

## 面向光储充一体化社区的有序充电策略研究

康童<sup>1,2</sup>, 朱吉然<sup>1,2</sup>, 冯楚瑞<sup>3</sup>, 范敏<sup>3</sup>, 任磊<sup>1,2</sup>, 唐海国<sup>1,2</sup>

(1. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 湖南 长沙 410007; 2. 国网公司配电网智能化应用技术实验室, 湖南 长沙 410007; 3. 重庆大学自动化学院, 重庆 400044)

**摘要:** 针对当前有序充电策略优化目标单一且未考虑新能源出力的现状, 提出了面向光储充一体化社区的有序充电策略。首先, 将降低社区负荷峰谷差作为电网层优化目标, 将减少用户充电费用作为用户层优化目标, 完成双层多目标有序充电模型的设计。其次, 设计基于云边协同的调度架构, 将电网层优化模型部署在云端侧, 用户层优化模型部署在边缘侧。该架构能有效利用边缘侧的计算资源, 缓解云端侧面对电动汽车大规模接入时的计算压力。最后, 以5种充电场景为例进行算例分析。实验表明, 与无序充电相比, 所提策略能够使社区负荷峰谷差减少40.47%, 充电均价减少52.63%。与单层有序充电策略相比, 该策略综合效果优势明显, 在保障配电网安全稳定运行的同时, 兼顾电动汽车用户的经济利益。

**关键词:** 光储充一体化社区; 有序充电; 双层多目标优化模型; 云边协同; 电动汽车

### An orderly charging strategy for a photovoltaic-storage-charging integrated community

KANG Tong<sup>1,2</sup>, ZHU Jiran<sup>1,2</sup>, FENG Churui<sup>3</sup>, FAN Min<sup>3</sup>, REN Lei<sup>1,2</sup>, TANG Haiguo<sup>1,2</sup>

(1. State Grid Hunan Electric Power Company Limited Research Institute, Changsha 410007, China; 2. State Grid Corporation Laboratory of Intelligent Application Technology for Distribution Network, Changsha 410007, China; 3. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Currently the optimization objective of an orderly charging strategy has a single layer and new energy output is not considered. Thus an orderly charging strategy for a photovoltaic-storage-charging integrated community is proposed. First, the reduction of peak valley difference of community load is taken as the optimization goal of the power grid layer, and the reduction of user charging costs is taken as the optimization goal of the user layer to complete the design of a double-layer multi-objective orderly charging model. Secondly, a scheduling architecture based on cloud edge collaboration is designed, deploying the power grid layer optimization model on the cloud side and the user layer optimization model on the edge side. This architecture effectively uses the computing resources on the edge side and alleviates the computational pressure on the cloud side for large-scale access to electric vehicles. Finally, five charging scenarios are used as examples for simulation analysis. The experiment shows that compared to disorderly charging, the strategy proposed can reduce the peak valley difference of community load by 40.47% and the average charging price by 52.63%. Compared with the single-layer orderly charging strategies, this strategy has significant advantages in terms of overall effectiveness, ensuring the safe and stable operation of the distribution network while also taking into account the economic interests of electric vehicle users.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2020YFB2009405).

**Key words:** photovoltaic-storage-charging integrated community; orderly charging; double-layer multi-objective optimization model; cloud edge collaboration; electric vehicle

## 0 引言

近年来, 随着全球经济的快速发展, 大量化石

能源被开采使用, 对环境造成污染<sup>[1-3]</sup>, 而电动汽车因具有环保、低碳等优点得以快速发展<sup>[4-7]</sup>, 据《电动汽车发展战略研究报告》数据预测, 2030年我国电动汽车保有量将达到6000万辆<sup>[8]</sup>。电动汽车数量的增加可以有效减少对传统能源的使用, 但电动汽车大量接入电网势必会带来诸多影响, 如加剧负荷波动、增大负荷峰谷差、减少电网设备寿命等<sup>[9-13]</sup>。

**基金项目:** 国家重点研发计划项目资助(2020YFB2009405); 国网湖南省电力有限公司科技项目资助(5216A5220010, 5216A522001Z)

因此研究电动汽车有序充电策略具有重要意义和实用价值。

目前, 国内外已经针对电动汽车有序充电策略开展了相关研究<sup>[14-16]</sup>。文献[17-18]以变压器容量等为约束条件、以充电站经营成本最低为目标建立有序充电模型。文献[19-20]在分时电价的基础上, 提出一种基于动态分时电价的电动汽车有序充电方法, 引导车主有序充电, 平抑配电网负荷波动。以上研究仅针对单一目标进行优化, 未考虑多方利益。文献[21-22]充分考虑到用户多方面需求, 提出了基于优劣解距离法的电动汽车有序充电优化策略, 该策略既能节约用户充电成本, 又能实现电力负荷削峰填谷的目标。文献[23]以配电网与充电站交互功率、充电站运营收益两方面为目标, 建立充电站调度模型, 减小电池的损耗与放电成本。但上述研究都未考虑新能源出力的情况。文献[24-25]针对分布式能源出力具有随机性等问题, 构建了多目标两阶段优化模型, 平抑了分布式能源出力波动, 同时降低了用户充电成本。文献[26]针对电动汽车的入网问题, 提出了含分布式电源和电动汽车充电的优化重构模型, 在 IEEE33 节点标准配电系统中进行仿真验证。但上述研究未考虑加入储能装置提高分布式能源的就地消纳。文献[27-28]借助住宅小区的有序充电控制系统, 利用分时电价调节电动汽车充电负荷, 达到最大化用户侧和电网侧利益的目的, 但文中的集中式调度架构在面对大规模电动汽车接入时, 容易因计算量大而导致响应速度慢等问题。

综上所述, 现有研究存在以下问题: 1) 优化目标单一, 缺乏对用户、电网等多方面利益的考虑; 2) 没有考虑加入分布式能源和储能设备来提高用户响应策略的积极性和分布式能源的就地消纳; 3) 现有的集中式调度架构在大规模电动汽车接入的情况下, 存在计算资源紧张、响应速度慢的问题。鉴于上述问题, 本文针对包含光伏单元和储能单元的社区, 以光储充一体化社区为例, 提出了一种基于鼠群优化算法(rat swarm optimizer, RSO)的双层多目标有序充电策略, 在光伏充分消纳的情况下, 考虑用户侧和电网侧的利益, 有助于负荷的削峰填谷, 降低峰谷差, 同时减少充电费用。此外设计了基于云边协同的调度架构, 有效利用边缘侧的计算能力, 降低云端侧面对大规模数据的计算压力。

