

基于单向调节算法及 V2G 技术的电动汽车优化调度

肖小龙¹, 欧朱建², 苏伟¹, 郭佳豪¹, 黄冬冬²

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 210000;

2. 国网江苏省电力有限公司南通供电分公司, 江苏 南通 226000)

摘要: 电动汽车 (electric vehicles, EV) 通过 V2G (vehicle-to-grid, V2G) 技术为公共电网提供有价值的配套服务。为了充分利用 V2G 服务, EV 聚合商需要根据市场规则来优化调度大规模 EV 负荷。常规的增量调度方法存在充电站和通信成本高的弊端, 本文提出了用于执行单向调节的 EV 调度算法, 使用远程开关开启和关闭 EV 充电站, 以满足系统负荷调节需求。采用设置充放电优先级来决定 EV 的切换策略, 该算法所需的基础设施成本和通信信号显著减少。对 ERCOT 系统中一组 1 000 辆 EV 的实时调度仿真, 验证了该算法相对于增量调度具备更优的性能。

关键词: 电动汽车; V2G; 增量调度; 单向调节; 优先级; 优化调度

中图分类号: TP18; TM732

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)01-0152-05

Optimal dispatching of electric vehicle based on unidirectional regulation algorithm and V2G

XIAO Xiaolong¹, OU Zhujian², SU Wei¹, GUO Jiahao¹, HUANG Dongdong²

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, Jiangsu, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nantong Power Supply Branch, Nantong 226000, Jiangsu, China)

Abstract: Electric vehicles (EV) provides valuable supporting services for public power grid through V2G technology. In order to make full use of V2G services, EV aggregators need to optimize and dispatch large-scale EV loads according to market rules. The conventional incremental dispatching method has the disadvantages of high charging station and communication costs. The paper proposes an EV scheduling algorithm for unidirectional regulation, which uses remote switches to open and close EV charging stations to meet the system load regulation requirements. The switching strategy of EV is determined by setting the charge and discharge priority. The infrastructure cost and communication signal required by the algorithm are significantly reduced. The real-time scheduling simulation of a group of 1 000 EV in ERCOT system verifies that the algorithm has better performance than incremental dispatching.

Keywords: electric vehicle; V2G; incremental dispatching; unidirectional regulation; priority; optimal dispatching

作为电能替代和出行代步的重要方式, EV 在近几年发展迅速。其充电负荷随机性强、分散性广但又存在一定的规律性, 可成为电网负荷调节的重要资源^[1]。V2G 技术可通过 EV 与电网双向能量传输, 从 EV 向电网提供能源和辅助服务, 如调峰^[2]、频率调节^[3]、旋转和非旋转备用, 有效提升供电可靠性和潮流均衡^[4-6]。

由于单辆 EV 没有足够的容量参与电网能源调度, 大量电动汽车充放电又是无序的, 因此需要电动汽车聚合商 (electric vehicle aggregator, EVA) 作为电力市场和 EV 用户之间的中间代理机构^[7-9], 将众多 EV 聚合成一个利益主体参与市场交易。EVA 从电网购电为某一区域内的

EV 车主提供服务, 并从中收取相应费用作为回报。EVA 可以响应实时电价, 合理调整集群 EV 充电行为, 调节电网负荷波动, 以减少自身购电开销^[10-12]。

近年来, 国内外学者从 EVA 的角度对 V2G 调度优化进行了大量研究, 文献[13]提出了 EVA 参与能量市场和备用市场的随机优化模型, 考虑了充电行为和调频信号的不确定性。文献[14]提出了考虑电网需求匹配度的需求响应机制, 基于粒子群算法对电网公司和 EVA 决策进行优化。文献[15]基于寡头竞争的博弈均衡理论, 建立了 EVA 参与下的能量和调频市场多时段均衡模型。文献[16]构建了 EV 参与削峰填谷的市场机制及响应的补偿

收稿日期: 2024-06-08; 录用日期: 2024-06-17

基金项目: 国网江苏省电力有限公司科技项目 (J2021010)

作者简介: 肖小龙 (1990—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 配网智能运检、直流配电技术。

通信作者: 欧朱建 (1989—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 配电自动化及多电平变换技术。

引用本文: 肖小龙, 欧朱建, 苏伟, 等. 基于单向调节算法及 V2G 技术的电动汽车优化调度[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(1): 152-156. (XIAO Xiaolong, OU Zhujian, SU Wei, et al. Optimal dispatching of electric vehicle based on unidirectional regulation algorithm and V2G[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(1): 152-156.)

