

中国电力
Electric Power
ISSN 1004-9649, CN 11-3265/TM

《中国电力》网络首发论文

题目：基于价格激励的城市公共充电站填谷潜力评估
作者：苏大威，范旖晖，赵天辉，潘虹锦，黄佑会，王岗，贾勇勇
网络首发日期：2024-10-08
引用格式：苏大威，范旖晖，赵天辉，潘虹锦，黄佑会，王岗，贾勇勇. 基于价格激励的城市公共充电站填谷潜力评估[J/OL]. 中国电力.
<https://link.cnki.net/urlid/11.3265.tm.20240930.1642.027>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于价格激励的城市公共充电站填谷潜力评估

苏大威¹, 范旖晖², 赵天辉³, 潘虹锦³, 黄佑会⁴, 王岗², 贾勇勇³

(1. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024; 2. 国网江苏省电力有限公司 电力调度控制中心, 江苏 南京 210024; 3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 4. 国网江苏电动汽车服务有限公司, 江苏 南京 210019)

摘要：随着新能源大规模接入电力系统，激励电动汽车参与电网调节，挖掘充电负荷的填谷潜力，已成为提升新能源消纳空间的重要手段之一。文中构建了城市公共充电站填谷潜力评估方法架构，提出了负荷特性和填谷潜力评估指标，具体阐述了充电订单概率建模、基于随机抽样的蒙特卡洛模拟和填谷潜力评估流程。最后，基于某省试点地市的城市公共充电站在不同价格激励下的真实充电订单数据，采用所提方法开展了试点地市所属省份城市公共充电站填谷潜力量化评估，结果表明，模拟的充电负荷和实际负荷走势一致、变化规律与实际情况相似，当该省服务费优惠超过七折后，每增加10%优惠，平均填谷响应约增加2.5万千瓦，实现了对价格激励的城市公共充电站填谷潜力评估。

关键词：电动汽车；填谷服务；城市公共充电站；填谷潜力评估；蒙特卡洛模拟

Evaluation of urban public charging stations valley filling potential based on price incentive

SU Dawei¹, FAN Yihui², ZHAO Tianhui³, PAN Hongjin³, HUANG Youhui⁴, WANG Gang², JIA Yongyong³

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China; 2. Power Dispatching Control Center, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China;
3. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China;
4. State Grid Jiangsu Electric Vehicle Service Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

Abstract: With the development of new power system, motivating valley filling users to participate in regulation and tapping the valley filling potential of charging loads has become one of the important means to enhance the space for new energy consumption. In this paper, the evaluation framework for valley filling potential of urban public charging stations is built, and the typical load characteristic indicators and valley filling potential evaluation parameters are proposed. The whole process of charging order probability modeling, Monte Carlo simulation based on random sampling, and sample data result re-processing are specifically described. Finally, taking charging stations in pilot cities under the jurisdiction of Jiangsu power grid as the research object, the guiding effect of charging loads under different time periods and price incentives was analyzed, and the valley filling potential of provincial urban public charging stations was evaluated. The results show that the simulated charging load trend is consistent with the actual load, and the change pattern is similar to the actual situation. When the service fee discount exceeds 30%, for every additional 10% discount, the average valley filling will increase by approximately 25MW. The proposed evaluation framework realizes the quantification of valley filling potential of public charging stations.

This work is supported by the Science and Technology of SGCC (System Balance Cost Representation and Allocation Method for Promoting New Energy Consumption, No. 5108-202218043A-1-1-ZN).

Keywords: electric vehicles; valley filling services; urban public charging stations; valley filling potential evaluation; Monte Carlo simulation

0 引言

截至 2024 年 6 月底,全国新能源装机容量达到约 8.6 亿千瓦,电网消纳矛盾日益突出,仅靠电源侧调节难以支撑未来更大规模的新能源消纳任务。因此,如何利用价格激励使电动汽车、储能等用户侧调节资源发挥填谷能力,以满足新能源发展和新型电力系统建设的需要,已成为电网公司考虑的重点问题之一。

国内外学者针对电动汽车充电负荷参与削峰填谷响应的研究主要集中在市场交易方式、协同优化调度、控制策略流程等方面。文献[1]对电动汽车参与电网调峰的潜力和经济性进行分析,重点探讨了其参与调峰辅助服务市场的交易方式、交易策略、充放电控制手段等内容。文献[2]结合电动汽车等负荷侧资源的充用电功率和时间可调节特性,提出了其参与省网调峰市场申报、出清、结算和分摊的原则与方法。文献[3]考虑电网、电动汽车和代理商利益关联关系,提出一种基于需求响应的电动汽车调度博弈模型。文献[4-5]基于系统的调峰需求,提出了电动汽车协同的电网优化调度策略。文献[6]从终端和电网两个层面对电动汽车参与辅助服务的控制策略进行总结,阐述了电动汽车参与分层式控制调峰的基本流程。文献[7]采用分布鲁棒机会约束描述电动汽车调节能力的不确定性,构建了充电服务运营商参与调峰市场的双层投标-分配模型。文献[8]以提高电网峰谷差率改善度等综合指标为目标,采用遗传算法制定最优电动汽车峰谷电价方案。然而,上述文献未提及价格激励对电动汽车充电负荷的调节效果,特别是填谷效果的影响。

