

# 考虑电动汽车随机转移特性的充储电站群 两阶段优化调度

程 杉<sup>1</sup>, 傅 桐<sup>1</sup>, 赵子凯<sup>2</sup>, 刘炜炜<sup>1</sup>, 王 灿<sup>1</sup>

(1. 电力系统智能运行与安全防御宜昌市重点实验室(三峡大学), 宜昌 443002;  
2. 国网河南省电力公司商丘供电公司, 商丘 476000)

**摘 要:** 电动汽车规模化入网加剧运营商对充储电站的投资建设, 考虑单个充储电站内的有序充放电调度难以实现区域充储电站群的收益最优。对此, 提出了一种考虑电动汽车随机转移特性的充储电站群两阶段优化调度策略。首先, 构建以充储电站群聚合商作为信息交换中心与调度中心的充储电站群运行拓扑结构, 利用出行链技术对电动汽车转移行程进行规划; 其次, 基于分时定价策略建立充储电站群两阶段优化调度模型, 阶段 1 以车主充电需求和满意度为目标建立充储电站群内负荷转移模型, 对充储电站群内负荷进行时空转移调度; 阶段 2 基于阶段 1 所得站内负荷数据, 以充储电站群收益为目标建立充储电站侧电动汽车有序充放电调度模型。最后, 通过仿真进行对比分析, 结果表明所提出的方法能改善区域内负荷曲线, 在满足车主满意度需求、提高充电达标率的同时给充储电站带来更多收益。

**关键词:** 电动汽车; 充储电站; 储能; 负荷转移; 时空分布; 两阶段优化调度

## Two-stage Optimal Scheduling of Charging and Storage Station Clusters Considering the Random Transfer Characteristics of Electric Vehicles

CHENG Shan<sup>1</sup>, FU Tong<sup>1</sup>, ZHAO Zikai<sup>2</sup>, LIU Weiwei<sup>1</sup>, WANG Can<sup>1</sup>

(1. Yichang Key Laboratory of Intelligent Operation and Security Defense of Power System, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Shangqiu Power Supply Company of State Grid Henan Electric Power Company, Shangqiu 476000, China)

**Abstract:** The large-scale access of electric vehicles to the power grid intensifies the investment of operators in charging and storage power stations. The orderly charging and discharging scheduling in a single charging and storage power station is difficult to achieve the optimal income of the regional charging and storage power station clusters. In this paper, a two-stage optimal scheduling strategy for charging and storage station clusters considering the random transfer characteristics of electric vehicles is proposed. Firstly, the operation topology of the charging and storage power station clusters is constructed, in which the aggregator of the charging and storage power station clusters is taken as the information exchange center and the dispatching center, and the travel chain technology is used to plan the electric vehicle transfer journey. Secondly, based on the time-sharing pricing strategy, the two-stage optimal scheduling model of the charging and storage power station group is established. In stage 1, the load transfer model in the charging and storage power station clusters is established with the charging demand and satisfaction of the owner as the goal, and the load in the clusters is transferred and dispatched in time and space. In stage 2, based on the load data in the station obtained in stage 1, the orderly charging and discharging scheduling model of electric vehicles at the charging and storage power station side is established with the goal of income of the charging and storage power station clusters. Finally, the simulation results show that the proposed method can be adopted to improve the load curve in the region, and bring more benefits to the charging and storage power station while meeting the requirements of vehicle owner satisfaction and improving the charging compliance rate.

**Key words:** electric vehicle; charging and storage station; energy storage; load transfer; spatiotemporal distribution; two-stage optimized scheduling

基金资助项目: 国家自然科学基金(52107108); 电力系统智能运行与安全防御宜昌市重点实验研究项目(2020DLXY01)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China (52107108), Yichang Key Experimental Research Project on Intelligent Operation and Security Defense of Power System (2020DLXY01).

### 0 引言

根据《新能源汽车产业发展规划(2021—2035)》，到 2035 年电动汽车(electric vehicle, EV)将成为汽车行业内主流<sup>[1]</sup>，而大规模 EV 接入电网严重影响电力系统的安全稳定性，作为具有大规模充电负荷的充电站群受到众多学者的关注<sup>[2-3]</sup>。由于 EV 在高峰时间进行充电不仅面临无法满足自身充电需求问题，还会给充电站所连接的电力系统节点带来压力<sup>[4-5]</sup>。且 EV 充电负荷还会受到 EV 自身固有的转移随机性而难以去预测、调度。为了解决区域内多个充电站集群无规则充电问题，对多个 EV 充电站进行分级管理、协同调度，构建协同、经济、共享的充电站群运行模型成为当前研究的一个热门话题<sup>[6-7]</sup>。

目前，国内外学者针对 EV 规模化并网展开大量研究。文献[8]提出了 EV 有序充放电多能流调度策略，而文献[9]以最小化系统的负荷波动和最大化 EV 充电量为目标，制定 EV 有序充放电策略。结果均表明，相比无序充电负荷波动明显降低，但经济性稍差。对此，文献[10-12]运用主从博弈理论模拟充电站与 EV 之间交互，处理各组成部分的不同偏好，制定准定价策略。结果表明，所提策略不仅使电网功率平稳而且有效提高 EV 参与电网能量交易的经济收益。

上述文献基于合理定价策略对 EV 进行有序充放电调度，但是，缺乏对 EV 随机转移特性的考虑，因此其 EV 负荷预测精度不高。文献[13]建立基于时刻充电概率的 EV 随机转移模型；文献[14]则建立基于停车生成率的 EV 随机转移模型；而文献[15]基于马尔可夫决策理论建立 EV 的时空转移模型。结果均表明，考虑 EV 随机转移特性的充储电站调度结果更加全面实际。

但是，上述文献均以电网经济性为目标对 EV 进行有序充放电调度，而忽略了对车主参与意愿的考虑，导致上述策略可行性不高。文献[16]通过分析用户出行里程心理效应来制定 EV 有序充放电策略。而文献[17]根据 EV 出行的随机性和可转移性，提出充放电裕度指标，进行 EV 的实时调度。文献[18]则建立 EV 充电可靠性评价指标体系，提出考虑充电可靠性的 EV 充放电优化调度策略。结果表明，以上策略更加契合 EV 出行需求，提高 EV 用户满意度，但略微降低充电站收益。而文献[19]综

合考虑用户利益和电网调峰需求，引入虚拟充电时间和虚拟充电状态来修正充放电控制系数，经算例验证，该策略在保证 EV 车主出行需求的同时降低了负荷需求曲线的方差，但上述文献均忽略了站与站之间的联动关系。

因此，本文针对上述不足之处，提出了一种考虑电动汽车随机转移特性的充储电站群两阶段优化调度策略。首先构建充储电站群拓扑结构，采用马尔可夫过程决策理论对 EV 转移路径进行随机规划。其次，基于分时定价策略建立充储电站群两阶段优化调度模型：阶段 1 通过充电等待时间和离站荷电状态(state of charge, SOC)持有量衡量车主满意度，以车主满意度为目标建立站间 EV 转移模型；阶段 2 基于阶段 1 获得的站内负荷数据，以充储电站群收益为目标建立站内 EV 有序充放电调度模型。本文最后通过算例进行区域充储电站群调度分析以及对比分析各电站充电负荷分布情况和使用不同充电策略的影响，以验证所提方法的可行性和高效性。

