

基于 Monte Carlo 随机模拟算法的 电动汽车无序充电负荷计算模型

马国真¹, 王云佳¹, 王竹梅², 杜文通^{3†}

(1. 国网河北省电力有限公司 经济技术研究院, 河北 石家庄 050000; 2. 石家庄职业技术学院, 河北 石家庄 050073;
3. 北京中能广联科技有限公司, 北京 100034)

摘 要: 为了有效降低电动汽车无序充电负荷对于电力系统稳定性的影响, 研究了基于 Monte Carlo 随机模拟算法的计算模型。综合考虑用户充电行为各参数的概率密度, 使得构建的模型更精确。分析了不同的充电策略对于充电负荷曲线的影响, 并利用综合策略模型使得用户的充电成本更低, 利用基于 Levy 飞行策略的改进麻雀算法对综合充电策略的权重系数进行寻优计算, 以使得用户的成本和电网稳定均能获得不错的效果。在此基础上, 提出利用双层优化模型对模型进一步优化, 综合考虑用户满意度和电力波动的情况, 结果表明改进后的模型, 可以节省充电成本 15.9%, 降低电力系统负荷峰谷差约 10.1%。

关键词: 蒙特卡洛; 电动汽车; 无序充电; 电力波动

中图分类号: U491.8; TM73

文献标识码: A

Calculation Model of Disorderly Charging Load of Electric Vehicle Based on Monte Carlo Stochastic Simulation Algorithm

MA Guozhen¹, WANG Yunjia¹, WANG Zhumei², DU Wentong^{3†}

(1. Economic and Technological Research Institute of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 050000, China; 2. Shijiazhuang College of Applied Technology, Shijiazhuang, Hebei 050073, China; 3. Beijing Zhong Neng Guang Lian Technology Co., Ltd., Beijing 100034 China)

Abstract: In order to effectively reduce the impact of disorderly charging load of electric vehicle on power system stability, this paper studies the calculation model based on Monte Carlo random simulation algorithm, comprehensively considering the probability density of various parameters of user charging behavior, so as to make the model more accurate. The improved algorithm based on Levy's charging strategy and the user's comprehensive charging strategy can be used to optimize the charging effect of the power grid. On this basis, a two-level optimization model is proposed to further optimize the model, comprehensively considering the situation of user satisfaction and power fluctuation. The results show that the improved model can save 15.9% of charging cost and reduce the peak valley difference of power system load by about 10.1%.

Key words: Monte Carlo; electric vehicle; disorderly charging; power fluctuation

能源是人类社会发展中必不可缺的资源, 随着过度开采和能源短缺等问题逐渐突出。实现资源的高效分配以及不可再生能源的有效替代, 被提上了日程^[1]。电动汽车是改善能源危机的重要工具,

利用电动汽车替代传统的燃油汽车, 可以有效降低石化能源的消耗, 改善生态环境, 助力实现人类生存环境的可持续发展^[2]。

电动汽车的推广, 使得其数量越来越多, 从而

对充电负荷的需求也越来越大。由于电动汽车的充电充满随机性,受到用户个人行为影响严重,研究电动汽车的无序充电,对于维持电力系统的稳定和保障配电网的安全运行具有重要的意义^[3]。刘敦楠等^[4]研究了电动汽车的充电负荷情况预测,综合考虑气温、气象等因素对充电行为的影响。李怡然等^[5]通过构建日内调度模型,运用多段优化的策略,实现了用户侧成本优化和负荷削峰填谷的效果。

对于电动汽车的无序充电负荷问题,本文研究了基于 Monte Carlo 随机模拟算法的计算模型构建问题,通过构建双层优化模型,综合考虑充电过程中用户满意度和配电网负荷调度问题,最终实现配电网负荷的波动平抑、用户满意的效果。