近年来,需求响应潜力评估逐渐成为热点研究问题,其被定义为用户在用电高峰时段主动响应分时电价或其他激励方式,进行负荷削减、转移的能力[9]。目前已有的潜力评估方法中,模糊综合评价法应用较为广泛,具有良好的实用性[10]。同时,聚类分析也是评估需求响应潜力的典型方法之一,该方法通过选取关键指标对负荷典型特性进行聚类分析,起到量化评估负荷削峰填谷能力的效果。例如,文献[11]使用两阶段聚类分析用户的用电模式与用电规律性,文献[12]采用 K-Medoids 聚类法和戴维森堡丁指数总结用户用电行为特征,文献[13]利用 K-Means 聚类算法确定用于评估需求响应能力的用户典型日负荷曲线。随着新型电力系统发展,考虑机器学习的潜力评估方法逐渐被国内学者使用,如文献[14]针对工业用户提出基于高斯过程回归的需求响应潜力评估方法,文献[15]引入基于深度子领域自适应的需求响应潜力评估方法。此外,价格弹性也是评估需求响应潜力过程中反复讨

论的重点,文献[16]通过计算各行业的价格弹性评估价格型需求响应项目的潜力,文献[17]引入弹性影响权重形成改进的电价-电量弹性矩阵,对用户的需求响应潜力进行了量化。上述文献对用户需求响应的潜力评估方法展开具体研究,但聚焦于城市公共充电站或电动汽车填谷潜力评估主题的文献较少。例如,文献[18]采用蒙特卡洛法和二项分布法结合的方法估算出多台电动汽车的需求响应潜力,文献[19]提出一种基于功率调控的充电站削峰潜力评估方法,文献[20]对电动汽车参与放电潜力评估的研究现状进行了介绍,文献[21]考虑充电负荷特性,提出电动汽车调峰定价策略,文献[22]考虑用户充电行为不确定性,提出通过充电服务费引导电动汽车有序充电策略。然而,这些文献提到的充电站或电动汽车填谷潜力分析均未考虑不同价格激励的引导作用。

与传统的以电动汽车为研究对象基于车辆起始充电时间、初始荷电状态和日行驶里程数获得充电负荷曲线的研究思路不同,本文选取城市公共充电站为研究对象,开展了基于价格激励的城市公共充电站填谷潜力评估。首先,构造了城市公共充电站填谷潜力评估框架。其次,对充电订单进行概率建模,开展基于随机抽样的蒙特卡洛模拟,从而获得表征起始充电时刻的抽样数据结果。然后,提出包含谷期和平期负荷率在内的典型负荷特性指标,引入充电负荷填谷潜力评估参数,开展城市公共充电站的填谷潜力评估。最后,以某省部分地市的城市公共充电站为试点,分时段地实施不同服务费折扣力度下的营销方案。评估结果表明,城市公共充电站在不同时段、不同激励下的响应效果存在较强差异。

1 城市公共充电站填谷潜力评估框架

本文开展的城市公共充电站潜力评估详细流程如图1所示,主要包含充电订单概率建模、基于随机抽样的蒙特卡洛模拟和填谷潜力评估参数计算三个方面的内容。其中,充电订单概率建模在于从充电订单数据合集中进行数据时段定位、充电功率提取和概率分布建模,以得到订单样本数据库;蒙特卡洛模拟是为了处理充电行为的不确定性,获得满足特定分布的抽样数据结果;填谷潜力评估参数计算侧重于负荷特性和填谷潜力的定量描述和分析。

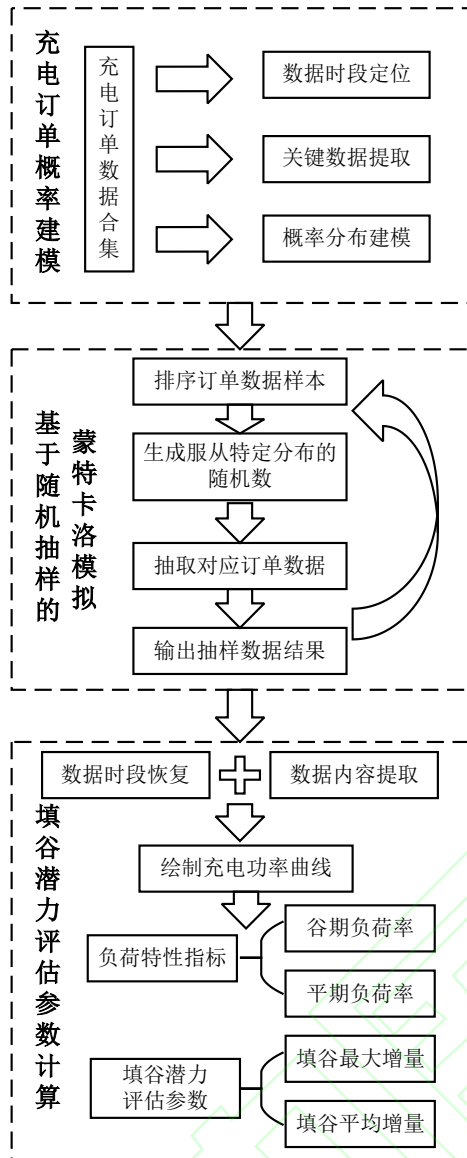


图1 城市公共充电站填谷潜力评估框架

Fig.1 The evaluation framework for valley filling potential of urban public charging stations

2 充电订单概率建模与蒙特卡洛模拟

2.1 充电订单概率建模

由于电动汽车充电行为存在较大随机性，在相同订单数量的情况下，不同充电行为的组合会形成差异化的充电负荷，故价格激励对充电负荷的影响，难以直接用于对更广范围充电负荷的影响分析。为了实现对更大范围城市公共充电站填谷潜力评估，考虑充电行为随机性的影响，有必要对充电订单开展概率建模。

根据2009年美国交通部对全美家用车辆出行情况统计结果，发现车辆最后一次出行的结束时刻近似服从正态分布^[23]。一般情况下，最后一次出行

结束时刻即为起始充电时刻，因此本文假设城市公共充电站负荷的起始充电时刻满足正态分布，其概率密度函数的数学表达如下：

$$f_{\text{pdf}}(t) = \frac{1}{\sigma_{\text{nd}} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t - \mu_{\text{nd}})^2}{2\sigma_{\text{nd}}^2} \right] \quad (1)$$

