

# 考虑削峰服务的电动汽车集群 最优充放电策略

赵林昕<sup>1</sup>, 李成鑫<sup>1</sup>, 桂江一<sup>2</sup>, 刘林<sup>1</sup>

(1. 四川大学电气工程学院, 成都市 610065; 2. 中国北方车辆研究所, 北京市 100072)

**摘要:**【目的】在含新能源的源网荷储一体化系统中,为优化参与削峰辅助服务电动汽车用户和负荷聚合商收益,建立了考虑各时段削峰需求程度的电动汽车集群充放电策略优化模型,并优化了参与削峰后续时段电动汽车集群充放电策略。【方法】首先,评估新能源出力场景下的各时段削峰需求;其次,基于各时段削峰需求程度,以负荷聚合商和电动汽车用户双方总期望收益最大为目标,建立电动汽车集群充放电策略优化模型;最后,为避免参与削峰服务后的电动汽车集群负荷出现负荷尖峰,以负荷波动最小为目标优化后续时段充放电策略。【结果】算例分析表明,所提充放电策略可辅助平滑高峰期用电负荷,同时使负荷聚合商和电动汽车用户总期望收益最大化,并抑制了参与削峰服务后的“负荷尖峰”现象。【结论】所提策略相较于不考虑参与削峰服务策略的电动汽车用户和负荷聚合商收益明显提高,削峰后续时段负荷波动明显降低,验证了所提方法的实用性和有效性。

**关键词:**源网荷储一体化系统;电动汽车用户;负荷聚合商;削峰辅助服务;电动汽车集群充放电策略优化;负荷尖峰  
**中图分类号:**TM714 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-7229(2025)11-0024-11

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2025.11.003

## Optimal Charging and Discharging Strategies for Electric Vehicle Clusters Considering Power Peak Shaving

ZHAO Linxin<sup>1</sup>, LI Chengxin<sup>1</sup>, GUI Jiangyi<sup>2</sup>, LIU Lin<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;  
2. China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

**ABSTRACT:** [Objective] In a source-grid-load-storage system incorporating renewable energy, an electric vehicle (EV) cluster charging and discharging strategy optimization model is established to optimize the revenues of EV users and load aggregators participating in peak-shaving ancillary services, considering the peak-shaving demand levels across different time periods. [Methods] First, the peak-shaving demand for each time period under renewable energy production scenarios was assessed. Second, based on the level of the peak-shaving demand in each time period, an optimization model for the charging and discharging strategy of the EV cluster was developed to maximize the total expected revenue for both load aggregators and EV users. Finally, to prevent peak load occurrences after participating in peak-shaving services, the charging and discharging strategy for subsequent time periods were optimized to minimize load fluctuations. [Results] The case analysis demonstrated that the proposed charging and discharging strategy assisted in smoothing the electricity load during peak periods, maximized the total expected revenue for load aggregators and EV users, and mitigated the occurrence of load peaks after participating in peak-shaving services. [Conclusions] The strategy proposed in this study significantly improved the benefits for EV users and load aggregators compared with the strategy without considering participation in the peak-shaving service, and the load fluctuations in the subsequent period of peak shaving were significantly reduced that verified the practicality and effectiveness of the proposed method.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Sichuan Province (No. 2022NSFSC0206).

**KEYWORDS:** source-grid-load-storage system; electric vehicle (EV) users; load aggregators; peak-shaving ancillary services; EV cluster charging and discharging strategy optimization; load peaks

## 0 引言

为推动区域能源结构转型,我国正逐步推动新型电力系统的建设,在可再生能源富集型城市的工业园区建设源网荷储一体化系统<sup>[1]</sup>。该类系统力求实现电能的自给自足,当新能源发电出力不足以满足用户用电需求时,需要调度储能装置以满足供电需求,当储能装置容量有限时通过交流联络线向上级电网购电<sup>[2-3]</sup>。增大储能配置和向上级电网购电均会大大提高系统成本。电动汽车(electric vehicle, EV)作为具备双向调节能力的柔性负荷<sup>[4-7]</sup>,能为电网提供大量灵活的负荷响应和能量存储,也为电网削峰提供了极大的调度空间。因此,可利用电动汽车集群等具备调节潜力的柔性负荷提供削峰辅助服务,平滑高峰期的用电需求,减少向上级电网购电的成本和储能配置成本。

许多学者对负荷聚合商管理下的电动汽车集群的充放电行为进行了大量研究,力求提升电网的调峰、削峰能力,保障电力系统的稳定运行<sup>[8-10]</sup>。文献[11]在考虑用户充电需求的前提下,实现了聚合商调控收益最大的目标。文献[12]总结了规模化电动汽车参与电网辅助服务系统框架,并归纳了电动汽车集群可调节容量量化方法。文献[13]考虑在供需双方博弈视角下,实现聚合商收益最大化、用户用电成本最小化的目标。上述文献主要优化负荷聚合商和电动汽车用户的利益,并未考虑为电力系统提供削峰辅助服务进一步扩大收益。

针对电动汽车集群提供辅助服务问题,目前,已有学者进行了相关研究。文献[14]提出一种计及电动汽车响应不确定性的风电-电动汽车群-小型抽水蓄能协同运行模型,以弃风惩罚和激励成本最小为目标函数引导电动汽车及抽水蓄能参与功率调节。文献[15]提出了电动汽车集群参与日前能量市场和调频辅助服务市场的协同充电优化策略,有效提升了电动汽车集群参与电力市场调节的经济性。文献[16]建立了以负荷聚合商自身效益最大化为目标的电动汽车聚合商-电动汽车用户主从博弈模型,管理电动汽车集群实现负荷削峰填谷。文献[17]提出了参与电网削峰调节的电动重卡换电站调度策略。文献[18]提出一种计及电动汽车引导和网络重构的配电网负荷恢复策略,灾后故障恢复场景下,利用电动汽车放电潜力为电网提供辅助服务,支撑电网关键负荷恢复供电,减少停电损失。以上文献发掘了电动汽车集群的调度潜力,让其为电力系统提供辅助服务,并获取相关收益。尽管现有文献对系统运行

成本进行了优化,但并未对电动汽车用户充放电成本和负荷聚合商收益进一步优化。在负荷聚合商管理下的电动汽车集群参与削峰服务过程中,需考虑最大化双方的收益。并且,实际情况中,不同时间段电力系统对削峰辅助服务的需求程度受到新能源出力结果的影响,存在显著差异性和不确定性。因此,负荷聚合商制定电动汽车集群的充放电计划时,应充分考虑电力系统在各个时间段对削峰服务的需求。此外,电动汽车集群在提供削峰辅助服务后,为满足自身充电需求,可能会在后续时间段大量充电,导致“负荷尖峰”现象的出现,这将对系统的稳定运行产生负面影响<sup>[19]</sup>。上述问题在现有文献中尚未得到深入探讨。

针对上述问题,在源网荷储一体化系统中,为优化参与削峰服务的电动汽车用户和负荷聚合商收益,本文提出了考虑各时段削峰需求程度下电动汽车用户和负荷聚合商利益最大化的电动汽车集群充放电策略优化模型,并且针对参与削峰辅助服务后的“负荷尖峰”现象,以电动汽车集群负荷波动最小为目标优化了参与削峰服务后续时段充放电策略。仿真结果表明,所提策略实现了考虑参与削峰服务下的电动汽车用户和负荷聚合商双方总期望收益最大的目标。并大幅降低了参与削峰服务后负荷波动,保障了电力系统的稳定运行。算例结果表明所提优化策略具有有效性和合理性。

