

多种充电模式协同的规模化电动汽车分层充电方法

刘永江¹, 郭杉², 贾俊青², 刘小恺², 蔡文超², 曾龙³

(1. 内蒙古电力(集团)有限责任公司, 呼和浩特 010020; 2. 内蒙古电力(集团)有限责任公司内蒙古电力科学研究院分公司, 呼和浩特 010020; 3. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 针对规模化电动汽车(electric vehicle, EV)随机充电负荷冲击电网的问题, 本文提出了一种多充电模式协同的规模化EV分层充电方法。通过利用不同充电方式特点, 避免充电负荷集中于电力负荷高峰时间段。针对内蒙古某地区电力负荷曲线, 考虑当地可再生能源丰富特点, 基于K-means和肘部法则聚类成当地5类典型电力负荷曲线。考虑EV通过充电桩充电和换电站换电池, 分别建立充电站充电模型和换电站电池交换模型, 同时建立规模化EV分层能量交换模型。在上层中, 根据用户特征以及充电方式成本, 基于粒子群算法对EV与充电方式进行匹配; 在下层中, 考虑电力价格、用户需求、充电站运行情况和快、慢充特点, 利用Matlab自带优化工具箱优化充电站内EV、电池充电优化方案。通过实验仿真表明, 本文所提方法采取的不同充电方式协同可实现充电方式优势互补, 有效避免了充电负荷集中于电力负荷高峰时间段, 可持续、经济地满足EV用户充电需求, 但是单以电力价格作为EV充电负荷的引导信号, 有可能加剧当地电力负荷曲线峰谷差和扰动情况。

关键词: 电动汽车 充电桩 电池交换 充电模式协同 分层优化

中图分类号: TM732 文献标志码: A

Electric Vehicles Hierarchical Charging Method Considering Multiple Modes Coordination

LIU Yongjiang¹, GUO Shan², JIA Junqing², LIU Xiaokai², CAI Wenchao², ZENG Long³

1. Inner Mongolia Power(Group) Co.,Ltd, Hohhot, 010020, China; 2. Inner Mongolia Power Science Research Institute, Inner Mongolia Power(Group) Co., Ltd, Hohhot, 010020, China; 3. School of Electric Information and Electric Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract: To alleviate the adverse effect of large-scale electric vehicles (EVs) random charging, an EV hierarchical charging method considering multiple modes coordination is proposed in this paper. This proposed method avoids the large-scale charging load centralized in a certain period by coordinating diverse charging modes. Considering the load characteristics such as the output of renewable power generation, the power load curves of an area in Inner Mongolia are clustered into five typical power load curves based on the K-means clustering algorithm and elbow method. According to EV charging and battery swapping (BS) modes' characteristics, the charging station models and EV hierarchical power exchange model are established. At the upper level, the users' requirements and charging costs are considered, and EVs are matched with the charging mode based on the particle swarm optimization algorithm. At the lower level, the electric price and charging station operation conditions are considered, and the charging schemes in the charging/BS station are optimized based on the optimization toolbox in the Matlab software platform. Extensive case studies are presented to

收稿日期: 2023-11-2

基金项目: 内蒙古自治区“双碳”科技创新重大示范工程“揭榜挂帅”项目(2022JBGS0043)

作者简介: 刘永江(1977-), 男, 内蒙古自治区鄂尔多斯市人, 正高级工程师, 从事综合能源系统优化调度研究。

通信作者: 曾龙, 男, 博士后; E-mail: zenglong2404@qq.com。

validate the effectiveness of the proposed method, where a large number of EVs charge continuously with cost efficiency. Moreover, through the charging power and the typical power load curves' respective superposition, the analysis demonstrates that only electric price guides EV charging load may exacerbate the valley-to-peak and instability of the local power load curve.

Key words: electric vehicle; electric vehicle charger; battery swapping; charging modes coordination; hierarchical optimization

随着我国“双碳”战略目标的制定与推进,各领域开始加大力度支持节能减排措施实施^[1-3]。电动汽车(electric vehicle, EV)一方面在交通领域通过替代传统燃油汽车降低碳排放^[4],另一方面在电力领域通过调度其充电负荷消纳新能源发电^[5]。EV的推广应用是我国落实“双碳”战略目标的重要手段。为了进一步促进EV发展,各级政府也推出了一系列鼓励政策^[6-7]。EV数量也因此近年来开始激增,大规模EV随机充电负荷并入电网,一方面导致配电网正常运行受到威胁,另一方面用户需求难以同时满足,最终导致配电网正常运行与用户需求满足之间的矛盾^[8]。

为了解决配电网正常运行与EV用户需求满足之间的矛盾,国内外学者就EV充电负荷调度进行了广泛研究。文献[9]考虑了EV开始和终止充电时间,在配电网正常运行下,协调EV充电时间和充电功率,避免了规模化EV充电负荷集中叠加在电力负荷高峰时间段。文献[10]考虑到电力系统信号,提出了EV充电引导策略。先基于配电网运行情况,建立电价与电力负荷之间的相关模型;然后,通过电力价格引导各充电站制定EV充电调度方案;最后,考虑充电费用、出行总时间以及行程距离,为EV推荐充电站并规划最优行驶路径,同时提升用户经济性和配电网运行的安全性。文献[11-12]利用EV储能特性以及充电功率响应速度快、准的特性,优化其充电功率曲线,通过消纳分布式可再生能源发电,改善用户体验。优化过程进行分层处理,分别在上、下层从电网侧、用户侧的角度进行优化,进而实现电网正常运行需求。文献[13-14]则根据多能源系统发展趋势,提出包含对EV充电负荷反馈修正的电热氢综合能源系统多层协调优化策略。该策略基于三层优化的协调配合,EV充放电管理层综合考虑负荷曲线方差和车主不满意度,制定充放电计划并传递给模型预测控制滚动优化层。在滚动优化过程中,实时识别非计划车辆数,自主运行车联网(vehicle-to-grid, V2G)负荷反馈修正层,从

而消除车辆出行计划临时改变所带来的不利影响。以上文献通过考虑EV用户具体需求,通过电力系统信号引导,利用微网内分布式可再生能源,制定了满足用户需求和配电网安全运行的EV充电方案。