式中： $f_{\text{pdf}}(t)$ 为概率密度函数； t 为起始充电时刻； μ_{nd} 为起始充电时刻的期望值； σ_{nd} 为起始充电时刻的标准差。

2.2 基于随机抽样的蒙特卡洛模拟

蒙特卡洛模拟法是一种基于数据样本近似概率分布模拟数据随机出现的试验方法，适用于针对随机数据的仿真计算试验，具有简单快速、应用广泛的优点。蒙特卡洛模拟流程主要包含：样本收集、统计检验、概率建模、随机模拟、重复抽样、统计研究等步骤，即通过构建与数据样本概率分布近似的概率模型，基于随机模拟和重复抽样获得样本值，通过统计抽取的样本值推测未知特性，实现考虑随机性的评估测算。

本文利用基于随机抽样的蒙特卡洛模拟方法处理城市公共充电站的电动汽车充电行为不确定性，通过正态分布的累积分布函数随机抽取各充电订单的起始充电时刻，获得抽样数据结果，具体流程如图2所示。其中，蒙特卡洛模拟和抽样分布函数的数学表达如下：

$$f_i = f_{\text{cdf}}(x_{1,i}, x_{2,i}, \dots, x_{M,i}) \quad (2)$$



式中： $x_{i,j}$ 为第*i*轮抽取的第*M*个随机变量； $f_{\text{cdf}}(t)$ 为服从正态分布的样本累积分布函数；*M*为每轮抽样的抽取随机变量总次数；*N*为重复抽样总轮数（ $i=1,2,\dots,N$ ）。

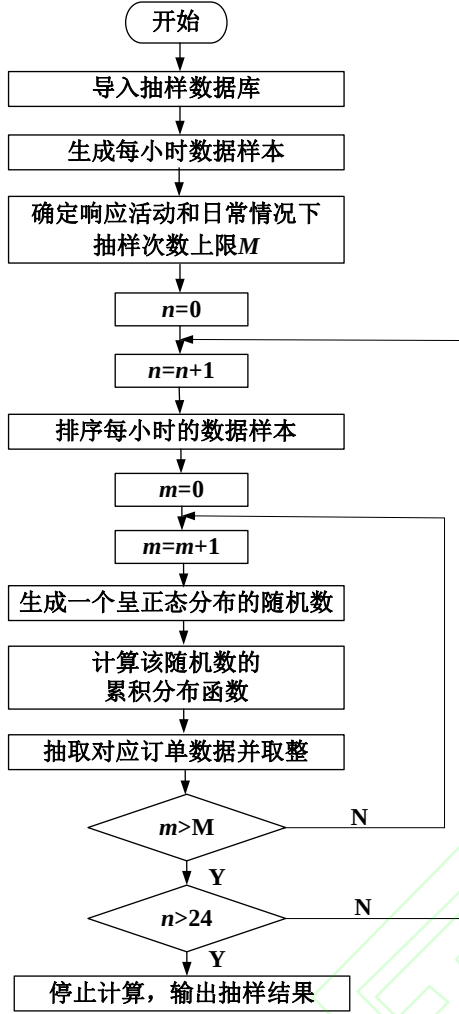


图2 基于随机抽样的蒙特卡洛模拟流程

Fig.2 Monte Carlo simulation flow chart based on random sampling

3 填谷潜力评估方法

3.1 负荷特性分析

负荷特性指标体现了电网的负荷状况，通常可以按不同时间尺度（日、月、年）划分，主要包含最大负荷、平均负荷、峰谷差、负荷率等。其中，谷期负荷率 λ_{valley} 和平期负荷率 λ_{flat} 可以反映谷期和平期电力需求情况，数学表达如下：

$$\lambda_{\text{valley}} = \frac{P_{\text{ave-valley}}}{P_{\text{max}}} \quad (4)$$

$$\lambda_{\text{flat}} = \frac{P_{\text{ave-flat}}}{P_{\text{max}}} \quad (5)$$

式中： P_{max} 为日内负荷最大功率； $P_{\text{ave-flat}}$ 、 $P_{\text{ave-valley}}$ 分别为平、谷时段内负荷功率平均值。

3.2 填谷潜力分析

填谷潜力是指用户参与响应增加谷时段负荷的能力，表征响应程度。通过改变营销活动服务费折扣力度，利用价格激励使充电负荷调整充电行为，将谷时段开展活动后的充电功率与同期不开展活动的充电功率相减，即获得每个时段的充电负荷填谷潜力。通过计算不同营销活动力度下，各时段充电负荷填谷增量的最大值 $\beta_{\text{max-valley}}$ 和平均值 $\beta_{\text{ave-valley}}$ ，可以分析出价格激励对负荷充电时段的引导能力，数学表达如下：

$$\beta_{\text{max-valley}} = \max(\beta_{\text{valley}}) \quad (6)$$

$$\beta_{\text{ave-valley}} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \beta_{\text{valley}}(t) \quad (7)$$

式中： j 为服务费折扣力度类型； t 为时段索引； T 为总时段数； P_{valley}^j 为第 j 种服务费折扣力度下 t 时段的营销活动后负荷充电功率； P_{valley}^0 为第 j 种服务费折扣力度下 t 时段的营销活动前负荷充电功率。

3.3 填谷潜力评估流程

填谷潜力评估流程如图3所示。具体步骤为：

- 1) 解析被抽样订单的充电起始时刻、终止时刻和充电电量信息。
- 2) 根据充电持续时间和电量，计算平均充电功率，绘制充电功率曲线。
- 3) 计算负荷特性和填谷潜力指标，完成填谷潜力评估。

