

基于电动汽车有序充电策略的配电网调控优化

乔世超¹, 侯朗博¹, 孙昊¹, 陈衡¹, 刘涛², 刘文毅¹

(1. 华北电力大学, 北京 102206; 2. 北京国电通网络技术有限公司, 北京 100070)

摘要: 随着我国电动汽车保有量的逐年攀升,大规模电动汽车充电负荷的无序接入给电网的安全高效运行带来了新的挑战。采用麻雀搜索算法,以用户充电费用最小、配电网负荷峰谷差和网损最小为目标建立优化模型以实现对电动车充电行为的优化调度。与传统的无序充电情景对比分析发现,采用智能优化算法的电动汽车充电策略能够有效降低用户充电费用,明显减轻电网负荷波动,降低电压偏移,减小有功网损,降低了电动汽车充电负荷对电力系统运行安全性和经济性的影响。

关键词: 电动汽车; 蒙特卡洛模拟; 麻雀搜索算法; 多目标优化; 配电网优化

DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2026.09.017

中图分类号: TM73

文献标识码: B

文章编号: 1001-1390(2026)09-0175-08

Control and optimization of distribution network based on orderly charging strategy of electric vehicles

Qiao Shichao¹, Hou Langbo¹, Sun Hao¹, Chen Heng¹, Liu Tao², Liu Wenyi¹

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China.

2. Beijing Guo Dian Tong Network Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: With the yearly rise of electric vehicle (EV) ownership in China, the disorderly access of large-scale electric vehicle charging loads brings new challenges to the safe and efficient operation of the power grid. The sparrow search algorithm is used to establish an optimization model with the objectives of minimizing user charging cost, minimizing peak-to-valley difference in distribution network loads and minimizing network loss to achieve optimal scheduling of EVs charging behavior. Compared with the traditional disorderly charging scenario, it is found that the electric vehicle charging strategy using intelligent optimization algorithm can effectively reduce the charging cost of users, significantly reduce the load fluctuation of the grid, lower the voltage offset, decrease the active network loss, and reduce the impact of the EV charging load on the operation security and economy of power system.

Keywords: electric vehicle, Monte Carlo simulation, sparrow search algorithm, multi-objective optimization, distribution network optimization

0 引言

随着我国汽车工业的高速发展,我国汽车产销量连续14年位居全球第一^[1]。传统的化石能源汽车带来的严重空气污染和大量的温室气体排放已经对居民生活产生影响^[2];作为能量来源的原油高度依赖进口^[3],对国家能源安全造成极大的威胁^[4]。为了应对这一挑战,国家推出相关政策法规大力支持新能源汽车产业发展^[5],电动汽车由于具有技术成熟、清洁环保、能量转换效率高、能量来源

易获取和造价低廉等优势^[6-10],正逐步成为传统化学燃料汽车的替代品。

电动车产业的迅猛发展提高了居民的生活质量,但也对现有的电力系统产生了极大的挑战^[11]。当电动汽车的集成量显著增加时,电网的负载会经历一个急剧增长的过程。若采用即时充电的充电模式,将会产生电动汽车充电负荷与居民用电高峰叠加的现象,使得配电网负荷超过自身承受能力^[12-13],从而引发电网的过载或失电等问题^[14]。而采用将电动汽车的充电负荷合理地分配到合理的时间的有序充电策略,能够在保证用电需求的前提下减少电网负荷的集中度,起到削峰填谷的目

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5108-202218280A-2-142-XG)

的^[15],同时提高配电网的负荷承受能力和供电质量稳定性^[16]。

针对电动汽车有序充电策略问题,众多学者已经进行了大量的研究:文献[17]提出了一种基于电动汽车有序充电的聚合调度策略,采用网格划分的方法建立了以用户用电成本最少为优化目标的有序充电模型;文献[18]将电动汽车作为系统的调度资源参与到能量调峰的工作中,提出一种区域综合能源系统的能源效益最大化的模型;文献[19]采用遗传算法,在分时电价的基础上提出了区域负荷波动最小的调度控制策略。

电动汽车充电决策优化问题核心在于以电动汽车历史充电数据为基础,规划电动汽车的充电状态序列,从而实现满足用户充电需求同时确定最优充电方案^[20]。现有的研究多以成本最低或平稳负荷为目标对电动汽车充电行为加以引导,文章从配电网的运行优化和降低用户充电费用角度出发,采用蒙特卡洛模拟方法,以2017年美国交通部私家车出行调查 NHTS 数据集为参考数据建立无序充电情况下的负荷预测模型,并依据我国实际情况对模型进行修正;采用麻雀搜索算法,建立以用户充电费用最少,配网有功网损和负荷峰谷差最小为目标函数的有序充电策略模型,并在 IEEE33 标准节点系统下进行了算例的仿真分析,分析结果表明智能算法引导下的有序充电策略能够有效地缓解电动汽车无序充电对配电网所带来的不利影响。