在对EV充电功率协调调控研究过程中,由于用户规模的快速增长,导致用户需求呈现多样化、复杂化特征^[15-16]。为了满足用户需求,现有文献对EV充电模式进行了一系列研究,并且开始通过两种充电模式协同确保电网正常运行。文献[17-18]考虑到家庭或者建筑微电网内EV充/放电功率、其他柔性电力负荷以及分布式可再生能源,通过EV储能特性以及其他柔性负荷可调节特性,实现分布式可再生能源发电就地消纳目的。同时根据微网内负荷曲线以及电网电力价格,优化EV充/放电功率,进而降低整个微网的电力成本。文献[19]通过引导EV前往BSS(battery swapping station, BSS),以更换电池的方式高效经济地消除EV用户里程焦虑。BSS根据电力价格浮动情况,优化其总充电负荷曲线,以降低电力成本和站内电池损耗成本,同时可以高效、经济地满足用户驾驶需求。文献[20]将BS(battery swapping, BS)与车联建筑两种方式进行协同,利用换电站容量充足的特点,提高的分布式可再生能源发电就地消纳能力,降低了EV充电成本,改善了用户体验。文献[21]通过利用EV可移动性、充电可调特性,提出了一种车辆互联的充电方法。以满足用户充电车位不足、用户里程焦虑明显情况下的驾驶需求。以上EV充电模式协同方法,针对不同场景下用户需求特点,提出了相应的充电模式下或者两种充电模式协同下的EV充电功率调度方法,提高了用户体验。

随着EV数量不断增长,用户规模进一步扩大,用户需求的多样性特点愈加突出。充电模式单一的充电站为规模化电动汽车提供充电服务,由于受用户需求特征限制,如停车时间限制等,导致随机充电负荷集中在电力负荷高峰时间段。因此,本文提出了一种考虑多种充电模式的规模化EV分层充电

方法。针对内蒙古某地区电力负荷数据, 考虑当地可再生能源丰富以及电力负荷曲线其他特征, 基于 k-means 聚类方法和肘部法则聚类成该地区典型电力负荷曲线, 为之后 EV 充电负荷对该地区电力负荷曲线影响分析提供。考虑 EV 充电和 BS 方式特征, 建立 EV 充电和 BSS 充电模型, 根据个体用户特征, 对 EV 与充电方式进行匹配, 考虑充电站运行情况、电力价格以及快、慢充特点, 优化站内充电方案。通过典型电力负荷曲线叠加充电负荷, 分析大规模 EV 充电对所在地区的影响, 并提出了对应建议。

1 区域电力负荷用户画像

不同配电网电力负荷受用户生活、工作习性以及用户类型构成等因素影响, 电力负荷曲线呈现明显的时空分布差异。本文通过收集内蒙古某地区各配网电力负荷数据, 刻画各小区电力负荷用户画像, 为 EV 充电方式协同分析提供现实依据。

1.1 数据特征量

(1) 最大、最小电力负荷

电力负荷最大、最小负荷反映了电力负荷水平, 有利于对规模化 EV 充电的影响分析提供参考。

$$\begin{cases} P_{l,\max} = \max\{P_l(0), P_l(\Delta t), \dots, P_l(t), \dots, P_l(T)\} \\ P_{l,\min} = \min\{P_l(0), P_l(\Delta t), \dots, P_l(t), \dots, P_l(T)\} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $P_{l,\max}$ 和 $P_{l,\min}$ 分别表示 l 区域时间周期 T 内的最大、最小电力负荷; P_l 表示区域 l 的电力负荷; Δt 表示充电负荷数据采集的时间间隔; T 表示电力负荷的时间周期。

(2) 平均电力负荷

平均电力负荷可在一定程度上反映所在区域电力负荷的整体水平。利用该特征量, 可以了解该区域可接受的 EV 总体充电负荷情况。

$$P_{l,\text{aver}} = \frac{\sum_{t=0}^T P_l(t)}{T/\Delta t} \quad (2)$$

式中, $P_{l,\text{aver}}$ 表示区域 l 时间周期 T 内的电力负荷平均负荷。

(3) 电力负荷方差

电力负荷方差反映了所在区域电力负荷离散程度, 反映了电力负荷曲线波动情况。利用该特征量, 有利于合理制订高成本效益的充电方案, 提升分布

式可再生能源就地消纳水平。

$$S_l = \frac{1}{T/\Delta t} \sum_{t=0}^T (P_l(t) - P_{l,\text{aver}})^2 \quad (3)$$

式中, S_l 表示区域 l 的电力负荷方差值。

(4) 分布式新能源消纳能力

考虑到内蒙古地区风能、太阳能资源丰富, 通过 EV 柔性资源消纳分布式新能源潜力巨大, 因此将分布式新能源消纳能力作为特征量考虑, 有利于提升部分地区分布式新能源就地消纳水平。

$$P_{l,w} = \sum_{t=0}^T (P_l(t) - (\min(\max(P_l(t), 0), P_w(t)) - P_w(t))) \quad (4)$$

$$P_{l,s} = \sum_{t=0}^T (P_l(t) - (\min(\max(P_l(t), 0), P_s(t)) - P_s(t))) \quad (5)$$

式中, $P_{l,w}$ 和 $P_{l,s}$ 分别表示区域 l 的分布式风能和光伏发电消纳能力; P_w 和 P_s 分别表示分布式风能和光伏发电出力, 这里本文将各个区域的风能、光伏发电出力值假设为相等。

1.2 Z-Score 标准化

考虑特征量的数值差异问题, 本文采用 Z-Score 标准化方法, 通过将数据标准化处理, 确保结果可比性。标准化公式如 (6) 所示。

$$Z_{l,d}^* = \frac{Z_{l,d} - Z_{\text{aver}}}{S} \quad (6)$$

$$\begin{cases} Z_{\text{aver}} = \frac{\sum_{l=1}^L \sum_{d=1}^D Z_{l,d}}{D \cdot L} \\ S = \sqrt{\frac{1}{D} \cdot \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \sum_{d=1}^D (Z_{l,d} - Z_{\text{aver}})^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $Z_{l,d}^*$ 表示 Z-Score 标准化后的区域 l 负荷数据第 d 个特征量; Z_{aver} 和 S 分别表示总体特征数据的平均值和标准差; $Z_{l,d}$ 表示区域 l 的第 d 个特征数据; D 表示每个区域的特征量数据个数。

1.3 区域电力负荷聚类

本文基于 K-means 算法对标准化的区域电力负荷特征量进行聚类。为了克服聚类中心点数量的问题, 本文采用肘部法则选定聚类中心点个数, 如式 (8) 所示。

$$E(K) = \sum_{k=1}^K \sum_{d=1}^D (Z_{l,d}^*(k) - K_{\text{means},d}(k))^2 \quad (8)$$