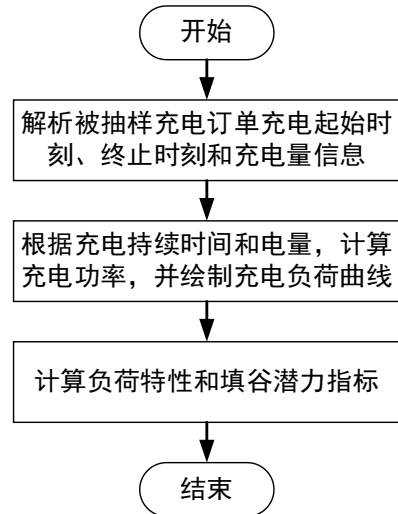


图3 填谷潜力评估流程

Fig.3 Flow chart for valley filling potential

4 算例分析

4.1 算例数据

以某省级电网下属城市公共充电站为研究对象，选择 A 地市（以下称 A 市）10 座、B 地市（以下称 B 市）35 座城市公共充电站为试点，开展充电服务费价格打折优惠活动，激励电动汽车充电负荷参与填谷响应，具体活动时间和方案如表 1 所示。

表 1 城市公共充电站优惠活动方案

Table 1 Marketing activities of urban public charging stations

stations		
日期	营销活动时段	活动力度
4 月 9 日	11:00-13:00	服务费七折
4 月 10 日	00:00-03:00	
4 月 11 日	11:30-15:00	
4 月 15 日	11:30-13:30	服务费五折
4 月 16 日	11:00-12:30	
4 月 17 日	11:00-12:30	
4 月 21 日	12:00-14:00	
4 月 22 日	11:15-12:30	
4 月 23 日	06:00-08:00	
4 月 24 日	00:15-03:00	
4 月 27 日	11:15-12:30	服务费全免
4 月 29 日	11:00-12:30	
4 月 30 日	11:00-12:30	
5 月 1 日	11:00-12:30	
5 月 2 日	01:00-03:00	
5 月 2 日	11:00-12:30	

分析参与活动充电桩历史连续 30 天的充电订单起始充电时刻，其均值为 15.02，标准差为 5.18，绘制其概率密度直方图和累积分布曲线，并基于公式(1)、(3)绘制相应的正态分布曲线，前后两者对比情况如图 4 和图 5 所示，可以发现，二者走势相似，表明电动汽车起始充电时刻服从正态分布，可采用充电订单数据和基于正态分布抽样的蒙特卡洛法模拟充电负荷。

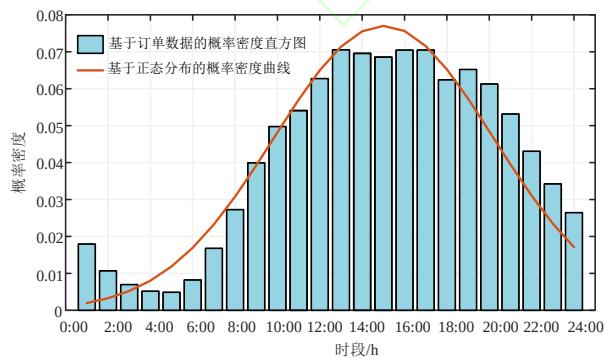


图 4 概率密度对比

Fig.4 Probability density comparison

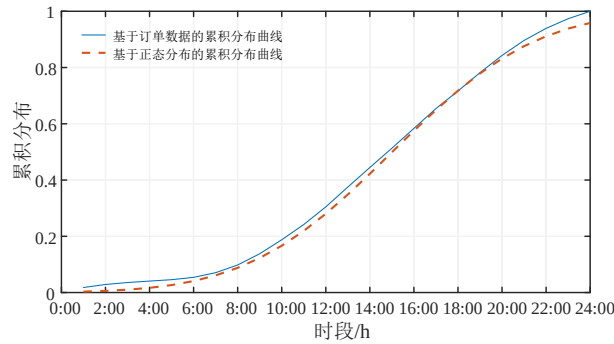


图 5 累积分布曲线对比

Fig.5 Cumulative distribution curve comparison

4.2 充电服务费优惠的填谷成效分析

在服务费七折情况下，凌晨和午间的充电负荷与参考日相比均无明显增长。试点城市公共充电站的充电负荷如图 6 和图 7 所示，以未组织活动的前 7 天充电负荷平均值为参考，可以发现活动期间的负荷与参考日相近。在充电订单方面，活动日凌晨的（00:00-03:00）充电订单增速为 24 单/小时，与参考日 27 单/小时接近；活动日午间（11:00-15:00）的增速为 152 单/小时，比参考日提升 4.8%。

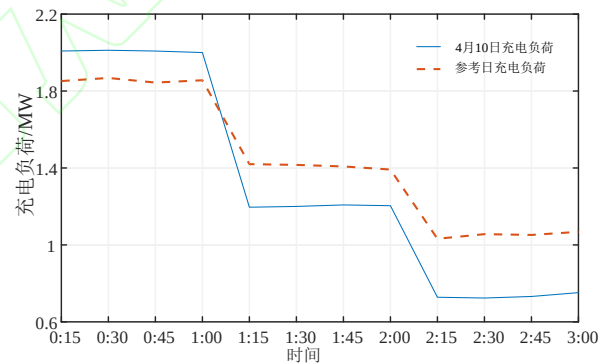


图 6 服务费七折下 4 月 10 日凌晨充电负荷情况

Fig.6 The charging load before dawn on April 10th under the 30% discount of the service fee

