

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231193

基于数据模型双驱动的电动公交车多时段 负荷建模和调节潜力评估

何聪^{1,2}, 耿建², 刘建涛², 徐鹏², 朱凯文¹, 张俊芳¹

(1. 南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094; 2. 中国电力科学研究院南京分院电力自动化研究所, 江苏 南京 210037)

摘要: 随着电动公交车渗透率的增加, 对其进行充电负荷建模及其调节潜力研究愈发具有现实意义。由此, 提出一种基于数据模型双驱动的电动公交车多时段负荷建模和调节潜力评估方法。首先通过分析电动公交车负荷特性影响因素, 按运营情况对电动公交车进行分类, 进而提出时段划分依据。其次基于历史数据确定拟合函数模型, 并结合电动公交车多时段充电特性确定负荷模型的各个参数, 建立电动公交车多时段负荷解析模型。然后综合考虑电网侧和用户侧的需求约束, 分析各时段可参与调节车辆数量变化情况, 提出多时段调节潜力解析评估模型。最后结合某地电动公交车的历史实际数据进行实例验证。结果表明所提负荷建模及调节潜力评估方法具有较强的适用性和有效性, 为电网削峰填谷提供了有力支撑。

关键词: 电动公交车; 曲线拟合; 解析模型; 多时段; 调节潜力

Multi-period load modeling and regulation potential assessment for electric buses based on data-driven and model-driven

HE Cong^{1,2}, GENG Jian², LIU Jiantao², XU Peng², ZHU Kaiwen¹, ZHANG Junfang¹

(1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Electric Power Automation Research Institute, China Electric Power Research Institute Nanjing Branch, Nanjing 210037, China)

Abstract: With the increase of the penetration rate of electric buses, it is more and more practical to study its charging load modeling and adjustable potential. Therefore, a multi-period load modeling and adjustable potential evaluation method for electric buses based on data-driven and model-driven is proposed. First, by analyzing the factors affecting the load characteristics, electric buses are classified based on their operational status, and a basis for period division is proposed. Secondly, the fitting function model is determined based on the historical data, and the parameters of the load model are determined in combination with the multi period charging characteristics of electric buses, and the multi period load analytical model of electric buses is established. Then, considering the demand constraints of the grid and user sides comprehensively, the changes in the number of electric buses that can participate in the regulation in each period are analyzed, and an analytical evaluation model of the multi-period adjustable potential is proposed. Finally, an example is verified with the actual historical data of the electric buses in a certain place. The results show that the load modeling and adjustable potential evaluation method has strong applicability and effectiveness, providing strong support for grid peak shaving and valley filling.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China "Research on Multiple Flexible Resources Collaborative Regulation Decision-making Technology for Promoting Distributed New Energy Consumption Capability" (No. 5100-202119576A-0-5-SF).

Key words: electric bus; curve fitting; mathematical model; multi-period; adjustable potential

0 引言

随着“双碳”目标的实现, 传统发电侧调节能力不断下降, 且用电负荷持续增长导致负荷峰谷差

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助“提升分布式新能源消纳能力的多元灵活资源协同调控决策技术研究”(5100-202119576A-0-5-SF)

不断增大, 新型电力系统对负荷侧调节能力提出了更高的要求。因此研究和挖掘负荷侧调节潜力是提升新型电力系统平衡能力的重要方向^[1-3]。在此背景下, 作为典型的可调节负荷, 电动公交车近年来发展迅速, 相比其他类型的电动汽车, 不仅数量大^[4-5]、增速快^[6], 且充电频率和充电量较高^[7-8], 此外还具有运营规律稳定、容易调控的特点^[9-10], 因此电动公交车具有较高的调节潜力研究价值。

现阶段,已有较多文献研究了电动汽车用电负荷建模方法和调节潜力分析方法。传统的电动汽车建模方法一般通过分析电动汽车运行特性,采用蒙特卡洛法随机模拟电动汽车充电行为,最后对数据进行统计分析^[11-13];或者是基于历史数据,通过回归分析法、相似日法等建立电动汽车负荷预测模型^[14-17]。电动汽车调节潜力方面,文献[18]分析电动汽车用户行为的差异,提出一种基于时空活动模型的电动汽车充电功率计算和需求响应潜力评估方法。文献[19]基于恒流-恒压二阶段变功率模型描述充放电负荷来分析电动汽车的调节潜力。文献[20]提出一种基于随机森林算法的电动汽车充放电容量预测方法,综合车辆充放电行为参数预测电动汽车可调容量。然而,目前电动汽车调节潜力研究方法存在“时序性”和“实用性”两大局限,难以计及负荷侧资源“何时可调”、“调节持续时间”等时序调节特性,没有涵盖多影响因素的多时段调节潜力数学模型,难以直接应用于电网削峰填谷场景下的调控。

随着电网侧和用户侧的深度融合,电动公交车的充电行为参与电网调度愈发重要^[21]。文献[22]考虑电动公交车换电电量需求和充换电行为,提出了一种换电站-电池充电建设模式,并给出了相应的优化规划方法。文献[23]以充电负荷波动最小为优化目标,建立电池组白天和夜间有序充电二次规划模型。文献[24]以电动公交车快速充电站充电成本最小化为目标,建立快速充电站内电动公交车有序充电的数学模型。文献[25]考虑特殊地形的影响,以社会年综合成本最小化为目标,建立电动汽车充电设施最优规划模型。文献[26]建立兼顾充电站、用户和电网三方利益的充电站选址定容模型,为城区电动汽车充电站布局规划提供最优方案。上述文献对电动公交车的研究主要集中在充电站规划、充电优化策略等方面,而针对电网平衡层面的负荷调节潜力尚需详细的分析研究。

为解决上述问题,本文提出一种基于数据模型双驱动的电动公交车多时段负荷建模和调节潜力评估方法,从历史数据和物理模型出发,建立了电动公交车多时段负荷解析模型,并综合考虑用户侧和电网侧约束,得到多时段调节潜力解析评估模型,最后通过实例验证了本文所提方法具有较强的适用性和有效性。