式中, E 表示总畸变程度; $K_{\text{means},d}(k)$ 表示第 k 个中心点的第 d 个特征量; K 表示中心点数量。

2 电动汽车充电模型

本文通过充电 EV 与充电方式的匹配, 利用 V2G 充电和换电特点, 避免充电负荷集中在电力负荷高峰时间段。EV 充电和 BS 模型的区别主要体现在充电时间上。在充电桩、BS 站电池数量充足情况下, EV 充电时间受 EV 到达和离开充电桩的时间限制, 而 BS 站中电池充电时间受上一辆 EV 离开时间和 EV 到访时间影响。

2.1 EV 充电能量交换模型

EV 充电过程中受用户电动汽车停泊时间、电网电力价格、电力负荷曲线等因素影响, 在成本上呈现不同程度的差异。本小节针对 EV 充电特点, 建立优化模型。

$$\min C_{V2G} = \sum_{n=1}^N C_{V2G,n} \quad (9)$$

$$\text{s.t.} \quad C_{V2G,n} = \sum_{T_{n,ini}}^{T_n} (P_n(t) \cdot a_n(t) + BDC_n(t)) \quad (10)$$

$$BDC_n = \alpha_1 |P_n(t)|^{\beta_1} + \alpha_2 |P_n(t) - P(t - \Delta t)|^{\beta_2} \quad (11)$$

$$P_{\min} \leq P_n(t) \leq P_{\max} \quad (12)$$

$$SOC_{n,obj} = SOC_{n,ini} + \frac{\sum_{T_{n,ini}}^{T_n} P_n(t)}{Q_n} \quad (13)$$

$$SOC_{\min} \leq SOC_{n,ini} \leq SOC_{n,obj} \leq SOC_{\max} \quad (14)$$

$$SOC_{\min} \leq SOC_n(t) \leq SOC_{\max} \quad (15)$$

$$t_0 \leq T_{ini,n} < T_n \leq T \quad (16)$$

$$N \geq \max(N_{EV}(t_0), N_{EV}(t_0 + \Delta t), \dots, N_{EV}(T)) \quad (17)$$

式中, C_{V2G} 和 $C_{V2G,n}$ 分别表示 EV 充电总成本和第 n 辆 EV 成本; T_n 表示电动汽车 n 的断网时间; P_n 表示 EV n 的充电功率; a_n 表示 EV n 的充电价格; BDC_n 表示 EV n 的电池损耗成本; α_1 、 α_2 、 β_1 和 β_2 均为电池损耗模型参数; P_{\max} 和 P_{\min} 分别表示 EV 充电最大和最小功率; a_{Grid} 表示电网售电价格; $SOC_{n,obj}$ 和 $SOC_{n,ini}$ 分别表示电动汽车 n 的电池期望和初始荷电状态值; Q_n 表示电动汽车电池额定容量; SOC_{\max} 和 SOC_{\min} 分别表示电池最大和最小核电状态; $SOC_n(t)$ 表示 EV n 的电池实时荷电状态; $T_{n,ini}$

表示 EV n 联网初始时间; P_{re} 和 P'_{re} 分别表示电动汽车消纳前和后的分布式新能源出力值; N 表示充电站内充电桩数量, 表示站内最大充电 EV 数量; N_{EV} 表示被匹配到充电站的 EV 数量。

本小节在 EV 充电过程中, 以 EV 总成本最优为目标以制定最优能量交换方案, 如式 (9) 所示。如式 (10) 所示, 针对每辆 EV, 在能量交换过程中成本考虑电能成本, 即购电成本和电池损耗成本。本文考虑电池损耗成本, 以每个时间段充/放电功率及其在相邻时间段的功率波动作为影响因素, 如式 (11) 所示^[21]。为了避免电池损耗成本过高, 式 (12) 将 EV 充电功率限定在合理范围内。能量交换过程中, 用户的驾驶需求必须满足, 在式 (13) 中要求在电动汽车离开之前, 电动汽车电池荷电状态值必须达到用户期望值。为了保护电池在能量交换过程中出现过充、过放现象, 式 (14) 和式 (15) 将电池荷电状态 (state-of-charge, SOC) 限定在合理范围以保护电池。为了简化仿真过程, 本小节将 EV 联网的初始时间和终止时间限定在一个时间周期内, 如式 (16) 所示。式 (17) 对每个时间段匹配到充电站的 EV 数量进行可约束, 不能超过充电桩数量。

2.2 BS 能量交换模型

相对于 EV 充电, BS 具有快捷的优点, 可在短时间较为经济地满足里程焦虑用户, 但是换电过程受 BSS 内电池数量及荷电状态、电网电力价格变化、EV 数量等因素影响。本小节针对 BS 特点, 建立优化模型。

$$\min C_{BS} = \sum_{m=1}^M C_{BS,m} \quad (18)$$

$$\text{s.t.} \quad C_{BS,m} = \sum_{T_{m,ini}}^{T_m} (P_m(t) \cdot a_m(t) + BDC_m(t)) \quad (19)$$

$$BDC_m = \alpha_1 |P_m(t)|^{\beta_1} + \alpha_2 |P_m(t) - P(t - \Delta t)|^{\beta_2} \quad (20)$$

$$P_{\min} \leq P_m(t) \leq P_{\max} \quad (21)$$

$$SOC_{m,obj} = SOC_{m,ini} + \frac{\sum_{T_{m,ini}}^{T_m} P_m(t)}{Q_m} \quad (22)$$

$$SOC_{\min} \leq SOC_{m,ini} \leq SOC_{m,obj} \leq SOC_{\max} \quad (23)$$

$$SOC_{\min} \leq SOC_m(t) \leq SOC_{\max} \quad (24)$$

$$t_0 \leq T_{ini,m} < T_m \leq T \quad (25)$$

$$M_B \geq \max(M_{EV}(t_0), M_{EV}(t_0 + \Delta t), \dots, M_{EV}(T)) \quad (26)$$

$$M = \sum_{t_0}^T M_{EV}(t) \quad (27)$$

式中, C_{BS} 和 $C_{BS,m}$ 分别表示 BS 方式下 EV 总成本和第 n 辆 EV 成本; $T_{m,ini}$ 和 T_m 分别表示 BSS 中位置 m 的电池充电开始时间和截止时间。这里的充电开始时间表示该位置期望 SOC 值的电池与 EV 刚完成电池交换, 该位置电池 SOC 值为电池交换前 EV 电池 SOC 值。充电截止时间表示 BSS 中对应位置电池与 EV 进行电池交换的时间, 或者该位置电池 SOC 值达到期望 SOC 值的时间。 P_m 表示 BSS 中位置 m 的电池充电功率。 Q_m 表示电池额定容量。 M_B 表示 BSS 内电池数量。