机制,建立了计及市场电价不确定性的聚合商多目标区间调度模型。文献[17]提出了一种基于充电功率增量的EV负荷调度算法,但存在充电站和通讯成本高的缺点。

本文为参与V2G调节的EV开发了一种简化调度方法,通过在聚合的EV组内以二进制方式打开或关闭某些EV来匹配调度信号。简化基础设施要求,在调度中只需要向改变充电状态的EV发送信号,而不是整个组,从而减少了通信需求。算法还考虑了EV的充电需求,保证其可获得增量调度方法同样的电量。在ERCOT系统上进行的算例仿真表明,所提方法性能与增量调度方法相当,同时减少了发送的通信信号总量。

1 EVA 区域控制与自动发电控制

每个EVA的控制区域均需要能够调节发电量,以满足负荷需求的实时变化。同时需要满足以下要求。

1) 频率响应。达到一定规模的所有电源必须具备有由于负载爬坡和发电机跳闸导致的频率偏差的能力。例如,调速器通常提供5%的滞后响应并且应该对预先指定频率之外的频率偏差作出响应。

2) 区域控制误差。表示将频率和净交换功率恢复到期望值所需的发电量变化,如下式所示。

$$CE = -B\Delta f - \Delta P_{net} \quad (1)$$

式中,CE为区域控制误差(MW),B为控制区域内频率响应的偏差调节系数, Δf 为频率偏差(Hz), ΔP_{net} 为交换值与控制值的偏差(MW)。

3) 自动发电控制(automatic generation control, AGC)。AGC通常安装在中央位置,作为在控制区域内利用发电装置将CE调整为零的一种方式。控制逻辑为将整体的CE及单个机组发电偏差调整至零,AGC计算产生的设定值通常2~6s发布一次。

2 EV 优化调度算法

2.1 EV 优化调度算法实现方法

单个电动汽车可以通过在系统中安排的优选操作点周围改变其充电率来自行调节。

优选操作点是指在提供电网调节服务时,EV充放电过程中的设定值。优选操作点代表了电动车电池在特定时间内应维持的平均电力水平,围绕这一点,电动车可以根据电网的需求增加或减少电力输出,以帮助稳定电网运行。

首选操作点的设定允许电动车在不影响其电池寿命和性能的前提下,有效地参与电网的调节服务。通过智能充电策略,比如基于电价和电网负载的充电调整,可以优化电动车的充电时间和电量,从而达到节能减排和经济效益最大化。

首选操作点的计算涉及复杂的优化模型,模型需要考虑电网的需求、电价变动、电动车的使用习惯及其电池状

态等多种因素。这样的策略有助于提升整个电网的经济性和可靠性,同时也保护了电动车用户的利益。本文的优选操作点的选择参考文献[17]。

在向市场投标监管时,EVA可以通过将电动汽车的各个优选操作点组合为其优选操作点来实现统一管理一组电动汽车。电动汽车聚合商向充电站发送信号,使其远程调节告诉电动汽车可能的最大充电速率的先导信号,从而完成EV功率控制。此时,EV的充电速率就会随着调节信号的变化而增加或减少,就无须在电动汽车本身装设额外的硬件。但这种调度方式的一个问题是,能够接收远程信号并调整其控制功率的智能充电站比常规固定导频信号控制模型更昂贵。另外,必须向每个新的增量EV发送调度信号,此时通信成本变得很高。

围绕EVA的优选操作点对每个EV进行二进制切换,将优选操作点添加到由系统操作员接收到的调节信号中,可以实现上述功率控制。满足该能量水平所需的EV数量根据其开启时的功率消耗来确定。算法逻辑会根据改小时的功率需求来决定需要打开哪些电动汽车,然后将调度信号发送到正在改变状态的EV中实现控制。