### 1 考虑 EV 随机转移特性的充储电站群调度模型

#### 1.1 充储电站群调度框架

本文建立充储电站群的云端信息平台即充储电站群聚集商(charging station cluster aggregator, CSCA)，作为充储电站群内 EV 充电负荷信息汇总中心。如图 1 所示，CSCA 进行数据汇总并制定转移计划和充电计划，实现两步式对充电站群的 EV 引导转移和有序充放电。

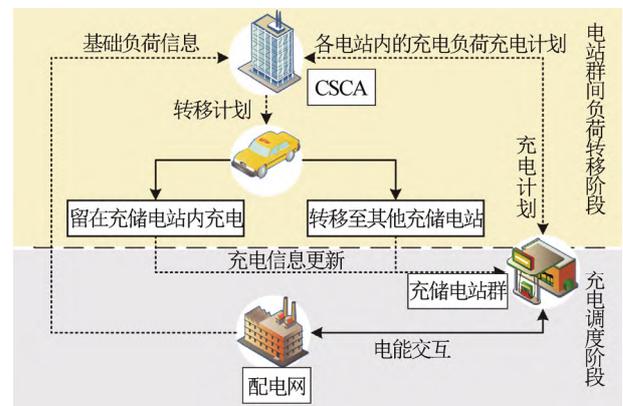


图 1 充储电站群间调度划分

Fig.1 Scheduling division among charging and storage station groups

## 1.2 EV 充电负荷随机转移规划

充储电站间 EV 转移过程具有随机性, 本文应用出行链技术可以很好的解决给定起讫点的路径规划问题。将 EV 在空间中的转移简化为道路节点间的转移, 通过多节点路径相连形成 EV 出行链。本文考虑 EV 的时空转移具有随机性, 采用马尔可夫决策过程理论进行 EV 在两个相邻节点间转移路径随机规划<sup>[20]</sup>。

基于 EV 行驶过程中车主对剩余行程最短时间的考虑, EV 从当前节点  $r^{\text{cur}}$  转移到下一节点  $r^{\text{nex}}$  节点的节点间转移概率为  $P(a|r^{\text{cur}}, r^{\text{nex}})$ , 如式(1)所示。

$$\begin{cases} P(a|r^{\text{cur}}, r^{\text{nex}}) = 1, & m = n \\ P(a|r^{\text{cur}}, r^{\text{nex}}) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \frac{S_{m,k}^{\text{pass}}}{V_{m,k}^{\text{pass}}}}{\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \frac{S_{n,k}^{\text{total}}}{V_{n,k}^{\text{total}}}}, & m < n \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $N$  为节点  $r^{\text{cur}}$  转移至终点所有可行方案数目;  $M$  为所有可行路径中下一次转移经过节点  $r^{\text{nex}}$  方案数目;  $K$  为当前方案中节点转移经过的节点数目;  $S_{n,k}^{\text{total}}$ 、 $S_{m,k}^{\text{pass}}$  分别为在  $n$  和  $m$  下第  $k$  段路径长度;  $V_{n,k}^{\text{total}}$ 、 $V_{m,k}^{\text{pass}}$  分别为在  $n$  和  $m$  下第  $k$  段路径 EV 行驶速度。

## 2 充储电站群两阶段优化调度模型

### 2.1 第 1 阶段充储电站群内负荷转移

充储电站是 EV 获得电能的重要基础设施, 本文根据充储电站群自身承受能力, 对部分充储电站内的负荷依靠 EV 进行转移至其他充储电站内完成充电计划。

CSCA 根据充储电站群内各充储电站充电计划进行统计, 对于用户需求无法被满足的车辆进行汇总并生成转移计划。如图 2 所示, 对于充储电站 1 自身站内满足不了用户需求, 将自身负荷转移至最近距离内的其他充储电站, 一方面, 提升用户的充电体验, 防止充电等待时间过长; 另一方面, 提高了充储电站自身充电调节能力, 实现站内调度时提高自身收益。

#### 2.1.1 车主充电需求与满意度模型

充储电站的建设带给车主充电便利, 为推进 EV 推广与充储电站的应用, 本文从用户侧出发, 考虑 EV 接入充储电站的充电等待时间和充电期望等影响车主充电体验的因素建立车主充电需求与满意度

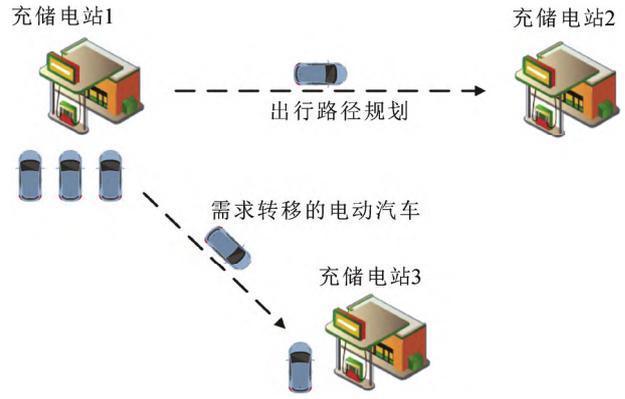


图 2 充储电站群间 EV 转移图

Fig.2 EV transfer diagram between charging and storage station clusters

模型。

#### 1) 车主充电需求模型

当 EV 具有充电需求时驶入充储电站。

$$\begin{cases} P_{\text{ch}}^{\text{EV}} R_{\text{ch}} (t_{s,j}^{\text{lea}} - t_{s,j}^{\text{acc}}) / C^{\text{EV}} + S_{s,j}^{\text{arr}} > S_{\text{exp}} \\ S_{s,j}^{\text{arr}} < S_{\text{min}} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $P_{\text{ch}}^{\text{EV}}$  是 EV 额定充电功率;  $t_{s,j}^{\text{acc}}$  和  $t_{s,j}^{\text{lea}}$  为车辆  $j$  到达  $s$  充储电站时接入充电桩和离站时间;  $S_{s,j}^{\text{arr}}$  是车辆  $j$  到达  $s$  充储电站时剩余 SOC;  $C^{\text{EV}}$  是 EV 电池容量;  $R_{\text{ch}}$  是充电效率;  $S_{\text{exp}}$  为充电期望 SOC 值;  $S_{\text{min}}$  是最低荷电阈值。

此外, 当 EV 完成本次出行计划到达目的地时, 根据 EV 本次行程信息, 对 EV 下一阶段出行所需 SOC 进行预测, 若当前电量持有量不满足下一阶段出行, EV 会选择在本次出行的目的地即当前停靠节点驶入充储电站。

#### 2) 车主充电满意度模型

##### (a) 充电等待时间 $F_1$

即 EV 到站时间和 EV 接入充电桩时间之差。

$$F_1 = \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^J (t_{s,j}^{\text{acc}} - t_{s,j}^{\text{arr}}) \quad (3)$$

式中:  $t_{s,j}^{\text{arr}}$  为车辆  $j$  到达  $s$  充储电站的时间。

##### (b) EV 出站 SOC 持有量 $F_2$

采用模糊理论, 引用  $F_2$  描述在调度时段内, EV 在充电结束后自身电池电量与期望电量之差。

$$F_2 = \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^J \left( \sum_{t=1}^T (P_{\text{ch}}^{\text{EV}} R_{\text{ch}} \chi_{s,t,j} - P_{\text{dis}}^{\text{EV}} R_{\text{dis}} \eta_{s,t,j}) - S_{\text{exp}} C_j^{\text{EV}} + S_{s,j}^{\text{arr}} C_j^{\text{EV}} \right) \quad (4)$$