1 电动汽车充电

1.1 充电模式

电动汽车的充电负荷与充电模式也有一定关系,充电模式主要包括常规充电、快速充电以及换电池充电等^[6]。

不同的充电模式具有不同的优缺点。

常规充电的优点为充电不受线路影响,利用市电即可完成,建设成本低。充电电流不会对电网产生大的冲击,对电池使用寿命等影响小。但由于该种模式的充电电流小,因此也被称作慢速充电。从而其充电过程需要大量的时间,只有车辆停留时间较长的情况下才适用。

快速充电利用大功率进行充电,因此充电效率较高,短时间内即可完成充电,适用于高速服务区等急用情况,其缺点在于充电桩建设成本高,对电池的损耗严重。

更换电池模式是一种新的充电模式,通过电池的更换,可以有效缓和电池充电时间与充电成本之间的矛盾,电池更换效率高,同时可以利用闲时充电实现削峰填谷的电力调度作用^[7]。其缺点在于不同车辆的电池型号、电池标准不一致,电池损耗费用较高等,不适用于个人电动汽车。

1.2 用户驾驶统计特性

根据统计规律,对用户的驾驶行为进行统计,分别总结其对于充电负荷有影响因素的概率密度情况。

(1) 用户出行时刻分布情况

根据数据统计,对于电动汽车出行的时间分布情况,上下午各不相同。上午出行的概率密度 $f_{ut}(x)$ 可以利用 Logistic 分布进行计算,表示为:

$$f_{ut}(x) = \frac{\exp\left(\frac{x - \mu_{ut}}{\sigma_{ut}}\right)}{\sigma_{ut} \left(1 + \exp\left(\frac{x - \mu_{ut}}{\sigma_{ut}}\right)\right)^2} \quad (1)$$

式中, μ_{ut} 和 σ_{ut} 分别为对应上午出行时间的均值和方差。

下午出行时间的概率密度分布情况,可以利用 Poisson 分布进行统计,表示为:

$$P(x = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} \quad (2)$$

式中, λ 为泊松分布随机变量。

(2) 用户行驶里程分布情况

用户的行驶里程,能够有效反映出其电量使用情况,通过分析车辆运行里程和耗电量,可以对剩余电量进行求解,从而分析出需要的充电时间^[8]。

根据数据拟合的结果,行驶里程的概率密度函数可以表示为:

$$f_m(l) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_m l} \exp\left(-\frac{(\ln l - \mu_m)^2}{2\sigma_m^2}\right) \quad (3)$$

式中, μ_m 和 σ_m 分别对应行驶里程概率密度的均值和方差。对应不同类型的车辆,其数值各不相同。

(3) 用户日出行次数分布情况

用户日出行的次数与电量的消耗具有正比的关系,用户出行次数的概率密度 $f_n(x)$, 可以用公式表示为:

$$f_n(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp\left(-\frac{(x - \mu_n)^2}{2\sigma_n^2}\right) \quad (4)$$

式中, μ_n 和 σ_n 分别对应行驶里程概率密度的均值和方差。

(4) 用户日出行时长分布情况

用户的日出行时长一般情况下大约为 30 分钟左右,根据统计结果,用户出行时长的概率密度函数可以表示为:

$$f_s(x) = \frac{1}{\sigma_s} \cdot \frac{e^{-\frac{\mu_s}{\sigma_s}} \cdot x \left(\frac{1}{\sigma_s} - 1\right)}{(1 + (e^{-\mu_s} \cdot x)^{\frac{1}{\sigma_s}})^2} \quad (5)$$

式中, μ_s 和 σ_s 分别对应出行时长概率密度的均值和方差。

(5) 用户起始充电时长分布情况

用户充电时长需要根据情况分成两个部分,即起始充电时间和充电结束时间^[9]。

按照日常习惯,起始充电时间通常情况下为用户下班后归家时间,这个时间约为 18 时左右,也是用电晚高峰时间,由于电动汽车充电时间的连续性,使得用电负荷大幅增加。

用户归家时间的概率密度函数,经统计用函数表示为:

$$f_e(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_e} \exp\left(-\frac{(x+24-\mu_e)^2}{2\sigma_e^2}\right), & 0 < x \leq \mu_e - 12 \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_e} \exp\left(-\frac{(x-\mu_e)^2}{2\sigma_e^2}\right), & \mu_e - 12 < x \leq 24 \end{cases} \quad (6)$$