2.2 EV 优化调度算法流程

EV优化调度算法流程如图1所示。

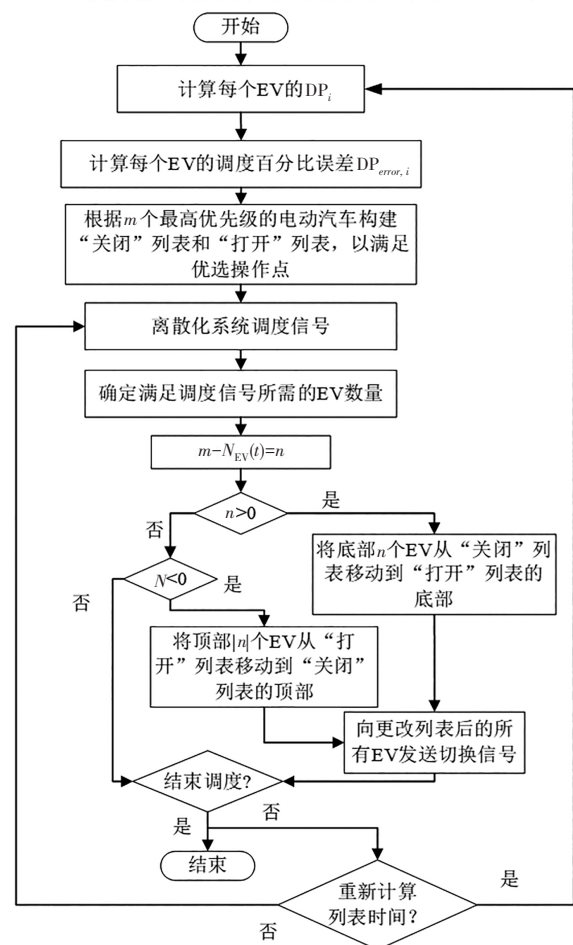


图1 单向调节的EV调度流程图

Fig. 1 Flowchart of EV scheduling with unidirectional regulation

第一步确定每辆电动汽车的调度百分比,用于计算调度优先级。优先级由调度算法给出的接收电能的期望值确定。基于EV的可利用性、调用历史、客户约束、电池SOC以及系统能源和辅助服务价格,确定EV的实时可投入市场的调节容量,据此计算在调度周期内接收的电能期望值^[18]。在 t 时段接收的电能期望值计算公式为

$$P_{ex,i}(t) = P_{opt,i}(t) - C_{up,i}(t)EX_{up,i} + C_{down,i}(t)EX_{down,i} \quad (2)$$

式中, $P_{ex,i}(t)$ 为第 i 辆EV在 t 时段接收能量的期望值, $P_{opt,i}(t)$ 为第 i 辆EV在 t 时段的优选操作点功率, $C_{up,i}(t), C_{down,i}(t)$ 分别为第 i 辆EV在 t 时段向上/向下调节的功率总量, $EX_{up,i}, EX_{down,i}$ 分别为第 i 辆EV在 t 时段向上/向下调节的期望比例。 $EX_{up,i}, EX_{down,i}$ 的值可使用一小时内调度容量的平均历史百分比的历史数据计算得出。

第二步使用接收到的能量期望值,基于调度百分比及其误差给出每个EV的优先级,即

$$\left\{ \begin{aligned} DP_i &= \frac{P_{opt,i}(t)}{\sum_{i=1}^{N_{EV}} P_{opt,i}(t)} \\ DP_{error,i} &= \frac{\left(DP_i - \frac{\sum_{i=1}^T EVDP_i(t)}{\sum_{i=1}^{N_{EV}} \sum_{i=1}^T EVDP_i(t)} \right)}{DP_i} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中, N_{EV} 为EV总量, T 为时段总数, DP_i 为第 i 辆EV要满足EVA调度总量时的百分比, $DP_{error,i}$ 为第 i 辆EV的调度百分比误差, $EVDP_i(t)$ 为 t 时段内第 i 辆EV的实时调度百分比。

第三步根据EV优先级分为“开启”和“关闭”两个列表,以减少EV在充电时的快速切换。“关闭”列表是满足优选操作点所需的EV,因此可以关闭。它由具有最高调度优先级的EV按降序排列。其余可开启的EV按降序分配到“开启”列表中。