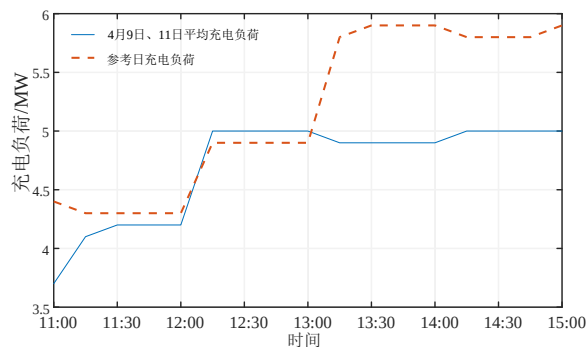


图 7 服务费七折下 4 月 9、11 日午间平均充电负荷情况

Fig.7 The average charging load at noon on April 9th and

11th under the 30% discount of the service fee

在服务费五折情况下，充电负荷在凌晨时段无明显变化，而午间各时段略有增长，平均响应增长 0.47MW。试点城市公共充电桩的充电负荷如图 8 和图 9 所示，凌晨时段仍与参考日相近，而午间平均增长 10%，最大增长充电负荷为 0.75MW。在充电订单方面，活动日凌晨（00:00-03:00）的充电订单增速为 25 单/小时，仍与参考日 23 单/小时接近；活动日午间（11:00-15:00）的增速为 134 单/小时，比参考日提升 18.6%。

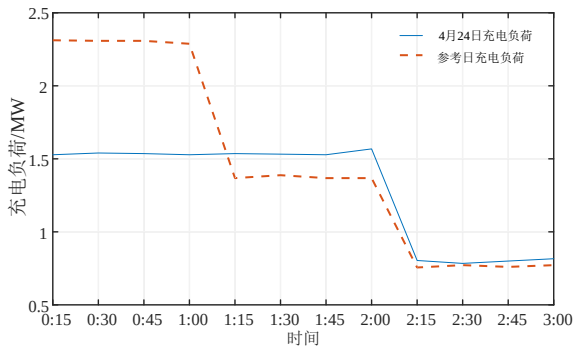


图 8 服务费五折下 4 月 24 日凌晨充电负荷情况

Fig.8 The charging load before dawn on April 24th under the 50% discount of the service fee

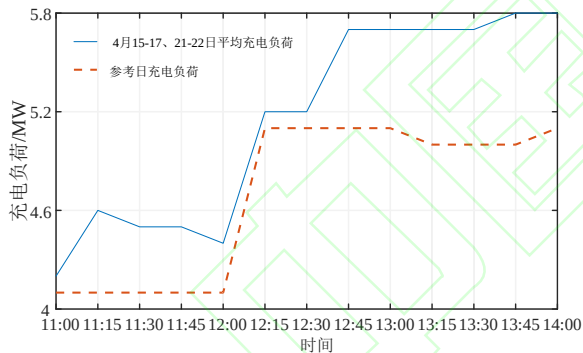


图 9 服务费五折下 4 月 15-17 日、4 月 21-22 日午间平均充电负荷情况

Fig.9 The average charging load at noon on April 15th-17th and April 21th-22th under the 50% discount of the service fee

在服务费全免情况下，充电负荷在凌晨和午间时段比参考日均明显增长，平均增长量为 0.48MW 和 1.2MW。充电负荷如图 10 和图 11 所示，凌晨时段充电功率平均增长 38%，最大为 0.59MW；午间时段平均增长 27%，最大增长 1.5MW。在充电订单方面，活动日凌晨（01:00-03:00）的充电订单增速为 34 单/小时，午间（11:00-12:30）为 165 单/小时，均比参考日提升约 100%。

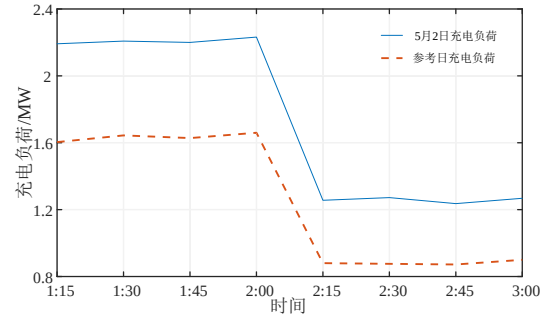


图 10 服务费全免下 5 月 2 日凌晨充电负荷情况

Fig.10 The charging load before dawn on May 2th under the service fee exemption

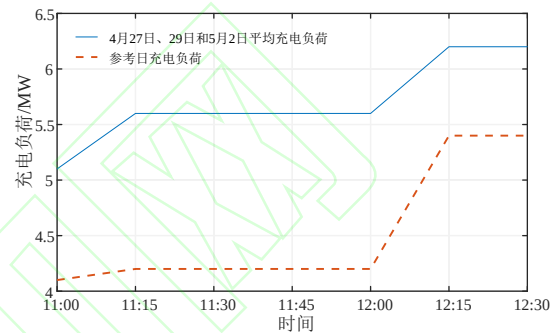


图 11 服务费全免下 4 月 27 和 29 日、5 月 2 日午间平均充电负荷情况

Fig.11 The average charging load at noon on April 27th, 29th, and May 2nd under the service fee exemption

对比分析不同充电服务费折扣优惠激励情况，可以得出如下结论：一是午间充电服务费优惠对充电负荷填谷能力激励作用强于凌晨，服务费优惠超过七折后，优惠每提升 10%，平均响应能力约提升 5%；二是当充电服务费优惠力度低于五折时，电动汽车对充电服务费优惠敏感度较低，服务费每优惠 10%，订单增速提升约 9.3%；当充电服务费优惠力度超过五折时，电动汽车对充电服务费优惠敏感度显著提升，每优惠 10%的服务费，订单增速提升约 20%。