式中： μ_e 和 σ_e 分别为对应充电开始时间的均值和方差。
充电结束时间一般为次日的用户出行时间，故其分布情况可以参考式(1)。

2 Monte Carlo 随机模拟

Monte Carlo 随机模拟算法，可以有效处理概率问题和随机时间关联问题，具有良好的数学处理能力^[10]。通过获取事件的发生概率，可以有效地对随机时间进行期望求解。

其处理过程主要包括：构建随机事件概率模型、进行随机变量抽样和无偏估计求解。Monte-Carlo 随机模拟算法产生的随机数，根据时间随机概率，选择随机变量对问题进行求解。

电动汽车的充电行为具有极大的随机性，完全由用户个人出行规律决定，从而使得充电时间过度集中，产生这种无序负荷会给配电系统的稳定运行带来挑战，需要对其进行引导和控制。

2.1 无序充电模型

为了得到电动汽车的无序充电负荷，通过 Monte Carlo 随机模拟算法，建立负荷模型，利用分时计算的方法，以 15min 为一个时间段，得到汽车负荷的表达式为：

$$P_i = \sum_{n=1}^N P_{n,i} \quad (7)$$

电动汽车无序充电的负荷计算流程，如图 1 所示。

2.2 车辆的负荷情况

利用 Monte Carlo 负荷计算模型，总结电动汽车的充电负荷分布情况^[11]。不同渗透率下的充电负荷趋势曲线如图 2 所示。

个人电动汽车是充电的主体，数量巨大，其充电行为的影响也更为重要。一般来说，个人电动汽车的行为会根据个人习惯而异，具有较大的随机性。但是统计显示，大量的个人电动汽车运行于早晚高峰期，主要作为上下班的交通工具，具有大量的停留时间，因此慢速充电即可满足其使用需求^[12]。

从图 2 中可以看到，在考虑不同渗透率的情况下，个人电动汽车的充电负荷趋势变化并不明显，仅是存在峰值大小的变化。个人电动汽车的充电

峰值位于 19 时附近，此时用户大量归家，从而程序充电至凌晨。充满后充电负荷变少，次日 6 时左右充电负荷接近于 0。

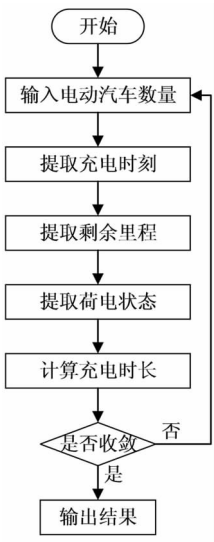


图 1 电动汽车充电负荷计算

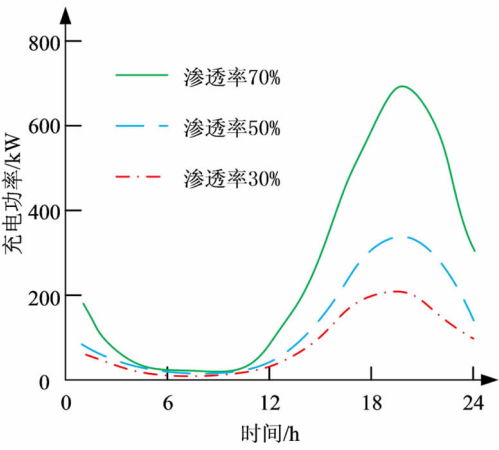


图 2 电动汽车充电负荷曲线

2.3 基于时间尺度的调度策略

电动汽车的无序充电行为会使得电网面临很大的压力，峰谷差值加剧、波动情况严重，影响电力系统稳定。需要对其充电策略进行引导，考虑不同充电策略情况下的负荷引导^[13]。