第四步将从系统接收的调度信号离散化为可通过切换单个EV来满足的功率增量。接着要根据系统操作员给出的信号确定所需的功率值以及EV数量,为

$$\left\{ \begin{aligned} P_d(t) &= P_{opt,i}(t) + P_{op}(t) \\ N_{EV}(t) &= \frac{P_d(t)}{P_{EV}} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

式中, $P_{op}(t)$ 是 t 时段系统操作员给出的信号确定所需的功率值, $N_{EV}(t)$ 是满足功率需求的EV数量, P_{EV} 是EV充电时的功率消耗。

第五步确定需要充电的EV,并将其与“关闭”列表上的EV进行比较。如果所需的EV总数小于“关闭”列表中的数字 n ,则列表底部的 n 辆EV将移至“打开”列表的底部。反之,则“打开”列表中的前 n 辆EV将移至“关闭”清单的顶部。在完成一定数量的调度之后,将重新计算优先级,并根据新的优先级重新组合列表。在调度周期结束

时,重新计算的V2G容量。

3 离散调节调度误差分析

本文算法的一个关键方面是,它将系统调节信号离散为单个电动汽车切换可以满足的增量。这可能会在EVA对信号的响应中产生误差^[19-20]。对于总体数量较少的电动汽车聚合商,如图2所示,该误差比较大。

图2对比了100辆使用7kW充电桩的电动汽车使用离散调节信号与连续信号相比较。

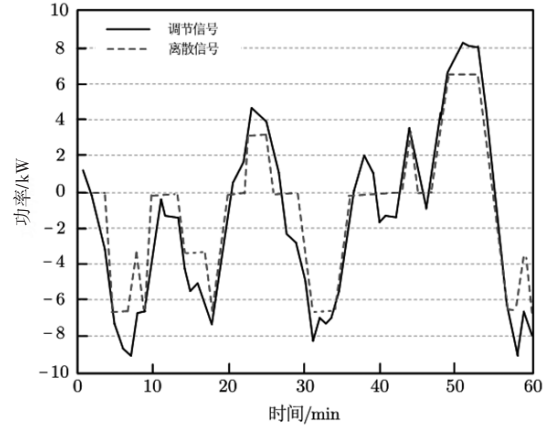


图2 100辆电动汽车的离散调节信号与连续信号对比图

Fig. 2 Comparison between discrete regulation signals and continuous signals for 100 EVs

但随着参与测试电动汽车总体数量的增加,误差会减小。图3显示了ERCOT系统3个月期间离散调节信号的平均绝对百分比误差减小情况。

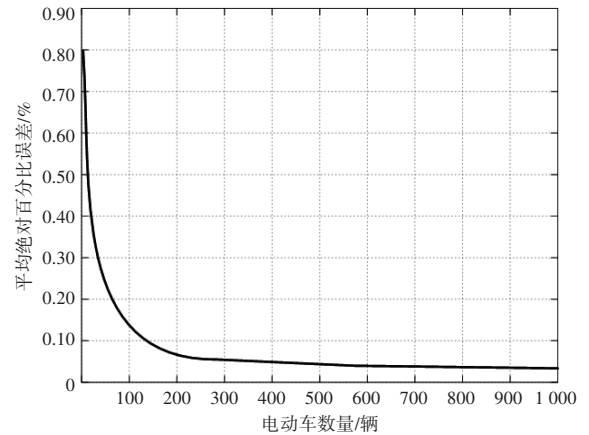


图3 离散信号与调节信号的平均绝对百分比误差

Fig. 3 Mean absolute percentage error (MAPE) between discrete signals and regulation signals

该图显示,100辆电动汽车的平均绝对百分比误差小于10%,1000辆电动汽车的平均绝对百分比误差小于2%。对于规则调度来说,这样的小误差通常是可以接受的。

4 算例仿真

4.1 算例描述

为验证算法有效性,在ERCOT系统上模拟了24小时

的仿真调度。为了进行算法性能比较,假设 EV 均使用 5.6 kW 充电桩进行充电,并使用连续调度方法来模拟 EV 车队序列。系统电价、预测价格和 EV 运行参数详见于文献[11]。根据 ERCOT 五分钟调度数据,以 6 秒的分辨率生成调度信号。使用 OptMaxReg 算法来调度日内 EV 的 V2G 容量和实时充电功率,并根据每 6 秒 EV 的功率消耗来进行增量调整。然后模拟单独调度和聚合调度两种情况,每 6 秒以及每 30 秒重新计算一次列表,并保存 EV 的 SOC 状态,对连续和离散两种情况进行比较。