式中:  $P_{\text{dis}}^{\text{EV}}$  是 EV 额定放电功率;  $R_{\text{dis}}$  是放电效率;  $\chi_{s,t,j}$  和  $\eta_{s,t,j}$  分别是  $s$  充储电站内  $t$  时刻第  $j$  辆 EV 充电状态和放电状态 0-1 变量;  $C_j^{\text{EV}}$  是第  $j$  辆 EV 的

电池容量。

### 2.1.2 充储电站群内 EV 转移模型

同一时刻各充储电站内 EV 接入情况不尽相同,通过充储电站引导站内不能达到充电预期的 EV 前往最近满足条件的充储电站进行充电可以提高充电满意度,即让  $F_1$  与  $-F_2$  最小。引入 CSCA 用于处理各充储电站内的用户充电信息。

将到站 EV 分为站内充电和转移至其他充储电站充电两类,则  $\chi_{s,t,j}$ 、 $\eta_{s,t,j}$  分别修改为  $\chi'_{s,t,j'}$ 、 $\eta'_{s,t,j'}$  和  $\chi''_{s,t,j''}$ 、 $\eta''_{s,t,j''}$ 。根据 1.2 节进行 EV 充电负荷转移规划,可以得到 EV 转移至其他节点的到站时间集合  $T_j^{arr} = \{t_{1,j''}^{arr}, t_{2,j''}^{arr}, \dots, t_{s,j''}^{arr} | j''=1, 2, 3, \dots, J''\}$ , 将  $T_j^{arr}$  每辆 EV 转移最小值记录为到站时间  $t_{s,j''}^{arr}$  并计算到站时 SOC 值  $S_{s,j''}^{arr}$ 。

则式(3)、(4)中  $F_1$  和  $F_2$  修改为  $F'_1$  和  $F'_2$  :

$$F'_1 = \sum_{s=1}^S \sum_{j'=1}^{J'} (t_{s,j'}^{acc} - t_{s,j'}^{arr}) + \sum_{s=1}^S \sum_{j''=1}^{J''} (t_{s,j''}^{acc} - t_{s,j''}^{arr}) \quad (5)$$

$$F'_2 = \sum_{s=1}^S \sum_{j'=1}^{J'} \left( \sum_{t=1}^T (P_{ch}^{EV} R_{ch} \chi'_{s,t,j'} - P_{dis}^{EV} R_{dis} \eta'_{s,t,j'}) - S_{exp} C^{EV} + C^{EV} S_{s,j'}^{arr'} \right) + \sum_{s=1}^S \sum_{j''=1}^{J''} \left( \sum_{t=1}^T (P_{ch}^{EV} R_{ch} \chi''_{s,t,j''} - P_{dis}^{EV} R_{dis} \eta''_{s,t,j''}) - S_{exp} C^{EV} + C^{EV} S_{s,j''}^{arr''} \right) \quad (6)$$

式中:  $j'$  为在当前充储电站内充电的 EV 序号;  $j''$  为转移至其他充储电站充电的 EV 序号;  $S_{s,j'}^{arr'}$  为到站时 SOC 值, 与其之前对应的  $S_{s,j'}^{arr}$  相同。

以车主满意度为目标, 得到 EV 转移函数:

$$\begin{aligned} \max F = & -a_1 F'_1 + a_2 F'_2 - a_3 b_3 C^{EV} \sum_{s=1}^S \sum_{j''=1}^{J''} (S_{s,j''}^{arr''} - S_{s,j''}^{arr'}) = \\ & \sum_{s=1}^S \sum_{j'=1}^{J'} (a_1 t_{s,j'}^{arr} - a_1 t_{s,j'}^{acc} + a_2 \sum_{t=1}^T (P_{ch}^{EV} R_{ch} \chi'_{s,t,j'} - P_{dis}^{EV} R_{dis} \eta'_{s,t,j'}) - a_2 S_{exp} C^{EV} + a_2 C^{EV} S_{s,j'}^{arr'}) + \\ & \sum_{s=1}^S \sum_{j''=1}^{J''} (a_1 t_{s,j''}^{arr} - a_1 t_{s,j''}^{acc} + a_2 \sum_{t=1}^T (P_{ch}^{EV} R_{ch} \chi''_{s,t,j''} - P_{dis}^{EV} R_{dis} \eta''_{s,t,j''}) - a_2 S_{exp} C^{EV} + a_2 C^{EV} S_{s,j''}^{arr''}) - \\ & a_3 b_3 C^{EV} (S_{s,j''}^{arr''} - S_{s,j''}^{arr'}) \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  为正加权系数, 根据组合权重法计算得到分别为 0.3、0.3 和 0.4<sup>[21]</sup>;  $b_3$  是 EV 转移到充储电站后电站所给予 EV 激励的补偿系数。

根据式(7)对区域内充储电站群内的 EV 进行部分转移, 对于充储电站来说实现各个充储电站内的充电负荷的空间调度, 提高整个充储电站群的调度裕度、灵活性; 对于 EV 方面给予转移的 EV 相应的转移耗电补偿, 一方面可以激励 EV 积极参与充储电站群间的调度, 一方面也可以给自身充电带来更短的等待时间和充电量同时减少充电总支出。实现充储电站群与车主之间双赢。

### 2.2 第 2 阶段充储电站群集中充电模型

本文根据区域充储电站群的各个电站处理负荷能力, 对充储电站群内的 EV 进行转移调度, 获得了转移以后的 EV 进站数据。本节 CSCA 从供应侧即充储电站群出发, 建立充储电站群的集中式充电调度模型, 调度框架图如图 3 所示。

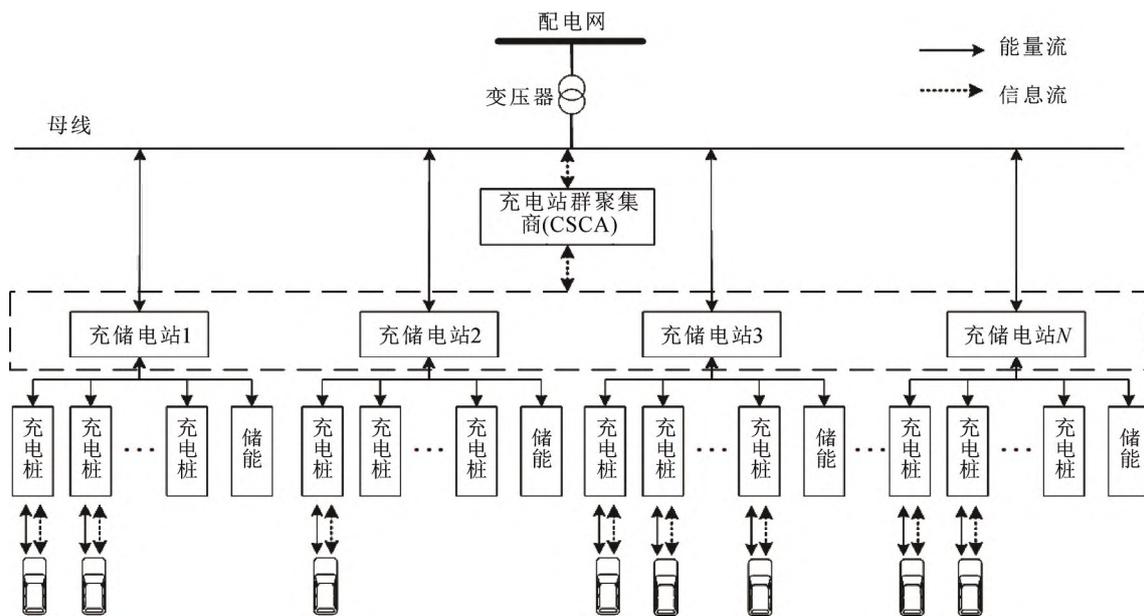


图 3 集中式调度框图

Fig.3 Centralized scheduling block diagram

CSCA 从各个充储电站内获取转移后的 EV 充电负荷和离站时间, 以整体收益最大为目标计算各个充储电站群内的各个充电桩的充电计划。

### 2.2.1 区域充储电站群收益函数

以充储电站群每日收益  $M$  包含从配电网购电成本、补偿转移 EV 成本、向配电网放电和向 EV 售电收益, 则收益  $M$  目标函数为:

$$\begin{aligned} \max M = & \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T (P_{\text{dis}}^{\text{EV}} c_t^{\text{sell}} \eta_{s,t,j} + P_{\text{dis}}^{\text{ES}} c_t^{\text{sell}} \eta_{s,t}^{\text{ES}} / J + \\ & P_{\text{ch}}^{\text{EV}} c^{\text{EV}} \chi_{s,t,j} - P_{\text{ch}}^{\text{EV}} c_t^{\text{buy}} \chi_{s,t,j} - P_{\text{dis}}^{\text{EV}} c^{\text{EV}} \eta_{s,t,j} - \\ & P_{\text{ch}}^{\text{ES}} c_t^{\text{buy}} \chi_{s,t}^{\text{ES}} / J) - b_3 C^{\text{EV}} \sum_{s=1}^S \sum_{j^*=1}^{J^*} (S_{s,j^*}^{\text{arr}} - S_{s,j^*}^{\text{arr}^*}) \end{aligned} \quad (8)$$

式中:  $P_{\text{dis}}^{\text{ES}}$ 、 $P_{\text{ch}}^{\text{ES}}$  分别为充储电站内储能(ES)放电和充电功率;  $c_t^{\text{sell}}$  和  $c_t^{\text{buy}}$  为充储电站向配电网售电和购电价格;  $c^{\text{EV}}$  为充储电站向 EV 售电价格;  $\chi_{s,t}^{\text{ES}}$ 、 $\eta_{s,t}^{\text{ES}}$  分别为充储电站  $s$  的 ES 充、放电状态的 0-1 变量。

### 2.2.2 约束条件

#### 1) 调度时间约束

$$t_{s,j}^{\text{arr}} \leq t_{s,j}^{\text{now}} \leq t_{s,j}^{\text{lea}} \quad s \in [1, S] \quad j \in [1, J] \quad (9)$$

式中:  $t_{s,j}^{\text{now}}$  为在  $s$  站内序号  $j$  车辆当前时刻, 约束 EV 在充储站内进行调度。

#### 2) EV 的 SOC 约束

$$\begin{aligned} S_{\min} & < \sum_{t=t_{s,j}^{\text{arr}}}^{t_{s,j}^{\text{now}}} (P_{\text{ch}}^{\text{EV}} R_{\text{ch}} \chi_{s,t,j} - P_{\text{dis}}^{\text{EV}} R_{\text{dis}} \eta_{s,t,j}) / C^{\text{EV}} + \\ & S_{s,j}^{\text{arr}} \leq S_{\max} \quad s \in [1, S] \quad j \in [1, J] \end{aligned} \quad (10)$$

式中:  $S_{\max}$  为 EV 的 SOC 值最大值。

#### 3) ES 的 SOC 约束

$$\begin{cases} S_{\min}^{\text{ES}} < \sum_{t=1}^{t_{s,j}^{\text{now}}} (P_{\text{ch}}^{\text{ES}} R_{\text{ch}} \chi_{s,t}^{\text{ES}} - P_{\text{dis}}^{\text{ES}} R_{\text{dis}} \eta_{s,t}^{\text{ES}}) / C^{\text{ES}} + S_{s,1}^{\text{ES}} \leq S_{\max}^{\text{ES}} \\ \sum_{t=1}^T (P_{\text{ch}}^{\text{ES}} R_{\text{ch}} \chi_{s,t}^{\text{ES}} - P_{\text{dis}}^{\text{ES}} R_{\text{dis}} \eta_{s,t}^{\text{ES}}) / C^{\text{ES}} + S_{s,1}^{\text{ES}} \geq S_{\text{end}}^{\text{ES}} \end{cases} \quad (11)$$

$s \in [1, S]$

式中:  $S_{\min}^{\text{ES}}$ 、 $S_{\max}^{\text{ES}}$  分别为 ES 的 SOC 最小值与最大值;  $S_{\text{end}}^{\text{ES}}$  为 ES 在一个调度周期结束时刻电能 SOC 最小持有量;  $C^{\text{ES}}$  为额定 ES 容量;  $S_{s,1}^{\text{ES}}$  是  $s$  充储电站内 1 时刻即调度周期开始时的 ES 的 SOC 持有量。

#### 4) EV 充放电约束<sup>[22]</sup>

$$0 \leq \chi_{s,t,j} + \eta_{s,t,j} \leq 1, \quad s \in [1, S], \quad t \in [1, T] \quad (12)$$

约束  $s$  充储电站内 EV 不能同时进行充放电。

#### 5) 电池充放电损耗约束

$$\begin{aligned} c^{\text{EV}} & = c^{\text{EV}} - a_4 \left( \sum_{t=t_{s,j}^{\text{arr}}}^{t_{s,j}^{\text{lea}}} |\chi_{s,t,j} - \eta_{s,t,j}| - 1 \right) \\ & s \in [1, S] \quad j \in [1, J] \end{aligned} \quad (13)$$

式中:  $a_4$  是充电次数补偿系数。描述避免 EV 频繁充放电, 每次进行充放电后给车主一定补偿。

#### 6) ES 充放电约束

$$0 \leq \chi_{s,t}^{\text{ES}} + \eta_{s,t}^{\text{ES}} \leq 1, \quad s \in [1, S], \quad t \in [1, T] \quad (14)$$

约束  $s$  充储电站内 ES 不能同时进行充放电。

#### 7) 功率平衡约束

$$\begin{aligned} \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^J (P_{\text{ch}}^{\text{EV}} \chi_{s,t,j} - P_{\text{dis}}^{\text{EV}} \eta_{s,t,j}) + P_{\text{ch}}^{\text{ES}} \chi_{s,t}^{\text{ES}} - \\ P_{\text{dis}}^{\text{ES}} \eta_{s,t}^{\text{ES}} - P_{s,t}^{\text{DN}} = 0 \quad t \in [1, T] \end{aligned} \quad (15)$$

式中:  $P_{s,t}^{\text{DN}}$  是  $s$  充储电站  $t$  时刻从配电网购电功率。描述充储电站与配电网之间的交互功率平衡。

#### 8) 充储电站内充电桩数目约束

$$\begin{aligned} 0 \leq \sum_{j=1}^J |\chi_{s,t,j} - \eta_{s,t,j}| \leq N_s^{\text{CP}} \\ s \in [1, S], \quad t \in [1, T] \end{aligned} \quad (16)$$