(1) 随机充电策略

$$\begin{cases} P_R = 1, & R > 0.5 \\ P_R = 0, & R < 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

式中， R 为 $0 \sim 1$ 间的随机数； P_R 为用户充电概率。

(2) 剩余里程策略

$$\begin{cases} P_S = 1, & S < S_m \\ P_S = 0, & S \geq S_m \end{cases} \quad (9)$$

式中， S 为用户车辆剩余里程， S_m 为用户考虑

充电的里程焦虑值, P_S 为用户充电概率。

(3) 电价引导的充电策略

$$\begin{cases} P_T = 1, T < T_a \\ P_T = 0, T \geq T_a \end{cases} \quad (10)$$

式中, T 为此时充电电价, T_a 为全天平均电价, P_T 为用户充电概率。

(4) 综合充电策略

$$\begin{cases} P_c = W_1 P_R + W_2 P_S + W_3 P_T \\ \sum_{i=1}^3 W_i = 1, i = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (11)$$

式中, W_i 为选择不同充电方式的权重系数, 当用户充电概率 P_c 小于 0.5 时, 汽车不充电, 其他情况下, 汽车充电。

2.4 双层优化模型

为了降低电动汽车无序充电对于电网的冲击, 提出了双层优化模型, 分别考虑电网的稳定性, 以及用户的充电成本两个方面^[14]。

双层优化的第一层, 主要是通过基于 Levy 飞行策略的改进麻雀算法, 来对充电策略的权重进行搜寻, 获得最优充电时间段。利用 Levy 飞行策略的距离优势, 提高麻雀算法的搜索范围, 进而提高其性能。改进麻雀算法的流程如图 3 所示。

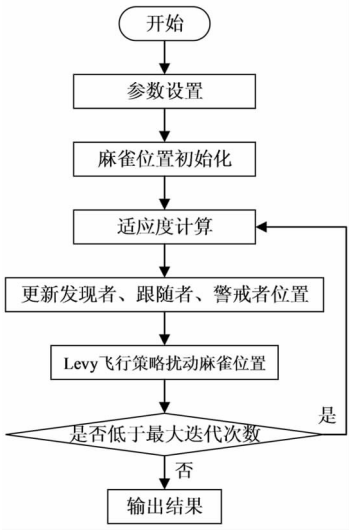


图 3 改进麻雀算法流程图

第 2 层优化的目标, 在于考虑负荷波动的情况下, 计算车辆充电概率, 使得充电对于电网的波动影响最小。

负荷波动 ΔS^2 可以用公式表示为:

$$\Delta S^2 = \int_1^T [(P_{tw} + P_{t0})^2 - (P_{t0})^2] dt \quad (12)$$

式中, P_{tw} 为 t 时刻电动汽车产生的无序充电负荷; P_{t0} 为 t 时刻电网原先的负荷。

可充电时间段 C_S 可以表示为:

$$C_S = P_{Ch} > P_{th} \quad (13)$$

P_{th} 为可充电的概率限定值; P_{ch} 为电动汽车的充电概率。

3 实验结果与分析

3.1 参数设置

为了验证本文优化模型对于电动汽车无序充电的效果, 利用 Matlab 对某区域的电动汽车负荷进行研究。设定该区域内的容量上限为 3000 kW, 电动汽车数量为 600 辆。设定改进麻雀算法的种群为 60, 迭代次数为 300。电动汽车的电池容量为 65 kWh, 充电功率为 6.5 kW。设定综合调度策略的权重系数 W_1 , W_2 和 W_3 初始值均为 1/3。

分时电价情况, 如表 1 所示。

表 1 充电分时电价

时段	价格(元/度)
0:00—7:00	0.4
7:00—10:00	1.0
10:00—14:00	1.5
14:00—18:00	0.4
18:00—21:00	1.5
21:00—24:00	1.0