1 电动公交车负荷时段划分

1.1 电动公交车负荷特性影响因素分析

电动公交车充电行为受多种因素影响,主要有充电方式、运营计划和电价3个影响因素^[27]。

1) 充电方式

当前电动公交车充电类型一般分为快速充电(快充)、慢速充电(慢充)和电池更换(换电)3种。

由于电动公交车运行模式较固定,充电模式分两种:(1)快充:公交车到达充电站时立刻快充,到发车时间停止充电开始出发;(2)慢充:公交车到达规定站点时,将需要充电的公交车采用慢充方式集中充电。因此,电动公交车一般采用的是“浅充浅用”、“一日多次”的充电方式。另一方面,根据电动公交车夜间停车时间长且集中,日间充电时间短且分散的特点,电动公交车采用的是“夜间慢充、日间快充”的充电模式。

2) 运营计划

公交车一般采取轮班运营制,运营时间大致是05:00—23:00。由于客流量时间上呈现不均衡性,同一线路公交车全天不同时段各班次时间间隔差别很大^[28]。一般每天早晚存在一个明显的客流高峰期,因此,为缓解客运压力,在早晚高峰公交车计划部门会在原有班次基础上增加班次,早晚高峰大致为5~8 min一班,而平时约为15~30 min一班。

3) 电价

受到峰谷电价政策的影响,为了降低充电成本,一般当日再无运营计划,充电时间灵活的车辆被安排在夜间电价优惠时段进行充电,因此夜间仍会有较大充电负荷出现的现象。

1.2 电动公交车运营类型

通过对电动公交车负荷特性影响因素分析,本文将电动公交车负荷分为以下3个运营类型。

1) 全天运营类型

该类型车辆按照固定时刻全天运营,利用运营班次间隙充电。为了增加运营时间和提高效率,充电方式选择快充。在早上首班车运营结束入网充电后,该类型车辆充电负荷逐渐上升,白天负荷平稳,直到晚高峰后,充电负荷逐渐下降。

2) 高峰期运营类型

在早晚高峰时段,公交公司通过增加运营班次缓解客运压力,由于该类型车辆只需要运营高峰时段,可用于充电的时间较长,一般选择慢充方式充电。该部分负荷主要是早高峰和晚高峰两个时段,在每个高峰时段,负荷呈现一个先升后降的趋势。

3) 夜间运营类型

除了全天运营和高峰期运营的车辆外,部分车辆会被安排在夜间运营,利用到站休息时间进行充电,一般选择快充方式。同时受到电价影响,部分车辆例如不再有当日运营任务的车辆,会被安排在夜间电价优惠时段进行充电,一般选择慢充方式。

因此, 在电价优惠的开始时刻, 负荷快速上升, 并在电价优惠结束时刻之前逐渐下降。

1.3 时段划分

基于电动公交车负荷特性的分析和运营类型的划分, 可以确定负荷时段划分点如表 1 所示。

表 1 时段划分点

Table 1 Period division points

时刻划分点	时刻划分点意义
t_1	夜间电价优惠开始时刻
t_2	夜间电价优惠结束时刻
t_3	首班车开始入网充电时刻
t_4	早高峰开始时刻
t_5	早高峰结束时刻
t_6	晚高峰开始时刻
t_7	晚高峰结束时刻
t_8	对应一天中的 24:00

2 电动公交车负荷建模

2.1 电动公交车负荷物理模型

电动汽车负荷的实际充电功率与电动汽车的工作状态有关, 而电动汽车是否处于充电状态主要由电动汽车的荷电状态(state of charge, SOC)决定。因此, t 时刻电动汽车的实际用电功率可以表示为

$$P_{EV}(t) = S_{EV}(t)P_{EV} \quad (1)$$

式中: $S_{EV}(t)$ 为 t 时刻电动汽车的工作状态, 0 表示电动汽车断电, 未处于充电状态, 1 表示电动汽车通电, 处于充电状态; P_{EV} 为电动汽车的充电功率(快充和慢充)。

其中, 电动汽车的工作状态 $S_{EV}(t)$ 可以表示为

$$S_{EV}(t) = \begin{cases} 0, & t-1 < t_{BEV} \text{ 或 } S_{SOC}(t-1) \geq S_{SOCmax} \\ 1, & t-1 \geq t_{BEV} \text{ 且 } S_{SOC}(t-1) < S_{SOCmax} \end{cases} \quad (2)$$

式中: t_{BEV} 为电动汽车的起始充电时刻; $S_{SOC}(t-1)$ 为 $t-1$ 时刻电动汽车电池的荷电状态; S_{SOCmax} 为用户设定允许电动汽车停止充电的电池荷电状态。

2.2 负荷特性影响因素分析

2.2.1 电动汽车负荷曲线拟合

通过对某地区电动汽车历史数据统计与分析, 单日单次充电的电动汽车集群典型充电负荷曲线如图 1 所示。

对典型负荷曲线进行函数拟合, 发现高斯分布拟合效果最佳。因此, 对于起始充电时间、初始荷电状态、期望荷电状态和运行里程等相关参数满足相同概率分布的电动汽车集群, 其充电负荷曲线可以用高斯分布进行拟合。

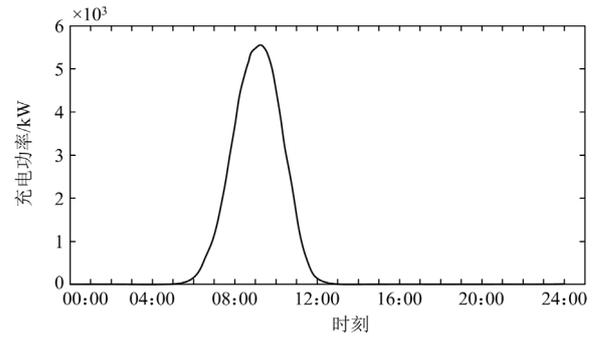


图 1 电动汽车集群典型充电负荷曲线

Fig. 1 Typical charging load curve of EV clusters

高斯分布拟合的负荷曲线为

$$F(t) = a_1 \exp\{-[(t - b_1)/c_1]^2\} \quad (3)$$

式中: a_1 为高斯分布的幅值参数; b_1 为高斯分布的位置参数; c_1 为高斯分布的形状参数。

2.2.2 拟合模型参数分析

1) 幅值参数 a_1

在采用高斯分布拟合的负荷曲线中, 幅值参数 a_1 决定了曲线的“高度”, 因此 a_1 主要与在网充电车辆数量和充电功率有关, 可以表示为

$$a_1 = N_i p_i \quad (4)$$

式中: N_i 为 i 时段在网充电车辆数量; p_i 为 i 时段在网充电车辆选择的充电功率。

2) 位置参数 b_1

由高斯分布特性可知, $t = b_1$ 是曲线的对称轴, 位置参数 b_1 决定了曲线的位置。因此, 在负荷曲线中, 位置参数与充电时段有关。本文中位置参数 b_1 取电动公交车集群的入网时刻和离网时刻的中间值。