式中:  $N_s^{\text{CP}}$  是  $s$  充储电站内的充电桩数目。

#### 9) EV 充电期望约束

$$\begin{aligned} S_{\text{exp}} \leq \sum_{t=t_{s,j}^{\text{arr}}}^{t_{s,j}^{\text{lea}}} (P_{\text{ch}}^{\text{EV}} R_{\text{ch}} \chi_{s,t,j} - P_{\text{dis}}^{\text{EV}} R_{\text{dis}} \eta_{s,t,j}) / C^{\text{EV}} + \\ S_{s,j}^{\text{arr}} \leq S_{\max} \quad s \in [1, S], \quad j \in [1, J] \end{aligned} \quad (17)$$

描述 EV 离开站时自身 SOC 值大于期望值。

#### 10) 配电网负荷约束

$$\sum_{s=1}^S P_{s,t}^{\text{DN}} + L_t^{\text{Roa}} \leq P^{\text{max}}, \quad s \in [1, S] \quad (18)$$

式中:  $L_t^{\text{Roa}}$  是  $t$  时刻配电网基础负荷;  $P^{\text{max}}$  是配电网负荷上限。

## 3 算例分析

### 3.1 仿真流程图

本文考虑用户充电满意度, 根据 EV 充电需求在 EV 出行链技术基础上建立充储电站群间的转移模型, 通过 CSCA 作为信息调控中心, 以充储电站群间收益为目标, 给出每个充储电站的充放电计划。仿真流程图如图 4 所示。

### 3.2 参数设置

某典型区域的交通拓扑结构如图 5 所示。在各节点设有充储电站, 共计 16 个充储电站。根据区域内生活需求的不同类型对区域进行划分。节点 1—6 为居民区; 节点 7—10 为工作区; 节点 11—15 提供

购物用餐、社交休闲服务，定义为休闲区；节点 16 为其他，仿真时将其纳入休闲区。区域内私家车、出租车的数量分别为 2280 辆、500 辆，统计区域内私家车充电数据 468 次，出租车充电数据 202 次<sup>[20]</sup>。

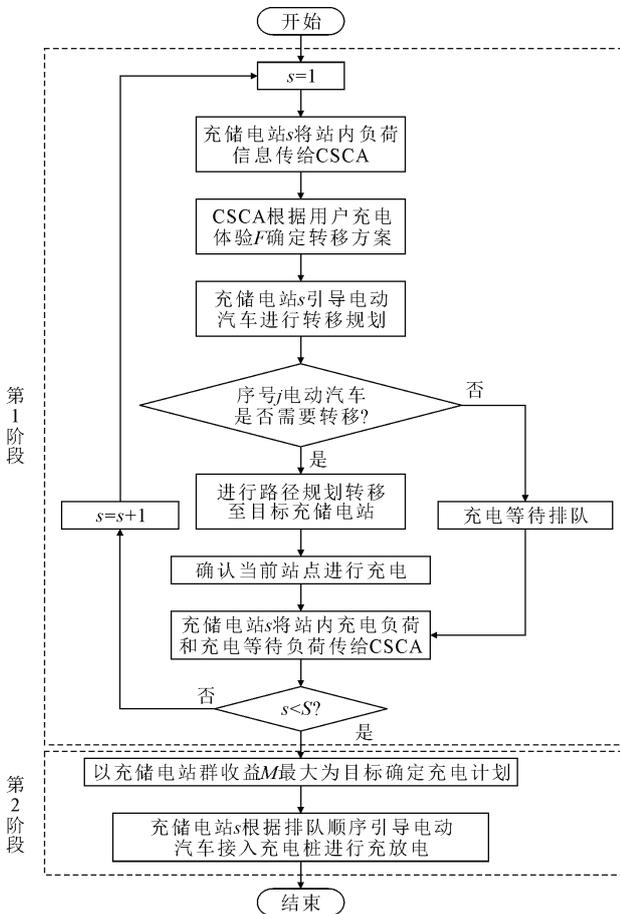


图 4 充电电站群调度仿真流程图

Fig.4 Flow chart of scheduling simulation of charging and storage station group

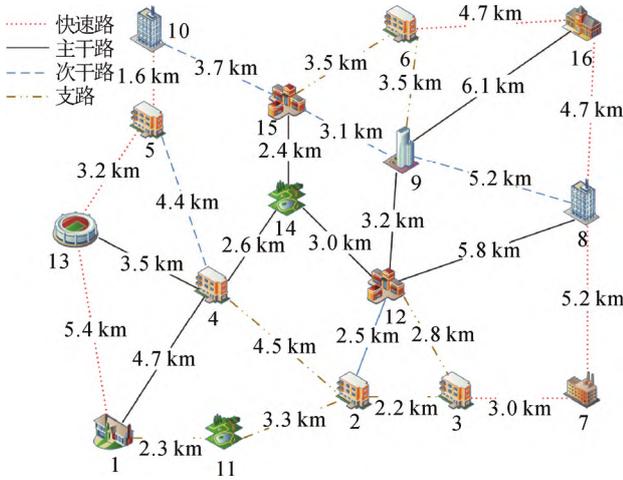


图 5 仿真区域拓扑

Fig.5 Simulation area topology

配置 2 种类型的 EV: EV<sub>1</sub> 为小型轿车，用于私家车和出租车出行；EV<sub>2</sub> 为大型公交车，参数如表 1 所示。充储电站参数如表 2 所示，配电网、充储电站分时电价如表 3 所示，调度时间尺度为 15 min，仿真周期为 24 h。充储电站群调度模型基于 MATLAB 和 CPLEX 进行仿真求解。

3.3 区域充储电站群调度分析

为研究充储电站群联合调度模型对于区域内充电负荷分布和充电幅值规律变化的影响，本节对调度后的 EV 充电负荷时空分布进行分析，如图 6 所示，若不考虑站与站之间的联动关系，会导致 EV 负荷在个别充储电站的积聚，而其余充储电站资源得不到充分利用，故其整体经济收益较差，站内实现资源的灵活调度空间较小。而本文所提方法使得站内负荷分布更均匀。图中充电出现的晚高峰意为充储电站的充电峰值，在 12:00—17:00 时段 ES 与 EV 同时进行充电，达到充电峰值，对比充储电站 1—6 与 7—16，可以看出居民区的晚高峰部分延迟至

表 1 EV 配置参数

Table 1 EV configuration parameters

类型	$C_{EV}/(kW \cdot h)$	$P^{EV}/kW$	$R_{ch}$	$S_{exp}$	$S_{min}$
EV <sub>1</sub>	32	7	0.9	0.95	0.1
EV <sub>2</sub>	150	120	0.9	0.95	0.1

表 2 充储电站配置参数

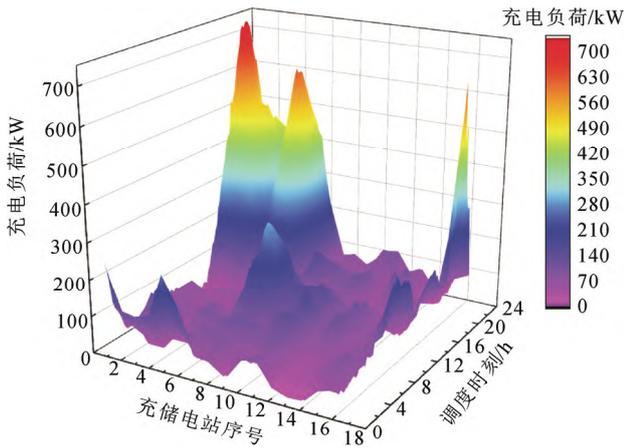
Table 2 Configuration parameters of charging and storage station