在 BS 能量交换过程中, 以 BSS 总成本最优为目标以制定最优能量交换方案, 如式 (18) 所示。如式 (19) 所示, 针对 BSS 内每个电池考虑购电成本和电池损耗成本。电池损耗成本以每个时间段充/放电功率及其在相邻时间段的功率波动作为影响因素, 如式 (20) 所示^[21]。为了避免电池损耗成本过高, 式 (21) 将电池充电功率限定在合理范围内。为了确保 EV 在 BSS 内能够交换到期望 SOC 值的电池, 式 (22) 对 BSS 内被交换电池 SOC 值进行了约束。同时, 为了避免电池过快老化, 式 (23) 和式 (24) 将电池 SOC 值限定在合理范围。为了简化仿真过程, 将 BSS 内电池充电初始时间和终止时间限定在一个时间周期内, 如式 (25) 所示。在式 (26), 对每个时间段匹配到 BSS 能量交换的 EV 数量进行了约束, 不能超过 BSS 承受范围。

3 电动汽车分层能量交换方法

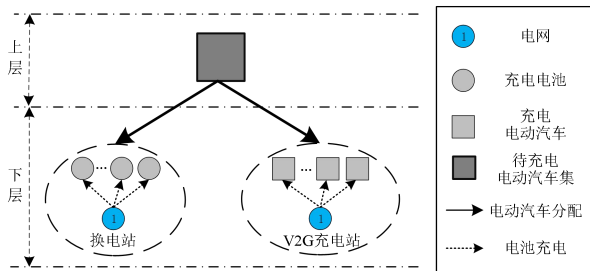


图 1 EV 分层充电系统框图

Fig.1 The framework diagram of EV hierarchical

charging system

本文考虑到 EV 充电和 BS 的协同, 通过不同能量交换方式的优势互补, 提出电动汽车分层能量交换方法。

本文对规模化 EV 协同充电过程进行了分层处理, 在上层能量交换过程中, 为了满足个体用户充电需求, 根据 EV 用户需求特性被匹配到 EV 充电站或者 BS 站。在下层能量交换过程中, 为了降低充电站和 BS 站运营成本, 对 EV 充电方案和电池充电方案进行了优化。

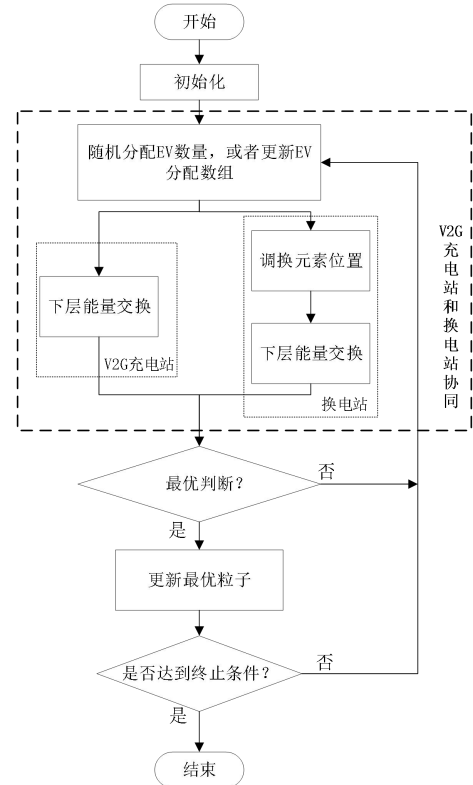


图 2 EV 上层能量交换算法流程图

Fig.2 The flowchart of EV power exchange at the upper level

3.1 分层充电系统

实际场景中, 前往待充电 EV 数量持续变化且可停泊时长呈现多样性特点。针对这种情况, 本文建立了 EV 分层充电模型。在上层中, 控制中心根据用户需求数据以及充电站/BS 站运行情况, 以用户成本最优为目标, 对 EV 与充电模式进行匹配。在下层中, 各充电站/BS 站运营商根据电力价格等信息, 以个体用户成本最低为目标, 分别优化个体 EV/电池充电方案。为确保用户驾驶需求能够得到满足, 本文在充电站/BS 站中均考虑快充、慢充模式。

3.2 上层能量交换

在上层能量交换过程中,每个时间段待充电 EV 将被随机分配到充电和 BS 能量交换方式,优化模型如下。

$$\min C_{BS}(t)+C_{V2G}(t) \quad (28)$$

$$\text{s.t.} \quad (10) \sim (15), \quad (19) \sim (24)$$

该模型以单个时间段被随机匹配到充电站和 BSS 的 EV 数量作为决策变量,采取粒子群优化算法求解,算法流程如图 2 所示。优化过程中,增加对每个粒子的元素位置交换前后的成本对比,以提高算法收敛速度。

3.3 下层能量交换

在下层能量交换过程中,个体 EV 通过充电或者 BS 进行电力补充。在该过程中,以个体用户成本作为优化目标,优化模型如下。

$$\min C_{EV,n}(t) \quad (29)$$

$$\text{s.t.} \quad (12), \quad (14) \sim (17), \quad (23), \quad (25) \sim (28)$$

式中, $C_{EV,n}$ 表示电动汽车个体 n 的充电成本。

该过程以各个时间段个体 EV 充电功率作为决策变量,采用 matlab2018a 自带优化工具箱中的 fmincon 函数求解。fmincon 是 MATLAB 中一个优化函数,用于求解约束非线性最小化问题。它所采用的 Sequential Quadratic Programming 迭代算法,从初始点开始,先求解一个次问题以找到一个可行解,然后更新工作点,在每次迭代中近似解决原始问题,并生成约束问题的近似次问题,直到满足终止条件并收敛到最终解。求解过程中,针对 EV 充电和 BS 两种方式,假设每个时间段的电力价格、EV 停泊时间等信息采集或者预测准确。

4 算例仿真

本文以内蒙古某地区电力负荷作为参考,通过聚类方法得出该地区典型电力负荷曲线。针对典型电力负荷场景,分析充电站和 BSS 协同满足规模化 EV 充电需求的影响。为了凸显本文所提能量交换方式协同方法(称为所提方法)的优势,分别选取了只考虑 V2G 充电(称为方法一)和只考虑换电方法(称为方法二)在仿真中进行与所提方法进行对比。本文算例在 2.20GHz CPU, 16GB 内存, 64 位操作系统的单台 PC 机上进行了测试。