## 1 源网荷储一体化系统运行特性

源网荷储一体化系统(以下统称“系统”)由新能源出力装置、与上级电网联络装置、储能装置及负荷构成。其中系统调度中心作为各个装置交流的枢纽,主要负责对区域内相关信息传递以及优化调度指令的下发。系统在稳态运行时,调度中心协调调度负荷和储能装置将新能源出力就地消纳,当新能源出力装置和储能装置无法承担系统内用电负荷时,调度中心可向电网购电,也可协调调度系统内电动汽车集群实现“负荷削峰”,降低系统运行成本。源网荷储一体化系统整体框架如图1所示。

## 2 负荷聚合商提供削峰辅助服务

负荷聚合商本质上是电力系统和电动汽车用户之间的中间机构,促进电力系统与电动汽车集群交互的同时赚取适当收益。负荷聚合商管理的电动汽车集群提供削峰辅助服务时,需要权衡电动汽车用户、电力系统和自身三方利益。本文所讨论的负荷聚合商对电动汽车集群充放电行为的管控模式

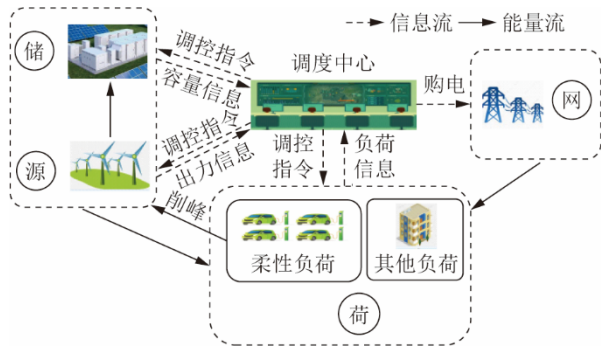


图1 源网荷储一体化系统整体框架

Fig. 1 Overall framework of the source-grid-load-storage integration system

为<sup>[20]</sup>:既可控制充电时间以及功率大小,还可适时地对电动汽车进行放电。本模式管控下,负荷聚合商参与削峰服务基本流程如图2所示。

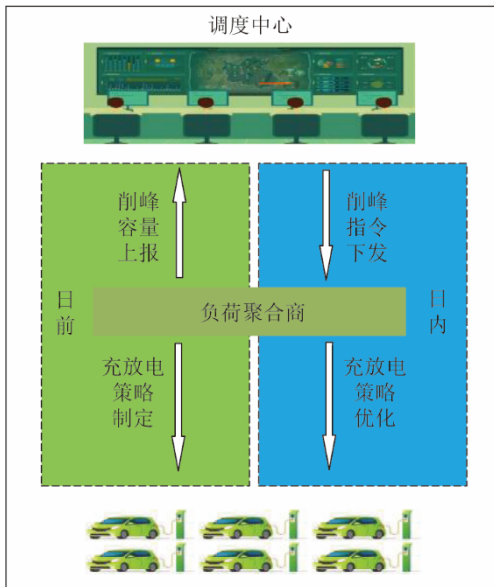


图2 负荷聚合商参与削峰服务框架

Fig. 2 The framework for load aggregators participating in peak shaving services

负荷聚合商在参与削峰服务日前需完成以下3个步骤:

- 1) 负荷聚合商在日前发布电动汽车参与削峰服务补贴标准,收集电动汽车用户的停车时段、充电需求、参与削峰服务的意愿等信息;
- 2) 负荷聚合商根据系统对削峰服务需求程度评估结果制定电动汽车集群最优充放电策略;
- 3) 在步骤2)中制定的充放电策略基础上,将可削峰容量结果上报系统调度中心。

若调度中心在新能源出力无法满足系统内用户用电需求时向负荷聚合商下发削峰指令,负荷聚合商接到指令后需调整电动汽车集群充放电策略,完成削峰任务。完成削峰任务后,进行相关补贴结算。

本文主要研究内容是参与削峰日前电动汽车集群最优充放电策略的制定以及参与削峰服务后电动汽车集群的充放电策略优化。

### 3 电动汽车集群充放电策略优化模型

新能源出力装置受天气、地理因素影响,出力结果存在不确定性<sup>[21-22]</sup>,而系统对削峰服务的需求与新能源出力结果息息相关。因此,本章在考虑新能源出力不确定性下评估了系统对削峰服务的需求程度,并求得负荷聚合商参与削峰服务概率。基于此结果,建立了以电动汽车用户和负荷聚合商双方总期望收益最大为目标的电动汽车集群充放电策略优化模型,并优化了参与削峰服务后续时段的负荷波动。

#### 3.1 削峰服务需求评估

##### 3.1.1 新能源出力不确定性处理

场景生成是处理新能源出力不确定性的重要方法之一,主要在建立概率模型的前提下,依托随机抽样生成场景集,并通过场景削减算法形成有代表性的典型场景<sup>[23-24]</sup>。

本文基于系统内新能源历史出力数据采用自回归滑动平均模型 (autoregressive moving average model, ARMA) 生成新能源出力抽样场景<sup>[25]</sup>:

$$y_t = \sum_{i=1}^a \phi_i y_{t-i} + \alpha_t - \sum_{j=1}^b \theta_j \alpha_{t-j} \quad (1)$$

式中:  $y_t$  为  $t$  时刻的时间序列值;  $\phi_i$  为自回归参数;  $\theta_j$  为滑动平均参数;  $\alpha_t$  为白噪声随机误差项,满足平均值为0和方差为  $\sigma^2$ ;  $a$  表示  $y_t$  依赖于过去多少个时间点的自身观测值;  $b$  表示  $y_t$  依赖于过去多少个时间点的随机冲击。本文设置  $a = 3$ ,  $\phi_1 = 0.8$ ,  $\phi_2 = \phi_3 = 0.15$ ,  $b = 2$ ,  $\theta_1 = 0.8$ ,  $\theta_2 = 0.2$ ,  $\sigma = 2.5$ <sup>[26]</sup>。

针对规模化的场景集采用K-means聚类方法对场景进行削减,得到具有代表性的典型场景,并计算各类典型场景出现的概率。

具体生成步骤如下:

- 1) 初始化场景数目  $N$ , 采用 ARMA 生成  $N$  个光伏场景;
- 2) 初始化 K-means 算法, 随机选取  $k$  个场景作为聚类中心, 将每个样本按与聚类中心的欧氏距离进行分类。
- 3) 不断更新聚类中心, 其中第  $l$  个聚类中心  $C_l$  为:

$$C_l = \frac{1}{N_l} \sum_{h=1}^{N_l} S_{h,l} \quad (2)$$

式中:  $S_{h,l}$  为第  $l$  个类簇中的第  $h$  个对象;  $N_l$  为第  $l$  个类

簇中的对象个数。

4) 重复步骤 2)、3), 直到聚类中心趋于稳定。

5) 结合各类典型场景出现概率并进行加权求和得到考虑新能源出力不确定性场景。

### 3.1.2 负荷聚合商参与削峰服务概率

系统对削峰服务的需求程度主要取决于系统内新能源出力和用电负荷之间的供求关系。当系统内新能源出力低于用电负荷越多, 系统对削峰服务的需求程度也越高。本文以负荷数据与新能源出力结果之差作为系统削峰需求量, 将其归一化后得到一天内各时段系统对削峰辅助服务的需求概率向量  $\mathbf{P}_0$  如下:

$$\mathbf{P}_0 = [\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_T] \quad (3)$$