1 电动车负荷影响因素分析

1.1 用户出行行为特征

在电动汽车充电负荷的预测与管理中,用户出行行为特征是影响用户充电规律的关键性变量,电动车用户驾车往返于家庭和工作地点之间,出行起止时间决定了电动汽车的充电起止时间,影响了用户的充电行为^[21]。通常在分析私家车主的充电行为时,认为统计数据中车主归家时间为充电开始时间,离家时间为充电结束时间。此外,车辆的日行驶里程也对充电负荷有重要影响,日行驶里程越长则充电需求量越大。以文献[22]2017年私家车出行调查 NHTS 数据集为参考数据,对数据进行归一化处理后进行统计分析,采用高斯混合模型拟合统计数据,可知私家车充电的起止时刻和日行驶里程分别近似服从标准正态分布和对数正态分布。图1和图2分别为充电起止时间和电动车日行驶里程的概率分布图。

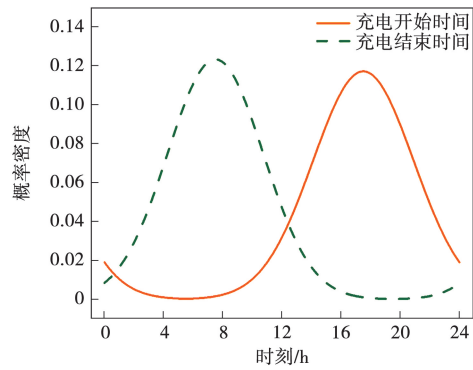


图1 充电起止时间概率密度分布图

Fig. 1 Probability density distribution of charging start and end time

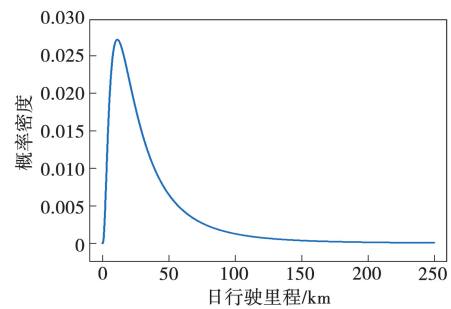


图2 日行驶里程概率密度曲线

Fig. 2 Probability density curve of daily driving mileage

充电的开始时刻(归家时刻)概率密度函数为:

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

式中: μ_s 为电动汽车充电开始时间平均值,又称期望值, $\mu_s = 17.49$; σ_s 为充电开始时间方差, $\sigma_s = 3.41$ 。鉴于美国交通情况和法定工作时间与我国存在差异,将 μ_s 取值修正为18.5。

充电的结束时刻(离家时刻)概率密度函数为:

$$f_e(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_e} \exp\left(-\frac{(x-\mu_e)^2}{2\sigma_e^2}\right), & 0 \leq x < \mu_e + 12 \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_e} \exp\left(-\frac{(x-24-\mu_e)^2}{2\sigma_e^2}\right), & \mu_e + 12 \leq x \leq 24 \end{cases} \quad (2)$$

式中: μ_e 为充电结束时间平均值,又称期望值, $\mu_e = 8.92$; σ_e 为充电结束时间方差, $\sigma_e = 3.24$ 。鉴于美国交通情况和法定工作时间与我国存在差异,

将 μ_e 取值修正为 7.5。

日行驶里程近似服从对数正态分布, 概率密度函数为:

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

式中: x_d 为电动汽车日行驶里程; μ_d 为电动汽车日行驶里程期望值, $\mu_d = 3.2$; σ_d 为电动汽车日行驶里程标准差, $\sigma_d = 0.88$ 。

1.2 电池充电区域负荷模型

锂离子电池相较于铅酸电池具有更稳定的放电性能、更高的能量密度和更长的循环寿命。经过 20 多年的应用发展, 技术趋于成熟。因此文章以锂离子电池的充电特性作为参考, 建立电动汽车电池充电负荷模型。为了延长锂电池的寿命, 电动汽车电池组往往采用恒流恒压充电模式, 电动车荷电状态 (state of charge, SOC) 在较低和较高时都会明显降低充电功率, 其余时刻保持较为稳定的高功率充电状态, 为研究方便, 可认为该段时间内充电功率为一个定值。以某电动车锂电池为参考标准, 其充电负荷及荷电状态关于时间的变化曲线如图 3 所示。