4.1 仿真参数

充电 EV 数量以及可再生能源发电参数设置如图 3 所示。本文仿真过程电力价格参考了文献[22]

数据。

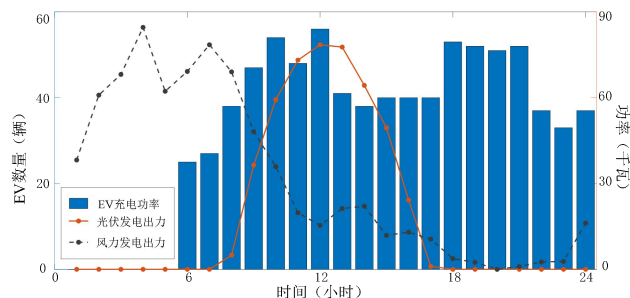


图 3 电动汽车数量、可再生能源发电情况图
Fig.3 The number of charging EVs and the output power of RPGs

其他仿真参数如表 1 所示,其中部分参数值参考了文献[23]数据。

表 1 仿真参数表

Tab.1 Simulation parameters table

参数名称	数值	参数名称	数值
T (小时)	24	P_{max} (千瓦)	70
Δt (小时)	1	P_{min} (小时)	0
t_0 (小时)	0	$SOC_{n,ini}$	0.4
N_{EV} (个)	100	$SOC_{n,obj}$	0.8
M_B (个)	100	Q_n (千瓦时)	70
N_{EV2} (个)	250	SOC_{max}	0.8
M_{B2} (个)	200	SOC_{min}	0.2
α_1 (美元/千瓦 ⁵)	0.2281×10^{-6}	$SOC_{m,obj}$	0.8
α_2 (美元/千瓦 ²)	0.8442×10^{-6}	$SOC_{m,ini}$	0.4
β_1	5	β_2	2

EV 停泊时间将考虑用户差异性,如(30)所示。

$$T_n - T_{ini,n} = 1 + t_{rand}, \quad t_{rand} \in \{1, 2, 3\} \quad (30)$$

式中, t_{rand} 表示为随机时间数。

在仿真过程中将会遇到充电时间跨越到第二天凌晨的情况。为了简化仿真过程,跨越到第二天凌晨的充电功率将直接叠加到当天凌晨。

4.2 仿真结果与分析

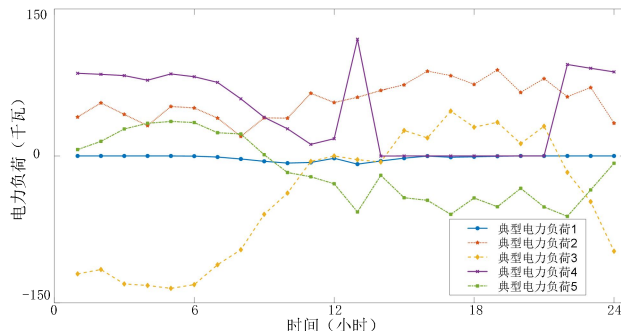


图 4 内蒙古地区典型电力负荷曲线

Fig.4 The typical load curves at the certain district of inner Mongolia

在本文聚类方法中, 根据肘部法则确定聚类中心点个数为 5, 每个中心点形成的电力负荷曲线本文称为典型电力负荷曲线, 如图 4 所示。

5 条曲线特征各异, 曲线 1 电力负荷只有在第 7~16 小时呈现发电状态, 且发电功率很低, 电力负荷整体极低; 曲线 2 电力负荷有 2 个高峰段, 分别出现在第 11 小时和 19 小时附近, 电力负荷整体呈现用电状态; 曲线 3 电力负荷在第 17 小时附近出现 1 个高峰段, 在第 01~11 小时和第 22~24 小时两个时间段呈现发电状态, 发电功率偏高, 其余时间段电力负荷不高; 曲线 4 在第 13 小时和第 22~07 小时两个时间段出现明显的电力负荷高峰, 这两个时间段电力负荷偏高, 在第 14~21 小时电力负荷几乎为 0; 曲线 5 在第 05 小时附近出现电力负荷高峰, 负荷较低, 而在第 10~24 小时时间段里则呈现发电状态。

本文所提能量交换方式协同方法与方法一、二, 在充电功率上的对比如图 5 所示。

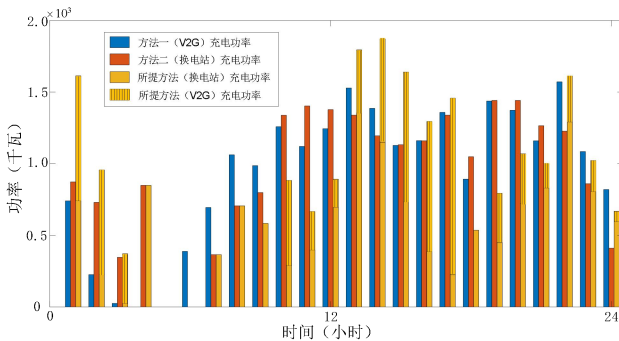
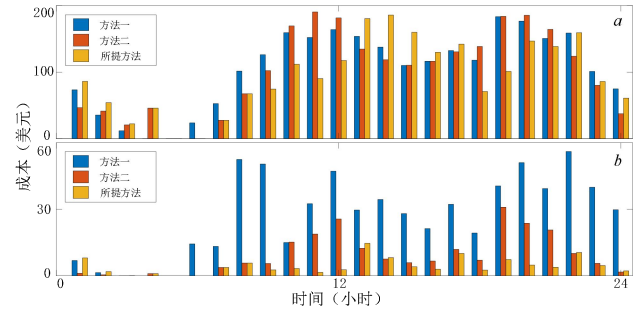


图 5 充电功率对比图

Fig.5 The charging power comparison among the three methods

图中显示, 方法一充电功率几乎都集中在电力价格高峰时间段。这是因为 EV 数量变化趋势和电力价格变化趋势相近, 因此大量充电负荷集中在 EV 达到充电站之后的时间段。方法二相对于方法一, 在电力价格低谷时间段 (如第 01~05 小时等), 充电功率更高, 在电力价格高峰时间段 (如第 09 小时等), 充电功率更低, 但是在部分电力负荷高峰时间段 (如第 10~12 小时), 充电功率更高。这是因为, 方法二的换电方式, 是电池在 BSS 充电后与 EV 交换电池, 柔性充电时间相对更长, 因此分别在电力负荷高峰时间段和低谷时间段充电功率比方