式中:  $\gamma_T$  用以刻画  $T$  时段调度中心对削峰辅助服务需求程度。

电动汽车集群参与削峰辅助服务的能力受自身充电需求、容量和出行需求约束, 且前后时段可调容量相互制约, 因此, 电动汽车集群能参与削峰辅助服务的周期通常较短。本文假设电动汽车因自身出行需求等的限制, 只能参与一个时段的辅助服务。则负荷聚合商参与  $T$  时段削峰辅助服务的概率  $\delta_T$  可表示为:

$$\delta_T = \begin{cases} \gamma_T \prod_{i=1}^{T-1} (1 - \gamma_i), & T \geq 2 \\ \gamma_T, & T = 1 \end{cases} \quad (4)$$

负荷聚合商各时段参与削峰服务概率向量  $\mathbf{P}$ :

$$\mathbf{P} = [\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_T] \quad (5)$$

## 3.2 电动汽车集群充放电策略优化模型

### 3.2.1 电动汽车集群充放电负荷模型

为延长电动汽车电池使用寿命, 应避免在短时间内频繁调整电动汽车充放电状态, 因此, 本研究将一天离散成 24 个时段, 用矩阵  $\mathbf{W}_{n \times 24}$  来描述由  $n$  辆电动汽车组成的电动汽车集群一天中各时段的充放电功率, 并设置矩阵  $\mathbf{W}_{n \times 24}$  中的元素  $P_{n,t}$  为决策变量。

$$\mathbf{W}_{n \times 24} = \begin{bmatrix} P_{1,1} & \dots & P_{1,24} \\ \vdots & & \vdots \\ P_{n,1} & \dots & P_{n,24} \end{bmatrix}_{n \times 24} \quad (6)$$

式中:  $P_{i,t}$  表示第  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 辆电动汽车在  $t$  时段的充放电功率。

该类私人电动汽车接入电网时间  $t_{in}$  和离开电网时间  $t_{out}$  均满足正态分布<sup>[27]</sup>, 其概率密度函数如下:

$$f(t_{in}) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_{in} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t_{in} - \mu_{in})^2}{2\sigma_{in}^2}\right], & \mu_{in} - 12 \leq t_{in} \leq 24 \\ \frac{1}{\sigma_{in} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t_{in} + 24 - \mu_{in})^2}{2\sigma_{in}^2}\right], & 0 \leq t_{in} < \mu_{in} - 12 \end{cases} \quad (7)$$

$$f(t_{out}) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_{out} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t_{out} - \mu_{out})^2}{2\sigma_{out}^2}\right], & 0 \leq t_{out} < \mu_{out} + 12 \\ \frac{1}{\sigma_{out} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t_{out} - 24 - \mu_{out})^2}{2\sigma_{out}^2}\right], & \mu_{out} + 12 \leq t_{out} \leq 24 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\sigma_{in}$  和  $\sigma_{out}$  分别代表电动汽车接入和断开充电桩时段的均值;  $\mu_{in}$ 、 $\mu_{out}$  分别为对应时段的方差。本文  $\sigma_{in} = 1.1$ ,  $\mu_{in} = 8.9$ ,  $\sigma_{out} = 1.5$ ,  $\mu_{out} = 17.6$ <sup>[28]</sup>。

该类电动汽车的日行驶里程数服从对数正态分布, 其概率密度函数如下:

$$f_D(x) = \frac{1}{x\sigma_D \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu_D)^2}{2\sigma_D^2}\right] \quad (9)$$

式中:  $x$  代表电动汽车日行驶里程数;  $\mu_D$ 、 $\sigma_D$  分别代表其里程数的均值和方差。本文  $\mu_D = 3.31$ ,  $\sigma_D = 0.87$ <sup>[28]</sup>。

在接入充电桩  $\Delta T$  时段后, 第  $i$  辆电动汽车断开充电桩时的电量  $S_i$  如下所示:

$$S_i = S_{i,base} + \sum_{t=1}^{\Delta T} P_{i,t} \Delta t \eta \quad (10)$$

式中:  $S_{i,base}$  代表电动汽车接入充电桩前的基础电量;  $\Delta t$  代表每个时段的时间长度;  $\eta$  代表充放电效率。

### 3.2.2 优化模型目标函数

在分时电价的前提下, 负荷聚合商主要通过合理分配电动汽车集群充放电时段赚取收益, 考虑参与削峰服务下负荷聚合商一天的总收益  $C_1$  如下所示:

$$C_1 = \sum_{i=1}^n \left[ \sum_{t=1}^{24} P_{i,t} |\Delta t| (z(t) - p(t)) \right] + v_1 \quad (11)$$

$$v_1 = P_s \Delta t \psi_0 \quad (12)$$

式中:  $z(t)$  代表负荷聚合商与电网部门的购售电价格;  $p(t)$  代表电动汽车用户与负荷聚合商之间的购售电价格;  $v_1$  代表负荷聚合商提供削峰服务获取的补贴;  $P_s$  代表削峰功率大小;  $\psi_0$  代表调度中心给负荷聚合商的削峰补贴单价。

电动汽车用户的充放电成本  $C_2$  应该包括电动汽车充放电的总费用、电动汽车放电循环带来的损耗以及参与削峰服务的补贴, 电动汽车用户一天的总成本  $C_2$  的计算方式如下:

$$C_2 = \sum_{i=1}^n \left[ \sum_{t=1}^{24} P_{i,t} \Delta t p(t) \right] + C_{w,t} - v_2 \quad (13)$$

$$v_2 = P_s \Delta t \psi_1 \quad (14)$$

式中:  $C_{w,t}$  代表电动汽车放电循环带来的损耗费用;  $v_2$  代表电动汽车用户参与削峰服务获取的补贴;  $\psi_1$  代

表负荷聚合商给电动汽车用户的削峰补贴单价。

电动汽车充放电循环会影响电池使用寿命,可用图3曲线表示电池充放电循环次数与其寿命的关系<sup>[29]</sup>,电动汽车放电损耗 $C_{w,t}$ 可根据此关系计算得到。

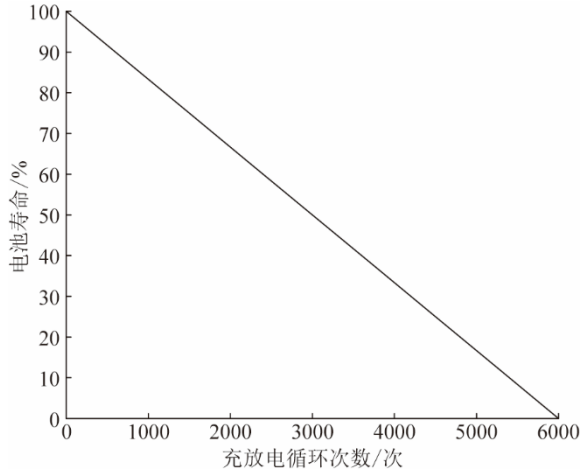


图3 电动汽车电池充放电循环次数与电池寿命关系

Fig. 3 Relationship between the number of charge and discharge cycles and battery life of EV batteries

负荷聚合商调控电动汽车充放电行为会涉及电动汽车用户和负荷聚合商的利益问题,在整个调控过程中,合理权衡双方的利益才能最大限度提升负荷聚合商的收益和电动汽车用户的参与积极性。因此,在考虑放电带来的电池损耗前提下,基于线性加权法,以函数 $F_T$ 表征 $T$ 时段电动汽车集群参与削峰辅助服务时负荷聚合商和电动汽车用户双方利益关系:

$$F_T = -\lambda_1 \frac{C_1}{C_{1,\max}} + \lambda_2 \frac{C_2}{C_{2,\max}} \quad (15)$$