## 1 光储充一体化社区无序充电分析

### 1.1 光储充一体化社区系统结构

如图 1 所示, 光储充一体化社区系统由光伏单元、储能单元和变压器等组成。其中箭头表示电能

的流向, 光伏单元和电网提供电能, 充电桩和常规负荷消耗电能。其中储能单元比较特殊, 既能提供电能, 也能消耗电能, 为了后续简化充电模型, 把储能单元看作负荷消耗电能, 计算时储能单元若处于充电状态, 则功率为正, 反之功率为负。

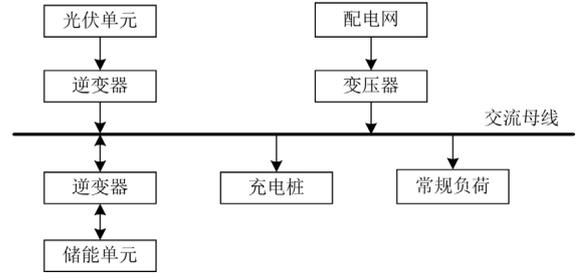


图 1 光储充一体化社区系统结构

Fig. 1 Structure of photovoltaic-storage-charging integrated community system

当光伏出力大于充电负荷时, 光伏单元先对充电桩供电, 其次向储能单元供电, 若有富余再流向常规负荷; 当光伏出力小于充电负荷时, 储能单元对充电桩进行供电, 最后充电负荷的差额由电网提供。

### 1.2 社区无序充电负荷模型

单个居民的充电行为是随机的和无序的, 但从整体而言, 充电规律会受到社区居民生活习惯和出行规律的影响<sup>[29]</sup>。本文以 2017 年美国交通部对全美家用轿车出行的统计结果<sup>[30]</sup>为依据, 并结合中美出行时段差异做了一定程度的调整, 使之更符合我国居民用户的出行情况<sup>[31]</sup>。

调整之后居民回家时间的概率密度函数为

$$f_s(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{(x_s + 24 - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right], & 0 < x_s \leq \mu_s - 12 \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{(x_s - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right], & \mu_s - 12 < x_s \leq 24 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $x_s$  为居民回家时间; 期望值  $\mu_s = 18.74$ ; 标准差  $\sigma_s = 3.41$ 。假设居民回家就开始充电, 即可以把回家时间看作电动汽车开始充电时间。

调整之后居民离家时间的概率密度函数为

$$f_c(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} \exp\left[-\frac{(x_c - \mu_c)^2}{2\sigma_c^2}\right], & 0 < x_c \leq \mu_c + 12 \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} \exp\left[-\frac{(x_c - 24 - \mu_c)^2}{2\sigma_c^2}\right], & \mu_c + 12 < x_c \leq 24 \end{cases} \quad (2)$$

式中： $x_c$  为居民离家时间；期望值  $\mu_c = 7.92$ ；标准差  $\sigma_c = 3.24$ 。假设居民离家才结束充电，即可以把离家时间看作电动汽车结束充电时间。

电动汽车日行驶里程的概率密度函数为

$$f_d(d) = \frac{1}{d\sigma_d\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln d - \mu_d)}{2\sigma_d^2}\right] \quad (3)$$

式中： $d$  为电动汽车日行驶里程；期望值  $\mu_d = 3.2$ ；标准差  $\sigma_d = 0.88$ 。

居民出行规律概率密度分布如图 2 所示。

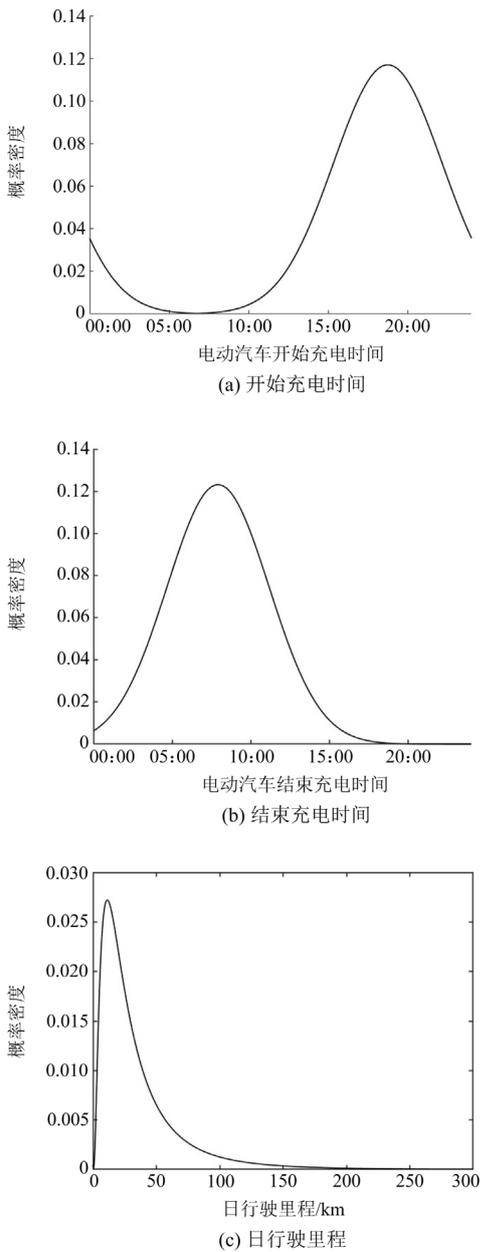


图 2 居民出行规律概率密度分布

Fig. 2 Probability density distribution of resident trip law

从图 2 可以看出：电动汽车开始充电时间集中在 16:00—21:00，结束充电时间集中在 06:00—10:00，日行驶里程集中在 50 km 以内。

### 1.3 无序充电负荷模拟

本文采用蒙特卡洛法模拟社区居民的无序充电行为<sup>[32]</sup>。假设电动汽车每天充电一次，直到充满为止，整个充电过程近似为恒功率充电，并选择更适合社区的常规充电方式<sup>[33]</sup>。电动汽车无序充电负荷模拟流程如图 3 所示，具体步骤如下。