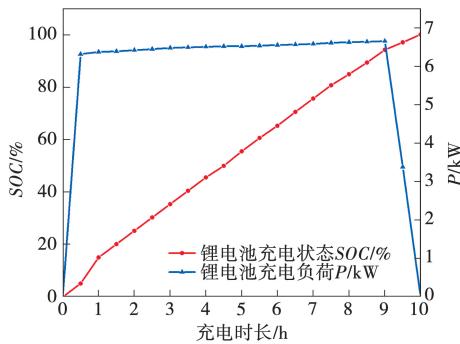


图 3 锂电池充电状态及充电负荷

Fig. 3 Lithium battery state of charge and charging load

电动车锂离子电池充电功率在不同充电阶段的大小可近似表述为:

$$P_c = \begin{cases} P_{\max} \frac{SOC_t T_{\max}}{T_s}, & 0 \leq t < 0.5 \\ P_{\max}, & 0.5 \leq t \leq 9 \\ P_{\max} \frac{(1 - SOC_t) T_{\max}}{T_{\max} - T_e}, & 9 < t \leq 10 \end{cases} \quad (4)$$

式中: SOC_t 为电动汽车在 t 时刻电池充电状态; $P_{\max}$ 为电动汽车锂离子电池充电最大功率; $T_{\max}$ 为锂离子电池自零电量充电至满电量所需要的时间; T_s 为

开始充电行为的时刻; T_e 为结束充电行为的时刻。

电动车充电时间与该日汽车行驶里程和百公里耗电量相关, 其表达式如下:

$$T_c = \frac{dE_{100}}{100P_c} \quad (5)$$

式中: T_c 为充电所需时长; d 为电动汽车每日行驶距离, E_{100} 为电动汽车每行驶 100 公里所消耗的电量。

将一个时段内电动车负荷累积, 即可得到在 t 时刻由于电动车充电所产生的区域额外负荷 $P_{t, ev}$, 计算公式如下:

$$P_{t, ev} = \sum_{i=1}^n P_{c, i}(t) \quad (6)$$

式中: n 为 t 时刻正在充电的汽车个数; $P_{c, i}(t)$ 为电动汽车 i 在 t 时刻的充电功率。

2 采用蒙特卡洛模拟法的无序充电区域负荷模型

2.1 蒙特卡洛模拟法

蒙特卡洛模拟法 (Monte Carlo simulation) 是一种基于随机抽样和概率统计原理的数值分析技术, 广泛应用于金融学和生物工程等各个领域, 尤其在复杂系统的模拟计算和优化决策方面具有很大的优势^[23]。其基本思想是通过随机抽样的方式, 从总体分布中产生一组数据样本, 通过对这些数据样本进行大量的模拟计算, 得出统计量的分布规律和数值特征, 以求解问题的一种方法。

2.2 无序充电负荷模拟

选取某住宅区域作为仿真对象, 认为小区内全部电动车为同一型号, 每台电动车的最大充电功率为 $P_{\max}$, 锂离子电池自零电量充电至满电量所需要的时间为 $T_{\max}$ 。将 1 天分为 24 个时段, 每段间隔 1 h, 采用蒙特卡洛模拟法对住宅区域内电动车的无序充电过程进行模拟仿真, 具体模拟流程如下:

1) 设置初始化参数, 确定区域内电动车台数 n , 由此设定迭代次数;

2) 对电动汽车起止充电时间, 当日行驶里程数进行随机抽取;

3) 计算负荷曲线, 结合锂离子电池充电特性公式, 计算第 i 辆电动车的充电负荷;

4) 累加负荷数据, 当 $i < n$ 时迭代上述步骤, $i > n$ 时停止迭代, 获得电动汽车的负荷预测曲线。

3 基于麻雀搜索算法的有序充电策略

3.1 目标函数

为了使电动车用户能够积极响应电动车有序

充电调控,将充电费用为目标函数1。

$$f_1 = \min \sum_{t=1}^T P_{t, \text{ev}} \varepsilon_t \quad (7)$$

式中: ε_t 为 t 时刻电价。

由于电动车的无序充电产生的大量随机负荷接入导致了输电过程的损失,选取系统网络有功损耗作为目标函数2。

$$f_2 = \min \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^I P_{\text{loss}}(t, i) \quad (8)$$

式中: I 为电网中包括的支路数; T 为一天内分成的时间节点数; $P_{\text{loss}}(t, i)$ 是在 t 时刻支路 i 的有功功率损耗。

电动车汽车充电负荷接入会导致原有的电网负荷的变化,为了减少大量电动车同时充电对电网安全性的危害,设定电网总负荷曲线峰谷差最小为目标函数3。

$$f_3 = \min [\max(P_t) - \min(P_t)] \quad (9)$$

$$P_t = P_{t, \text{ev}} + P_{t, \text{b}} \quad (10)$$

式中: P_t 为 t 时刻含电动汽车接入的配电网负荷; $P_{t, \text{b}}$ 为 t 时刻配电网基本负荷。

同时在这三方面设定目标函数,相当于在尽可能保证降低用户充电费用的前提下分别对配网系统的经济性和安全性做出了要求,优化配电网调度,使其经济安全运行。

3.2 约束条件

车充电时间与该日汽车行驶里程和百公里耗电量相关,其表达式如下:

以下的约束条件必须在每个时间间隔内都满足:

1) 电动汽车充电数量约束

假设充电桩足够小区内全部汽车进行充电,应满足:

$$n \leq N \leq Q \quad (11)$$

式中: n 为处于充电状态的电动汽车总数; N 为区域内电动汽车总数; Q 为小区内的充电桩数目。

2) 电动汽车充电状态约束

$$SOC_s \leq SOC_t \leq SOC_e \leq SOC_{\text{max}} \quad (12)$$

式中: SOC_s 为电动车充电行为开始时充电状态; SOC_t 为电动汽车在 t 时刻的充电状态; SOC_e 为结束充电时电动车荷电状态; SOC_{max} 为电动车最大的荷电状态, $SOC_{\text{max}} = 1$ 。

3) 功率平衡约束

$$P_{t, \text{g}} = P_{t, \text{loss}} + P_{t, \text{ev}} + P_{t, \text{b}} \quad (13)$$

式中: $P_{t, \text{g}}$ 为在 t 时刻输入配电网的功率; $P_{t, \text{loss}}$ 为输电线路在 t 时刻的线损; $P_{t, \text{ev}}$ 为电动汽车在 t 时刻的充电负荷; $P_{t, \text{b}}$ 为在 t 时刻的基础负荷。

4) 电压约束

$$U_{i, \text{min}} \leq U_i \leq U_{i, \text{max}} \quad (14)$$

式中: U_i 为节点 i 处电压; $U_{i, \text{min}}$ 和 $U_{i, \text{max}}$ 为节点 i 处电压运行下限值和上限值。

5) 潮流约束分布

$$P_i + P_{gi} = P_{li} + U_{li} \sum_{i=1}^N U_i Y \quad (15)$$

$$Q_i + Q_{gi} = Q_{li} + U_{li} \sum_{i=1}^N U_i Y \quad (16)$$

式中: P_i 和 Q_i 为节点 i 处的有功、无功功率; P_{gi} 和 Q_{gi} 为节点注入的有功功率和无功功率; P_{li} 和 Q_{li} 为节点的有功功率和无功功率; Y 为支路导纳。

3.3 麻雀搜索算法

麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)是文献[24]提出的一种基于模拟麻雀群体觅食行为的优化算法,在SSA中,目标问题的搜索空间被看作是一个生态系统,其中包含若干个生物种群。每个生物都有自己的位置和适应度,这个适应度代表了解决问题的质量。SSA通过模拟生物种群中的搜索和交流行为,来寻找最佳的解决方案。

麻雀搜索算法包括三类型麻雀个体:发现者、加入者和警戒者。发现者负责探索搜索空间,并发现潜在的解决方案;加入者会跟随发现者的脚步进行搜索,一旦察觉到发现者已经找到了更好的食物,便会离开当前位置去争夺食物;警戒者则时刻警惕可能会威胁到搜索过程的因素,例如局部最优解或者搜索方向的误导。

发现者的位置更新描述如下:

$$x_{i, j}^{t+1} = \begin{cases} x_{i, j}^t \times \exp\left(\frac{-i}{a \times m}\right), & R_2 < ST \\ x_{i, j}^t + \mathbf{QL}, & R_2 \geq ST \end{cases} \quad (17)$$

式中: $x_{i, j}^t$ 表示第 t 次迭代时第 i 只麻雀所在的位置, a 为一个 $0 \sim 1$ 之间的随机数, m 为最大迭代次数; R_2 为预警值,取值在 $0 \sim 1$ 之间; ST 为安全值,取值在 $0.5 \sim 1$ 之间。当 $R_2 < ST$ 时,意味麻雀群体处于安全状态,发现者继续扩大搜索范围; $R_2 > ST$ 时,意味麻雀群体处于危险之中,有必要采取相关措施对其进行保护; $\mathbf{Q}$ 为服从标准正态分布的随机数列矩阵; $\mathbf{L}$ 为矩阵元素都为1的 $1 \times m$ 维矩阵。

加入者的位置更新描述如下:

$$x_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Q \times \exp\left(\frac{x_{\text{worst}}^t - x_{i,j}^t}{t^2}\right), & i > \frac{n}{2} \\ x_p^{t+1} + |x_{i,j}^t - x_p^{t+1}| \times A^+ L, & i \leq \frac{n}{2} \end{cases} \quad (18)$$

式中: x_{worst}^t 为发现者在第 t 次迭代时全局最差位置, x_p^{t+1} 为发现者在第 $t+1$ 次迭代时全局最优位置; A 为一个 m 维向量, 内部元素随机设定为 1 或 -1, 且 $A^+ = A^T(AA^T)^{-1}$ 。