法一的功率更低和更高。然而随着充电 EV 持续在 BSS 内进行能量交换, 方法二中 BSS 内达到期望 SOC 值的电池数量不够, 并且柔性充电时间有限, 因此不得不采取电力负荷高峰时间段充电甚至快充的方式, 导致充电功率过高。与方法一和二相比, 本文所提方法在电力价格高峰时间段, 充电功率最低, 在电力价格低谷时间段, 充电功率最高。这是因为所提方法将充电考虑用户停车时间和 BS 方式柔性充电时间长的特点结合, 根据用户停车时间和成本匹配充电模式。

图 6 (a) 电力成本, 和 (b) 电池损耗成本对比图
Fig.6 (a) power cost and (b) battery degradation cost, comparison among the three methods

三个方法的电力成本和电池损耗成本如图 6 所示, 方法一、二和本文所提方法的电力成本与充电功率分析的类似。方法一的电池损耗成本最高且比其他两个方法明显高很多。这是因为部分 EV 受停车时间短的限制被迫选择快充模式满足用户驾驶需求, 导致高电池损耗成本。方法二的电池损耗成本则明显低于方法一, 但是在部分时间段则高于方法一。这是因为 BS 方式相对于 EV 充电有较多的柔性充电时间, 因此在 EV 数量合适时, BS 站内电池慢充, 产生的电池损耗成本较少。但是在 EV 数量连续增多时, BSS 内达到期望 SOC 值的电池数量受限。为满足用户驾驶需求, BSS 内部分电池被迫进入快充模式, 产生了较高的损耗成本。与方法一、二相比, 本文所提方法的电池损耗成本最低。这是因为所提方法在 EV 与充电模式匹配过程中考虑了 EV 停留时间, 对停泊时间充足且成本较低的 EV 匹配充电模式, 否则匹配 BS 模式。值得注意的是, 本文所提方法部分时间段的电力成本和电池损耗成本仍然出现了高峰值, 这是因为受充电站车位数量和 BS 站内电池数量的约束, 部分 EV 或者电池充电功率较高。

三个方法总成本对比如表 2 所示。同图 5 和图

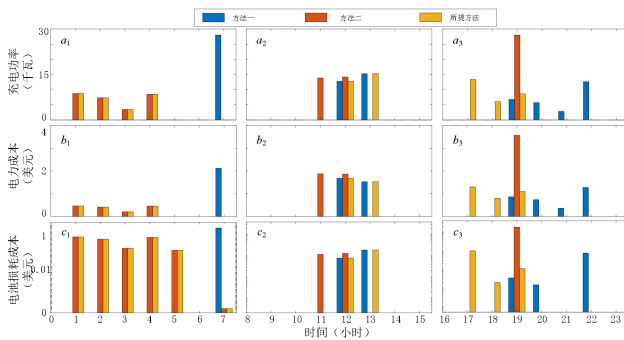
6 分析相同, 方法一在电力成本、电池损耗成本、总成本上面都是最高。方法二的成本均有所降低, 电力成本降低相对不明显是因为受 BSS 内电池数量限制, 导致部分电力价格高峰时间段采取快充。因为通过协同 EV 充电和 BS 方式, 有效满足了用户停车时间差异、电力价格变化下的 EV 充电需求, 本文所提方法的成本是最低的。

表 2 三种方法成本对比表

Tab.2 Cost comparison among the three methods

	电力成本 ($\times 10^3$ 美元)	电池损耗成本 ($\times 10^3$ 美元)	总成本 ($\times 10^3$ 美元)
方法一	2.5148	0.6550	3.1699
方法二	2.4186	0.2217	2.6403
所提方法	2.2605	0.1069	2.3674

本文随机抽取了 3 辆 EV, 并且在三种方法下的充电功率、成本进行了对比。3 辆 EV 信息如表 3 所示, 充电功率、成本对比如图 6 所示。



- (a_1) EV1 充电功率, (b_1) EV1 电力成本, 和 (c_1) EV1 电池损耗成本;
 (a_2) EV2 充电功率, (b_2) EV2 电力成本, 和 (c_2) EV2 电池损耗成本;
 (a_3) EV3 充电功率, (b_3) EV3 电力成本, 和 (c_3) EV3 电池损耗成本

图 7 个体 EV 成本对比图

Fig.7 The individual EV cost comparison among the three methods

如图 7 所示, 由于 EV1 停车充电时间只有 1 个小时, 因此方法一的充电功率集中在第 7 个时间段, 导致最高的电力成本和电池损耗成本。由于在第 01~07 小时时间段有充足的柔性充电时间, 方法二中 BSS 内电池根据电力价格和电池损耗进行柔性充电, 产生了较少的电力成本和电池损耗成本。本文所提方法考虑到 EV1 停留时间过短, 同时 BSS 内电池柔性充电时间充足, 因此也匹配了 BS 方式。对于 EV2, 三个方法差异微弱。这是因为经历过一

段时间持续为 EV 提供电力, BSS 内期望 SOC 值的电池数量不足, 因此 BS 方式柔性充电时间长的优势这个时候已经不存在了。同时 EV2 停车充电时间有 2 个小时和电力价格这段时间浮动不大, 因此三个方法的充电功率和成本虽然分布存在差异, 但是差异很微弱。对于 EV3, 停车充电时间有 4 个小时。方法二由于受到 BSS 内期望 SOC 值的电池数量不足, 导致电池快充, 产生了最高的电力成本和电池损耗成本。方法一由于受到 EV3 停车充电时间的影响, 反而存在柔性充电时间相对充足的优势, 因此电力成本和电池损耗成本相对于方法二明显降低。本文所提方法由于之前通过协调 EV 充电和 BS 方式, 前往 BSS 换电池的 EV 数量相对于方法二不多, 此时 BSS 内电池有相对充足的柔性充电时间, 因此电力成本和电池损耗成本相对方法一略低。

随机抽取的 3 辆个体 EV 在能量交换过程中的成本情况如表 4 所示。

表 3 随机抽取个体 EV 信息表

Tab.3 The information of chosen individual EV

	停车初始时间 (时)	停车时长 (小时)
EV1	7:00	1
EV2	12:00	2
EV3	19:00	4

表 4 随机抽取个体 EV 成本对比表

Tab.4 The individual EV cost comparison among the three methods

		电力成本 (美元)	电池损耗 成本 (美元)	总成本 (美元)
EV1	方法一	2.1252	3.9270	6.0522
	方法二	1.5485	0.0267	1.5752
	所提方法	1.5485	0.0267	1.5752
EV2	方法一	3.2150	0.2649	3.4799
	方法二	3.7444	0.2458	3.9902
	所提方法	3.2150	0.2649	3.4799
EV3	方法一	3.2492	0.0780	3.3272
	方法二	3.5700	3.9263	7.4963
	所提方法	3.1981	0.1093	3.3074