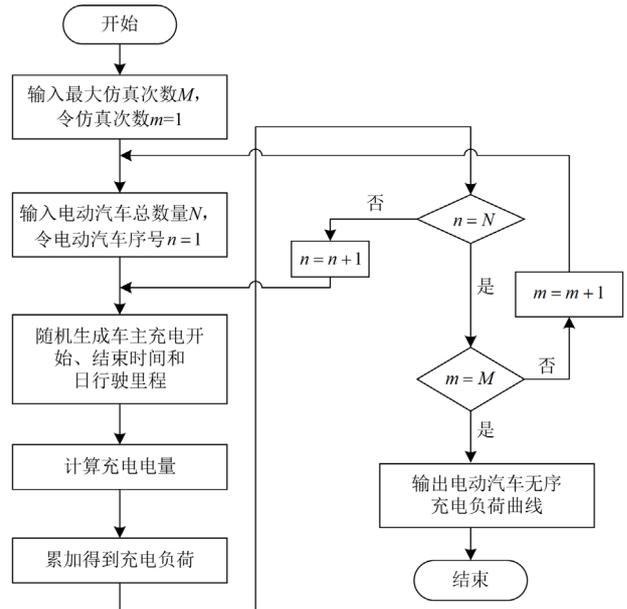


图 3 无序充电负荷模拟流程

Fig. 3 Simulation process of disorderly charging load

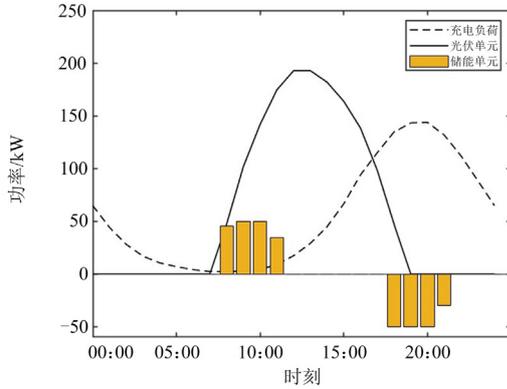
- 1) 输入最大仿真次数和电动汽车总数量，并进行初始化；
- 2) 根据前文提到的概率模型，随机生成车主充电开始时间、结束时间和日行驶里程；
- 3) 结合电动汽车相关参数计算得到充电电量，并累加得到充电负荷；
- 4) 当完成所有电动汽车充电负荷的计算后，进行下一次仿真，仿真次数达到最大值后，取平均值输出电动汽车无序充电负荷曲线。

### 1.4 社区无序充电仿真分析

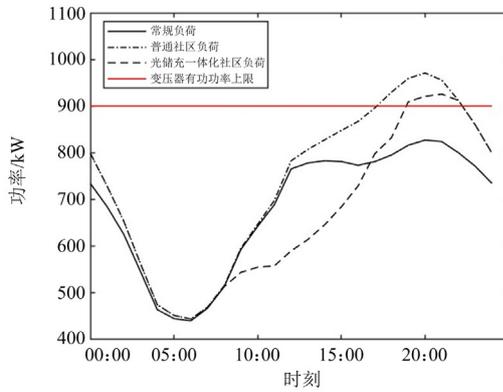
社区电动汽车无序充电负荷和储能单元、光伏单元出力情况如图 4(a)所示，三者再和社区常规负荷叠加得到无序充电下的社区负荷，如图 4(b)所示。

从图 4 中可以看出：光伏单元出力时间集中在 08:00—17:00，期间光伏发电量可以覆盖充电负荷和储能单元的消耗，剩下的再供给社区常规负荷使用，无须上网，减少传输时的损耗，实现就地消纳。但充电负荷集中的时间段正好是常规负荷的高

峰时间段, 容易“峰上加峰”, 进一步增加峰谷差, 加剧电网负荷波动。此时储能单元可以放电, 对充电桩供电, 降低负荷峰值。



(a) 无序充电下的充电负荷



(b) 无序充电下的社区负荷

图4 无序充电仿真结果

Fig. 4 Simulation result of disorderly charging

在 18:00—22:00 这一时间段, 社区负荷已经超过变压器有功功率上限, 使变压器处于过载状态, 损害其使用寿命。和普通社区相比, 光储充一体化社区的负荷峰值和越限时间都有一定程度降低, 但仍未解决社区负荷越限和波动大的问题, 影响居民的安全用电, 亟需对电动汽车充电行为开展有序调度研究。

## 2 基于鼠群优化算法的双层多目标有序充电策略

### 2.1 双层多目标有序充电策略

本策略提出了社区负荷峰谷差和用户充电费用最小的双层多目标优化模型。第一层是电网层, 将降低社区负荷峰谷差作为优化目标; 第二层是用户层, 将减少用户充电费用作为优化目标, 并把电网层优化结果作为本层优化模型的约束条件, 减少用

户充电费用, 同时考虑社区负荷平稳性。双层多目标有序充电策略具体流程如图 5 所示。

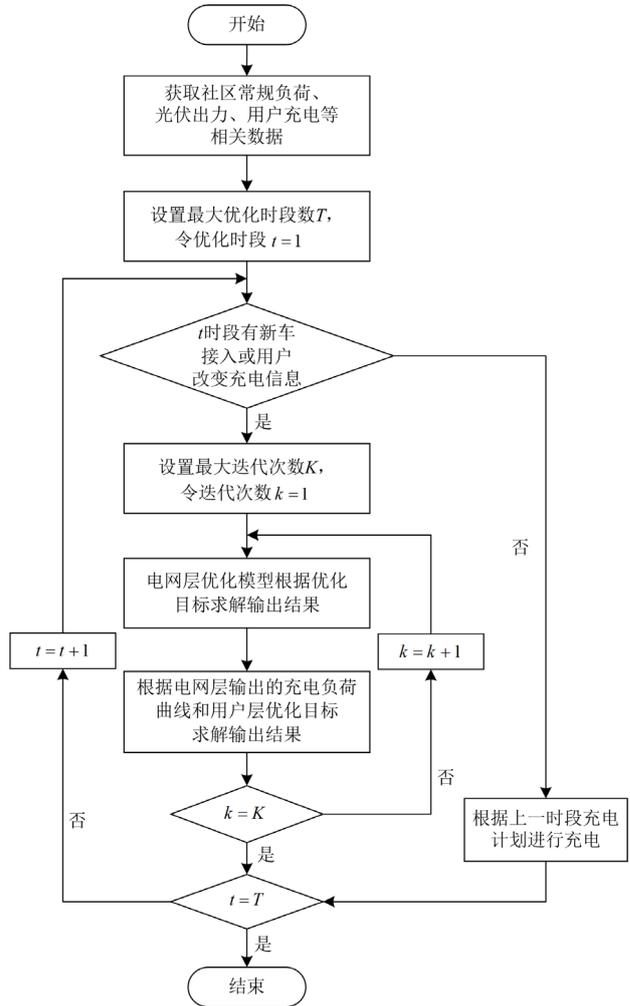


图5 双层多目标有序充电策略流程

Fig. 5 Process of double-layered multi-objective orderly charging strategy

1) 获取未来 24 h 社区常规负荷和光伏出力预测数据, 动态获取用户充电信息, 包括开始充电时间、结束充电时间、充电量等;