$$b_1 = (t_i^s + t_i^e)/2 \quad (5)$$

式中, t_i^s 和 t_i^e 分别为充电开始时刻和结束时刻。

3) 形状参数 c_1

同样由高斯分布特性可知, 形状参数 c_1 越大, 曲线越“扁平”, 反之, c_1 越小, 曲线越“瘦高”。而负荷曲线的形状主要与行车和充电计划有关, 考虑到行车和充电计划不会轻易发生变化, 所以形状参数 c_1 也不会产生较大变化, 可以通过历史负荷数据拟合挖掘得到。

2.3 多时段负荷解析模型

基于确定的拟合负荷模型及时段划分依据, 对 3 类电动公交车负荷建立多时段负荷解析模型。

2.3.1 全天运营类型

1) $t_3 \sim t_4$ 时段。随着上午首班车运营结束接入电网充电, 该部分负荷快速增加。可以用高斯分布拟

合负荷的上升过程。

2) $t_4 \sim t_7$ 时段。该时段内, 该类型电动公交车入网车辆与离网车辆大致保持平衡, 在网充电的数量保持稳定, 充电负荷也保持稳定。可以用常数拟合该时段的负荷曲线。

3) $t_7 \sim t_8$ 及 $0 \sim t_1$ 时段。晚间, 随着车辆逐渐停运, 充电慢慢结束, 负荷逐渐降为 0。可以用高斯分布拟合负荷的下降过程。

通过曲线拟合得到全天运营类型电动公交车的多时段负荷解析模型, 如式(6)所示。

$$P_{\text{all}} = \begin{cases} p_s N_{\text{all}} \exp\{-(t+t_8-t_7)/c_{\text{all}}\} + k, & 0 \leq t < t_1 \\ 0, & t_1 \leq t < t_3 \\ p_f N_{\text{all}} \exp\{-(t-t_4)/c_{\text{all}}\} + k, & t_3 \leq t < t_4 \\ p_f N_{\text{all}} + k, & t_4 \leq t < t_7 \\ p_s N_{\text{all}} \exp\{-(t-t_7)/c_{\text{all}}\} + k, & t_7 \leq t < t_8 \end{cases} \quad (6)$$

式中: p_f 为快充功率; p_s 为慢充功率; N_{all} 为全天运营类型一个班次的公交车数量; c_{all} 为全天运营类型负荷曲线形状参数; k 为考虑到公交车的故障、修理、事故等因素的修正系数。

2.3.2 高峰期运营类型

该部分负荷对应早高峰和晚高峰两个时段, 随着高峰时段的开始和结束, 负荷呈现一个先升后降的趋势。

1) $t_4 \sim t_5$ 时段。随着早高峰时段的开始和结束, 该类型电动公交车负荷呈现一个先升后降的趋势。可以用高斯分布拟合该时段的负荷。

2) $t_6 \sim t_7$ 时段。该时段的负荷特性与早高峰时段相同, 可以用高斯分布拟合该时段的负荷。

通过曲线拟合得到高峰期运营类型电动公交车的多时段负荷解析模型, 如式(7)所示。

$$P_{\text{peak}} = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < t_4 \\ p_s N_{\text{peak}}^{\text{am}} \exp\left\{-\left[\left(t - \frac{t_4+t_5}{2}\right)/c_{\text{peak}}\right]^2\right\} + k, & t_4 \leq t < t_5 \\ 0, & t_5 \leq t < t_6 \\ p_s N_{\text{peak}}^{\text{pm}} \exp\left\{-\left[\left(t - \frac{t_6+t_7}{2}\right)/c_{\text{peak}}\right]^2\right\} + k, & t_6 \leq t < t_7 \\ 0, & t_7 \leq t < t_8 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $N_{\text{peak}}^{\text{am}}$ 为早高峰运营类型一个班次的公交车数量; $N_{\text{peak}}^{\text{pm}}$ 为晚高峰运营类型一个班次的公交车数量; c_{peak} 为高峰期运营类型负荷曲线形状参数。

2.3.3 夜间运营类型

$t_1 \sim t_2$ 时段。受到电价影响, 部分电动汽车充电

负荷转移充电时段至夜间优惠电价时段, 在电价优惠的开始时刻, 该类型负荷快速上升, 并在电价优惠结束时刻之前负荷逐渐下降。可以用高斯分布拟合该时段的负荷。

通过曲线拟合得到夜间运营类型电动公交车的多时段负荷解析模型, 如式(8)所示。

$$P_{\text{eve}} = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < t_1 \\ p_s N_{\text{eve}} \exp\left\{-\left[\left(t - \frac{t_1+t_2}{2}\right)/c_{\text{eve}}\right]^2\right\} + k, & t_1 \leq t < t_2 \\ 0, & t_2 \leq t < t_8 \end{cases} \quad (8)$$

式中: N_{eve} 为夜间电价优惠时段充电类型的公交车数量; c_{eve} 为夜间电价优惠时段充电类型负荷曲线形状参数。

2.3.4 整体电动公交车多时段负荷解析模型

将 3 种类型负荷累加起来得到电动公交车一天的多时段负荷解析模型, 如式(9)所示。

$$P_{\text{EB}} = P_{\text{all}} + P_{\text{peak}} + P_{\text{eve}} = \begin{cases} p_s N_{\text{all}} \exp\{-(t+t_8-t_7)/c_{\text{all}}\} + k, & 0 \leq t < t_1 \\ p_s N_{\text{eve}} \exp\left\{-\left[\left(t - \frac{t_1+t_2}{2}\right)/c_{\text{eve}}\right]^2\right\} + k, & t_1 \leq t < t_2 \\ 0, & t_2 \leq t < t_3 \\ p_f N_{\text{all}} \exp\{-(t-t_4)/c_{\text{all}}\} + k, & t_3 \leq t < t_4 \\ p_s N_{\text{peak}}^{\text{am}} \exp\left\{-\left[\left(t - \frac{t_4+t_5}{2}\right)/c_{\text{peak}}\right]^2\right\} + p_f N_{\text{all}} + k, & t_4 \leq t < t_5 \\ p_f N_{\text{all}} + k, & t_5 \leq t < t_6 \\ p_s N_{\text{peak}}^{\text{pm}} \exp\left\{-\left[\left(t - \frac{t_6+t_7}{2}\right)/c_{\text{peak}}\right]^2\right\} + p_f N_{\text{all}} + k, & t_6 \leq t < t_7 \\ p_s N_{\text{all}} \exp\{-(t-t_7)/c_{\text{all}}\} + k, & t_7 \leq t < t_8 \end{cases} \quad (9)$$