针对之前仿真聚类的 5 种内蒙古某地区典型电力负荷曲线, 本文分别叠加方法一、方法二和所提方法的电力负荷后, 用峰谷差、平均负荷、方差和可再生能源消纳的指标来评价叠加后电力负荷曲线情况。

表 5 充电负荷叠加典型电力负荷 1 曲线表
Tab.5 The charging load superimposed the typical load curve 1

	峰谷差 ($\times 10^3 \text{kW}$)	平均负荷 ($\times 10^3 \text{kW}$)	方差 ($\times 10^3 \text{kW}^2$)	风光出力 消纳 ($\times 10^3 \text{kW}$)
无叠加	0.0084	-0.0019	0.0026	0
方法一	1.5716	0.9420	0.4771	0.005
方法二	1.4422	0.9420	0.4370	0.004
所提方法	1.8663	0.9420	0.5136	0.004

表 6 充电负荷叠加典型电力负荷 2 曲线表
Tab.6 The charging load superimposed the typical load curve 2

	峰谷差 ($\times 10^3 \text{kW}$)	平均负荷 ($\times 10^3 \text{kW}$)	方差 ($\times 10^3 \text{kW}^2$)	风光出力 消纳 ($\times 10^3 \text{kW}$)
无叠加	0.0678	0.0565	0.0183	0
方法一	1.6010	1.0004	0.4874	0
方法二	1.4807	1.0004	0.4484	0
所提方法	1.8891	1.0004	0.5214	0

表 7 充电负荷叠加典型电力负荷 3 曲线表
Tab.7 The charging load superimposed the typical load curve 3

	峰谷差 ($\times 10^3 \text{kW}$)	平均负荷 ($\times 10^3 \text{kW}$)	方差 ($\times 10^3 \text{kW}^2$)	风光出力 消纳 ($\times 10^3 \text{kW}$)
无叠加	0.1810	-0.0437	0.0635	0
方法一	1.6115	0.9001	0.5316	0.8734
方法二	1.6901	0.9001	0.4929	0.9797
所提方法	2.0003	0.9001	0.5505	0.9797

表 8 充电负荷叠加典型电力负荷 4 曲线表
Tab.8 The charging load superimposed the typical load curve 4

	峰谷差 ($\times 10^3 \text{kW}$)	平均负荷 ($\times 10^3 \text{kW}$)	方差 ($\times 10^3 \text{kW}^2$)	风光出力 消纳 ($\times 10^3 \text{kW}$)
无叠加	0.1193	0.0462	0.0404	0
方法一	1.5877	0.9901	0.4610	0
方法二	1.3772	0.9901	0.4151	0
所提方法	1.8333	0.9901	0.5082	0

表 9 充电负荷叠加典型电力负荷 5 曲线表
Tab.9 The charging load superimposed the typical load curve 5

	峰谷差 ($\times 10^3 \text{kW}$)	平均负荷 ($\times 10^3 \text{kW}$)	方差 ($\times 10^3 \text{kW}^2$)	风光出力 消纳 ($\times 10^3 \text{kW}$)
无叠加	0.0969	-0.0157	0.0328	0

方法一	1.4767	0.9282	0.4508	0.5748
方法二	1.3749	0.9282	0.4118	0.5748
所提方法	1.8173	0.9282	0.4940	0.5748

由表可知，3 种方法都显著提高了 5 种典型电力负荷曲线的负荷等级，同时带来了不稳定扰动。对于曲线 1，由于原曲线整体负荷极低，因此叠加后负荷情况主要依据所叠加负荷。方法一的充电负荷受 EV 停泊时间限制，相对于方法二的充电负荷峰谷差、负荷波动情况更明显。对于曲线 2，原有曲线虽然存在一定的负荷波动，但是本文仿真所考虑 EV 数量相对偏多，因此叠加后的负荷情况同曲线 1 类型，取决于所叠加负荷。对于曲线 3，在部分时间段电源富余，被方法二的充电负荷消纳，因此在平均负荷方法二的最低。但是曲线 3 的电力负荷高峰与方法二的充电负荷高峰时间段有重叠，同时方法一的充电高峰消纳了原有曲线的发电功率，因此在峰谷差指标上，叠加方法一负荷的曲线最优。对于曲线 4，电力负荷高峰时间段与方法一充电负荷高峰时间段重叠，导致了叠加方法一负荷的电力曲线指标更优。对于曲线 5，方法一、二的负荷高峰、低谷时间段分别与原曲线负荷的低谷、高峰时间段重叠，因此原有曲线的富余电源被消纳，叠加后的负荷情况取决于所叠加曲线情况。在表中，各曲线叠加本文所提方法充电负荷之后，曲线负荷情况最差。这是因为：（1）本文仿真中充电 EV 数量设置较高，导致整体充电负荷过高；（2）所建立优化模型，系统信号只考虑了电力价格，导致在电价低谷段反而形成了所提方法的充电负荷高峰；（3）BSS 站电池数量和充电桩数量相对有限，加剧了充电负荷峰谷差。

5 结论

本文基于内蒙古某地区电力负荷数据，通过聚类分析得出该地区 5 种典型电力负荷曲线。同时考虑 EV 充电和 BS 特点，提出了分层能量交换方法。通过 EV 充电和 BS 方式的协同，避免了充电负荷集中于电力负荷高峰时间段，满足了用户经济需求和充电需求。当 EV 停泊时间充足时充电优势更为明显，否则 BS 方式补充 EV 电池电力更为合适。最后将 EV 充电负荷叠加在典型电力负荷曲线进行了分析。根据分析结果为内蒙古地区大规模 EV 充电提供以下建议：

(1) 针对所在区域充电 EV 用户特点, 考虑不同充电方式协同, 对充电 EV 和充电方式进行匹配, 同时对充电方案进行优化。根据充电站运行情况、充电 EV 数量变化等因素, 适当提高充电站容量, 确保能够持续、经济地满足用户需求。

(2) 在充电方案优化过程中, 考虑所在区域电力负荷情况, 同时将电网电价、充电站充电负荷对所在区域电力负荷影响作为影响因素, 构建各充电站充电负荷引导激励机制。