3.2 目标函数

对于无序充电的优化目标, 需要考虑多个函数, 从而维持配电网的稳定, 以及用户成本的降低^[15]。

多目标函数主要包括:

(1) 电网负荷均峰比 L_m

$$\max L_m = \frac{\text{average}(P_{t0} + \sum_{i=1}^n P_{ti})}{\max_{0 \leq t \leq 1440} (P_{t0} + \sum_{i=1}^n P_{ti})} \quad (14)$$

式中, P_{ti} 为 t 时刻, 电动汽车 i 的无序充电负荷。

(2) 充电费用 E_s 最优

$$\max E_{sr} = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{i+j-1} C_{ij} \cdot P_k \cdot f_{ij} \cdot \Delta t}{\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{i+j-1} C_{ij} \cdot P_k \cdot f_{ij} \cdot \Delta t} \quad (15)$$

式中, N 为汽车总量; i 和 j 分别对应充电开始和充电结束的时间; C_{ij} 为对应时间段 i 和 j 的充电平均电价; f_{ij} 为充电行为识别辨识, 取 0 时表示

电动汽车此时不充电,取 1 时表示电动汽车此时充电; P_k 为此时电动汽车充电行为产生的功率; Δt 为充电时长; E_{sr} 为用户充电行为费用节省率。

3. 电网负荷均方差和 S_m 的表示式为:

$$\begin{cases} S_m = \frac{1}{\sum_{i=1}^N (\sum_{i=1}^N P_{ti} + P_{r0} - P_a)^2} \\ P_a = \sum_{i=1}^T P_{r0} / T \end{cases} \quad (16)$$

式中, T 为时间段的数量; P_a 为一天 24 小时内的无序充电负荷平均值。

3.3 结果与分析

(1) 充电策略对比

利用 Monte Carlo 随机模拟算法,对采用不同充电策略的无序充电负荷进行计算,结果对比情况如图 4 所示。

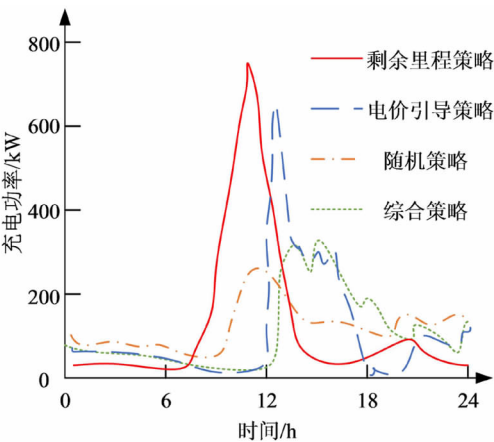


图 4 不同策略下的无序充电负荷

从图 4 中结果可以看到,不同的充电策略对于相对无序的电动汽车充电来说,用一定的引导作用。

采用随机充电策略的负荷分布情况基本均匀,全天均有可能充电,主要的负荷高峰位于 10—15 时,其原因主要在于早高峰的车辆出行会消耗一定的能量,对于时间充裕的用户,就会在中午进行充电。

电价引导策略的采用,主要是为了起到电力调度中削峰填谷的作用。对于平时负荷较少的时间段,采用低电价,引导用户在此时充电。从结果上看,低电价的时间段存在大量的车辆充电行为,也在此时产生电力负荷的高峰。一定的充电引导可以削峰填谷,但是过多的充电行为集中会破坏电网的稳定,需要加以控制。