式中: $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 分别是负荷聚合商收益和电动汽车用户充放电成本的加权系数; $C_{1,\max}$ 代表负荷聚合商参与削峰辅助服务收益的最大值; $C_{2,\max}$ 代表负荷聚合商参与削峰辅助服务时电动汽车用户充放电成本的最大值。特别地,当负荷聚合商不参与削峰辅助服务时,双方利益以 $F_0$ 表示,此时 $C_{1,\max}$ 代表不参与削峰辅助服务下负荷聚合商收益的最大值, $C_{2,\max}$ 代表不参与削峰辅助服务下电动汽车用户充放电成本的最大值。 $C_{1,\max}$ 与 $C_{2,\max}$ 求解方式与下文中以 $\min Z_1$ 为目标函数的优化模型求解方法相同。不同应用场景下双方利益主次可通过设置不同权重 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 加以区分,为更好地保障用户利益、调动用户参与削峰辅助服务的积极性,本文取 $\lambda_1 = 0.2$ 、 $\lambda_2 = 0.8$ 。

基于上述函数 $F$ 和削峰需求矩阵 $P$ ,本文提出了一天以内以负荷聚合商和电动汽车用户双方期望收

益最大化为目标的目标函数:

$$\min Z_1 = \sum_{T=1}^{24} [\delta_T F_T] + (1 - \sum_{T=1}^{24} \delta_T) F_0 \quad (16)$$

式中: $F_T$ 代表参与 $T$ 时段削峰任务后的双方利益。而 $F_T$ 受削峰后续时段充放电策略影响,因此计算 $F_T$ 时需先完成3.2.3节中削峰后续时段充放电策略优化模型的求解。

### 3.2.3 参与削峰后续时段目标函数

“负荷尖峰”的出现可能导致后续时间段内系统对削峰辅助服务的需求增加,从而对系统的稳定运行产生不利影响。因此,在满足电动汽车集群自身充放电需求的前提下,对其参与削峰服务后续时间段的充放电策略优化流程如下:

1) 负荷聚合商接到调度中心下发的 $T_0$ 时段的削峰指令后,根据指令调整对应时段 $T_0$ 可控电动汽车集群的充放电功率;

2) 在满足电动汽车用户需求的前提下,根据电动汽车集群负荷波动最小制定参与削峰服务后的充放电策略。

后续优化过程目标函数 $Z_2$ :

$$\min Z_2 = \frac{\sum_{t=T}^{24} \left( \sum_{i=1}^s P_{i,t} - P_{\text{avg}} \right)^2}{24 - T} \quad (17)$$

式中: $P_{\text{avg}}$ 代表可调电动汽车集群的平均功率; $s$ 代表集群中参与削峰辅助服务的电动汽车数量。

### 3.3 约束条件

1) 电动汽车充放电功率 $P_{i,t}$ 约束:

$$\begin{cases} 0 < P_{i,t} \leq P_{\max}, \text{ 充电} \\ P_{i,t} = 0, \text{ 静止} \\ -P_{\min} \leq P_{i,t} < 0, \text{ 放电} \\ t \in [1, 24] \end{cases} \quad (18)$$

式中: $P_{\max}$ 和 $P_{\min}$ 分别代表电动汽车充电和放电的最大功率。

2) 电动汽车电池容量 $S_i$ 约束:

$$S_{i,\min} \leq S_i \leq S_{i,\max} \quad (19)$$

式中: $S_{i,\min}$ 代表第 $i$ 辆电动汽车的最低电量需求; $S_{i,\max}$ 代表第 $i$ 辆电动汽车的电池容量最大值。

3) 变压器容量约束:

$$P_{\text{base},t} + \sum_{i=1}^n P_{i,t} \leq S_T \quad (20)$$

式中: $S_T$ 代表区域内变压器的最大容量; $P_{\text{base},t}$ 代表区域内基础负荷功率大小。

4) 功率平衡约束:

$$P_{\text{base},t} + \sum_{i=1}^n P_{i,t} \leq P_{N,t} + P_{\text{ess},t} + P_{\text{tran},t} \quad (21)$$

式中: $P_{N,t}$ 代表新能源出力功率; $P_{ess,t}$ 代表储能装置出力功率; $P_{tran,t}$ 代表联络线出力功率。

5)联络线功率约束:

$$0 \leq P_{tran,t} \leq P_{tran,max} \quad (22)$$

式中: $P_{tran,max}$ 代表联络线最大输电功率,仅在购电时使用,且不向外电网输电。

6)储能功率约束:

$$P_{ess, disc, max} \leq P_{ess,t} \leq P_{ess, char, max} \quad (23)$$

式中: $P_{ess, disc, max}$ 代表最大放电功率; $P_{ess, char, max}$ 代表最大充电功率。

### 4 电动汽车集群充放电策略优化模型求解

上述电动汽车充放电策略模型的求解是一项复杂的任务,涉及在削峰前后两个阶段优化充放电策略。本文采用遗传算法和 CPLEX 求解器对该模型进行求解。需要注意的是,以  $\min Z_1$  为目标的优化模型属于复杂的非线性模型,遗传算法可通过种群搜索策略,在广泛的解空间内进行探索,从而更易于接近全局最优解。此外,遗传算法的适应度函数反映了个体的优劣,依据本文研究目标,设定适应度函数  $f = -Z_1$ 。而 CPLEX 求解器在解决相对简单的数学模型时,展现了较高的求解速度和准确性,因此更适合应用于以  $\min Z_2$  为目标的优化模型。整个优化模型求解的流程如图 4 所示。

### 5 算例分析

#### 5.1 参数设置

假设该区域配置有包含总容量为 10 MW 的光伏场和风电场,储能额定功率为 2 MW,占新能源总装机容量的 20%。一个周期(24 h)内有 100 辆电动汽车接受负荷聚合商管理,其电池容量为 90 kWh,最大充电功率为 10 kW,放电功率为 6 kW,充电放电效率均为 90%。并以国内某分布式电源示范区的风光出力数据作为本文历史新能源出力数据。

本文设置 2024 年 3 月国网北京市电力公司发布的工业电价收费标准为分时电价标准,具体价格如图 5 所示。设置电动汽车用户从负荷聚合商购电的电价为 1 元/kWh,放电回收价格比分时电价少 0.2 元/kWh。负荷聚合商按照分时电价与电网部门进行电量交易。以现行短期削峰补贴均价 2 元/kWh 作为削峰补贴标准,设置  $\psi_0 = 2$  元/kWh,  $\psi_1 = 1$  元/kWh。经联络线装置向上级电网购电价格比削峰补贴电价高 20%。储能配置成本 150 元/kW<sup>[2]</sup>。设置遗传算法种群规模 40,最大迭代次数

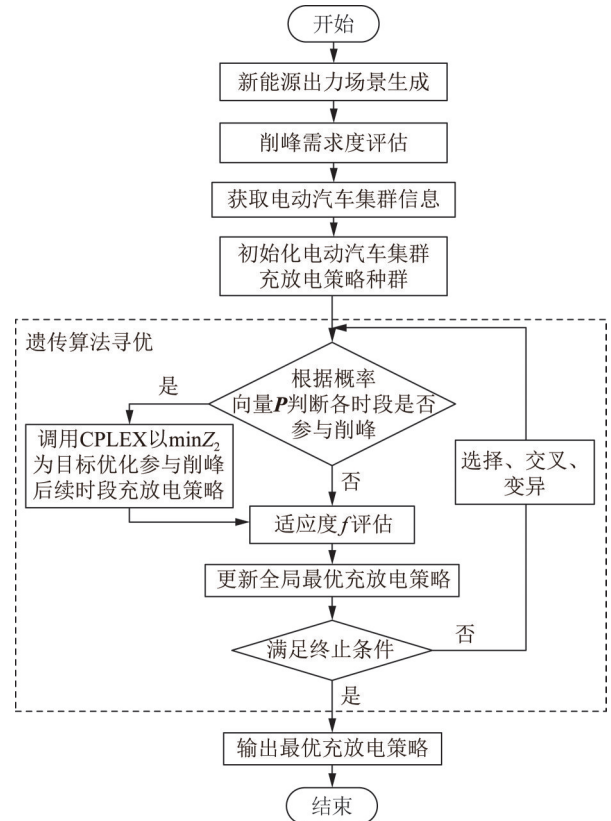


图 4 电动汽车集群充放电策略优化流程图

Fig. 4 Flowchart for optimization of charging and discharging strategies for electric vehicle clusters