3 电动公交车调节潜力评估

调节潜力是指在特定约束条件下, 对于给定的调度时段, 负荷具备向上和向下调节的容量。研究表明, 非快充需求的电动汽车停靠时间远大于其充电时间^[29], 因此通过控制电动汽车的充电功率可以实现其用电负荷量的上下调节^[30]。

3.1 调节原理

电网调度与用户之间存在着差异化的需求。从用户的角度来看, 电动汽车属于可转移负荷, 其所需要的用电负荷总量不能随意削减, 仅可进行充电时间上的调整。而在电网侧, 不同调频方式决定了调度时间的差异, 也决定了对用户负荷调节容量的不同要求。因此, 只有同时满足电网侧和用户侧的差异化需求, 才能得到准确的电动公交车调节潜力。

3.1.1 可上调判断条件

将调控时段内电动公交车充电功率增至最大, 从而获得的最大负荷增加量称为电动公交车可上调潜力。

1) 功率约束

只有当充电功率小于最大充电功率时, 才可以向上提高充电功率, 从而为电网提供负荷上调容量。本文设定电动公交车只有快充 p_f 和慢充 p_s 两种充电功率, 因此最大充电功率为 p_f 。充电功率约束为

$$p_i < p_f \quad (10)$$

2) 电网侧约束

对于电网的调度要求, 参与上调控制的电动公交车必须保证有充足的剩余电量空间来满足调控时段内的大功率持续充电, 即电网侧约束为

$$E_c - E_i \geq \alpha T_{\text{agc}} p_f \quad (11)$$

式中: E_c 为电动公交车电池总电量; E_i 为电动公交车实时电池电量; T_{agc} 为电网调控时间; α 取[0,1]。

3) 用户侧约束

由于充电功率上调缩短了电动公交车的充电时间, 并且上调前预期的充电时间满足电动公交车的充电需求, 因此参与向上调节同样满足电动公交车的运营需求。

3.1.2 可下调判断条件

将调控时段内电动公交车充电功率减至最小, 从而获得的最大负荷减小量称为电动公交车可下调潜力。

1) 功率约束

与上调功率约束类似, 只有当充电功率大于最小充电功率时, 才能为电网提供负荷下调容量。由于本文不考虑电动公交车对电网的放电行为, 因此最小充电功率取 0。充电功率约束为

$$p_i > 0 \quad (12)$$

2) 电网侧约束

电动公交车参与电网下调调度, 其本身要具备

调控时段内具有持续下调能力, 即电网侧约束为

$$E_c - E_i \geq \beta T_{\text{agc}} p_i \quad (13)$$

式中, β 取[0,1]。

3) 用户侧约束

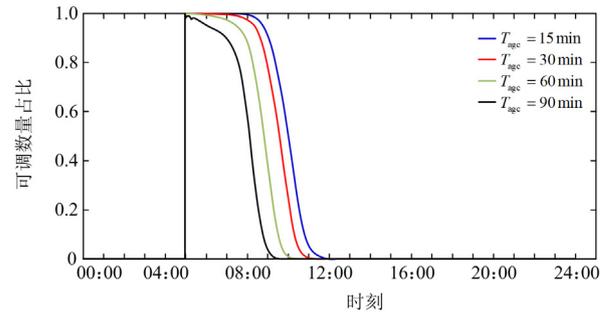
为了不影响参与调控的电动公交车正常出行需求, 在下调调度结束后, 电动公交车以最大充电功率进行充电, 调控时段与调控结束后还需充电时间之和应小于电动公交车预期离网时间, 所以用户侧约束为

$$T_{\text{agc}} + \frac{E_c - E_i}{p_f} \leq t_e \quad (14)$$

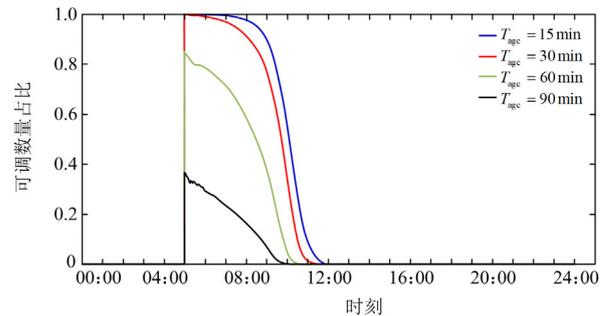
式中, t_e 为电动公交车的预期离网时间。

3.1.3 可参与调节的车辆数量比例

基于上述调节判断条件分析, 对某地区典型日 05:00—12:00 在网充电的某班次电动公交车集群进行调节能力判断, 得到不同电网调控时长下, 可参与上调和下调的电动公交车占在网车辆总数比例的变化情况, 如图 2 所示。



(a) 可上调比例



(b) 可下调比例

图 2 不同调控时长下电动公交车可调数量比例

Fig. 2 Proportion of electric buses that can participate in regulation under different regulation time