2) 当某时段有新车接入或用户改变充电信息时, 电网层根据社区负荷峰谷差最小的优化目标求解并输出用户开始充电时间、光伏的充放电功率和充电负荷;

3) 电网层输出的充电负荷作为用户层优化模型的约束条件, 用户层根据用户充电费用最小的优化目标求解并输出用户开始充电时间、光伏的充放电功率;

4) 重复步骤 2)和 3), 达到最大迭代次数, 输出新的充电计划;

5) 若没有新车接入或用户改变充电信息, 则遵循上一时段充电计划;

6) 重复步骤 2) 一步骤 5), 直到优化时段达到最大时段数。

## 2.2 电网层优化模型

### 2.2.1 目标函数

电网层的优化目标是降低社区负荷峰谷差, 目标函数为

$$\min f_1 = \max P_{\text{all}} - \min P_{\text{all}} \quad (4)$$

式中,  $P_{\text{all}}$  为总负荷。

### 2.2.2 约束条件

#### 1) 功率平衡约束

$$P_{\text{all}} + P_{\text{pva}} = P_{\text{c}} + P_{\text{g}} + P_{\text{s}} \quad (5)$$

式中:  $P_{\text{pva}}$  为光伏出力功率;  $P_{\text{c}}$  为充电负荷;  $P_{\text{g}}$  为常规负荷;  $P_{\text{s}}$  为储能单元充放电功率。

#### 2) 总负荷限制约束

$$P_{\text{all}} \leq P_{\text{max}} \quad (6)$$

$$P_{\text{max}} = P_{\text{R}} \cdot \lambda_{\text{R}} \quad (7)$$

式中:  $P_{\text{max}}$  为社区变压器的最大有功功率;  $P_{\text{R}}$  为社区变压器的额定容量;  $\lambda_{\text{R}}$  为功率因数。式(6)代表社区总负荷不能超过社区变压器的最大有功功率。

#### 3) 用户充电需求约束

##### 充电时间约束为

$$T_{\text{min}}^i \leq T_{\text{need}}^i \leq T_{\text{max}}^i, i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

$$S_{\text{st}}^i = \left( 1 - \frac{d_i \cdot E_{100}}{100B} \right) \times 100\% \quad (9)$$

$$T_{\text{need}}^i = \frac{(1 - S_{\text{st}}^i)B}{P_{\text{cs}}} \quad (10)$$

式中:  $T_{\text{min}}^i$  为第  $i$  辆电动汽车充满电的最短时间, 即按最大功率进行充电需要的时间;  $T_{\text{need}}^i$  为第  $i$  辆电动汽车充满电需要的充电时长;  $T_{\text{max}}^i$  为第  $i$  辆电动汽车的最长充电时间, 即车主回家到离家之间的时间;  $S_{\text{st}}^i$  为第  $i$  辆电动汽车开始充电时的电池荷电状态;  $d_i$  为第  $i$  辆电动汽车的日行驶里程;  $E_{100}$  为电动汽车百公里耗电量;  $B$  为电池的额定容量;  $P_{\text{cs}}$  为充电桩的额定充电功率。

##### 电池电量约束为

$$S_{\text{st}}^i \leq S_{\text{end}}^i \leq 1 \quad (11)$$

式中,  $S_{\text{end}}^i$  为第  $i$  辆电动汽车结束充电时电池的荷电状态。

#### 4) 储能单元约束

##### 储能单元充放电功率约束为

$$0 \leq |P_{\text{s}}| \leq P_{\text{smax}} \quad (12)$$

式中,  $P_{\text{smax}}$  为最大充放电功率。

##### 储能单元容量约束为

$$0.1B_{\text{cmax}} \leq B_{\text{c}} \leq B_{\text{cmax}} \quad (13)$$

式中:  $B_{\text{cmax}}$  为储能单元最大容量;  $B_{\text{c}}$  为储能单元实际容量。

## 2.3 用户层优化模型

### 2.3.1 目标函数

社区的电力来自光伏单元和配电网, 充电费用也来自这两部分, 其余充电设施建设的费用暂不考虑, 充电费用目标函数为

$$\min f_2 = \sum_i^T (P_{\text{pvc}}^i R_{\text{pv}} + P_{\text{dn}}^i R_i) \Delta t, i = 1, 2, \dots, T \quad (14)$$

$$P_{\text{pvc}}^i = \begin{cases} P_{\text{pva}}^i, P_{\text{pva}}^i \leq P_{\text{c}}^i \\ P_{\text{c}}^i + P_{\text{s}}^i, P_{\text{pva}}^i > P_{\text{c}}^i \end{cases} \quad (15)$$

$$P_{\text{dn}}^i = P_{\text{c}}^i - P_{\text{pvc}}^i + P_{\text{s}}^i \quad (16)$$

式中:  $P_{\text{pvc}}^i$  为第  $i$  个时段的光伏单元在电动汽车和储能单元上的输出功率;  $R_{\text{pv}}$  为光伏的单位发电成本;

$P_{\text{dn}}^i$  为第  $i$  个时段电网在电动汽车和储能单元上的输出功率;  $R_i$  为第  $i$  个时段的分时电价;  $\Delta t$  为单位时段;

$P_{\text{pva}}^i$  为第  $i$  个时段的光伏出力功率;  $P_{\text{c}}^i$  为第  $i$  个时段的充电负荷;  $P_{\text{s}}^i$  为第  $i$  个时段的储能单元充放电功率。

### 2.3.2 约束条件

$$0.9P_{\text{c1}}^i \leq P_{\text{c2}}^i \leq 1.1P_{\text{c1}}^i \quad (17)$$

式中:  $P_{\text{c1}}^i$  为电网层输出第  $i$  个时段的充电负荷;  $P_{\text{c2}}^i$  为用户层输出第  $i$  个时段的充电负荷。

其余约束条件和 2.2.2 节相同。

## 2.4 优化模型求解方法

电动汽车双层多目标有序充电优化模型优化对象众多, 且存在多个约束条件, 传统方法求解困难。本文采用鼠群优化算法进行求解。鼠群优化算法是一种新型群智能优化算法, 在局部搜索和全局搜索之间实现动态平衡, 避免了粒子群算法容易陷入局部最优的问题。