800, 变异率 0.001。

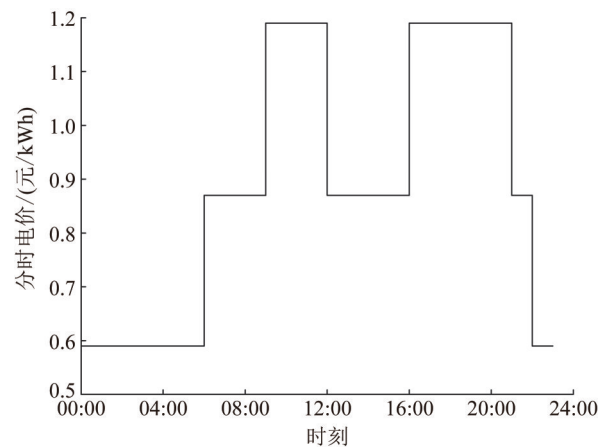


图 5 2024 年 3 月北京市分时电价

Fig. 5 Time-of-use price for March in 2024 Beijing

#### 5.2 新能源出力结果

本文根据 3.1.1 节所提 ARMA 生成了 200 个新能源出力抽样场景,其生成结果如图 6 所示。

利用 K-means 算法对所生成的抽象场景进行聚类,生成 5 个典型风光出力场景结果,如图 7 所示。各类场景对应出现的概率如表 1 所示。

结合各类典型场景出现概率,模拟得到新能源出力结果,并结合负荷预测结果,计算得到削峰需求量,

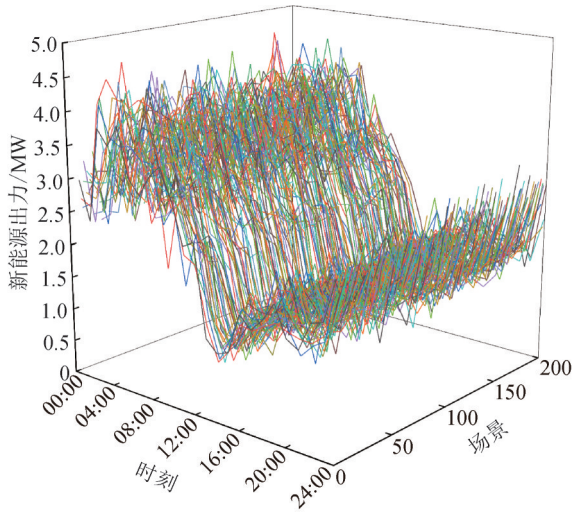


图6 新能源出力抽样场景

Fig. 6 New energy output sampling scenario

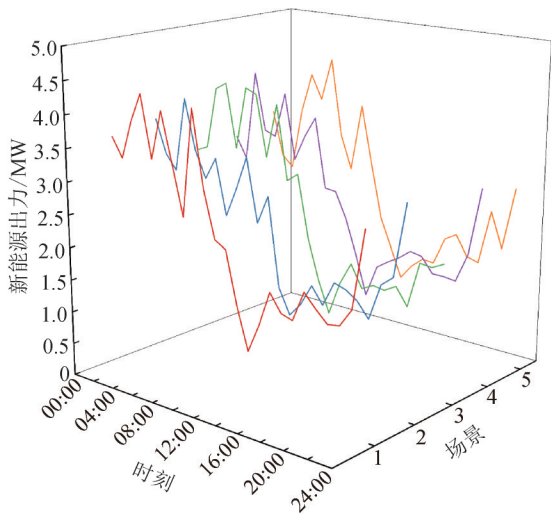


图7 典型新能源出力场景

Fig. 7 Typical new energy output scenario

表1 各类典型场景出现概率

Table 1 Probability of occurrence of typical scenarios for each category

场景	出现概率
场景1	0.005
场景2	0.350
场景3	0.030
场景4	0.585
场景5	0.030

将所得结果与实际结果相比较,对比结果如图8所示。

### 5.3 考虑参与削峰服务电动汽车集群最优充电策略仿真结果

为了验证本文所提方法的有效性,负荷聚合商分别在无序充电、考虑参与削峰服务和不考虑参与削峰服务的三种模式下对电动汽车集群充放电行为进行管控:

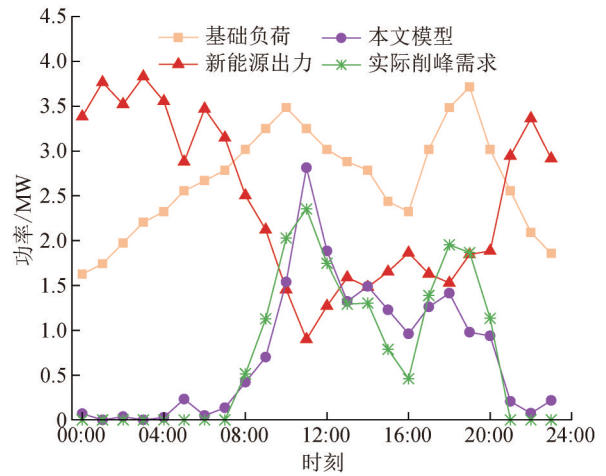


图8 预测值与实际值对比结果

Fig. 8 Comparison of forecast and actual values

模式1:无序充电模式。

模式2:负荷聚合商管理下不考虑参与削峰服务的有序充放电模式。

模式3:本文所提负荷聚合商管理下考虑参与削峰服务下的有序充放电模式。

本文基于上文建立的充放电负荷模型模拟制定了三种负荷聚合商负荷管理模式下的100辆电动汽车集群充放电策略。其中,以3.2.1节提到的电动汽车出行规律为基础,模拟了模式1电动汽车集群充放电行为。模式2是在不参与削峰辅助服务前提下,负荷聚合商以自身收益最大和电动汽车用户充放电成本最小为目标管理电动汽车集群充放电行为。模式3电动汽车集群充放电策略由本文所提的考虑参与削峰服务下电动汽车集群充放电策略优化模型求解得到。三种模式下电动汽车集群充放电功率如图9所示。

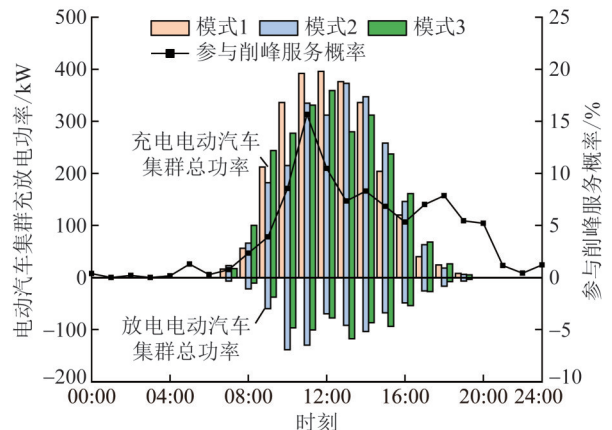


图9 不同模式下电动汽车集群充放电策略对比

Fig. 9 Comparison of EV cluster charging and discharging strategies in different models