4.2 仿真分析

由于调度的功率分辨率为 5.6 kW,因此系统调节信号和 EVA 响应之间的误差不会超过该值。当仅考虑接收到的 EVA 调节信号大于 5.6 kW 阈值时的情况,EVA 对信号响应的平均绝对百分比误差为 3.1%,92%的调节信号被发送到该水平以上,这在预期误差范围内。

对于单个 EV 的离散调度算法性能可通过使用增量调度实现的 SOC 偏差来衡量。SOC 偏差通过下式计算公式为

$$Er_i(t) = SOC_{incr}(t) - SOC_{dis}(t) \quad (5)$$

式中, $Er_i(t)$ 为 t 时段内第 i 辆 EV 的 SOC 偏差, $SOC_{incr}(t)$, $SOC_{dis}(t)$ 分别为增量调度和离散调度下 t 时段内第 i 辆 EV 的 SOC。

图 4 为增量调度和离散调度之间的平均 SOC 偏差,在每 6 秒和每 30 秒重新计算一次列表的情况下,每小时结束时 EV 的平均偏差是相同的。可以看出,离散调度下将 SOC 保持在平均 28.5 Wh 以内,这对 EV 所有者来说是不明显的。每 6 秒重新计算列表情况下,每小时结束时所有 EV 的误差标准偏差和最大误差如图 5 所示。可以看出,标准偏差始终小于 105 Wh。在任何时候,至少 99.3% 的 EV 在增量调度的 300 Wh 内。在这种情况下,只有 5 辆 EV 的 SOC 误差大于 0.45 kWh,只有 2 辆 EV 大于 0.95 kWh。这些结果是由于每 6 秒重新计算一次列表时,总是在每个新信号处调度具有最高优先级的 EV,并忽略了列表。出现个别辆电动汽车大误差的原因主要是没有根据过去的调度周期调整优先级,导致误差会随时间累积。

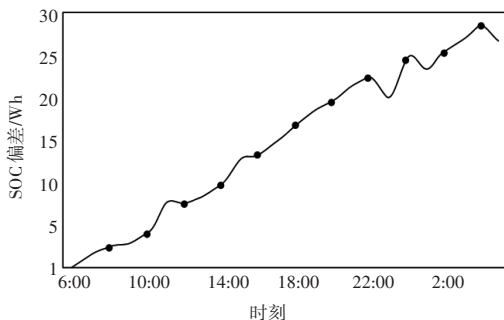


图 4 增量调度和离散调度之间的平均 SOC 偏差
Fig. 4 Average SOC deviation between incremental scheduling and discrete scheduling

在每 30 秒列表重新计算的情况下,聚合器使用“打开”列表和“关闭”列表来进一步减少需要发送的信号数量,以及切换 EV 充电状态的可能性。在这种情况下,在每 5 次调度后,重新计算优先级。如图 6 所示,这使得单个 EV 之间积累了更多的误差。然而,标准偏差仍然小于 265 Wh,并且始终有至少 96.2%EV 的 SOC 误差小于 300 Wh。SOC 误差大于 0.45 kWh 和 0.90 kWh 的 EV 数量比每 6 秒重新计算的列表更为显著,如图 7 所示。

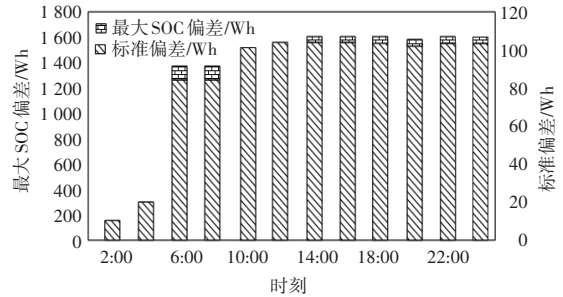


图 5 6 秒更新列表情况下的标准偏差和最大 SOC 偏差
Fig. 5 Standard deviation and maximum SOC deviation under the 6-second list update scenario