(3) 考虑交通网-配电网耦合作用, 通过交通网分流作用, 避免部分充电站过载运行。

(4) 鼓励部分用户在 EV 电池 SOC 较高时充电, 避免充电站充电负荷高峰叠加所在区域电力负荷高峰。

参考文献

- [1] 李高俊杰, 杨军, 朱旭, 等. 计及电动汽车用户响应特性的充电站实时电能共享机制[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12): 56-66.
LI Gaojunjie, YANG Jun, ZHU Xu, et al. Real-time Energy Sharing Mechanism of Charging Stations Considering User Response Characteristics of Electric Vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 56-66.
- [2] CAO Y, ZHOU B, CHUNG CY, et al. Dynamic modelling and mutual coordination of electricity and watershed networks for spatio-temporal operational flexibility enhancement under rainy climates[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(5): 3450-3464.
- [3] LIU X, HAN W, LIU Y, et al. A Coordinated Voltage-Frequency Support Method for VSC-MTDC Integrated Offshore Wind Farms System[J]. IEEE Transactions on Power Systems. Early Access.
- [4] ZENG L, CHEN S, ZHONG C, et al. Hierarchical Transactive Power Exchange Method on Expressways for EVs Energy Supplement[J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 11:1213883.
- [5] ZENG L, LI C, LI Z, et al. Hierarchical dispatching method based on Hungarian algorithm for reducing the battery degradation cost of EVs participating in frequency regulation[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2020, 14(23): 5617-5625.
- [6] 吴翠玉, 张美霞, 陈海燕, 等. 国内外电动汽车扶持政策比较与分析[J]. 上海电力学院学报, 2016, 32(2): 188-192.
- WU Cuiyu, ZHANG Meixia, CHEN Haiyan, et al. Comparative Analysis of Supportive Policies for Electric Vehicles at Home and Abroad[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2016, 32(2): 188-192.
- [7] 蒋菱, 王旭东, 庄剑, 等. 智能电网高适应性发展建设模式与政策建议[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(S1): 120-125.
JIANG Ling, WANG Xudong, ZHUANG Jian, et al. Policy Recommendations & Development Construction Mode of High Adaptability of Smart Grid[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2015, 27(S1): 120-125.
- [8] 杨天宇, 郭庆来, 盛裕杰, 等. 系统互联视角下的城域电力-交通融合网络协同[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 1-9.
YANG Tianyu, GUO Qinglai, SHENG Yujie, et al. Coordination of Urban Integrated Electric Power and Traffic Network from Perspective of System Interconnection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 1-9.
- [9] ZHOU T, SUN W. Research on multi-objective optimisation coordination for large-scale V2G[J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(3): 445-453.
- [10] 王岩庆, 王骁, 丛若晨, 等. 考虑配电网运行安全的出行电动汽车充电引导策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 2131-2139.
WANG Yanqing, WANG xiao, CONG ruochen, et al. Charging Guidance Strategy of Traveling Electric Vehicle Considering the Operation Safety of Distribution Network[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 2131-2139.
- [11] 朱磊, 黄河, 高松. 计及风电消纳的电动汽车负荷优化配置研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(S1): 194-203.
ZHU Lei, HUANG He, GAO Song, et al. Research on Optimal Load Allocation of Electric Vehicle Considering Wind Power Consumption[J]. Proceeding of the CSEE, 2021, 41(S1): 194-203.
- [12] 姚丽娟, 蔡瑞天, 钱江, 等. 面向低碳园区供需平衡的混杂负荷系统聚合和控制模型构建[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3153-3166.
YAO Lijuan, CAI Ruitian, QIAN Jiang, et al. Aggregation and Control Model Construction of Hybrid Load System for Supply and Demand Balance in Low-carbon Zone[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3153-3166.
- [13] 贾士铎, 康小宁, 黑皓杰, 等. 基于 V2G 负荷反馈修正的电热氢综合能源系统多层协调优化调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(15): 100-110.

- JIA Shiduo, KANG Xiaoning, HEI Haojie, et al. Multi-layer Coordinated Optimal Dispatch of Electric-Thermal-Hydrogen Integrated Energy System Based on V2G Load Feedback Correction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15): 100-110.
- [14] JOZI F, ABDALI A, MAZLUMI K, et al. Reliability Improvement of the Smart Distribution Grid Incorporating EVs and BESS via Optimal Charging and Discharging Process Scheduling[J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10: 920343.
- [15] LI D, ZHANG L, ZHANG Z, et al. Battery safety issue detection in real-world electric vehicles by integrated modeling and voltage abnormality[J]. Energy, 2023, 284: 128438.
- [16] 孙欣, 江海林, 谢敬东, 等. 基于用户信用指数的园区电动汽车充放电调度机制[J]. 上海交通大学学报. (网络版) SUN Xin, JIANG Hailin, XIE Jingdong, et al. Charging and Discharging Scheduling Mechanism of Electric Vehicles in Park Based on User Credit Index[J]. Journal of Shanghai jiaotong University.
- [17] GUO D, ZHOU C. Potential Performance Analysis and Future Trend Prediction of Electric Vehicle with V2G/V2H/V2B Capability[J]. AIMS Energy, 2016, 4(2): 331-346.
- [18] BERGE-DIEZ D, ICAZA D, Açıkkalp E, et al. Combined Vehicle to Building (V2B) and Vehicle to Home (V2H) Dstrategy to Increase Electric Vehicle Market Share[J]. Energy, 2021, 237: 121608.
- [19] LI S, ZHAO P, GU C, et al. Aging Mitigation for Battery Energy Storage System in Electric Vehicles[J]. IEEE Transactions on smart grid, 2023, 13(3): 2152-2163.
- [20] 崔杨, 李翼成, 付小标, 等. 基于换电服务定价策略及动态调控方法的含充换电站微电网系统双层优化调度[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1998-2011.
- CUI Yang, LI Yicheng, FU Xiaobiao, et al. Double-layer Optimal Scheduling of Micro-grid System with Charging and Swapping Stations Based on Battery Swap Service Pricing Strategy and Dynamic Regulation[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1998-2011.
- [21] ZENG L, LI C, LI Z, et al. Hierarchical Bipartite Graph Matching Method for Transactive V2V Power Exchange in Distribution Power System[J]. IEEE Transactions on smart grid, 2021, 12(1): 301-311.
- [22] ZENG L, CHEN S, TANG Z, et al. An Electric Vehicle Charging Method Considering Multiple Power Exchange Modes' Coordination[J]. Sustainability, 2023, 15: 10520.
- [23] DATTA U, SAIPRASAD N, KALAM A, et al. A Price-Regulated Electric Vehicle Charge-Discharge Strategy for G2V, V2H, and V2G[J]. International journal of energy research. 2019, 43: 1032-1042.