变量	值	变量	值
$N^{CP}$	8	$P_{ch}^{ES}/kW$	70.875
$S_{max}$	1	$P_{dis}^{ES}/kW$	70.875
$S_{min}^{ES}$	0.1	$C^{ES}/(kW \cdot h)$	113
$S_{end}^{ES}$	0.3	$P^{max}/kW$	55 000

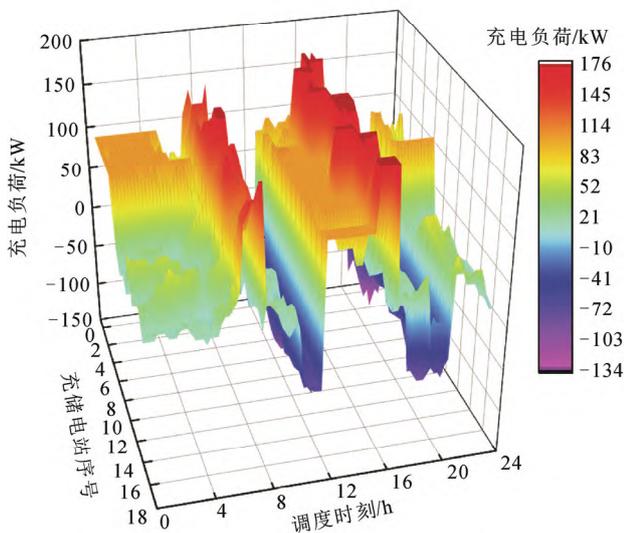
表 3 配电网、充储电站分时电价

Table 3 Time-of-use electricity price of distribution network and charging and storage station

时段	$c^{EV}/(\text{元} \cdot (kW \cdot h)^{-1})$	$c_{ch}^{sell}、c_{dis}^{buy}/(\text{元} \cdot (kW \cdot h)^{-1})$
00:00—08:00	0.365	0.85
08:00—12:00	0.869	1.21
12:00—17:00	0.687	1.12
17:00—22:30	0.869	1.21
22:30—24:00	0.687	1.12



(a) EV转移前充电负荷时空分布



(b) EV转移后充电负荷时空分布

图6 充储电站群充电负荷时空分布

Fig.6 Time and space distribution of charging load of charging and storage station group

00:00 之后, 位于工作区和娱乐区内的充储电站峰值转移在 08:00—10:00 时段, 其中部分由于充电桩数量限制, 充储电站最大充电功率恒定, 出现峰值相等情况。在工作区 6—10 内电站受上班时间集中, 充电负荷站内不能处理, 分散至其他站内进行处理。

图 7 是区域内充储电站群负荷接入配网后的总负荷, 全天负荷峰值出现在 17:00—19:00 时段, 最大峰值为 49879.95 kW, 由 EV 和 ES 的充电负荷叠加导致。从图中可以看出 EV 的充电负荷充电功率相比充储电站 ES 放电较为均匀, EV 在调度时刻内多需要电网和充储电站提供能量, 在 19:00—21:00 售卖电能给电站带来利益, 出现放电大于充电, 向电网反馈电能; ES 的充电集中在 07:00—09:00 时段

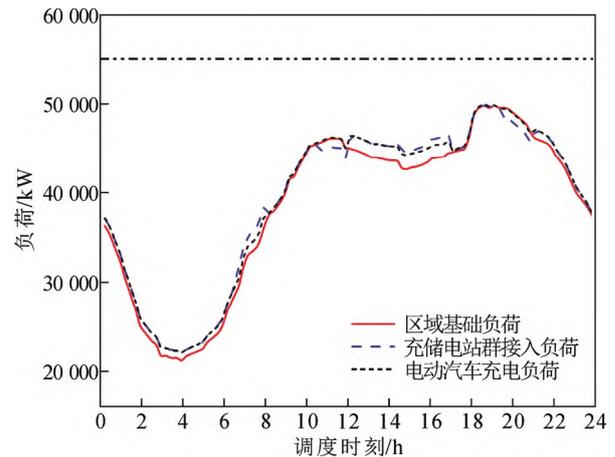


图7 充储电站群负荷入网

Fig.7 Loading of charging and storage station group into the grid

和 15:00—17:00 时段, 放电集中在 11:00—12:00 时段和 19:00—21:00 时段, 受分时电价的变化规律改变充放电计划, 合理的电价设置有助于配网实现削峰填谷。

### 3.4 多充储电站内充电负荷对比分析

充储电站群内各个充储电站调度周期内的站内 EV 和 ES 的充电状态如图 8 所示。充储电站 1—6 位于居民区, 其下班 EV 较多, 可调配负荷大, 由于 00:00—08:00 时段配电网电价最低, 充储电站在高电价来临之前进行 EV 充电行为, 并在 08:00—12:00 时段充储电站控制 EV 放电, 将电能卖给配网利用配网电价差获取利益, 在 12:00 之后进行满足用户需求的充电计划, 故 12:00 时段之后充电负荷较大。7—16 节点位于工作区和娱乐区, 充电负荷集中在早高峰与晚高峰之后, 其中为满足车主回家需求, 在 19:00 之前对 EV 进行充电, 并对可调度 EV 在配网电价较高时放电。在 19:00—22:30 之间电价较高, 节点内 EV 部分选择放电, 而在 22:30—00:00 时段电价较低时, 出现充电聚集现象。ES 充电与配电网电价相关性方面比 EV 具有更直接的因果关系, 根据配电网电价低充高放。

### 3.5 充储电站群联合调度收益对比分析

对联合调度下的各个电站收益进行汇总, 如表 4 所示, 包含不进行负荷空间转移的方案收益对比。在参与调度的 705 辆 EV 之中, 有 82 辆参与调度, 对比不参与负荷转移方案平均 EV 充电达到期望值率提高了 11.67%, 其中充储电站 9 位于工作区, 且自身充电负荷较高, 充电需求较为集中, 只能满足