剩余里程充电策略情况,其负荷曲线与随机充电策略曲线类似,同样由于早高峰的耗电较多,从而使得午间充电的车辆增多。用电负荷形成高峰。

综合充电策略由于兼顾了不同的策略类型,因

此其在无序充电调动方面,效果更好,能够有效缓解其他策略的负荷缺陷,起到削峰填谷的作用,并提高用户的满意度和电网稳定性。

为了更好地比较不同充电策略在削峰填谷方面的作用,将配电网的其他负荷加入进来,考虑充电负荷与基础负荷结合后的电力负荷情况,结果如图 5 所示。

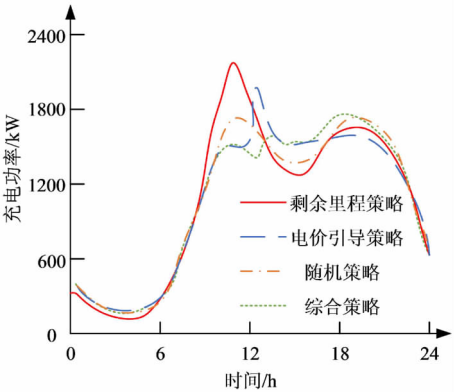


图 5 不同策略下的电网负荷

图 5 中可以看到,由于图 4 中的随机充电策略和剩余里程策略在电网负荷中形成了高峰,从而使得结合后的总负荷进一步提高,不利于电网的稳定。电价引导策略虽然形成了一定的移峰效果,但是由于充电过于集中,从而也在低价时间段形成一定的小高峰。综合策略的效果相对稳定,能对峰谷形成一定的抑制,但是效果依然有待提升。

(2) 改进麻雀算法优化

单独利用改进麻雀算法,对于前文的综合策略进行优化,根据优化目标,对不同充电策略的权重进行寻优。优化后的结果与其他综合策略进行负荷曲线对比,结果如图 6 所示。

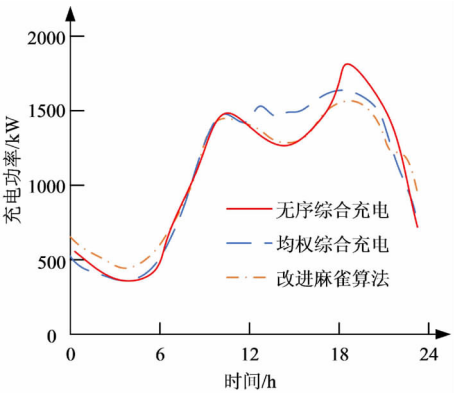


图 6 不同策略下的无序充电负荷

从图 6 中可以看到,单独改进麻雀算法,有较好的优化负荷的分布情况,有效改进了电力调度的削峰填谷时间,在电力低谷期进行电动汽车充电,减小电力系统的负荷波动情况。

(3)双层优化策略

在双层优化策略的调度之间,电动汽车的充电负荷曲线与其他策略的负荷对比情况,如图 7 所示。

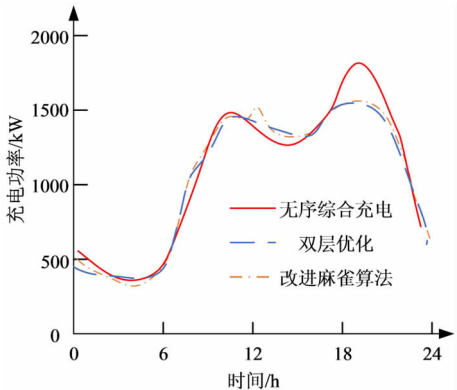


图 7 不同策略下的无序充电负荷

从图 7 的结果可以看到,本文的双层优化策略能够较好地调度充电负荷,对于电网的削峰填谷来说,具有重要的意义。

单纯的无序充电会使得负荷集中,从而在用电高峰期形成另外一个充电负荷峰,使得系统的稳定性更差,负荷波动加剧。从充电费用的角度,用户的用电成本上升,此时的电价相对更高,用户的满意程度下降。

利用改进麻雀算法,可以使得综合调度策略更为合理,电网的峰谷差得到缓和,在低价的时间段为电动汽车充电的用户更多,用电负荷得到较好的分配,利用算法优化后的综合策略权重系数 W_1 、 W_2 、 W_3 分别为:0.3325,0.4618,0.2057。