鼠群优化算法通过模拟鼠群的捕食行为, 将鼠群的捕食行为分为两个过程——追逐猎物和攻击猎物, 并进行数学建模<sup>[34]</sup>。

在鼠群追逐猎物过程中, 假设鼠群中的最优个体知道猎物的位置, 鼠群中的其他个体便可以通过最优个体来更新自己的位置, 更新策略如式(18)和式(20)所示。

$$P_i^t = A \cdot X_i^t + C \cdot (X_{\text{best}}^t - X_i^t) \quad (18)$$

$$A = R \cdot \left(1 - \frac{t}{T}\right) \quad (19)$$

式中:  $P_i^t$  为猎物对于第  $i$  只老鼠来说的位置;  $A$  为自身权重;  $X_i^t$  为第  $i$  只老鼠;  $X_{best}^t$  为鼠群中的最优个体;  $t$  为当前迭代次数;  $C$  为 0~2 之间的随机数;  $R$  为 1~5 之间的随机数。

在攻击猎物过程中, 算法从数学上定义老鼠与猎物的打斗过程, 老鼠位置更新公式为

$$X_i^{t+1} = \left| X_{best}^t - P_i^t \right| \quad (20)$$

式中,  $X_i^{t+1}$  是第  $i$  只老鼠在下次迭代中的位置。

鼠群优化算法通过模拟鼠群追逐猎物和攻击猎物的行为, 并通过调整式(18)中的参数  $A$  和  $C$  使老鼠到达不同的位置, 完成对搜索空间的搜索。本文利用鼠群优化算法对优化模型进行求解, 得到最优充电计划, 包含电动汽车开始充电时间和储能单元充放电功率, 具体流程如图 6 所示。

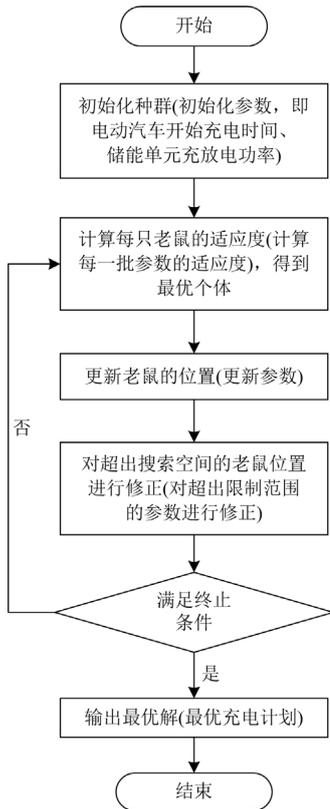


图 6 鼠群优化算法流程

Fig. 6 Process of RSO

## 2.5 基于云边协同的调度架构

目前电动汽车有序充电调度主要采取集中式调度架构, 但在面对大规模电动汽车接入电网时, 云主站往往会因为数据庞大导致计算时间过长, 甚至出

现错误<sup>[35]</sup>。对此, 在配电网“云管边端”的建设模式基础上, 基于云边协同设计有序充电调度架构<sup>[36]</sup>, 如图 7 所示。

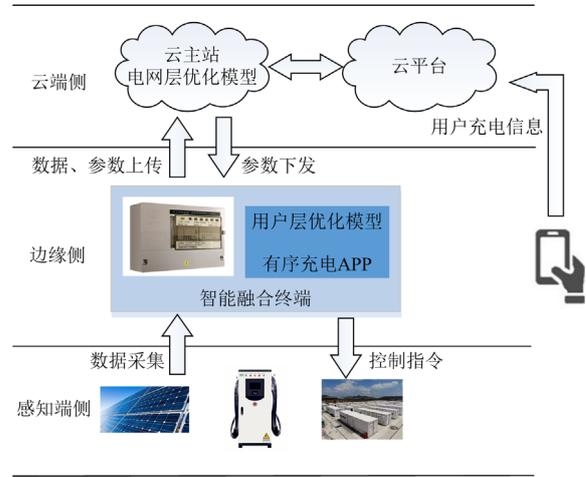


图 7 基于云边协同的调度架构

Fig. 7 Scheduling architecture based on cloud edge collaboration

基于云边协同的调度架构由感知端侧、边缘侧和云端侧构成, 具体调度流程如下。

- 1) 用户通过手机 APP 将预设充电开始时间、结束时间等充电信息发送给云平台;
- 2) 云主站从云平台获取用户充电信息, 从智能融合终端获取储能单元和充电桩的状态信息, 并汇集未来 24 h 的光伏出力、社区负荷预测数据;
- 3) 云主站内电网层优化模型求解得到电动汽车开始充电时间、储能单元充放电功率和充电负荷, 然后将参数下发至边缘侧;
- 4) 智能融合终端内部署用户层优化模型, 接收参数并进行求解, 并将参数上传回云端侧;
- 5) 重复步骤 3) 和 4), 直到达到设置的最大迭代次数, 输出充电计划;
- 6) 智能融合终端内有序充电 APP 将充电计划控制指令下发到感知端侧设备。

## 3 算例分析

### 3.1 参数设置

本文以湖南某光储充一体化社区为研究对象, 其中详细参数如下。

- 1) 光伏单元容量为 200 kW, 平均发电成本为 0.35 元/kWh。
- 2) 储能单元容量为 200 kWh, 最大充放电功率为 50 kW/h, 最大放电深度为 90%。
- 3) 配电网变压器额定容量为 1000 kVA, 功率因数为 0.9。

4) 社区内有 300 户居民, 假设每户一辆车, 且拥有电动汽车的用户配置一个充电桩; 电动汽车渗透率为 50%, 即电动汽车 150 辆。单台电动汽车电池额定容量为 50 kWh, 类型为锂电池, 百公里耗电量为 25 kWh; 充电桩额定充电功率为 7 kW/h。

以 1 h 为时间间隔, 即  $\Delta t = 1$ , 当地分时电价如表 1 所示。

表 1 分时电价

Table 1 Time-of-use tariff

时段	时段划分	电价/(元/kWh)
高峰时段	11:00—14:00	1.375
	18:00—23:00	
平时段	07:00—11:00	0.877
	14:00—18:00	
低谷时段	23:00—次日 07:00	0.378

### 3.2 结果分析

本文以普通社区无序充电、光储充一体化社区无序充电、电网层有序充电、用户层有序充电、双层多目标有序充电等 5 种充电场景为例进行仿真分析。

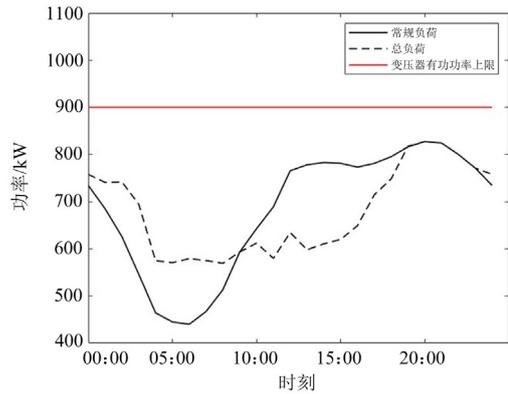
#### 1) 5 种充电场景下充电负荷和社区负荷

普通社区无序充电和光储充一体化社区无序充电的仿真结果见图 4, 由图 4 中可以看出, 社区虽然配备了光储单元, 但在无序充电下仍然无法有效解决社区负荷越限和波动大的问题。