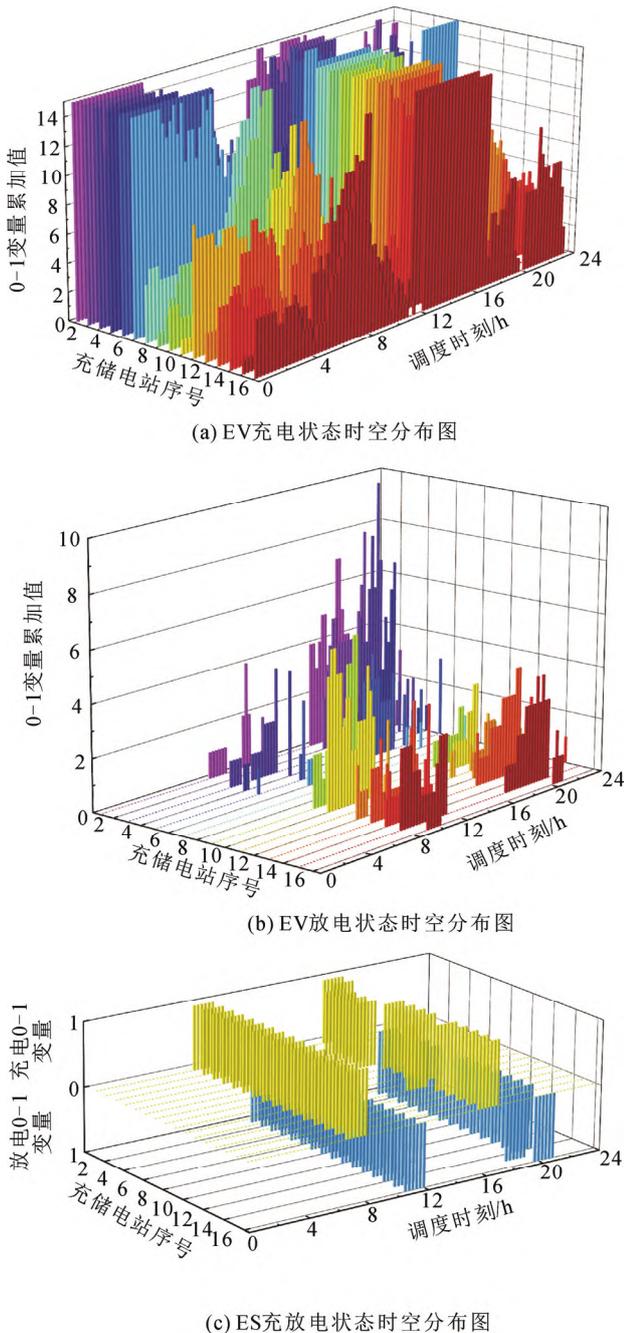


图8 充储电站群充电状态分布图

Fig.8 Distribution of charging status of charging and storage station group

53.70%EV 充电达到期望值。根据 EV 转移至目标点充电期间所消耗的能耗进行补偿, 总补偿金额为 49.22 元。对比充储电站 1, 虽然一天处理 EV 充电数量相同, 但经过负荷转移, 将站内负荷较高且不能满足车主需求的 EV 转移至其他站点, 并接受其他站点转移来的 EV 给予相应补偿, 可给自身利益收入提高 0.34%。充储电站群经过负荷时空转移后, 总收益相较原来提高 1.68%, 验证本文提出的方式

表 4 限定充电桩情境下收益表

Table 4 Income statement under the limited charging pile

充储 电站	scenario								
	考虑车主充电满意度					不考虑车主充电满意度			
	需补偿 车辆数量	补偿金 /元	充电车 辆数量	收益 /元	$S_{exp}$ 值 到达 率/%	充电车 辆数量	收益 /元	$S_{exp}$ 值 到达率 /%	
1	6	3.46	61	815.84	100	61	815.40	90.16	
2	5	4.02	44	635.01	100	39	575.70	100	
3	13	8.50	55	755.12	100	42	601.72	100	
4	7	6.47	50	705.76	100	45	647.70	95.55	
5	8	1.57	64	863.83	100	56	772.37	100	
6	14	8.43	66	881.16	100	55	762.92	94.54	
7	0	0	42	826.98	100	49	593.38	85.71	
8	0	0	42	518.86	100	53	622.02	79.24	
9	0	0	29	378.73	100	54	621.28	53.70	
10	0	0	32	408.55	100	42	510.14	76.19	
11	6	2.48	43	552.22	100	42	531.03	88.09	
12	8	5.32	39	514.46	100	34	455.29	91.17	
13	0	0	38	497.06	100	40	519.11	95.00	
14	5	3.21	25	341.98	100	20	286.51	100	
15	6	3.88	33	444.15	100	28	384.14	96.42	
16	4	1.84	42	534.19	100	45	550.86	84.44	
总计	82	49.22	705	9373.90	100	705	9249.55	88.36	

在给车主带来更好的充电体验同时, 提高了充储电站群的收入, 实现车主与充储电站群之间的互赢。

### 3.6 不同充电策略对比

为研究不同 EV 充电策略下充储电站群的负荷变化和电站收益, 进行 5 种策略对比, 仿真中去除 ES 干扰充放电。

策略 1: 无序充电;

策略 2: 以“削峰填谷”为目标的有序充电;

策略 3: 以“削峰填谷”为目标的有序充放电;

策略 4: 以“充储电站收益”为目标的有序充电;

策略 5: 以“充储电站收益”为目标的有序充放电。

图 9 为不同充电策略下的区域负荷, 表 5 为不同方案充储电站群收益对比。

针对不同策略下负荷曲线特点, 从图 9 中可以看出策略 1 负荷与区域基础负荷时间分布趋势相同, 这是由于无序充电反应本文所建立的 EV 出行链引起 EV 充电行为符合区域内居民基础充电行为。从图表中得到策略 2 与策略 3 曲线负荷峰谷差最小, 当 EV 进行放电行为时可以将 EV 视为需要支付使用费的 ES, 实现电能的峰放谷充, 相比不放

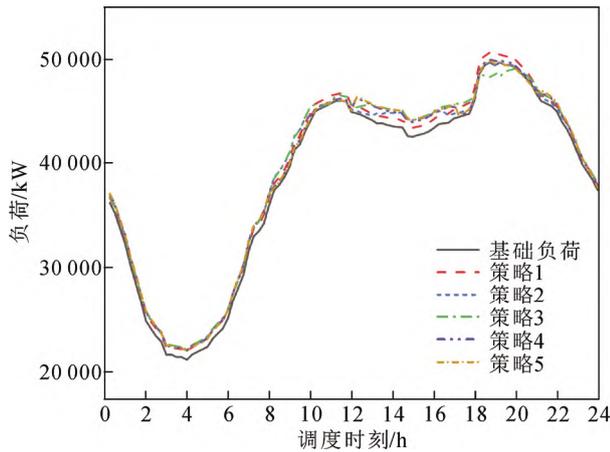


图9 不同方案区域总负荷

Fig.9 Total load of different scheme areas

表5 不同方案充储电站群收益对比

Table 5 Comparison of benefits of charging and storage station groups in different schemes

方案	充电电量/ kW	放电电量/ kW	收益/元	峰谷值差/ kW
策略1	17 160.5	0	7139.51	3827
策略2	17 010.0	0	7418.47	3322
策略3	22 302.0	5570.5	7578.58	3299
策略4	18 012.8	0	7982.24	3586
策略5	19 188.8	1237.9	8069.22	3696

电可以降低峰谷差 0.69%、提高收益 2.16%。从图 9 和表 5 中可以看出策略 4 与策略 5 的负荷变化与电价关联较大, 会出现集中在收益最大时充电现象, 策略 5 不仅可以降低基础负荷峰谷差 3.42%, 实现削峰填谷, 还在 5 种策略中使充储电站群在调度周期内获得最大利益 8069.22 元; 且对比策略 3 和策略 5 出现 EV 放电行为可以看到策略 5 放电电量低于策略 3, 这是由于 EV 放电行为伴随着电能转换消耗, 策略 3 为实现削峰填谷不考虑损耗对 EV 进行充放电调度, 相对于策略 5 加重电池损耗, 这显然也不符合大众 EV 车主意愿, 综上本文所提出的策略 5 相对于无序、无放电、不同目标下的策略方案能带动车主参与到充储电站群充电调度之中并提高充储电站群整体收益, 实现双方共赢。

#### 4 结论

本文针对区域充储电站群无规则充电导致充储电站群整体收益不佳以及车主充电满意度低的问题, 建立考虑 EV 转移随机特性的充储电站群运行

优化调度模型, 将调度阶段分为负荷转移阶段和站内充放电调度阶段, 实现对区域内多个充储电站的集群调度, 得到以下结论:

1) 充储电站群根据每个充储电站内充电桩使用情况激励车主响应负荷时空转移, 可以有效提高车主充电期望值达标率。

2) 本文所建立充储电站群调度模型能合理的进行 EV 有序充放电, 经算例验证本文所提方法能实现充储电站群收益最大化。

3) 充储电站的群内联合调度在给充储电站群整体带来更高收益的同时, 自身的谷价充电、峰价放电, 也能在一定程度上削减配电网负荷峰值压力。

在今后的研究中, 将进一步考虑构建包含换电的充换储一体化电站运行模型, 进而实现 EV 换电电池的梯次利用。

#### 参考文献 References

- [1] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于印发新能源汽车产业发展规划(2021—2035 年)的通知[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2020, 1714(31): 16-23.  
The General Office of the State Council. Circular of the General Office of the State Council on printing and issuing the development plan of new energy automobile industry(2021—2035)[J]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2020, 1714(31): 16-23.
- [2] WU X M, FENG Q J, BAI C C, et al. A novel fast-charging stations locational planning model for electric bus transit system[J]. Energy, 2021, 224: 120106.
- [3] 徐 冉, 徐满源, 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.
- [4] 李咸善, 陈敏睿, 程 杉, 等. 基于双重激励协同博弈的含电动汽车微电网优化调度策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(7): 2286-2295.  
LI Xianshan, CHEN Minrui, CHENG Shan, et al. Research on optimal scheduling strategy of microgrid with electric vehicles based on dual incentive cooperative game[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2286-2295.
- [5] 程 杉, 杨 堃, 魏昭彬, 等. 计及电价优化和放电节制的电动汽车充电站有序充放电调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 1-8.  
CHENG Shan, YANG Kun, WEI Zhaobin, et al. Orderly charging and discharging scheduling of an electric vehicle charging station considering price optimization and discharge behavior control[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 1-8.
- [6] OROZCO C, BORGHETTI A, NAPOLITANO F, et al. Day-ahead multistage stochastic optimization of a group of electric vehicle charging stations[C]//Proceedings of the 2021 IEEE 15th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering. Florence, Italy: IEEE, 2021: 1-8.

- [7] 程 杉, 王贤宁, 冯毅焜. 电动汽车充电站有序充电调度的分散式优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(1): 39-46.  
CHENG Shan, WANG Xianning, FENG Yichen, et al. Decentralized optimization of ordered charging scheduling in electric vehicle charging station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 39-46.
- [8] WANG N, LI B, DUAN Y, et al. A multi-energy scheduling strategy for orderly charging and discharging of electric vehicles based on multi-objective particle swarm optimization[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 44: 101037.
- [9] TAO Y, HUANG M H, CHEN Y P, et al. Orderly charging strategy of battery electric vehicle driven by real-world driving data[J]. Energy, 2020, 193: 116806.
- [10] ZHAO T Y, LI Y Z, PAN X W, et al. Real-time optimal energy and reserve management of electric vehicle fast charging station: hierarchical game approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 5357-5370.
- [11] 张 高, 王 旭, 蒋传文. 基于主从博弈的含电动汽车虚拟电厂协调调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 48-55.  
ZHANG Gao, WANG Xu, JIANG Chuanwen. Stackelberg game based coordinated dispatch of virtual power plant considering electric vehicle management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 48-55.
- [12] YAN D X, YIN H, LI T, et al. A two-stage scheme for both power allocation and EV charging coordination in a grid-tied PV-battery charging station[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(10): 6994-7004.
- [13] 王浩林, 张勇军, 毛海鹏. 基于时刻充电概率的电动汽车充电负荷预测方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 207-213.  
WANG Haolin, ZHANG Yongjun, MAO Haipeng, et al. Charging load forecasting method based on instantaneous charging probability for electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 207-213.
- [14] 张 良, 孙成龙, 蔡国伟, 等. 基于 PSO 算法的电动汽车有序充放电两阶段优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1837-1851.  
ZHANG Liang, SUN Chenglong, CAI Guowei, et al. Two-stage optimization strategy for coordinated charging and discharging of EVs based on PSO algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1837-1851.
- [15] 程 杉, 魏昭彬, 赵子凯, 等. 考虑电动汽车时空接入随机性的充储电站有序充放电分散式优化[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 28-35, 44.  
CHENG Shan, WEI Zhaobin, ZHAO Zikai, et al. Decentralized optimization of ordered charging and discharging for charging-storage station considering spatial-temporal access randomness of electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 28-35, 44.
- [16] 侯 慧, 王逸凡, 吴细秀, 等. 长时间尺度下计及里程焦虑心理效应的电动汽车充放电调度策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 85-93.  
HOU Hui, WANG Yifan, WU Xixiu, et al. Electric vehicle charging and discharging scheduling strategy considering psychological effect of mileage anxiety on a long-time scale[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 85-93.
- [17] 占 智, 邹 波, 林振智, 等. 计及可转移充放电电量裕度的电动汽车充放电实时调度策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(6): 109-116.  
ZHAN Zhi, Zou Bo, LIN Zhenzhi, et al. Real-time dispatch strategy for charging/discharging of electric vehicles considering transferable margin of charging/discharging energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 109-116.
- [18] LI S M, HUANG T C. Optimization control for orderly charge and discharge control strategy of electric vehicles based on reliable index of charging[C]//Proceedings of 2020 IEEE Sustainable Power and Energy Conference. Chengdu, China: IEEE, 2020: 2200-2205.
- [19] BIAN H H, GUO Z Y, ZHOU C G, et al. Research on orderly charge and discharge strategy of EV based on QPSO algorithm[J]. IEEE Access, 2022, 10: 66430-66448.
- [20] 程 杉, 赵子凯, 陈 诺, 等. 计及耦合因素的电动汽车充电负荷时空分布预测[J]. 电力工程技术, 2022, 41(3): 194-201, 208.  
CHENG Shan, ZHAO Zikai, CHEN Nuo, et al. Prediction of temporal and spatial distribution of electric vehicle charging load considering coupling factors[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 194-201, 208.
- [21] 李东东, 段维伊, 林顺富, 等. 实时电价条件下基于用户引导的电动汽车-充电桩匹配策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(8): 74-82.  
LI Dongdong, DUAN Weiyi, LIN Shunfu, et al. User guidance based matching strategy for electric vehicle-charging pile in condition of real-time electricity price[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 74-82.
- [22] 肖秋瑶, 杨 骥, 宋政湘. 考虑碳交易和电动汽车充电负荷的工业园区综合能源系统调度策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(4): 1392-1401.  
XIAO Qiuyao, YANG Kun, SONG Zhengxiang. Scheduling Strategy of industrial parks integrated energy system considering carbon trading and electric vehicle charging load[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1392-1401.



CHENG Shan  
Ph.D., Professor  
Corresponding author

程 杉(通信作者)

1981—, 男, 博士, 教授, 博导  
主要从事分布式能源与微电网、电动汽车设施集成与运行、智能配用电等方面的研究  
E-mail: hpucquyzu@ctgu.edu.cn



FU Tong

傅 桐

1998—, 男, 硕士生  
主要从事电力系统运行与控制方面的研究

收稿日期 2022-10-26 修回日期 2023-05-10 编辑 陈 蔓