双层优化测量中,充分考虑了综合权重的影响,并利用其作为模型的输入条件进行负荷求解,不同充电策略得到的负荷结果如表 2 所示。

表 2 不同策略的负荷对比

策略	峰谷差率	匀峰比	节省率	综合指标
无序充电	0.841	0.597	0.168	0.714
改进麻雀算法	0.765	0.682	0.338	0.818
双层优化	0.742	0.676	0.327	0.835

表 2 中的数据结果可以看出,利用双层优化充电策略能够很好地节省用户的用电成本,节省用电费用约占原先无序充电情况的 15.9%。在峰谷差的调整方面,双层模型同样起到重要的作用,降低了约 10.1%。相比单纯的改进麻雀算法,本文优化策略依然占据优势,虽然节省成本约低了 1.1%,单调整峰谷差方面增加了 2.3%,综合指标高了 1.7%。从而在保证电力系统稳定的基础上,提高了用户的满意度。

4 结 论

电动汽车的无序充电会严重影响电力系统的稳定。为了精确分析其影响并制定合理的引导策略,研究了基于 Monte Carlo 随机模拟算法电动汽车无序充电模型,通过分析电动汽车用户的特性,获得电动汽车行为的准确模型。利用不同充电引导策略,对负荷曲线进行分析,获得更低的用户消费和更好的电力调度效果。利用改进麻雀算法对综合策略的权重系数进行寻优,结果证明改进后的模型具有更好的削峰填谷效果,对于电力系统的稳定具有重要意义。构建双层优化模型,综合考虑用户充电费用与负荷波动两个方面的优化,实验结果表明,该算法可以很好地起到削峰填谷的作用,相比单纯改进麻雀算法来说,电网稳定性效果更好,用户充电成本更低。

参考文献

[1] 蔡国伟,姜雨晴,黄南天,等. 电力需求响应机制下基于多主体双层博弈的规模化电动汽车充放电优化调度[J]. 中国电机工程学报,2023,43(1):85-98.

[2] 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.

[3] 陈宇,吴晓刚,杜玖玉,等. 计及出租车充电行为的微电网能量管理研究[J]. 汽车工程,2022,44(4):525-534.

[4] 刘敦楠,张悦,彭晓峰,等. 计及相似日与气象因素的电动汽车充电负荷聚类预测[J]. 电力建设,2021,42(2):43-49.

[5] 李怡然,张姝,肖先勇,等. V2G 模式下计及供需两侧需求的电动汽车充放电调度策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(3):129-135+143.

[6] 王少林,王刚,王晓磊,等. 基于改进蜂群算法的电动汽车微电网优化调度[J]. 电气应用,2022,41(4):63-70+13-14.

[7] 薛新白,万芮,牛凤文. 可入网电动汽车对配电网负荷影响的研究[J]. 现代制造技术与装备,2022,58(3):8-10.

[8] 史倩芸,吴传中,高山. 考虑电动汽车需求响应的微电网预测控制研究[J]. 电力需求侧管理,2022,24(2):1-6+13.

[9] 罗玉玲,渠砚青,陈超波,等. 考虑车主响应度的峰谷电价时段优化模型研究[J]. 电工技术,2022(4):71-75.

[10] 林铭睿,胡志坚,高明鑫,等. 基于时空规律的电动汽车负荷建模及其自动需求响应[J]. 南方电网技术,2022,16(1):99-107.

[11] 罗维祥,常喜强,伏睿,等. 考虑供需需求的电动汽车充放电调度策略[J]. 电力系统及其自动化学报,2022,34(7):106-112.

[12] 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):1837-1852.

[13] 丁建顺,任民,马亚彬,等. 基于区块链技术的电动汽车充电桩共享检测[J]. 电测与仪表,2023,60(7):26-32.

[14] 汪天允,张浩. 基于人工鱼群算法的电动汽车优化充电策略[J]. 电测与仪表,2023,60(7):33-38.

[15] 秦建华,潘崇超,张璇,等. 基于充电行为分析的电动汽车充电负荷预测[J]. 电测与仪表,2023,60(4):19-26.