand[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018,14(1): 156-166.
- [4] YANG Q, SUN S Y, DENG S G, et al. Optimal sizing of PEV fast charging stations with Markovian demand characterization[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4457-4466.
- [5] 张美霞,蔡雅慧,杨秀,等. 考虑用户充电差异性的家用电动汽车充电需求分布分析方法[J]. 电力自动化设备, 2020,40(2): 154-163.
ZHANG Meixia, CAI Yahui, YANG Xiu, et al. Charging demand distribution analysis method of household electric vehicles considering users' charging difference[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020,40(2): 154-163.
- [6] 高锋阳,袁成,李昭君,等. 考虑风-光-荷时空相关性的分布式电源和广义储能联合规划[J]. 电力自动化设备, 2021,41(6): 133-144.
GAO Fengyang, YUAN Cheng, LI Zhaojun, et al. Joint planning of distributed generation and generalized energy storage considering spatial-temporal correlation of wind-photovoltaic-load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021,41(6): 133-144.
- [7] 孟锦鹏,向月,顾承红,等. 面向可靠性提升的电动汽车充电基础设施协同优化规划[J]. 电力自动化设备, 2021,41(6): 36-50.
MENG Jinpeng, XIANG Yue, GU Chenghong, et al. Collaborative optimization planning of electric vehicle charging infrastructure for reliability improvement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021,41(6): 36-50.
- [8] 贾雨龙,米增强,刘力卿,等. 分布式储能系统接入配电网的容量配置和有序布点综合优化方法[J]. 电力自动化设备, 2019,39(4):1-7,16.
JIA Yulong, MI Zengqiang, LIU Liqing, et al. Comprehensive optimization method of capacity configuration and ordered installation for distributed energy storage system accessing distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019,39(4):1-7,16.
- [9] 窦迅,王俊,杨志宏,等. 含交直流混合配网综合能源系统的电动汽车分群调控策略[J]. 中国电机工程学报, 2021,41(14):

- 4829-4844.
- DOU Xun, WANG Jun, YANG Zhihong, et al. Cluster-based control strategies of electric vehicles for integrated energy system with AC-DC hybrid distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4829-4844.
- [10] 袁洪涛, 韦钢, 张贺, 等. 计及充换储一体站的主动配电网鲁棒优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8): 2453-2468.
- YUAN Hongtao, WEI Gang, ZHANG He, et al. Robust optimal scheduling of active distribution network considering with the charging-swapping-storage integrated station[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2453-2468.
- [11] 袁泉, 汤奕. 基于路-电耦合网络的电动汽车需求响应技术[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1627-1637.
- YUAN Quan, TANG Yi. Electric vehicle demand response technology based on traffic-grid coupling networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1627-1637.
- [12] 刘思, 李熊, 张一凡, 等. 基于高精度源表一体的非车载直流充电机检定装置研制[J]. 电测与仪表, 2021, 58(9): 194-200.
- LIU Si, LI Xiong, ZHANG Yifan, et al. Development of off-board DC charger verification devices based on high-precision source-table integration[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(9): 194-200.
- [13] 纪红刚, 周凌. 电动汽车充电桩直流计量装置远程校验方法的研究[J]. 计量与测试技术, 2017, 44(6): 69-71.
- JI Honggang, ZHOU Ling. A research of remote calibration methods for DC metering of EV charging station[J]. Metrology & Measurement Technique, 2017, 44(6): 69-71.
- [14] 王兴媛, 李贺龙, 宋燕军, 等. 直流充电桩远程检测系统的计量特性研究[J/OL]. 电测与仪表. (2021-07-05)[2022-01-18]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210702.1808.013.html>.
- [15] 侯云, 徐晓天, 王一弓, 等. 一种新型交流充电桩现场测试仪的研制[J]. 电测与仪表, 2021, 58(12): 190-195.
- HOU Yun, XU Xiaotian, WANG Yigong, et al. Development of a novel on-site tester for AC charging spot[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(12): 190-195.
- [16] 姜立标, 凌诗韵, 黄楚然, 等. 基于LabVIEW的直流充电桩自动检测系统的开发[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2017, 31(8): 7-13.
- JIANG Libiao, LING Shiyun, HUANG Churan, et al. Design of DC charging piles automatic detection system based on LabVIEW[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2017, 31(8): 7-13.
- [17] 罗玉涛, 王峰. 电动汽车用双向DC/DC效率参数化模型的建立与影响因素分析[J]. 汽车工程, 2016, 38(11): 1396-1401.
- LUO Yutao, WANG Feng. Creation of parameter model for the efficiency of bi-DC/DC in electric vehicle and affecting factor analysis[J]. Automotive Engineering, 2016, 38(11): 1396-1401.
- [18] 曾金迪. 基于空间自回归神经网络的插值方法及其模拟和实测数据验证[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- ZENG Jindi. Spatial interpolation based on spatial auto-regressive neural network and its verification of simulation and measured data[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.