由图9可知,模式1电动汽车集群充放电功率仅与电动汽车接入充电桩时段相关,因其在峰电价下电动汽车充电功率较大,所以电动汽车用户充放电

成本较高。相较于模式1,模式2、模式3在负荷聚合商的管理下,电动汽车用户在峰电价时段大幅减少了充电功率,并增大了放电功率,在谷电价时段明显提升了充电功率,最大程度优化了自身充放电成本和负荷聚合商收益。根据图9中负荷聚合商参与削峰服务概率曲线可知:峰电价时段削峰需求远大于其他时段,尽管模式3电动汽车集群在峰电价时段充电功率略高于模式2,但模式3管理下的电动汽车集群充分预留了参与削峰服务的可调容量,为后续参与削峰服务获取更多收益奠定了基础。参与削峰辅助后,对负荷聚合商与相关电动汽车用户结算削峰辅助服务补贴。

三种模式下负荷聚合商的收益以及电动汽车用户的充放电成本结果对比如表2所示。

表2 电动汽车用户和负荷聚合商不同模式下的经济性对比  
Table 2 Economic comparison of different models for electric vehicle users and load aggregator 元

模式	充电成本	放电收益	放电损耗	参与削峰服务期望补贴	用户总期望充放电成本	负荷聚合商总期望收益
模式1	2 560.0	0	0	0	2 560.00	343.74
模式2	2 344.0	643.82	77.8	0	1 777.98	508.08
模式3	2 417.0	571.22	70.5	295.28	1 621.00	775.95

由表2可知,相较于模式1,由负荷聚合商控制电动汽车充放电行为的模式2、3获取了较大的放电收益,大幅降低了电动汽车用户的充放电成本,并增加了负荷聚合商从中获取的收益。并且,在长期运营下,模式3管理下的电动汽车集群相较于模式2可通过参与削峰辅助服务获取相应补贴,电动汽车用户的总期望充放电成本以及负荷聚合商的总期望收益能更大程度得到优化。由此可见,模式3管理下负荷聚合商和电动汽车用户双方总期望收益都明显优于模式1、2。

结合上述模式3管理下的电动汽车集群最优充放电策略,模拟电动汽车集群参与削峰辅助服务过程。在现有最优充放电策略基础上,对可参与削峰服务的电动汽车集群可调容量进行准确评估,并结合不可参与削峰服务的电动汽车集群充放电行为对实际可削峰功率进行计算,结果如图10所示。

由图10可知,模式3针对削峰需求较高时段预留了充足的削峰容量。同时,受自身充电需求约束,不可参与削峰服务的电动汽车集群需在参与削峰辅助服务时段维持原有充放电状态。因此实际可

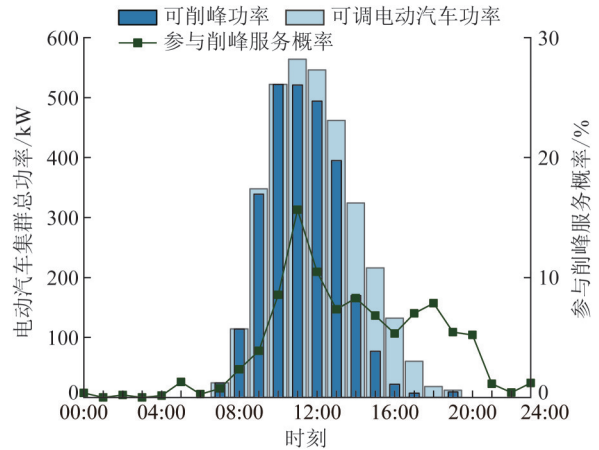


图10 可调电动汽车容量

Fig. 10 Adjustable electric vehicle capacity

削峰功率与电动汽车集群内可参与削峰服务的放电总功率存在一定区别。

### 5.4 参与削峰后续时段优化仿真结果

以电动汽车集群在削峰需求最高时段  $T = 11$  时段(11:00—12:00)参与削峰辅助服务,削峰容量为电动汽车集群最大可调容量为例,模拟模式3下可调电动汽车集群充放电策略优化过程。

负荷聚合商根据削峰任务调控可调电动汽车集群  $T = 11$  时段的充放电功率,完成削峰任务。后续时段根据目标函数  $Z_2$  对可控电动汽车集群充放电策略优化,优化后电动汽车集群各电动汽车各时段充放电功率如图11所示。

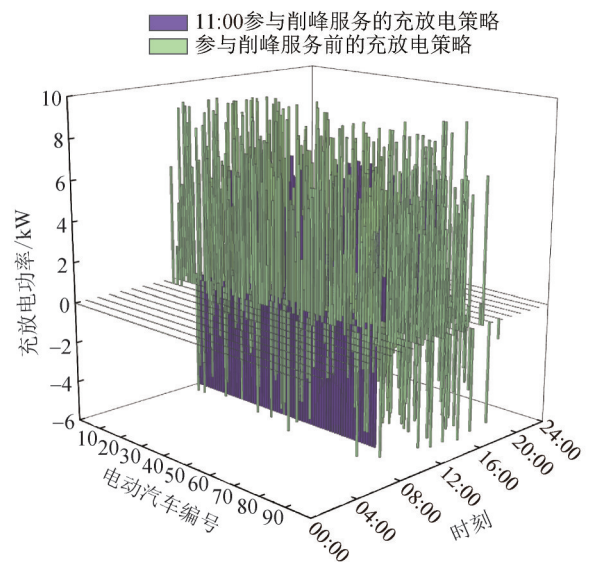


图11 参与削峰辅助服务时电动汽车集群功率

Fig. 11 EV cluster power in peak shaving auxiliary services

由图11可知,负荷聚合商根据  $T = 11$  时段的削峰指令调整了电动汽车集群的充放电策略,让可调电动汽车集群大量放电以满足系统内削峰需求。对于参与削峰任务的可调电动汽车集群,以  $\min Z_2$  为目

标函数,优化了削峰后续时段的电动汽车集群充放电策略。

并且,在上述可调电动汽车集群参与削峰服务场景下对参与削峰服务后续时段的电动汽车集群后续充放电策略设置了3种优化策略:

**策略1:**文献[16]中提到的以负荷聚合商利益最大化为目标的电动汽车集群充放电优化策略;

**策略2:**文献[28]中提到的兼顾双方利益和负荷波动的电动汽车集群充放电优化策略;

**策略3(本文所提):**以后续时段功率波动最小为目标的电动汽车集群充放电优化策略。

对比3种策略下后续时段电动汽车集群总功率,结果如图12所示。

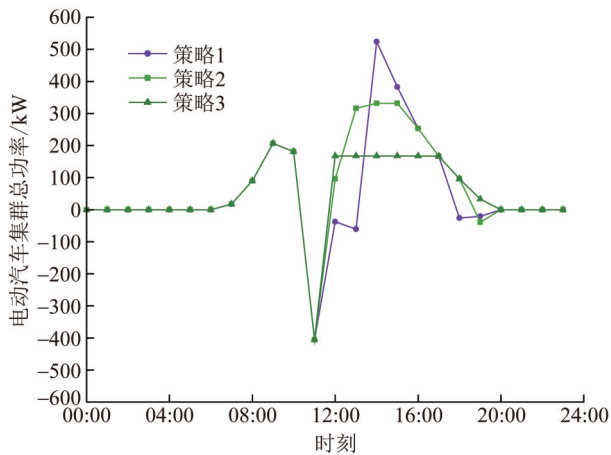


图12 三种策略后续时段功率对比

Fig. 12 Comparison of the three strategies in peak shaving subsequent periods

由图12可知,相较于策略1、2,本文所提策略3能够更好地平滑后续时段电动汽车集群负荷波动,避免了“负荷尖峰”现象的出现。

为验证本文在求解削峰后续时段电动汽车集群充放电策略优化模型时选择CPLEX求解器的高效性,分别计算了遗传算法与CPLEX求解器在求解该模型时所耗费的时间,具体结果如表3所示。