电网层有序充电、用户层有序充电和双层多目标有序充电的仿真结果如图 8—图 10 所示。

由图 8 可以看出: 电网层有序充电可以在保证用户正常充电需求的情况下, 将充电负荷转移到电价低谷时期, 从而实现削峰填谷。但随着接入电动汽车数量的增加, 势必会将更多的充电负荷转移到电价平时段, 增加充电费用, 降低用户响应有序充电策略的积极性。

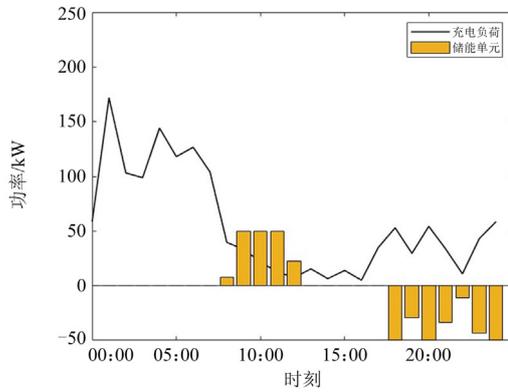
由图 9 可以看出: 用户层有序充电同样可以在保证用户正常充电需求的情况下, 将充电负荷转移到电价低谷时段和光伏出力时段, 从而减少充电费



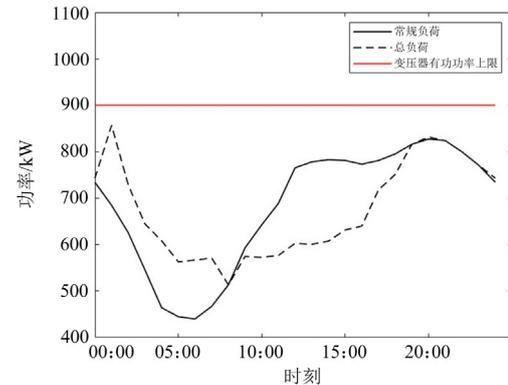
(b) 社区负荷

图 8 电网层有序充电

Fig. 8 Orderly charging at the power grid layer



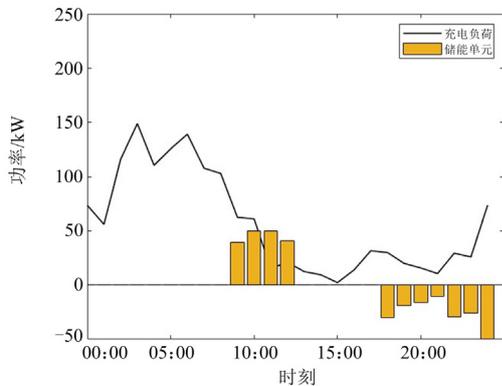
(a) 充电负荷



(b) 社区负荷

图 9 用户层有序充电

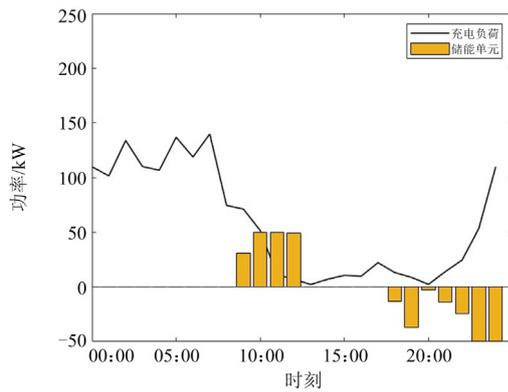
Fig. 9 Orderly charging at the user layer



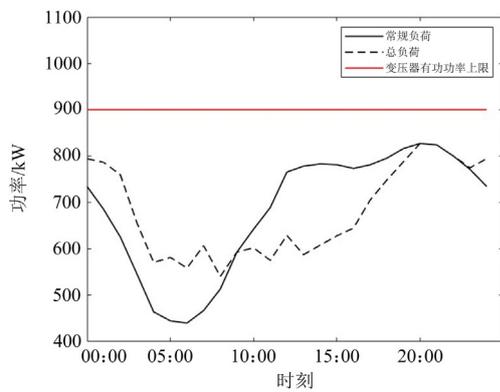
(a) 充电负荷

用。此外, 储能单元也可以保障电价高峰时段零星的充电需求, 但充电负荷容易在电价低谷时段形成新的高峰, 加剧负荷的波动, 影响电网的正常运行。

由图 10 可以看出: 双层多目标有序充电的充电负荷分布范围更大, 既能充分发挥充电负荷削峰填谷的作用, 降低负荷峰谷差, 也能减少用户充电费用。



(a) 充电负荷



(b) 社区负荷

图 10 双层多目标有序充电

Fig. 10 Double-layer multi-objective orderly charging

### 2) 5 种充电场景下负荷波动对比分析

对社区电动汽车执行无序和有序充电策略的社区负荷情况进行对比分析, 具体数据如表 2 所示。

表 2 社区负荷数据

Table 2 Data of community load

负荷类型	负荷		峰谷	
	峰值/kW	谷值/kW	差值/kW	差率/%
普通社区无序充电	970.89	444.16	526.73	54.25
光储充一体化社区 无序充电	925.66	444.16	481.5	52.02
电网层有序充电	827.25	569.09	258.16	31.21
用户层有序充电	856.67	513.44	343.23	40.07
双层多目标 有序充电	827.25	540.64	286.61	34.65

由表 2 可以看出: 无序充电时, 由于“峰上加峰”的现象, 社区负荷超过变压器的有功功率上限, 使变压器处于过载状态, 负荷峰值和峰谷差率分别达到 970.89 kW 和 54.25%。光储充一体化社区依靠光伏系统和储能系统虽然能降低负荷峰值和峰谷差

率, 分别减少了 45.23 kW 和 2.23%, 但依然不能解决社区负荷越限问题。

而 3 种有序充电策略均能有效降低负荷峰谷差, 且负荷峰值都未超过上限 900 kW, 其中电网层有序充电和双层多目标有序充电效果较好, 和光储充一体化社区无序充电相比, 峰谷差分别降低了 223.34 kW 和 194.89 kW, 峰谷差率分别降低了 20.81% 和 17.37%。