作者简介:



刘 炜

刘 炜(1991—),男,工程师,博士,主要研究方向为电动汽车电能计量技术、直流电能计量技术(**E-mail**: lwei_sgzy@126.com);

王朝亮(1986—),男,高级工程师,硕士,主要研究方向为智能配用电技术(**E-mail**: chaoliangwang@126.com);

肖 涛(1979—),男,教授级高级工程师,硕士,主要研究方向为电能计量及检测技术(**E-mail**: 296306@qq.com);

陆春光(1978—),男,高级工程师,硕士,主要研究方向为电能计量及检测技术(**E-mail**: zjdl_lcg@163.com)。

(编辑 陆丹)

AMI data-driven state evaluation method for measurement operation error of electric vehicle charging facilities

LIU Wei, WANG Chaoliang, XIAO Tao, LU Chunguang

(Marketing Service Center of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 311121, China)

Abstract: As the compulsory measurement management instrument, the accuracy and reliability of electric vehicle charging facilities' measurement performance are directly related to the rights and interests of consumers. According to the current verification regulations, the traditional on-site measurement verification method of charging facilities has the problems of large verification personnel investment and low verification efficiency, which cannot meet the measurement and testing demands of a large number of charging facilities. Therefore, an AMI (Advanced Measurement Infrastructure) data-driven state evaluation method for measurement operation error of electric vehicle charging facilities is proposed. The measurement operation error model of charging facilities is established, and the high-frequency charging data collected from AMI of power company are used to solve the model and the state evaluation of metering operation error of charging facilities in operation is realized. The field pilot application results verify the effectiveness of the proposed method, which can realize the online monitoring and abnormal warning of electric vehicle charging facilities' measurement performance and ensure the accurate measurement of charging facilities.

Key words: electric vehicles; charging facilities; advanced measurement infrastructure; metering operation error; metrological detection; state evaluation; data-driven

附录 A



图 A1 AC/DC 电源模块转换效率的现场测试
Fig.A1 Field test of conversion efficiency of AC/DC power module

表 A1 订单数据格式及定义
Table A1 Format and definition of order data

数据格式	定义	数据格式	定义	数据格式	定义
ELEC_TIMES	充电时长/min	END_SOC	起始 SOC/%	END_T_MR	结束 SOC/%
END_TIME	充电结束时间	GUN_ID	充电枪编号	ONLINE_TRANS_ID	在线交易记录 ID
ORDER_NO	业务订单号	PAY_CARD_NO	支付卡号	PHY_CARD_NO	物理卡号
SERIAL_NO	序列号	SERVICE_AMT	服务费	STOP_REASON	停止原因
T_AMT	总金额	T_PQ	总电量	TRANS_TYPE	记录类别 01 在线 02 离线

表 A2 充电过程数据格式及定义
Table A2 Format and definition of charging process data

数据格式	定义	数据格式	定义	数据格式	定义
GUN_ID	充电桩枪号	DATA_TIME	数据时间	OUT_U	输出电压
OUT_I	输出电流	OUT_P	输出功率	ED_PQ	累计充电电量/kWh
ED_ELEC_AMT	累计充电费	ED_SERVICE_AMT	累计服务费	ED_AMT	累计总金额
ED_TIME	累计充电时长/min	LD_TIME	估算剩余充电时间/min	SOC	当前 SOC/%
ORDER_NO	订单号	PILE_RUN_ID	主键 ID		