警戒者的位置更新描述如下:

$$x_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} x_{\text{best}}^t + \beta |x_{i,j}^t - x_{\text{best}}^t|, & f_i > f_{\text{best}} \\ x_{i,j}^t + K \times \left(\frac{|x_{i,j}^t - x_{\text{worst}}^t|}{f_i - f_{\text{worst}} + \varepsilon} \right), & f_i = f_{\text{best}} \end{cases} \quad (19)$$

式中: x_{best}^t 为当前的全局最优位置; β 和 K 均为随机数, 用以描述麻雀的移动方向和随机步长, β 服从正态分布; f_i 、 f_{best}^t 、 f_{worst}^t 分别代表当前麻雀适应度值, 全局最优和最差值; ε 为一个无穷小的常量, 用于避免分母为零。

这三类型麻雀个体协作与交流, 使得麻雀搜索算法能够有效地探索搜索空间, 并找到最佳的解决方案。通过模拟麻雀群体的觅食行为, 麻雀搜索算法在求解优化问题方面表现出了较强寻优能力和更快的收敛速度。

采用麻雀搜索算法对模型进行求解, 具体流程如下:

1) 获取配网参数, 读取 branch 矩阵设置支路参数, 更改 generator 矩阵设置电源参数;

2) 初始化麻雀搜索算法参数, 设定种群数量为 100, 其中, 发现者占 30%, 其余作为种群加入者, 警戒者占比设定为 10%。迭代次数为 100 次, 预警值为 0.75;

3) 计算初始位置麻雀个体适应度, 确定最优适应度值和对应位置, 选取适应度最好前 30% 麻雀作为发现者, 其余个体为加入者;

4) 根据式(17)和式(18)更新种群发现者和加入者位置, 更新最优位置 x_{best} 和最优适应度 f_{best} 值;

5) 选取 10% 个体为警戒者, 依据式(19)更新位置;

6) 记录全局最优解和当前最优解, 比较并不断更新全局最优解;

7) 重复上述步骤 3) ~ 步骤 6), 直至达到算法迭代次数。

算法的流程图见图 4。

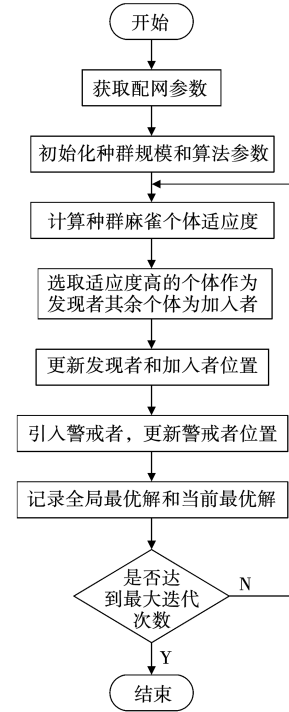


图 4 麻雀搜索算法流程

Fig. 4 Flow chart of sparrow search algorithm

4 算例分析

4.1 数据及参数设置

为验证所述方法的有效性, 以某住宅区为例进行仿真验证如图 5 所示。住宅区内电动汽车持有量设定为 200 辆, 每台电动车的最大充电功率 $P_{\text{max}} = 6 \text{ kW}$, 锂离子电池自零电量充电至满电量所需要的时间 $T_{\text{max}} = 10 \text{ h}$, 电动汽车百公里耗能 $E_{100} = 12 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 采用历史数据的蒙特卡洛模型预测建立无序充电条件下的负荷曲线; 将 1 天分为 24 个时段, 每段间隔 1 h, 采用麻雀搜索算法对充电行为进行优化求解。

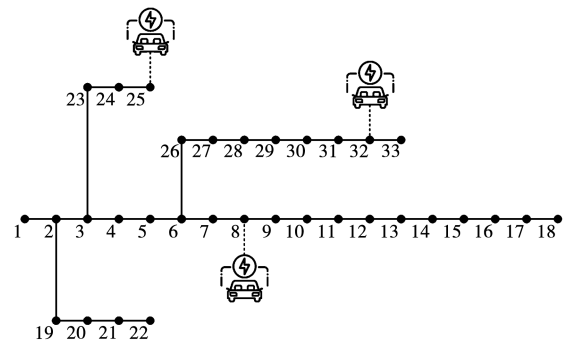


图 5 接入电动汽车负荷的 IEEE 33 网络结构图

Fig. 5 Structural diagram of IEEE 33 network connected to electric vehicle load

实验基于 MATPOWER 潮流计算平台,对 IEEE33 节点系统采用前推回代法进行最优潮流计算。该配网功率基准值为 10 MVA,电压基准值为 12.66 kV,设为 1.0 p. u.。分别将节点 8、节点 25、节点 32 设置为居民区。