### 3) 5 种充电场景下用户充电费用对比分析

对社区电动汽车执行无序和有序充电策略的社区充电情况进行对比分析, 具体数据如表 3 所示。

表 3 社区充电数据

Table 3 Data of community charging

负荷类型	充电量/ kWh	充电 费用/元	充电均价/ (元/kWh)
普通社区无序充电	1340.7	1419.2	1.08
光储充一体化社区无序充电	1340.7	995.37	0.76
电网层有序充电	1340.7	523.42	0.39
用户层有序充电	1340.7	444.69	0.33
双层多目标有序充电	1340.7	479.96	0.36

结合图 4、图 8—图 10, 由表 3 可以看出: 在无序充电情况下, 充电负荷主要集中在电价高峰时段和平时段, 充电费用较高; 在有序充电情况下, 将充电负荷有效转移到电价低谷时段和光伏出力时段, 充电费用较低。其中, 用户层有序充电和双层多目标有序充电效果较好, 和光储充一体化社区无序充电相比, 充电均价分别降低了 0.43 元/kWh 和 0.4 元/kWh。

3 种有序充电策略均能取得不错的效果, 但用户层有序充电容易使社区总负荷在电价低谷时段形成新的峰, 不利于减少峰谷差。电网层有序充电仅考虑了配电网的稳定性, 忽略了用户的用电成本需求, 容易降低用户的响应积极性。而双层多目标有序充电在降低负荷峰谷差和减少用户充电费用方面都能取得令人满意的效果, 该策略在降低社区负荷波动性、保障配电网安全运行的同时, 提高了用户的经济效益和响应策略的积极性。

## 4 结论

光储充一体化社区虽然可以提高光伏的就地消纳, 降低社区负荷峰值, 但仍存在社区负荷的越限问题。对此提出了基于鼠群优化算法的双层多目标有序充电策略, 该策略满足了电网层和用户层的双方利益, 不仅可以减少社区负荷峰谷差, 还能降低用户充电费用。同时基于云边协同的调度架构充分利用云端侧和边缘侧的计算资源, 可以应对电动汽

车大规模接入的情况。根据算例分析,该策略取得的综合效果明显优于无序充电和单层有序充电策略,起到了削峰填谷、节约用户充电费用的作用,保障了电网的安全、稳定运行。

本文未考虑到不同电动汽车型号、电池类型等因素,此外仅考虑社区有序充电场景,后续将展开进一步研究,使该策略更具实用性和扩展性。

## 参考文献

- [1] 张延宇,饶新朋,周书奎,等.基于深度强化学习的电动汽车充电调度算法研究进展[J].电力系统保护与控制,2022,50(16):179-187.  
ZHANG Yanyu, RAO Xinpeng, ZHOU Shukui, et al. Research progress of electric vehicle charging scheduling algorithms based on deep reinforcement learning[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 179-187.
- [2] 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.
- [3] XU Biao, ZHANG Guiyuan, LI Ke, et al. Reactive power optimization of a distribution network with high-penetration of wind and solar renewable energy and electric vehicles[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(4): 801-813.
- [4] YU Yang, LIU Mai, CHEN Dongyang, et al. Dynamic grouping control of electric vehicles based on improved k-means algorithm for wind power fluctuations suppression[J]. Global Energy Interconnection, 2023, 6(5): 542-553.
- [5] 朱永胜,苗阳,谢晓峰,等.新能源微电网多层次车网协同优化策略[J].智慧电力,2023,51(2):61-68.  
ZHU Yongsheng, MIAO Yang, XIE Xiaofeng, et al. Multi-level vehicle-grid collaborative optimization strategy for new energy microgrid[J]. Smart Power, 2023, 51(2): 61-68.
- [6] 李龙,贺瀚青,张钰声,等.配电网接纳电动汽车充电负荷能力的评估方法[J].电网与清洁能源,2022,38(11):107-116.  
LI Long, HE Hanqing, ZHANG Yusheng, et al. Evaluation of electric vehicle charging load capacity of distribution networks[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(11): 107-116.
- [7] 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.
- [8] 李景丽,时永凯,张琳娟,等.考虑电动汽车有序充电的光储充电站储能容量优化策略[J].电力系统保护与控制,2021,49(7):94-102.  
LI Jingli, SHI Yongkai, ZHANG Linjuan, et al. Optimization strategy for the energy storage capacity of a charging station with photovoltaic and energy storage considering orderly charging of electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 94-102.
- [9] 程杉,汪业乔,廖玮霖,等.含电动汽车的新能源微电网多目标分层优化调度[J].电力系统保护与控制,2022,50(12):63-71.  
CHENG Shan, WANG Yeqiao, LIAO Weilin, et al. Bi-level multi-objective optimization of a new energy microgrid with electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 63-71.
- [10] 胡志勇,郭雪丽,王爽,等.考虑响应意愿的电动汽车群-空调集群需求响应策略研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(15):109-119.  
HU Zhiyong, GUO Xueli, WANG Shuang, et al. Demand response strategy for electric vehicles and air conditioners considering response willingness[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 109-119.
- [11] 刘岩,邓彬,王瑾,等.基于多目标优化模型的电动汽车充电调度策略[J].沈阳工业大学学报,2022,44(2):127-132.  
LIU Yan, DENG Bin, WANG Jin, et al. Charging scheduling strategy of electric vehicle based on multi-objective optimization model[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2022, 44(2): 127-132.
- [12] 邓慧琼,张晓飞,曾凡淦,等.动态分时电价机制下的电动汽车充放电调度策略研究[J].智慧电力,2023,51(3):59-66,78.  
DENG Huiqiong, ZHANG Xiaofei, ZENG Fangan, et al. Electric vehicle charging and discharging scheduling strategy under dynamic time-of-use electricity price mechanism[J]. Smart Power, 2023, 51(3): 59-66, 78.
- [13] 肖丽,谢尧平,胡华锋,等.基于V2G的电动汽车充放电双层优化调度策略[J].高压电器,2022,58(5):164-171.  
XIAO Li, XIE Yaoping, HU Huafeng, et al. Two-level optimization scheduling strategy for EV's charging and discharging based on V2G[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(5): 164-171.
- [14] 侯慧,唐俊一,王逸凡,等.价格与激励联合需求响应下电动汽车长时间尺度充放电调度[J].电力系统自动化,2022,46(15):46-55.