由图 2 可知, 对于一个车辆集群的充电过程而言, 可参与上下调节的车辆占在网充电车辆总数的

比例随着剩余充电时间的减少而逐渐下降, 并且调控时长越长, 下降速度越快。通过曲线拟合指标判定, 可参与调节的车辆数量比例与时间的关系 $G(t)$ 满足韦布尔分布。韦布尔分布如式(15)所示。

$$W(t) = a_2 \exp[-(t/b_2)^{c_2}] \quad (15)$$

式中: a_2 为韦布尔分布的幅值参数, 由于 $G(t)$ 取值在 $[0,1]$ 之间, 因此幅值参数 a_2 取 1; b_2 为位置参数, 位置参数与充电时间和调控时长 T_{agc} 有关, 本文 b_2 取离网时刻与调控时长之差, 即 $b_2 = t_i^c - T_{\text{agc}}$; c_2 为形状参数, 形状参数决定了 $G(t)$ 下降的快慢, 与调控时长 T_{agc} 有关, 本文中 $c_2 = -\lambda T_{\text{agc}}^2 + 17$, λ 在上调和下调计算时分别取 0.5 和 0.8。因此, $G(t)$ 如式(16)所示。

$$G(t) = \exp\{-[t/(t_i^c - T_{\text{agc}})]^{(-\lambda T_{\text{agc}}^2 + 17)}\} \quad (16)$$

进而求得在调节时段上调潜力大小为

$$P_{\text{EB,up}} = \frac{(p_f - p_s)P_{\text{EB}}G(t)}{p_s} \quad (17)$$

下调潜力大小为

$$P_{\text{EB,down}} = -P_{\text{EB}}G(t) \quad (18)$$

3.2 多时段调节潜力解析评估模型

对 3 类电动公交车负荷进行调节潜力分析。

1) 全天运营类型。由于该类型公交车运营时间长, 充电时间有限, 无法满足上调和下调潜力的约束条件, 因此其不具备上下调节潜力。

2) 高峰期运营类型。该类型公交车运营结束后有较长时间进行充电, 因此其可以较大程度地参与电力系统调度, 具有上下调节潜力。

3) 夜间运营类型。该类型公交车集中在夜间电价优惠时段充电, 由于夜间电价优惠时段较长, 因此该类型负荷具备调节潜力。

早、晚高峰时段的电动公交车充电负荷较大, 参与电网调度能力较强, 且在该时段不同地区之间市民的出行习惯以及外界环境影响因素不同, 电动公交车负荷调节潜力也有所差异。由于市民的出行习惯和外界环境影响因素较为复杂, 难以精准反映其变化规律, 因此在结合电动公交车负荷模型和调节潜力分析原理所建立的调节潜力模型的基础上, 采用基于神经网络的数据驱动方法引入修正系数 δ 、 μ , 对早、晚高峰时段的调节潜力模型进行修正。

基于上述分析, 得到多时段向上调节潜力 $P_{\text{EB,up}}$ 和向下调节潜力 $P_{\text{EB,down}}$ 解析模型, 分别如式(19)、式(20)所示。

$$P_{\text{EB,up}} = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < t_1 \\ (p_f - p_s)G(t)_{\text{eve}} N_{\text{eve}} \exp\left\{-\left[\left(t - \frac{t_1 + t_2}{2}\right)/c_{\text{eve}}\right]^2\right\} + k, & t_1 \leq t < t_2 \\ 0, & t_2 \leq t < t_4 \\ \delta(p_f - p_s)G(t)_{\text{peak}}^{\text{am}} N_{\text{peak}}^{\text{am}} \exp\left\{-\left[\left(t - \frac{t_4 + t_5}{2}\right)/c_{\text{peak}}\right]^2\right\} + k, & t_4 \leq t < t_5 \\ 0, & t_5 \leq t < t_6 \\ \mu(p_f - p_s)G(t)_{\text{peak}}^{\text{pm}} N_{\text{peak}}^{\text{pm}} \exp\left\{-\left[\left(t - \frac{t_6 + t_7}{2}\right)/c_{\text{peak}}\right]^2\right\} + k, & t_6 \leq t < t_7 \\ 0, & t_7 \leq t < t_8 \end{cases} \quad (19)$$

$$P_{\text{EB,down}} = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < t_1 \\ -p_s G(t)_{\text{eve}} N_{\text{eve}} \exp\left\{-\left[\left(t - \frac{t_1 + t_2}{2}\right)/c_{\text{eve}}\right]^2\right\} + k, & t_1 \leq t < t_2 \\ 0, & t_2 \leq t < t_4 \\ -\delta p_s G(t)_{\text{peak}}^{\text{am}} N_{\text{peak}}^{\text{am}} \exp\left\{-\left[\left(t - \frac{t_4 + t_5}{2}\right)/c_{\text{peak}}\right]^2\right\} + k, & t_4 \leq t < t_5 \\ 0, & t_5 \leq t < t_6 \\ -\mu p_s G(t)_{\text{peak}}^{\text{pm}} N_{\text{peak}}^{\text{pm}} \exp\left\{-\left[\left(t - \frac{t_6 + t_7}{2}\right)/c_{\text{peak}}\right]^2\right\} + k, & t_6 \leq t < t_7 \\ 0, & t_7 \leq t < t_8 \end{cases} \quad (20)$$

式中: $G(t)_{\text{eve}}$ 为夜间电价优惠时段充电类型的公交车随时间可参与调节的车辆数量比例; $G(t)_{\text{peak}}^{\text{am}}$ 为早高峰运营类型的公交车随时间可参与调节的车辆数量比例; $G(t)_{\text{peak}}^{\text{pm}}$ 为晚高峰运营类型的公交车随时间可参与调节的车辆数量比例。

4 实例仿真分析

4.1 参数设定与时段划分

本文对某地区 2020 年 1 月至 3 月的电动公交车负荷数据进行处理, 得到该地区典型日电动公交车

96点(15 min 间隔)负荷曲线, 并基于运行特性对其进行时段划分, 日负荷时段划分如图3所示。时段划分点取值如表2所示。电动公交车负荷模型参数取值如表3所示。

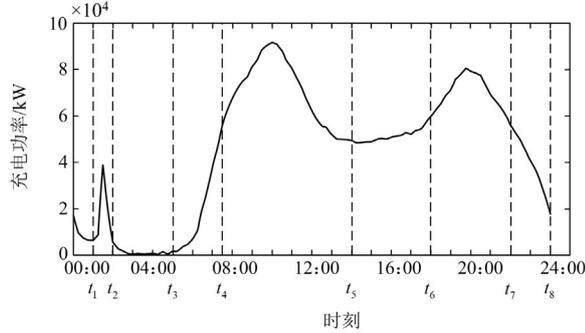


图3 时段划分图

Fig. 3 Period division diagram

表2 时段划分点取值

Table 2 Period division points value

时刻划分点	数值/15 min
t_1	4
t_2	8
t_3	20
t_4	30
t_5	56
t_6	72
t_7	88
t_8	96

表3 负荷模型参数取值

Table 3 Load model parameters value

参数	数值	参数	数值
N_{eve}	1000	p_s/kW	30
N_{all}	700	c_{eve}	1.5
N_{peak}^{am}	900	c_{all}	5
N_{peak}^{pm}	800	c_{peak}	7
p_f/kW	90	k/kW	$U(-500,500)$
δ	0.9	μ	0.9