4.2 仿真结果

4.2.1 负荷曲线

以某居民小区为例,提取该小区某典型日为基础负荷。采用蒙特卡洛模拟法预测及时充电情况下一日内每小时的电动汽车充电负荷,利用麻雀搜索算法优化电动汽车充电方式,获得改进后的充电负荷曲线。在采用两种不同充电方式的情况下,加入电动汽车充电负荷后的居民区负荷曲线如图 6 所示。

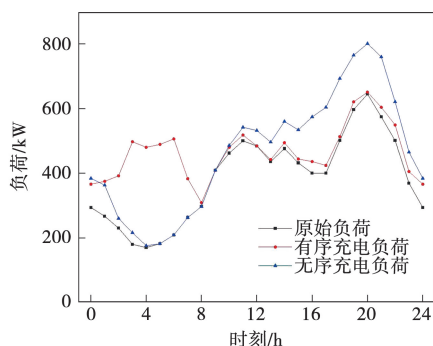


图 6 不同充电策略下的居民区负荷曲线

Fig. 6 Residential area load curves under different charging strategies

由图 6 中可以分析出,居民区基础负荷主要集中在 18 时—22 时,在无引导措施对充电行为进行调控时,电动汽车充电负荷与居民用电高峰发生叠加,导致电网负荷“峰上加峰”;通过寻优算法的有序充电策略能够使电动汽车充电负荷自夜间居民用电高峰期转至凌晨的居民用电低谷期,能够有效降低负荷峰谷差率,平缓电网负荷曲线,降低用户充电费用。

4.2.2 用户充电费用

该居民区充电桩采用分时电价计费模式,具体分时电价信息如表 1 所示,此举能够有效地引导电动汽车车主响应有序充电调控策略。经计算该居民区每日用户充电费用从 1 461.59 元降至 814.194 元,用户充电费用降低了 44.29%。

4.2.3 电压偏移

由图 6 可知,居民区用电负荷在 20 时达到最高峰,以该时刻为代表,计算在不同充电策略下,配电网各节点电压偏移情况,如图 7 所示。由图 7 可以看出,在电动车进行无序充电时,配电网末端节点

电压有明显的跌落;通过对电动车实行有序充电策略,可以有效降低节点电压的偏移程度,对电网运行安全影响较小。

表 1 充电分时电价

Tab. 1 Time-of-use electricity price

时段	时间范围	电价/元
峰时	7:00—12:00; 18:00—22:00	1.121
平时	12:00—18:00; 22:00—24:00	0.512
谷时	0:00—7:00	0.301

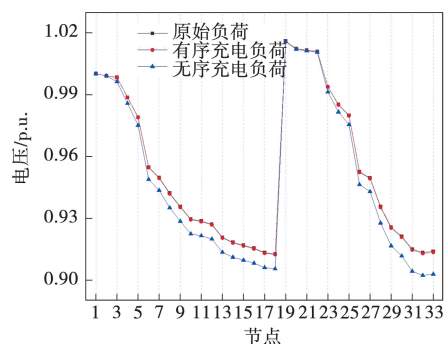


图 7 各节点电压偏移

Fig. 7 Voltage offset of each node

4.2.4 有功网络损耗

图 8 是 24 小时内不同充电策略下的配网有功网络损耗变化,由图 8 中分析可知,在电动车无序充电时,在用电高峰期网损达到最大值;而在有序充电策略的引导下,配网系统全天有功网损维持在相对稳定的区间。有序充电时全天平均网损相较无序充电时有所降低。由此可知对电动车充电行为合理的优化调度可以有效地降低网络损耗。

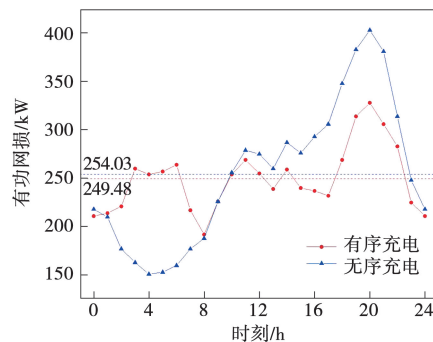


图 8 各时刻有功网络损耗

Fig. 8 Active network loss at each moment

4.3 算法对比

另外选取粒子群算法和遗传算法这两种常见的优化算法对同一多目标优化问题进行求解,图 9 展示了三种不同算法的寻优过程,可以看出不同算

法均在 500 次迭代内达到最优,其中麻雀搜索算法收敛速度较快,适应度最小,能够更为高效地解决居民区电动汽车有序充电的优化问题。

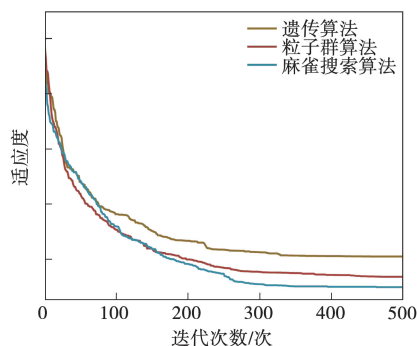


图 9 不同算法的迭代曲线

Fig. 9 Iterative curves of different algorithms

5 结论

采用蒙特卡洛算法对电动汽车用户的即时充电行为进行模拟,利用麻雀搜索算法优化电动汽车充电策略,并在 IEEE33 标准节点进行仿真模拟,主要结论如下:

1) 电动汽车用户无序充电时,电动汽车充电负荷与居民用电高峰发生叠加,增加了配电网日峰谷差率,对电网安全运行造成了威胁,因此需要对电动汽车充电行为加以优化和引导;

2) 通过采用麻雀搜索算法,建立了以用户充电费用最小、配电网网损和负荷峰谷差最小为目标的优化模型,实验证明采用该算法引导下的有序充电模式,能够明显降低用户充电费用,同时使得区域日负荷曲线明显平缓,起到“削峰填谷”的作用;

3) 在 IEEE33 标准节点进行仿真模拟,对不同充电策略下的配电网模型采用前推回代法进行潮流计算,实验表明,所提出的有序充电策略能够降低电压偏移率和有功网络损耗,有效提高配电网运行的安全性和经济性。

参考文献

- [1] 袁小康. 我国汽车产销量连续 14 年稳居全球第一 [N]. 经济参考报, 2023-1-13.
- [2] 李浩, 陈浩, 陆续, 等. 考虑排放约束的电动汽车混行交通路网均衡模型 [J]. 交通运输工程与信息学报, 2021, 19(4): 24-35, 117.
Li Hao, Chen Hao, Lu Xu, et al. Mixed traffic network equilibrium with battery electric vehicles considering emission constraints [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2021, 19(4): 24-35, 117.
- [3] 邢梦玥. 石油进口对我国经济的影响效应研究 [D].

北京: 中国社会科学院研究生院, 2022.

Xing Mengyue. Study on the impact effect of oil imports on China's economy [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Social Sciences, 2022.

- [4] 李冰. 国家石油对外依存下的战略选择: 能源独立与相互依赖 [J]. 当代亚太, 2018(2): 37-67, 157.
Li Bing. National strategic options for foreign oil dependence: energy independence or interdependence [J]. Journal of Contemporary Asia-Pacific Studies, 2018(2): 37-67, 157.
- [5] 马建, 刘晓东, 陈轶嵩, 等. 中国新能源汽车产业与技术发展现状及对策 [J]. 中国公路学报, 2018, 31(8): 1-19.
Ma Jian, Liu Xiaodong, Chen Yisong, et al. Current status and countermeasures for China's new energy automobile industry and technology development [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(8): 1-19.
- [6] 王长春, 王果, 赵倩宇, 等. 考虑分时电价和充电利用率特征的大型电动汽车充电站负荷短期预测方法 [J]. 南方电网技术, 2024, 18(5): 75-84.
Wang Changchun, Wang Guo, Zhao Qianyu, et al. A short-term load forecasting method for large scale electric vehicle charging stations considering characteristics of charging utilization rate and time-of-use electricity price [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(5): 75-84.
- [7] Zhang Y F, Zhao C, Dai B, et al. Dynamic simulation of permanent magnet synchronous motor (PMSM) electric vehicle based on simulink [J]. Energies, 2022, 15(3): 1134.
- [8] 马艳红, 张炜函. 考虑充放电成本的 V2G 参与用户细分及激励机制研究 [J]. 智慧电力, 2024, 52(5): 31-36, 51.
Ma Yanhong, Zhang Weihuan. V2G participating in user segmentation incentive mechanism considering charging and discharging cost [J]. Smart Power, 2024, 52(5): 31-36, 51.
- [9] 赵健, 李嘉禄, 曾宪瑞, 等. 空间无人作业车无线充电系统设计 [J]. 电源技术, 2024, 48(3): 377-381.
Zhao Jian, Li Jialu, Zeng Xianrui, et al. Design of wireless charging system for space operation vehicle [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2024, 48(3): 377-381.
- [10] 胡治国, 李永杰, 张磊冲. 基于混合储能荷电状态的光伏直流微网系统能量分配策略 [J]. 电源技术, 2024, 48(2): 337-344.
Hu Zhiguo, Li Yongjie, Zhang Leichong. Energy allocation strategy for photovoltaic DC microgrid system based on hybrid energy storage state of charge [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2024, 48(2): 337-344.
- [11] 袁瑞铭, 巨汉基, 焦东翔, 等. 直流充电桩快速变化的电流和电压波形模态特性分析 [J]. 电测与仪表, 2024, 61(5): 38-43, 59.
Yuan Ruiming, Ju Hanji, Jiao Dongxiang, et al. Modal