- HOU Hui, TANG Junyi, WANG Yifan, et al. Long-time-scale charging and discharging scheduling of electric vehicles under joint price and incentive demand response[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(15): 46-55.
- [15] 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): 23-30.
- [16] 徐琴, 魏新迟, 李锦, 等. 交直流混合配电网电动汽车充电承载能力及有序充电研究[J]. *供用电*, 2023, 40(8): 74-82.  
XU Qin, WEI Xinchí, LI Jin, et al. Research on charging carrying capacity and ordered charging of electric vehicles in AC/DC hybrid distribution network[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(8): 74-82.
- [17] 于浩明, 刘杰, 牟欣玮, 等. 基于动态服务价的充电站有序充电控制方法[J]. *电力大数据*, 2023, 26(2): 1-9.  
YU Haoming, LIU Jie, MU Xinwei, et al. Orderly charging strategy of charging stations based on dynamic time-sharing charging price response[J]. *Power Systems and Big Data*, 2023, 26(2): 1-9.
- [18] 李敬航, 杨德玲, 赖伟坚, 等. 住宅小区充电站电动汽车有序充电方法[J]. *电力需求侧管理*, 2021, 23(3): 31-35.  
LI Jinghang, YANG Deling, LAI Weijian, et al. Orderly charging method of electric vehicle in charging station of residential area[J]. *Power Demand Side Management*, 2021, 23(3): 31-35.
- [19] 于瀛涵, 陈嘉德, 韩子娇, 等. 电动汽车的有序充电管理及其对配电网的影响分析[J]. *东北电力技术*, 2023, 44(2): 34-39.  
YU Yinghan, CHEN Jiade, HAN Zijiao, et al. Research on orderly charging management of electric vehicles and its impact on distribution network[J]. *Northeast Electric Power Technology*, 2023, 44(2): 34-39.
- [20] 谭维玉, 雷雨, 李军, 等. 计及动态分时电价的电动汽车参与电网调度研究[J]. *可再生能源*, 2020, 38(11): 1515-1522.  
TAN Weiyu, LEI Yu, LI Jun, et al. Research on the participation of electric vehicles in power system dispatching considering dynamic time-of-use price[J]. *Renewable Energy Resources*, 2020, 38(11): 1515-1522.
- [21] 沈国辉, 陈光, 赵宇, 等. 基于双目标分层优化和TOPSIS排序的电动汽车有序充电策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(11): 115-123.  
SHEN Guohui, CHEN Guang, ZHAO Yu, et al. Orderly charging optimization strategy of an electric vehicle based on double objective hierarchical optimization and TOPSIS ranking[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(11): 115-123.
- [22] 王欢, 徐建军. 智能小区电动汽车有序充电策略优化研究[J]. *国外电子测量技术*, 2021, 40(5): 95-99.  
WANG Huan, XU Jianjun. Study on orderly charging strategy optimization of electric vehicles in intelligent community[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2021, 40(5): 95-99.
- [23] 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.
- [24] 马文彪, 程亮, 陈红坤. 考虑电动汽车有序充电的主动配电网网架规划[J]. *电力科学与技术学报*, 2020, 35(3): 83-91.  
MA Wenbiao, CHENG Liang, CHEN Hongkun. Framework planning considering coordinated charging of electric vehicles in active distribution networks[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2020, 35(3): 83-91.
- [25] 徐嘉启, 郭红霞, 邹桂林. 基于实时电价的含电动汽车微电网两阶段优化调度[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(13): 5571-5578.  
XU Jiaqi, GUO Hongxia, ZOU Guilin. Two-stage optimization scheduling of microgrid with electric vehicles based on real-time electricity price[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(13): 5571-5578.
- [26] 张涛, 张东方, 王凌云, 等. 计及电动汽车充电模式的主动配电网多目标优化重构[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(8): 1-9.  
ZHANG Tao, ZHANG Dongfang, WANG Lingyun, et al. Multi-objective optimization of active distribution network reconfiguration considering electric vehicle charging mode[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(8): 1-9.
- [27] 董涛, 雍静, 赵瑾, 等. 含光、储、电动汽车居民小区电力负荷综合管理系统[J]. *重庆大学学报*, 2021, 44(8): 45-58.  
DONG Tao, YONG Jing, ZHAO Jin, et al. Load management approach for residential power system incorporating photovoltaics, electric storage and electric-vehicle charging[J]. *Journal of Chongqing University*, 2021, 44(8): 45-58.
- [28] 林健, 熊军, 孙明浩, 等. 一种住宅小区电动汽车有序充电控制系统的设计[J]. *电力科学与技术学报*, 2020, 35(5): 46-53.

- LIN Jian, XIONG Jun, SUN Minghao, et al. Design of coordinated charging control system for electric vehicles charging load in the residential area[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5): 46-53.
- [29] 严俊, 严凤. 峰谷分时电价背景下的居民电动汽车有序充放电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 127-134.
- YAN Jun, YAN Feng. An orderly charging and discharging strategy for residential electric vehicles based on peak-valley electricity tariffs[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 127-134.
- [30] 李景丽, 时永凯, 张琳娟, 等. 考虑电动汽车有序充电的光储充电站储能容量优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 94-102.
- LI Jingli, SHI Yongkai, ZHANG Linjuan, et al. Optimization strategy for the energy storage capacity of a charging station with photovoltaic and energy storage considering orderly charging of electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 94-102.
- [31] 张逸超. 家用电动汽车有序充电策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- ZHANG Yichao. Study on coordinated charging strategy for household electric vehicles[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [32] 石文超, 吕林, 高红均, 等. 考虑需求响应和电动汽车参与的主动配电网经济调度[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 41-51.
- SHI Wenchao, LÜ Lin, GAO Hongjun, et al. Economic dispatch of active distribution network with participation of demand response and electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 41-51.
- [33] 敖羿. 居民区电动汽车充电有序控制策略研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2021.
- AO Yi. Research on orderly control strategy of electric vehicle charging in residential area[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021.
- [34] DHIMAN G, GARG M, NAGAR A, et al. A novel algorithm for global optimization: rat swarm optimizer[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2020, 12(8): 1-26.
- [35] 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. Decentralized optimization of orderly charging scheduling in electric vehicle charging station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 39-46.
- [36] 范敏, 孟鑫余, 夏嘉璐, 等. 云边协同下基于深度迁移网络的配电网台区异常工况诊断方法[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(1): 128-138.
- FAN Min, MENG Xinyu, XIA Jialu, et al. Diagnosis method of abnormal working conditions in distribution station area based on deep migration network under cloud-edge collaboration[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(1): 128-138.

收稿日期: 2023-08-02; 修回日期: 2023-12-01

作者简介:

康童(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为车网互动技术、新型配电系统及群智能优化算法; E-mail: 649360483@qq.com

冯楚瑞(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为机器学习与大数据处理、配电自动化系统; E-mail: 2267129162@qq.com

范敏(1975—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向为机器学习与大数据处理、配电自动化系统。E-mail: fanmin@cqu.edu.cn

(编辑 周金梅)