4.3 全省城市公共充电桩填谷潜力评估

A 市、B 市参与充电服务费优惠的 45 座充电站（共 385 个充电桩）在活动日和参考日的充电订单数量（剔除新注册参与活动用户订单）如表 2 所示。截至 2022 年底，某省公共充电桩保有量约 6.02 万个，根据充电桩比例关系，折算获得全省城市公共充电站日常和相同优惠活动下的各时段充电订单数量，以开展优惠活动的公共充电站订单数据为样本，折算的订单数作为各时段抽样次数上限，采用

本文所提基于随机抽样的蒙特卡洛模拟方法，评估荷填谷潜力。
不同服务费优惠下全省城市公共充电站的充电负

表 2 不同时段、不同价格激励下的活动日、参考日充电订单数量统计

Table 2 Statistics of charging orders numbers on activity and reference days under different periods and price incentives						
营销活动	活动日期	活动时段	对应订单数	参考日期	参考时段	对应订单数
服务费七折	4 月 9 日	11:00-13:00	288	4 月 2 日	11:00-13:00	207
	4 月 10 日	00:00-03:00	71	4 月 3 日	00:00-03:00	82
	4 月 11 日	11:30-15:00	549	4 月 4 日	11:30-15:00	589
服务费五折	4 月 15 日	11:30-13:30	274	4 月 8 日	11:30-13:30	258
	4 月 16 日	11:00-12:30	198	4 月 9 日同时段已开展营销活动		
	4 月 17 日	11:00-12:30	193	4 月 10 日	11:00-12:30	115
	4 月 21 日	12:00-14:00	322	4 月 14 日	12:00-14:00	249
	4 月 22 日	11:15-12:30	150	4 月 15 日同时段已开展营销活动		
	4 月 24 日	00:15-03:00	63	4 月 17 日	00:15-03:00	57
服务费全免	4 月 27 日	11:15-12:30	213	4 月 20 日	11:15-12:30	97
	4 月 29 日	11:00-12:30	267	4 月 22 日同时段已开展营销活动		
	4 月 30 日	11:00-12:30	249	4 月 23 日	11:00-12:30	122
	5 月 1 日	11:00-12:30	247	4 月 24 日	11:00-12:30	153
	5 月 2 日	01:00-03:00	68	4 月 25 日	01:00-03:00	29
	5 月 2 日	11:00-12:30	260	4 月 26 日	11:00-12:30	142

按照全省电动汽车充电同时率最大不超过 30%考虑，通过填谷潜力评估方法获得全省城市公共充电站模拟日常充电负荷曲线如图 12 所示，与图 13 全省城市公共充电站实际典型充电负荷曲线相比，可以发现模拟的日常充电负荷和实际典型负荷数据变化趋势一致、数据接近，模拟数据可信度较高。

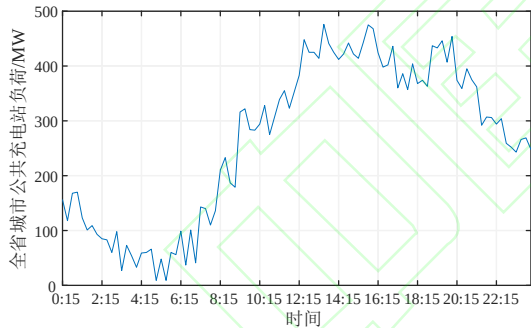


图 12 全省城市公共充电站模拟日常充电负荷曲线
Fig.12 Simulated load curve of provincial urban public charging stations without activities

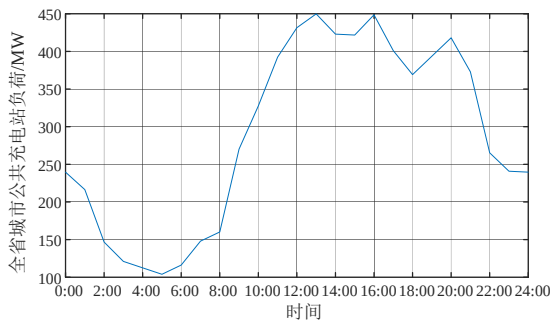


图 13 全省城市公共充电站实际典型充电负荷曲线
Fig.13 Actual load curve of provincial urban public

charging stations on the typical day

通过填谷潜力评估获得不同服务费折扣优惠下凌晨、午间的全省城市公共充电站负荷曲线如图 14 和图 15 所示，相应时段的负荷特性和全省城市公共充电站填谷潜力情况如表 3 和表 4 所示。

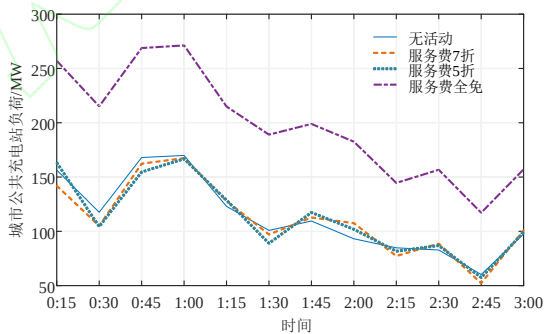


图 14 凌晨不同活动下全省城市公共充电站负荷曲线
Fig.14 Load curve of provincial urban public charging stations before dawn under different activities