- characteristics analysis of current and voltage waveform with fast-changing in DC charging station[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(5): 38-43, 59.
- [12] 王毅, 王飞宏, 侯兴哲, 等. 住宅区电动汽车充电负荷随机接入控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(20): 53-58.
- Wang Yi, Wang Feihong, Hou Xingzhe, et al. Random-access control strategy of charging for household electric vehicle in residential area[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(20): 53-58.
- [13] 周步祥, 姚先禹, 臧天磊. 计及电-气双向耦合的综合能源配电网优化重构[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(2): 17-24.
- Zhou Buxiang, Yao Xianyu, Zang Tianlei. Optimization and reconfiguration of the integrated energy distribution network considering the electricity-gas two-way coupling [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(2): 17-24.
- [14] 康童, 朱吉然, 冯楚瑞, 等. 面向光储充一体化社区的有序充电策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(9): 132-142.
- Kang Tong, Zhu Jiran, Feng Churui, et al. An orderly charging strategy for a photovoltaic-storage-charging integrated community[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(9): 132-142.
- [15] 蒋宇, 吕干云, 贾德香, 等. 考虑用户充电行为和光伏不确定性的光储充电站储能容量优化配置[J]. *浙江电力*, 2024, 43(5): 10-17.
- Jiang Yu, Lv Ganyun, Jia Dexiang, et al. Optimal allocation of energy storage capacity for photovoltaic energy storage charging stations considering EV user behavior and photovoltaic uncertainty[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2024, 43(5): 10-17.
- [16] 徐诗鸿, 张宏志, 石栋, 等. 面向智慧城市的快充负荷充电服务费制定策略[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(10): 3187-3201.
- Xu Shihong, Zhang Hongzhi, Shi Dong, et al. Setting strategy of charging service fee for fast charging load of smart cities[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(10): 3187-3201.
- [17] 王鹤, 冷贤达, 潘禹含, 等. 考虑时空特性及时间成本的电动汽车有序充放电策略[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(10): 86-91, 133.
- Wang He, Leng Xianda, Pan Yuhan, et al. Orderly charging and discharging strategy of electric vehicle considering spatio-temporal characteristic and time cost[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(10): 86-91, 133.
- [18] 李崎勇, 宋子涵, 刘斌. 含垃圾能源化处理及电动汽车负载的区域综合能源系统协调优化[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(4): 109-115.
- Li Jiyong, Song Zihan, Liu Bin. Coordinated optimization of regional comprehensive energy system with garbageenergy treatment and electric vehicle load[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(4): 109-115.
- [19] 郭豪杰, 崔双喜. 基于多目标的电动汽车有序充电策略研究[J]. *现代电子技术*, 2022, 45(17): 145-150.
- Guo Haojie, Cui Shuangxi. Multi-objective orderly charging strategy for electric vehicles[J]. *Modern Electronics Technique*, 2022, 45(17): 145-150.
- [20] 臧汉洲, 叶宇剑, 汤奕. 基于内点策略优化的受约束电动汽车充放电策略[J]. *电网技术*, 2023, 47(10): 4170-4180.
- Zang Hanzhou, Ye Yujian, Tang Yi. Constrainedelectric vehicle charging and discharging strategy based on safe reinforcement learning[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(10): 4170-4180.
- [21] 沈筱琦, 方鑫, 谭林林, 等. 基于居民出行模拟的电动汽车负荷时空分布预测[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(3): 130-139.
- Shen Xiaoqi, Fang Xin, Tan Linlin, et al. Prediction of spatio-temporal distribution of electric vehicle load based on residential travel simulation[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(3): 130-139.
- [22] U. S. Department of Transportation. 2017 national household travel survey[EB/OL]. [2020-11-12]. <https://nhts.ornl.gov/>.
- [23] Liu Y X, Heuvelink Gerard Bm, Bai Z G, et al. Uncertainty quantification of nitrogen use efficiency prediction in China using Monte Carlo simulation and quantile regression forests[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023: 204.
- [24] Xue J K, Shen B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm[J]. *Systems Science & Control Engineering*, 2020, 8(1): 22-34.

收稿日期: 2024-06-10; 修回日期: 2024-11-21

作者简介:

乔世超(2000—),男,硕士研究生,研究方向为配电网提质增效技术。E-mail:Gregory_Qiao@outlook.com

侯朗博(1999—),男,硕士,研究方向为配电网提质增效技术。

孙昊(2001—),男,硕士研究生,研究方向为配电网提质增效技术。

陈衡(1989—),男,通信作者,博士,副教授,研究方向为电网提质增效技术、智慧电力系统、系统综合评价、多能互补系统。Email: heng@ncepu.edu.cn

刘涛(1991—),男,硕士,工程师,研究方向为配网智能化改造及信息化平台设计。

刘文毅(1971—),男,博士,教授,研究方向为能源动力系统优化与节能,电网提质增效技术。

(编辑 田春雨)