4.2 多时段负荷解析模型

基于多时段负荷解析模型对该地区电动公交车冬季典型负荷曲线进行多时段拟合, 将参数代入后, 拟合得到的负荷曲线和历史数据曲线对比图如图4所示。

各时段曲线拟合效果如表4所示, 其中SSE表示拟合误差平方和, MSE表示均方误差, RMSE表示均方根误差, MAE表示平均绝对误差, R-squared

表示拟合模型与实际数据的相关系数。

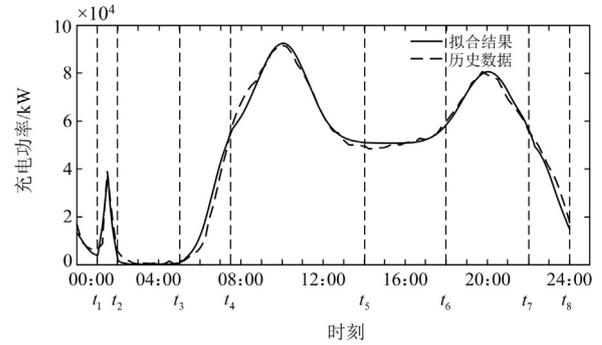


图4 曲线拟合结果

Fig. 4 Curve fitting results

表4 各时段曲线拟合效果指标

Table 4 Curve fitting effect index of each period

时段	SSE	MSE	RMSE	MAE	R-Squared
$0 \sim t_1$	0.0276	2.523×10^{-3}	0.0462	2.523×10^{-3}	0.9317
$t_1 \sim t_2$	0.0110	2.209×10^{-3}	0.0470	2.209×10^{-3}	0.8826
$t_2 \sim t_3$	0.0018	1.485×10^{-4}	0.0122	1.485×10^{-4}	0.5493
$t_3 \sim t_4$	0.0275	2.746×10^{-3}	0.0524	2.746×10^{-3}	0.9323
$t_4 \sim t_5$	0.0136	5.227×10^{-4}	0.0229	5.227×10^{-4}	0.9787
$t_5 \sim t_6$	0.0016	1.988×10^{-4}	0.0141	1.988×10^{-4}	0.6390
$t_6 \sim t_7$	0.0048	2.000×10^{-4}	0.0141	2.000×10^{-4}	0.9825
$t_7 \sim t_8$	0.0281	2.342×10^{-3}	0.0484	2.342×10^{-3}	0.9232

由表4可看出, 各时段的曲线拟合结果与历史数据的误差较小, 除 $t_2 \sim t_3$ 和 $t_5 \sim t_6$ 时段的R-Squared指标低于0.8外, 其余时段的R-Squared指标都较高, 且大部分都大于0.9, 拟合结果证明本文所提方法对电动公交车负荷曲线拟合的精度较高, 具有较强的适用性。其中 $t_2 \sim t_3$ 和 $t_5 \sim t_6$ 时段拟合程度较低的原因是该时段负荷比较稳定, 使用直线进行拟合, 但在实际充电负荷中, 仍会受到车辆事故维修、充电桩故障等因素的影响。

4.3 多时段调节潜力仿真评估

调控时长是电动汽车能否参与上下功率调节的重要因素, 决定了各时段参与调控的车辆数量。为了全面研究不同的调控持续时间对电动汽车调节潜力容量的影响, 并验证本文所提方法在实际应用中的可行性, 本文设置了4种场景来分析电动汽车的调节潜力, 如表5所示。

表5 调控时长场景

Table 5 Regulating time cases

场景1	场景2	场景3	场景4
15 min	30 min	60 min	90 min

将负荷模型参数分别代入多时段上调和下调潜力解析模型。在不同调度场景下, 电动公交车负荷调节潜力曲线及各可调时段的调节量分别如图 5 和表 6 所示。

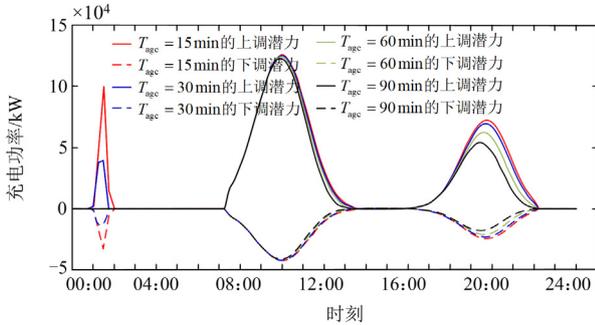


图 5 各场景下的调节潜力曲线

Fig. 5 Adjustable potential curve in different cases

表 6 各场景下的调节潜力

Table 6 Adjustable potential in different cases

场景	调节方向	深夜时段调节平均值/kW	早高峰时段调节平均值/kW	晚高峰时段调节平均值/kW
1	上调	2.8166×10^4	5.4530×10^4	3.0271×10^4
	下调	9.4889×10^3	1.8333×10^4	1.0285×10^4
2	上调	1.4285×10^4	5.3762×10^4	2.8584×10^4
	下调	4.8526×10^3	1.8073×10^4	9.6760×10^3
3	上调	2.1974×10^2	5.2410×10^4	2.4669×10^4
	下调	0	1.7666×10^4	8.4734×10^3
4	上调	1.4719×10^2	5.0620×10^4	2.0586×10^4
	下调	0	1.7047×10^4	7.1789×10^3

分析图 5 和表 6 可知, 电动汽车上下调节潜力主要集中在早高峰、晚高峰和深夜这 3 个时段, 分别对应了电动公交车的 3 个用电负荷高峰。其中早高峰时段的调节潜力最大, 以场景 1 为例, 早高峰时段的上调平均值为 5.453×10^4 kW, 下调平均值为 1.8333×10^4 kW, 远高于深夜时段和晚高峰时段的上下调节平均值。