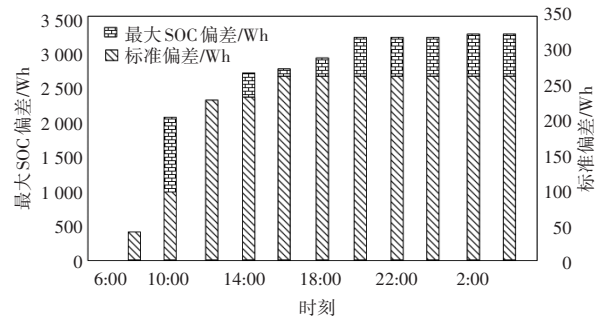


图 6 30 秒更新列表情况下的标准偏差和最大 SOC 偏差
Fig. 6 Standard deviation and maximum SOC deviation under the 30-second list update scenario

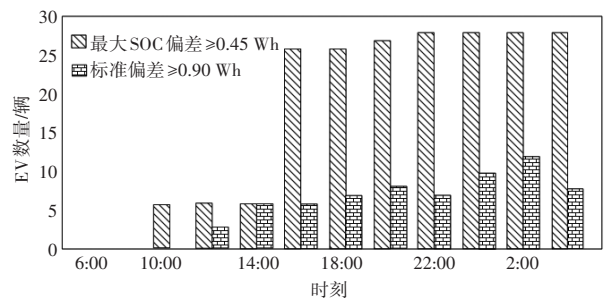


图 7 30 秒更新列表情况下的 SOC 偏差大于 0.45 kWh 和 0.90 kWh 的 EV 数量
Fig. 7 Number of EVs with SOC deviation greater than 0.45 kWh and 0.90 kWh under the 30-second list update scenario

使用离散调度算法会显著减少信号需求量,如表 1 所示,6 秒更新列表的情况下所需信号总量仅为增量调度的 27.6%,每辆 EV 每小时接收信号量仅为增量调度的 30.2%。30 秒更新列表的情况下,所需发送信号的数量

减少了94.0%。

表1 不同列表更新情况下调度信号需求量

Table 1 Demand for scheduling signals under different list update scenarios

调度算法	信号总量	平均信号量
增量调度	4 625 895	192
6秒更新列表	1 274 453	53
30秒更新列表	279 563	12

5 结论

本文提出了一种可用于进行系统功率调节的EV离散调度算法,挖掘EVA的V2G潜力,通过基于调度优先级的方法,实现了对电动汽车集群的系统调度的同时有效减少调度信号的总量。算例表明,对于总量较大的EV集群,使用离散调度算法能以最小误差满足离散调节要求。ERCOT系统上的仿真表明,该方法可将调度信号的总量减少94%,且这一削减可在保证车辆SOC状态不会对车主产生影响的情况下实现。后续工作将关注如何进一步减少不同调度周期内的累积误差以及调度所需的信号总量上。

参考文献

[1] 黎黎, 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.
 [2] 刘达夫, 钟剑, 杨祺铭, 等. 基于V2G与应急通信的配电网信息物理协同快速恢复方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(7):147-158.
 [3] 彭伟伦, 马力, 刘琦颖, 等. 基于供需两侧协同优化的电动汽车V2G充放电负荷时空分布预测研究[J]. 汽车技术, 2024(6):17-23.
 [4] OBAID M, TOROK A, ORTEGA J. A Comprehensive Emissions Model Combining Autonomous Vehicles with Park and Ride and Electric Vehicle Transportation Policies[J]. Sustainability, 2021, 13(9): 4653.