表3 削峰后续时段充放电策略不同求解方式快速性对比

Table 3 Comparison of the rapidity of different solution methods for charging and discharging strategies in the subsequent period

求解方式	时间/s
CPLEX求解器	12.98
遗传算法	>45.39

表3结果表明,CPLEX在求解此类相对简单的优化模型时展现出更高的求解效率,充分证明了选择CPLEX求解器作为削峰后续时段电动汽车集群充放

电策略优化模型的高效性。

三种削峰后续时段优化策略下,电动汽车用户的削峰补贴、负荷聚合商的削峰补贴以及储能装置和联络线最大输出功率均相同,因此,将削峰后续时段电动汽车用户成本、负荷聚合商收益和负荷波动结果进行对比,对比结果如表4所示。

表4 不同策略下经济性和负荷波动对比

Table 4 Comparison of economic performance and load fluctuations under different strategies

策略	充电成本/元	放电收益/元	放电损耗/元	用户总期望充放电成本/元	负荷聚合商总期望收益/元	负荷波动/(kW <sup>2</sup> /h)
策略1	2 433.66	937.27	194.1	1 210.49	1 152.37	33 591.0
策略2	2 676.09	1 033.76	187.3	1 349.63	1 139.95	19 274.7
策略3	2 102.26	803.00	88.1	907.36	957.42	5 934.7

由表4结果可知,策略1和策略2管控下的电动汽车用户总期望充放电成本和负荷波动远高于本文所提策略3。尽管策略1和策略2在负荷聚合商总期望收益上优于策略3,但策略1在削峰后续时段负荷波动过大,会带来更多的负面影响,尽管负荷聚合商能获得更大收益,但该策略相较于策略2和策略3可行性较低。而策略3相较于策略2降低了少量负荷聚合商收益却明显优化了后续时段负荷波动,避免了“负荷尖峰”现象出现,降低了参与削峰服务后的消极影响,有效保障了电力系统的稳定运行。同时,以本文所提策略3优化电动汽车集群充放电策略能够更大幅度降低电动汽车用户的充放电成本,在现实中能大大提高电动汽车用户参与的积极性,有利于电动汽车集群长期参与削峰辅助服务。

综上,不论从现实中的可行性还是可持续发展,本文所提策略3相较于策略1和策略2都具有明显的优势。

基于表4结果,现有条件无法满足用户用电需求,系统可采取调用电动汽车集群、提升储能容量和通过联络线装置向上级电网购电几种解决措施。不同措施下系统投入成本对比如表5所示。

表5 系统投入成本对比

Table 5 System input cost comparison

措施	削峰及购电成本	储能配置成本
削峰+购电	1 512.0	300 000
削峰+提升储能容量	1 008.0	331 500
提升储能容量	0	396 600
购电	1 545.6	300 000

由表 5 结果可知,本文所提调用柔性负荷提供削峰服务能够优化系统成本,减少储能装置配置成本。本文所提策略适用于系统短期通过联络线购电价格较削峰补贴高场景,并且当系统通过联络线短期购电价格更高时成本优化幅度更大。

## 6 结 论

针对系统内负荷聚合商提供削峰辅助服务优化收益问题,基于系统各时段削峰需求提出了以负荷聚合商收益和电动汽车用户充放电成本的总期望收益最大为目标的电动汽车集群充放电策略优化模型,并优化了参与削峰后续时段可调电动汽车集群充放电策略,最后实现了多方共赢,证明了本文所提策略和模型的实用性、有效性和可行性。主要贡献如下:

1) 本文所提的充放电优化策略考虑了系统削峰需求,在保障电动汽车用户充电需求的前提下实现了负荷聚合商和电动汽车用户总期望最大化。

2) 对参与削峰后续时段电动汽车集群的充放电行为进行了优化,防止参与削峰服务后电动汽车集群大量充电产生新的“负荷尖峰”,保障了电力系统的稳定运行。

3) 本文所提的优化策略能够在分时电价的背景下,帮助电动汽车用户降低自身充放电成本、增加负荷聚合商的经济收益以及辅助弥补新能源出力不确定性、降低系统投入成本,实现多方获益。

本文所提出的优化策略具有实际应用价值,可以在与本文运行场景相似的实际场景中推广使用。然而,电动汽车参与削峰服务能力受充电需求限制,不能长时间参与削峰服务,针对多时段或连续时段参与削峰服务问题还需要做进一步研究。

### 利益冲突声明 (Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

### 作者贡献声明 (Authors' Contributions):

赵林昕和李成鑫进行了研究设计,赵林昕和林完成了实验并分析数据,桂江一参与了论文写作和修订。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

## 7 参考文献

- [1] 孙惠,翟海保,吴鑫. 源网荷储多元协调控制系统的研究及应用[J]. 电工技术学报, 2021, 36(15): 3264-3271.  
SUN Hui, ZHAI Haibao, WU Xin. Research and application of multi-energy coordinated control of generation, network, load and storage [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(15): 3264-3271.
- [2] 赵冬梅,宋晨铭,冯向阳,等. 100% 新能源场景下考虑频率稳定约束的源网荷储一体化系统储能优化配置[J]. 电工技术学报, 2025, 40(7): 2146-2161.  
ZHAO Dongmei, SONG Chenming, FENG Xiangyang, et al. The optimal configuration of energy storage in the source-grid-load-storage integrated system considering frequency stability constraints in 100% new energy scenarios [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(7): 2146-2161.
- [3] 姚建国,杨胜春,王珂,等. 智能电网“源-网-荷”互动运行控制概念及研究框架[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 1-6, 12.  
YAO Jianguo, YANG Shengchun, WANG Ke, et al. Concept and research framework of smart grid “source-grid-load” interactive operation and control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 1-6, 12.
- [4] 王琼,邹晴,李乐,等. 基于多智能体强化学习的电动汽车充放电调控算法[J]. 供用电, 2023, 40(9): 83-90.  
WANG Qiong, ZOU Qing, LI Le, et al. Multi-agent reinforcement learning algorithm for charging/discharging control of electric vehicles [J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(9): 83-90.
- [5] 张琳娟,周志恒,陈婧华,等. 含电动汽车的县域光伏台区储能容量优化配置研究[J]. 供用电, 2024, 41(10): 101-113.  
ZHANG Linjuan, ZHOU Zhiheng, CHEN Jinghua, et al. Research on optimal allocation of energy storage capacity in county photovoltaic distribution station area with electric vehicles [J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(10): 101-113.
- [6] 吴永孝,肖辉,曾林俊,等. 考虑供需双边响应的综合能源系统优化调度[J]. 电力建设, 2024, 45(10): 13-23.  
WU Yongxiao, XIAO Hui, ZENG Linjun, et al. Optimal scheduling of integrated energy systems considering bilateral response of supply and demand [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(10): 13-23.
- [7] 陈文颖,刘蓓迪. 基于粒子群算法的电动汽车有序充放电优化[J]. 山东电力技术, 2023, 50(1): 52-58.  
CHEN Wenyong, LIU Beidi. Sequential charging and discharging optimization of electric vehicles based on particle swarm optimization [J]. Shandong Electric Power, 2023, 50(1): 52-58.
- [8] 侯永全,徐敦彬,袁晓冬,等. 基于博弈论的含氢微网多主体能源系统优化配置[J]. 高压电器, 2024, 60(7): 48-59.  
HOU Yongquan, XU Dunbin, YUAN Xiaodong, et al. Optimized allocation of hydrogen-containing micro grid multi-subject energy system based on game theory [J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(7): 48-59.
- [9] 娄奇鹤,李彦斌,赵宇尘,等. 适应极端事件的配电网弹性规划和投资策略研究综述[J]. 电力建设, 2024, 45(5): 37-47.  
LOU Qihe, LI Yanbin, ZHAO Yuchen, et al. A review of research on resilience planning and investment strategies for distribution networks adapted to extreme events [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(5): 37-47.
- [10] 葛乐,王庆园,王明深,等. 考虑充放电激励机制的电动汽车聚合商参与能量-调频市场多阶段运营策略[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(6): 176-184.  
GE Le, WANG Qingyuan, WANG Mingshen, et al. Multi-stage operation strategy of electric vehicle aggregator participating in energy and frequency regulation markets considering charging and discharging incentive mechanisms [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(6): 176-184.
- [11] LIU H, QI J J, WANG J H, et al. EV dispatch control for supplementary frequency regulation considering the expectation of EV owners [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4):