4 个场景的电动公交车各时段调节潜力结果显示, 随着调控时长从 15 min 增长到 90 min, 电动公交车的调节潜力依次下降。以早高峰时段为例, 上调潜力依次下降 1.41%、3.89% 和 7.17%。原因是调控时间越长, 要求电动公交车在调度开始时刻的 SOC 值越小, 即有充足的剩余电池容量来参与电网调节, 所以符合调度要求的电动汽车数量减少, 上下调节潜力也就随之减小。此外, 场景 4 和场景 1 相比, 以上调为例, 早高峰时段调节潜力下降 7.17%, 晚高峰时段下降 32.01%, 深夜时段下降近 100%, 早、晚高峰时段调节潜力受调控时长影响明显小于深夜时段, 深夜时段受调控时长影响最大。

主要原因是早、晚高峰期充电车辆数量多, 充电时间长, 且在运营高峰时段, 因此充电开始时刻的 SOC 较低, 能够满足长时间调控的要求; 而深夜充电的车辆, 主要是受电价影响进行充电, 数量少, 初始 SOC 较高, 并且本算例中电价优惠时段较短, 因此调节潜力受调控时长影响较大。

在削峰填谷场景下, 电网负荷高峰时段为 08:00—12:00, 对应电动公交车负荷早高峰时段, 且在该时段电动公交车负荷调节潜力较大, 以场景 1 为例, 下调平均值为 1.8333×10^4 kW, 可以较大程度地参与电网调控进行削峰; 电网负荷低谷时段为 00:00—08:00, 在该时段仅深夜时段运行的车辆具备上调潜力, 以场景 1 为例, 上调平均值为 2.8166×10^4 kW, 可以较大程度地参与电网调控进行填谷。因此, 通过调控电动公交车负荷参与调节, 可以有效降低电网负荷峰谷差, 稳定电网运行。

5 结论

针对电动公交车负荷, 本文提出一种基于数据模型双驱动的多时段负荷建模和调节潜力评估方法, 为电网调度提供重要参考, 主要表现在以下几个方面。

1) 基于电动公交车的负荷特性和运营规律, 将电动公交车全天运营特性划分多个关键时段, 并通过曲线拟合的方法, 结合历史数据和物理模型确定拟合模型参数, 构建了电动公交车负荷模型及调节潜力多时段解析模型, 最后通过实例验证了该方法具有较强的适用性。

2) 电动公交车调节潜力主要分布在早高峰、晚高峰和深夜 3 个时段, 其中早、晚高峰时段的调节潜力较大, 并且受调控时长的影响较小。

3) 在电网削峰填谷场景下, 早高峰时段和深夜时段的电动公交车负荷具备较大的调节潜力, 可以参与电网调控。

4) 本文提出的调节潜力评估方法, 兼顾了电网平衡业务需求和电动公交车负荷生产运营需求, 建立了上下调节潜力模型, 可以有效引导电动公交车在满足自身运营需求的条件下参与新型电力系统的平衡, 具有一定的工程应用前景。

参考文献

[1] 彭大健, 裴玮, 肖浩, 等. 数据驱动的用户需求响应行为建模与应用[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2577-2586. PENG Dajian, PEI Wei, XIAO Hao, et al. Data-driven consumer demand response behavior modulization and application[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2577-2586.

- [2] 王彩霞, 时智勇, 梁志峰, 等. 新能源为主体电力系统的需求侧资源利用关键技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 37-48.
WANG Caixia, SHI Zhiyong, LIANG Zhifeng, et al. Key technologies and prospects of demand-side resource utilization for power systems dominated by renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 37-48.
- [3] 杨欢红, 施颖, 黄文焘, 等. 考虑实时需求侧响应的光储充电站容量优化配置方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(7): 51-58.
YANG Huanhong, SHI Ying, HUANG Wentao, et al. Optimal capacity configuration method of photovoltaic-battery charging station considering real-time demand side response[J]. Smart Power, 2023, 51(7): 51-58.
- [4] 姚颖蓓, 陆建忠, 傅业盛, 等. 华东地区电动汽车发展趋势及用电需求预测[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 141-145.
YAO Yingbei, LU Jianzhong, FU Yesheng, et al. Electric vehicle development trends and electricity demand forecast in East China[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 141-145.
- [5] 姚芳, 汤俊豪, 陈盛华, 等. 基于 ISSA-CNN-GRU 模型的电动汽车充电负荷预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 158-167.
YAO Fang, TANG Junhao, CHEN Shenghua, et al. Charging load prediction method for electric vehicles based on an ISSA-CNN-GRU model[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 158-167.
- [6] VAGROPOULOS S I, BALASKAS G A, BAKIRTZIS A G. An investigation of plug-in electric vehicle charging impact on power systems scheduling and energy costs[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 32(3): 1902-1912.
- [7] 尚姗姗, 刘敦楠, 李晓宇, 等. 基于实物期权的电动汽车充电站投资决策评估研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(9): 67-73, 89.
SHANG Shanshan, LIU Dunnan, LI Xiaoyu, et al. Investment decision evaluation of electric vehicle charging station based on real option[J]. Smart Power, 2022, 50(9): 67-73, 89.
- [8] 陈丽娟, 秦萌, 顾少平, 等. 计及电池损耗的电动公交车参与 V2G 的优化调度策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 52-60.
CHEN Lijuan, QIN Meng, GU Shaoping, et al. Optimal dispatching strategy of electric bus participating in vehicle-to-grid considering battery loss[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 52-60.
- [9] PAN Z N, YU T, CHEN L P, et al. Real-time stochastic optimal scheduling of large-scale electric vehicles: a multidimensional approximate dynamic programming approach[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 116: 105542.
- [10] 徐冉, 徐潇源, 王晗, 等. 考虑公交车移动特性的电动公交车-充电站-配电网联合调度[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(24): 36-44.
XU Ran, XU Xiaoyuan, WANG Han, et al. Coordinated dispatching of electric bus, charging station and distribution network considering bus travelling characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 36-44.
- [11] 李玲, 曹锦业, TOMIN N, 等. 计及电动汽车接入的区域综合能源系统双层日前协调优化调度[J]. 电力建设, 2023, 44(5): 23-33.
LI Ling, CAO Jinye, TOMIN N, et al. Bi-level coordinated day-ahead optimal dispatch of regional integrated energy system considering the integrations of electric vehicles[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(5): 23-33.
- [12] HE Z, CHENG Y, HU Z. Multi-time simulation of electric taxicabs' charging demand based on residents' travel characteristics[C]// 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), November 26-28, 2017, Beijing, China: 1-6.
- [13] 李含玉, 杜兆斌, 陈丽丹, 等. 基于出行模拟的电动汽车充电负荷预测模型及 V2G 评估[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 88-96.
LI Hanyu, DU Zhaobin, CHEN Lidan, et al. Trip simulation based charging load forecasting model and vehicle-to-grid evaluation of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 88-96.
- [14] 张琦, 杨健维, 向悦萍, 等. 计及气象因素的区域电动汽车充电负荷建模方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(6): 14-22.
ZHANG Qi, YANG Jianwei, XIANG Yueping, et al. Regional electric vehicle charging load modeling method considering meteorological factors[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(6): 14-22.
- [15] 吴豫, 董智, 赵阳, 等. 基于 LSTM 算法的配电网分布式电源和电动汽车充电站联合优化规划[J]. 供用电, 2023, 40(6): 64-74.
WU Yu, DONG Zhi, ZHAO Yang, et al. Joint optimization planning of distribution network DG and EV charging station based on LSTM algorithm[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(6): 64-74.
- [16] 牛牧童, 廖凯, 杨健维, 等. 考虑季节特性的多时间尺度电动汽车负荷预测模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(5): 74-85.
NIU Mutong, LIAO Kai, YANG Jianwei, et al. Multi-time-scale electric vehicle load forecasting model considering seasonal characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(5): 74-85.
- [17] 蔡黎, 葛棚丹, 代妮娜, 等. 电动汽车入网负荷预测及其与电网互动研究进展综述[J]. 智慧电力, 2022, 50(7):