[5] LI R, REN H, WU Q, et al. Cooperative economic dispatch of EV-HV coupled electric-hydrogen integrated energy system considering V2G response and carbon trading[J]. Renewable Energy, 2024(227):120488.
 [6] 雷雪婷, 郝文波, 等. 电动汽车参与电网调频策略研究[J]. 黑龙江电力, 2021, 43(5):403-406.
 [7] 王杨洋, 茆美琴, 杨铖, 等. 面向多场景辅助服务的大规模电动汽车聚合可调度容量建模[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(7): 103-115.
 [8] 黄元清, 刘迪迪, 覃光锋, 等. 计及车主需求的电动汽车聚合商能量调度策略[J]. 南方电网技术, 2024, 18(10):161-170.
 [9] 徐俊俊, 程奕凌, 张腾飞, 等. 计及充电行为特征与可调性的电动汽车集群优化调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(23): 23-32.
 [10] 李东东, 张凯, 姚寅, 等. 基于信息间隙决策理论的电动汽车聚合商日前需求响应调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24):101-111.
 [11] 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.
 [12] 李军, 梁嘉诚, 刘克天, 等. 计及用户响应度的电动汽车充放电优化调度策略[J]. 南方电网技术, 2023, 17(8):123-132.
 [13] WU Z, HU J, AI X, et al. Data-driven approaches for optimizing EV aggregator power profile in energy and reserve market[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021(129):106808.
 [14] 杨景旭, 李钦豪, 张勇军, 等. 考虑电网需求匹配度的多EV聚合商需求响应削峰优化建模[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8): 125-134.
 [15] 魏震波, 田轲, 罗筱均, 等. 电动汽车聚合商参与下的主辅联合市场均衡分析[J]. 电力建设, 2021, 42(2):50-57.
 [16] 杨昆, 刘通, 柏林, 等. 基于谈判博弈的微电网群多主体共享储能容量优化配置策略[J]. 电测与仪表, 2024, 61(3):33-41.
 [17] SHAHID M M, SHENGXIAN Z, MUDASSIR H M, et al. A study of charging-dispatch strategies and vehicle-to-grid technologies for electric vehicles in distribution networks[J]. Energy Reports, 2023(9):1777-1806.
 [18] 张胜楠, 王海云, 王茹. 双向无线电能传输系统在V2G中的控制策略研究[J]. 电源学报, 2024, 22(S1):208-216.
 [19] 车彬, 张泽龙, 杨燕. 考虑V2G储能特性与负荷需求响应的主动配电网低碳鲁棒调度[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(1):29-39.
 [20] 黄珍瑶, 程诺, 江岳文. 考虑EV调峰需求响应可靠性的V2G聚合商多时间尺度调度策略[J]. 高电压技术, 2025, 51(1):401-411.

(上接第146页)

[4] 王璐, 王柯荣. 云计算视角下的智慧医院管理平台设计研究[J]. 微型电脑应用, 2023, 39(10):51-55.
 [5] 郭海男, 谢越, 于丹丹, 等. 考虑远程复诊需求的门诊预约调度优化[J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(12):3279-3293.
 [6] HAMMOURI A I. A modified biogeography-based optimization algorithm with guided bed selection mechanism for patient admission scheduling problems [J]. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 2022, 34(3):871-879.
 [7] 王妍. 面向供热现场安全管理的一体化信息系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(5):278-286.
 [8] 张芳胜, 王妙龄, 季嘉辉, 等. 基于语音识别的多资源组合应急调度指挥系统[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(3):155-159.
 [9] 柴蓉, 陈米铃, 李锦红. 基于效用优化的星地融合网络联合用户关联及资源块调度算法[J]. 电子学报, 2023, 51(12):3483-3495.
 [10] 程曦, 宋铁成. 基于改进多目标布谷鸟搜索的资源调度算法[J].

计算机应用与软件, 2022, 39(3):241-2253.

[11] 黄苏丹, 刘付榕, 曹广忠, 等. 基于在线差分进化算法的平面开关磁阻电机约束预测位置控制[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(13):5239-5250.
 [12] 袁子龙, 吴秋新, 刘韧, 等. 一种基于改进差分进化算法的源码漏洞检测模型的冷启动方法[J]. 计算机应用研究, 2023, 40(7):2170-2178.
 [13] 代荣李, 李宏慧, 付学良. 基于差分进化融合蚁群算法的数据中心流量调度机制[J]. 计算机应用, 2022, 42(12):3863-3869.
 [14] PREMKUMAR M, KUMAR C, DHARMA RAJ T, et al. A reliable optimization framework using ensembled successive history adaptive differential evolutionary algorithm for optimal power flow problems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2023, 17(6):1333-1357.
 [15] 周伟, 谢志强. 考虑多工序设备权重的资源协同综合调度算法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(5):1625-1635.