- 3763-3772.
- [12] 付卓铭, 胡俊杰, 马文帅, 等. 规模化电动汽车参与电力系统二次调频研究综述[J]. 电力建设, 2023, 44(2): 1-14.  
FU Zhuoming, HU Junjie, MA Wenshuai, et al. Review of research on participation of numerous electric vehicles in power system secondary frequency-regulation service [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(2): 1-14.
- [13] 戴朝华, 杨帅, 叶圣永, 等. 供需双方博弈视角下的V2G优化策略[J]. 西南交通大学学报, 2025, 60(1): 166-174, 193.  
DAI Chaohua, YANG Shuai, YE Shengyong, et al. Vehicle to grid optimization strategy from the perspective of supply and demand game [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2025, 60(1): 166-174, 193.
- [14] 江建, 张树森, 徐峰亮. 考虑电动汽车集群响应的分布式资源协同调度策略研究[J]. 山东电力技术, 2024, 51(6): 1-11, 35.  
JIANG Jian, ZHANG Shusen, XU Fengliang. Research on the collaborative dispatch strategy of distributed resources considering the response of electric vehicle cluster [J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(6): 1-11, 35.
- [15] 高爽, 戴如鑫. 电动汽车集群参与调频辅助服务市场的充电调控策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(18): 60-67.  
GAO Shuang, DAI Ruxin. Charging control strategy for electric vehicle aggregation participating in frequency regulation ancillary service market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 60-67.
- [16] 房宇轩, 胡俊杰, 马文帅. 计及用户意愿的电动汽车聚合商主从博弈优化调度策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 5091-5103.  
FANG Yuxuan, HU Junjie, MA Wenshuai. Optimal dispatch strategy for electric vehicle aggregators based on Stackelberg game theory considering user intention [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16): 5091-5103.
- [17] 程飞, 郭春林, 高泽阳, 等. 参与电网削峰调节的电动重卡换电站调度策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(9): 120-128.  
CHENG Fei, GUO Chunlin, GAO Zeyang, et al. Scheduling strategy of battery swapping stations for electric heavy-duty trucks participating in power grid peak-shaving regulation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(9): 120-128.
- [18] 王炜歆, 张露元, 王小君, 等. 计及电动汽车引导和网络重构的配电网负荷恢复策略[J]. 山东电力技术, 2024, 51(8): 18-26.  
WANG Weixin, ZHANG Luyuan, WANG Xiaojun, et al. Load restoration strategy of distribution system considering electric vehicle guiding and network reconfiguration [J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(8): 18-26.
- [19] 辛昊, 严正, 许少伦. 基于多代理系统的电动汽车协调充电策略[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 48-54.  
XIN Hao, YAN Zheng, XU Shaolun. Multi-agent system based coordinated charging strategy for electric vehicles [J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 48-54.
- [20] 张婷婷. 考虑经济物理约束的电动汽车负荷聚合可调节容量评估[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.  
ZHANG Tingting. Evaluation of adjustable capacity of electric vehicle load aggregation considering economic and physical constraints [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [21] 卢有飞, 邹时容, 刘璐豪, 等. 基于知识共享的高比例可再生能源系统发电控制[J]. 高压电器, 2024, 60(10): 33-45.  
LU Youfei, ZOU Shirong, LIU Luhao, et al. Generation control of high percentage renewable energy systems based on knowledge sharing [J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(10): 33-45.
- [22] 杨本星, 王伟, 杨明轩, 等. 辅助风电并网的构网型储能控制策略研究[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 56-64.  
YANG Benxing, WANG Wei, YANG Mingxuan, et al. Research on grid-forming energy storage control strategy for auxiliary wind power grid-connection [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 56-64.
- [23] 王守相, 陈海文, 李小平, 等. 风电和光伏随机场景生成的条件变分自动编码器方法[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1860-1869.  
WANG Shouxiang, CHEN Haiwen, LI Xiaoping, et al. Conditional variational automatic encoder method for stochastic scenario generation of wind power and photovoltaic system [J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1860-1869.
- [24] 惠振国, 艾澜, 常鹏霞, 等. 计及风光出力相关性的风光水储互补系统优化调度[J]. 水电能源科学, 2024, 42(8): 218-222.  
HUI Zhenguo, AI Lan, CHANG Pengxia, et al. Optimal scheduling of wind-solar-water-storage complementary system considering the correlation of wind-solar output [J]. Water Resources and Power, 2024, 42(8): 218-222.
- [25] 李鹏, 朱洪泽, 骆光杰, 等. 基于ARMA模型的海上风机随机风场模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2024, 57(1): 112-120.  
LI Peng, ZHU Hongze, LUO Guangjie, et al. Simulation of stochastic wind field of offshore wind turbines based on ARMA model [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2024, 57(1): 112-120.
- [26] 董文略, 王群, 杨莉. 含风光水的虚拟电厂与配电公司协调调度模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 75-81, 207.  
DONG Wenlue, WANG Qun, YANG Li. A coordinated dispatching model for a distribution utility and virtual power plants with wind/photovoltaic/hydro generators [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 75-81, 207.
- [27] U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. The 2017 national household travel survey [EB/OL]. [2024-07-15]. <https://nhts.ornl.gov/>.
- [28] 李军, 梁嘉诚, 刘克天, 等. 计及用户响应度的电动汽车充放电优化调度策略[J]. 南方电网技术, 2023, 17(8): 123-132.  
LI Jun, LIANG Jiacheng, LIU Ketian, et al. Optimal scheduling strategy for electric vehicles charging and discharging considering user responsiveness [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(8): 123-132.
- [29] NEUBAUER J, WOOD E. The impact of range anxiety and home, workplace, and public charging infrastructure on simulated battery electric vehicle lifetime utility [J]. Journal of Power Sources, 2014, 257: 12-20.

收稿日期: 2024-10-18 修回日期: 2024-12-09

作者简介:

赵林昕(2000),男,硕士研究生,主要研究方向为负荷弹性、车网互动,E-mail:18382252113@163.com;

李成鑫(1976),男,博士,副教授,硕士生导师,通信作者,研究方向为负荷弹性、配网降损、综合能源等,E-mail:lcx36@scu.edu.cn;

桂江一(1977),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为民用车辆、电动汽车,E-mail:gui1975@126.com;

刘林(1999),男,硕士研究生,研究方向为负荷弹性、空调负荷,E-mail:1120728439@qq.com。

(编辑 魏希辉)