- 96-103.
CAI Li, GE Pengdan, DAI Nina, et al. Review of research progress on load prediction and grid interaction of electric vehicles[J]. Smart Power, 2022, 50(7): 96-103.
- [18] 钱甜甜, 李亚平, 郭晓蕊, 等. 基于时空活动模型的电动汽车充电功率计算和需求响应潜力评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 127-134.
QIAN Tiantian, LI Yaping, GUO Xiaorui, et al. Calculation of electric vehicle charging power and evaluation of demand response potential based on spatial and temporal activity model[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 127-134.
- [19] 吴国沛, 莫一夫, 张勇军, 等. 计及调度-用户两侧差异化需求的电动汽车可调度潜力评估[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2): 68-75.
WU Guopei, MO Yifu, ZHANG Yongjun, et al. Schedulable potential evaluation of electric vehicles considering different requirements of dispatchers and users[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 68-75.
- [20] 邓艺璇, 黄玉萍, 黄周春. 基于随机森林算法的电动汽车充放电容量预测[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 181-188.
DENG Yixuan, HUANG Yuping, HUANG Zhouchun. Charging and discharging capacity forecasting of electric vehicles based on random forest algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 181-188.
- [21] 刘东奇, 张曦, 钱奕衡. 电动汽车集群充放电演化博弈协同策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 84-93.
LIU Dongqi, ZHANG Xi, QIAN Yiheng. Evolutionary game coordination strategy of electric vehicle cluster charging and discharging[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 84-93.
- [22] 钱斌, 石东源, 谢平平, 等. 电动公交车换电站-电池充电站优化规划[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(2): 64-69, 84.
QIAN Bin, SHI Dongyuan, XIE Pingping, et al. Optimal planning of battery charging and exchange stations for electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(2): 64-69, 84.
- [23] 蔡子龙, 束洪春, 单节杉. 考虑运营成本的电动公交车集群换电优化调度策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(17): 205-217.
CAI Zilong, SHU Hongchun, SHAN Jieshan. Optimal dispatching strategy for battery swapping of electric bus cluster considering operation cost[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(17): 205-217.
- [24] 李斌, 刘畅, 陈慧妙, 等. 基于混合整数规划的电动公交车快速充电站有序充电策略[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2623-2629.
LI Bin, LIU Chang, CHEN Huimiao, et al. Coordinated charging of plug-in electric buses in fast charging stations based on mixed-integer programming[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2623-2629.
- [25] 周思宇, 顾博, 张晓勇, 等. 计及山地城市时空特性的充电设施最优规划[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2229-2237.
ZHOU Siyu, GU Bo, ZHANG Xiaoyong, et al. Optimal planning for charging facilities considering spatial and temporal characteristics of mountainous cities[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2229-2237.
- [26] 侯慧, 唐俊一, 王逸凡, 等. 城区电动汽车充电站布局规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 181-187.
HOU Hui, TANG Junyi, WANG Yifan, et al. Layout planning of electric vehicle charging stations in urban areas[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 181-187.
- [27] 臧海祥, 舒宇心, 傅雨婷, 等. 考虑多需求场景的城市电动汽车充电站多目标规划[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 67-80.
ZANG Haixiang, SHU Yuxin, FU Yuting, et al. Multi-objective planning of an urban electric vehicle charging station considering multi demand scenarios[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 67-80.
- [28] 郭群勇, 万云鹏. 基于多指标协同的公交大站快车站点推荐方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(1): 162-168.
WU Qunyong, WAN Yunpeng. Stop selection of limited-stop bus services based on multi-criteria collaboration[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(1): 162-168.
- [29] DAS H S, RAHMAN M M, LI S, et al. Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: a technological review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 120: 109618.
- [30] 张聪, 张祥文, 夏俊荣, 等. 电动汽车实时可调度容量评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 99-106.
ZHANG Cong, ZHANG Xiangwen, XIA Junrong, et al. Research on estimation of electric vehicles real-time schedulable capacity[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 99-106.

收稿日期: 2023-09-11; 修回日期: 2023-12-21

作者简介:

何 聪(2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为负荷侧资源调节潜力及协同控制研究; E-mail: 1216405975@qq.com

耿 建(1971—), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 研究方向为电力市场、电力系统优化调度等;

张俊芳(1965—), 女, 通信作者, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统运行与控制、负荷侧资源调节潜力及协同控制等。E-mail: zjf807@163.com

(编辑 周金梅)