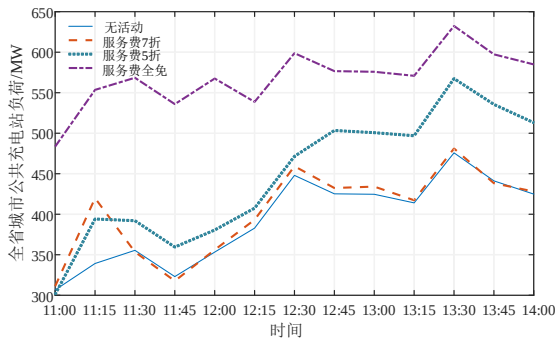


图 15 午间不同活动下全省城市公共充电站负荷曲线
Fig.15 Load curve of provincial urban public charging

stations at noon under different activities

由图 14 和 15 可见, 午间服务费优惠对填谷响应的激励作用强于凌晨。当凌晨服务费优惠少于五折时, 充电负荷的填谷响应为几乎 0; 午间填谷响应随服务费优惠力度增加而增长, 具体表现为服务费优惠七折时填谷响应作用有限, 服务费五折和全免情况的填谷响应逐渐提升。模拟结果与试点城市公共充电站的真实充电负荷变化规律相似, 进一步表明模拟方法有效。

表 3 不同服务费优惠下负荷特性指标

Table 3 Load characteristic indicators under different activities

服务费优惠	谷期负荷率	平期负荷率
无活动	0.178	0.795
七折	0.175	0.785
五折	0.149	0.666
全免	0.184	0.597

注: 平期 11:00-17:00、22:00-24:00, 谷期 0:00-8:00。

表 4 全省城市公共充电站填谷潜力评估参数
(单位: 万千瓦)

Table 4 Evaluation parameters for valley filling potential of provincial urban public charging stations (unit: 10 MW)

服务费 优惠	凌晨 (0:15-3:00)		午间 (11:00-14: 00)	
	最大 增量	平均 增量	最大 增量	平均 增量
七折	0	0	8.07	0.98
五折	0	0	9.44	5.5
全免	10.13	8.43	21.43	17.47

由表 3 和表 4 可知, 由于服务费优惠活动可引导充电负荷转移充电时间, 使得平期负荷率降低, 谷期负荷率随着优惠力度增强而提高。服务费七折和五折对于提升谷期负荷率不显著, 凌晨时段填谷响应增量为 0, 午间时段有小幅的填谷响应增量; 当服务费全免时会提升谷期负荷率, 凌晨充电填谷响应最大可达 10.13 万千瓦, 平均响应为 8.43 万千瓦, 午间响应最大量为 21.43 万千瓦, 平均响应为 17.47 万千瓦。服务费优惠超过七折后, 每增加 10%优惠, 平均填谷响应量约增加 2.5 万千瓦。

5 结论

本文提出了基于充电订单概率建模、随机抽样的蒙特卡洛模拟和填谷潜力评估参数计算的评估框架, 采用试点地市的公共充电站在不同充电服务费优惠时的真实充电订单数据, 开展了全省城市公共充电站填谷响应模拟, 发现模拟的充电负荷

和实际负荷走势一致、变化规律与试点实际情况相似, 系统谷期负荷率随着全省城市公共充电站的充电服务费优惠力度增强而提高。当该省城市公共充电站充电服务费优惠超过七折后, 每增加 10%优惠, 平均填谷响应约增加 2.5 万千瓦, 实现了对价格激励的城市公共充电站填谷潜力量化评估。

本文所提测算方法侧重于电动汽车对价格敏感程度下的填谷潜力评估研究, 未开展关于城市公共充电站考虑盈利情况的降低服务费意愿与定价博弈分析。在下阶段工作中, 计划考虑充电负荷增长率、竞争对手定价、市场填谷需求及响应补贴力度等因素, 研究城市公共充电站以盈利为目的的降低服务费意愿和定价行为对填谷潜力的影响, 提升评估结果准确性。通过开展填谷潜力评估, 充电负荷预测值按响应能力提升情况修正后的结果, 可作为城市公共充电站参与市场报量交易的申报依据。

参考文献:

- [1]白泽洋,巨健,姜炎君等.电动汽车参与电网调峰的关键技术研究综述[J]. 电力需求侧管理,2022,24(06):25-31.
- BAI Zeyang, JU Jian, JIANG Yanjun, et al. Key technologies of electric vehicles participating in power grid peak shaving [J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(06):25-31.
- [2]史沛然,李彦宾,江长明等.第三方独立主体参与华北电力调峰市场规则设计与实践[J].电力系统自动化,2021,45(05):168-174.
- SHI Peiran, LI Yanbin, JIANG Changming, et al. Rule design and practice for third-party independent entities participating in electric power peak regulation auxiliary service market of north China [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(05):168-174.
- [3]程宏波,罗通,康琛,等. 电动汽车代理商参与需求响应的多层博弈竞标模型[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(2): 46-56.
- CHENG Hong-bo, LUO Tong, KANG Chen, et al. Multi-layer game bidding model for electric vehicle aggregators participating in demand response[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(2): 46-56
- [4]卢艺,梁俊文,程韧俐,等. 考虑光伏和电动汽车不确定性的配电网鲁棒经济调度[J]. 电工电能新技术,

2018, 37(9): 42-50.

LU Yi, LIANG Jun-wen, CHENG Ren-li, et al. Robust economic dispatching of distribution network including photovoltaic and electric vehicles[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(9): 42-50.

[5]王敏,吕林,向月.计及 V2G 价格激励的电动汽车削峰协同调度策略[J].电力自动化设备,2022,42(04):27-33+85.

WANG Min, LÜ Lin, XIANG Yue. Coordinated scheduling strategy of electric vehicles for peak shaving considering V2G price incentive [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(04):27-33+85.

[6]裴振坤,王学梅,康龙云.电动汽车参与电网辅助服务的控制策略综述[J].电力系统自动化, 2022, 47(18): 17-32.

PEI Zhenkun, WANG Xuemei, KANG Longyun. Review on control strategies for electric vehicles participating in ancillary services of power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 47(18): 17-32.

[7]文艺林,胡泽春,宁剑等.基于分布鲁棒机会约束的充电运营商参与调峰市场投标策略[J].电力系统自动化,2022,46(07):23-32.

WEN Yilin, HU Zechun, NING Jian, et al. Bidding strategy of charging operator participating in peak regulation market based on distributionally robust chance constraint [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(07):23-32.

[8]许珊,李扬.引导电动汽车有序充放电的峰谷电价时段优化模型[J].电力需求侧管理,2018,20(05):11-15.

XU Shan, LI Yang. An optimization model of peak-valley price time interval for guiding the orderly charging and discharging of electric vehicles [J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(05):11-15.

[9]郭浩然,刘洋,许立雄等.基于多源异构数据关联规则分析的需求响应潜力居民用户辨识方法[J].电网技术,2023,47(05):1950-1961.

GUO Haoran, LIU Yang, XU Lixiong, et al. Recognition of demand response potential resident users based on multi-source heterogeneous data

association rule analysis [J]. Power System Technology, 2023, 47(05):1950-1961.

[10]周星月,黄向敏,张勇军等.基于需求响应潜力模糊评估的电动汽车实时调控优化模型[J].电力自动化设备,2022,42(10):30-37.

ZHOU Xingyue, HUANG Xiangmin, ZHANG Yongjun, et al. Real-time scheduling and optimization model of electric vehicles based on fuzzy evaluation of demand response potential [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(10):30-37.

[11]雷翔胜,伍子东,董萍等.基于两阶段聚类分析的用电需求响应潜力评估方法[J].南方能源建设,2020,7(S2):1-10.

LEI Xiangsheng, WU Zidong, DONG Ping, et al. Method of demand response potential assessment based on two-stage cluster analysis [J]. Southern Energy Construction, 2020, 7(S2):1-10.

[12]宋美琴,王俐英,曾鸣.基于用电行为特征的工业用户需求响应潜力研究[J].电力科学与工程,2023,39(02):1-7.

SONG Meiqin, WANG Liying, ZENG Ming. Research on demand response potential of industrial users based on electricity consumption behavior characteristics [J]. Electric Power Science and Engineering, 2023, 39(02):1-7.

[13]任炳俐,张振高,王学军等.基于用电采集数据的需求响应削峰潜力评估方法[J].电力建设,2016,37(11):64-70.

REN Bingli, ZHANG Zhengao, WANG Xuejun, et al. Assessment method of demand response peak shaving potential based on metered load data [J]. Electric Power Construction, 2016, 37(11):64-70.

[14]吴迪,王韵楚,郁春雷等.基于高斯过程回归的工业用户需求响应潜力评估方法[J].电力自动化设备,2022,42(07):94-101

WU Di, WANG Yunchu, YU Chunlei, et al. Demand response potential evaluation method of industrial users based on Gaussian process regression [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(07):94-101.

[15]孔祥玉,刘超,王成山等.基于深度子领域自适应的需求响应潜力评估方法[J].中国电机工程学报,2022,42(16):5786-5797+6156.

KONG Xiangyu, LIU Chao, WANG Chengshan, et al.

Demand response potential assessment method based on deep subdomain adaptation network [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16):5786-5797+6156.

[16]李亚平,王珂,郭晓蕊等.基于多场景评估的区域电网需求响应潜力[J].电网与清洁能源,2015,31(07):1-7.

LI Yaping, WANG Ke, GUO Xiaorui, et al. Demand response potential based on multi-scenarios assessment in regional power system [J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(07):1-7.

[17]张若愚,刘敏,李震.基于价格弹性矩阵的用户响应潜力评估方法[J].电力科学与工程,2022,38(07):17-24.

ZHANG Ruoyu, LIU Min, LI Zhen. Evaluation method of user response potential based on price elasticity matrix [J]. Electric Power Science and Engineering, 2022, 38(07):17-24.

[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]刘琦颖,曲大鹏,范晋衡等.基于功率调控的充电站削峰潜力评估方法[J].机电工程技术,2022,51(05):74-77.

LIU Qiying, QU Dapeng, FAN Jinheng, et al. Evaluation method of peak-shaving potential of charging station based on power regulation [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2022, 51(05):74-77.

[20]陈丽丹,张尧等.电动汽车充放电负荷预测研究综述[J].电力系统自动化,2019,43(10):177-191.

CHEN Lidan, ZHANG Yao, et al. Overview of charging and discharging load forecasting for electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10):177-191.

[21]王庆园,崔莉,王明深等.考虑快慢充负荷特性的电动汽车调峰定价策略[J].电力工程技术,2023,42(4):31-40.

WANG Qingyuan, CUI Li, WANG Mingshen, et al. Peak load regulation pricing strategy of electric vehicle considering fast and slow charging characteristics [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023,42(4):31-40.

[22]范宏,李嘉晖,郭琦.考虑用户充电决策行为的电动汽车充电引导策略[J].电力工程技术,2023,42(4):23-30.

FAN Hong, LI Jiahui, GUO Qi. Electric vehicle charging guidance strategy considering user charging decision-making behavior [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023,42(4):31-40.

[23]蔡德福,钱斌,陈金富等.含电动汽车充电负荷和风电的电力系统动态概率特性分析[J].电网技术,2013,37(03):590-596.

CAI Defu, QIAN Bin, CHEN Jinfu, et al. Analysis on dynamic probabilistic characteristic of power grid connected with electric vehicle charging load and wind power [J]. Power System Technology, 2013, 37(03):590-596.

基金项目：国家电网有限公司科技项目（促进新能源消纳的系统平衡成本表征与分摊方法，5108-202218043A-1-1-ZN）

作者简介：

苏大威（1972—），男，硕士，研究员级高级工程师，从事电力系统调度自动化、电力市场研究，E-mail: david_su@163.com;

赵天辉（1990—），男，通信作者，博士，工程师，从事电力市场研究，E-mail: eethzhao@163.com。