



基于灵活性资源与风电协同互动可行域的鲁棒优化调度策略

余光正 崔朝越 汤波 陆柳

Robust Optimal Scheduling Strategy Based on Feasible Region of Cooperative Interaction Between Flexible Resources and Wind Power

YU Guangzheng, CUI Chaoyue, TANG Bo, LU Liu

引用本文:

余光正, 崔朝越, 汤波, 等. 基于灵活性资源与风电协同互动可行域的鲁棒优化调度策略[J]. *现代电力*, 2024, 41(5): 801–812. DOI: 10.19725/j.cnki.1007–2322.2023.0018

YU Guangzheng, CUI Chaoyue, TANG Bo, et al. Robust Optimal Scheduling Strategy Based on Feasible Region of Cooperative Interaction Between Flexible Resources and Wind Power[J]. *Modern Electric Power*, 2024, 41(5): 801–812. DOI: 10.19725/j.cnki.1007–2322.2023.0018

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2023.0018>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

风电全消纳下虚拟电厂内部资源鲁棒调度策略

Robust Scheduling Strategy of the Internal Resources in VPP Based on Wind Power Completely Consumed
现代电力. 2019, 36(3): 80–87 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I3/80>

考虑需求响应的电力系统灵活性资源优化配置

Optimal Allocation of Power System Flexible Resources Considering Demand Response
现代电力. 2021, 38(3): 286–296 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2020.0439>

计及风电相关性的主动配电网有功无功协调鲁棒优化调度策略

A Robust Coordinated Active–reactive Power Optimal Operation Strategy for Active Distribution Network With Correlated Wind Power
现代电力. 2023, 40(6): 1013–1022 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2022.0136>

考虑碳捕集和风电出力不确定性和电热联合系统多阶段鲁棒优化的低碳调度

Multi–stage Low Carbon Robust Dispatch of Integrated Electricity and Heat System Considering Carbon Capture and Wind Power Uncertainty
现代电力. 2023, 40(3): 363–371 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0339>

基于可控负荷提升风电接纳能力的优化调度

Optimized Scheduling for Improving Wind Power Accommodation Ability Based on Controllable Load
现代电力. 2020, 37(2): 171–179 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2019.0131>

电力及天然气系统中的产消者能量–备用协同优化

Energy–Reserve Co–optimization of Prosumers in Power and Natural Gas System
现代电力. 2022, 39(1): 45–55 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0036>

基于灵活性资源与风电协同互动可行域的鲁棒优化调度策略

余光正¹, 崔朝越¹, 汤波¹, 陆柳²

(1. 上海电力大学 电气工程学院, 上海市 杨浦区 200090; 2. 上海电力设计院有限公司, 上海市 黄浦区 200025)

Robust Optimal Scheduling Strategy Based on Feasible Region of Cooperative Interaction Between Flexible Resources and Wind Power

YU Guangzheng¹, CUI Chaoyue¹, TANG Bo¹, LU Liu²

(1. Institute of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Yangpu District, Shanghai 200090, China;
2. Shanghai Electric Power Design Institute Co., Ltd., Huangpu District, Shanghai 200025, China)

摘要: 风电高比例接入电网后, 其出力的随机性及波动性增加了电网中安全调度运行的决策难度。为促进风电消纳, 同时降低风电不确定性对电网稳定运行的影响, 提出一种基于灵活性资源与风电协同互动可行域的鲁棒优化调度策略。首先, 以储能及电动汽车作为可调节灵活性资源集合, 构建可消纳风电波动范围与储能、电动汽车功率调节区间的可行域, 根据系统当前运行状态为控制策略提供指导; 其次, 基于可行域提出一种计及风电消纳能力及调度成本最优的两阶段鲁棒优化模型, 充分挖掘灵活性资源的调节能力, 优化灵活性资源与风电的协同调度策略以应对系统调度中的不确定因素; 最后, 根据可行域形态指标修正调度策略进一步提升风电资源的消纳能力。通过 IEEE39 节点系统进行算例分析, 验证了所提模型及方法的有效性。

关键词: 灵活性资源; 风电; 鲁棒优化调度; 可行域; 风电消纳

Abstract: The randomness and volatility of wind power output after its high proportion is connected to the power grid increases the difficulty of decision-making for safe dispatching operation in the power grid. In order to promote wind power consumption and reduce the impact of wind power uncertainty on the stable operation of power grid, this paper proposes a robust optimal scheduling strategy based on flexible resources and wind power cooperative interaction feasible region. Firstly, the energy storage and electric vehicles are used as the ad-

justable flexible resource set to build the feasible region of the wind power fluctuation range and the energy storage and electric vehicle power regulation range, and provide guidance for the control strategy according to the current operating state of the system; Secondly, based on the feasible region, a two-stage robust optimization model considering the optimal wind power consumption capacity and scheduling cost is proposed, which fully exploits the regulatory capacity of flexible resources and optimizes the cooperative scheduling strategy of flexible resources and wind power to deal with the uncertain factors in system scheduling; Finally, according to the feasible region shape index, the scheduling strategy is modified to further improve the wind power resource absorptive capacity. The effectiveness of the proposed model and method is verified by an example of IEEE 39 bus system.

Keywords: flexible resources; wind power; robust optimization dispatch; feasible region; acceptable accommodation of wind power

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0018

0 引言

在“双碳”背景下, 以新能源为主体的新型电力系统迅速发展, 到 2050 年, 我国风电装机容量将达到 24 亿 kW^[1]。随着风电入网比例的提升, 其随机性^[2-4]和波动性为电网的安全调度运行带来了严峻挑战, 制约了电网对风电的消纳能力, 造成大量弃风^[5]。因此, 通过优化风电并网系统的调度策略, 最大化利用风电资源对“双碳”目标的实现具有重要意义^[6]。储能与电动汽车作

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52207121); 国网湖北电科院科技项目 (B31532225680)

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52207121); State Grid Hubei Institute of Electrical Science and Technology Project (B31532225680).

为可调节灵活性资源,能够促进电能的时空转移,实现削峰填谷^[7],为进一步提升风电消纳能力^[8]及电网运行的经济性,对于风电与灵活性资源间的协同优化调度进行深入研究具有广阔的前景。

风电出力的随机性及波动性严重影响了电力系统的安全高效运行^[9],以储能及电动汽车为代表的灵活性可调节资源与风电协同参与系统调度,能够接收负荷低谷时段的多余风电并适时释放,是促进风电消纳的有效手段。文献^[10]提出了一种基于风储混合系统与电动汽车需求响应资源联合优化的调度模型,并未考虑风电实际出力偏移预设出力场景时对于风电消纳能力的影响。文献^[11]以系统运行收益最大化为目标实现风电与电动汽车的协同增效,但未计及大规模电动汽车集中充电后局部过负荷对电网稳定运行产生的影响。文献^[12]根据风电出力季节性差异提出了风电场中储能电站的经济运行策略,缺少对于提升风电消纳能力方面的分析。风电与灵活性资源间的协同运行增加了系统中的不确定性风险,未能及时根据不同调度时段的不确定变量灵活调整调度计划,对于电网中的调度策略优化问题仍需深入探究。

鲁棒优化方法^[13-16]是解决风电出力不确定性问题、实现恶劣场景下最优调度决策的经典方法之一。文献^[17]在可行边界内根据实时风速状态灵活调节风电出力,但其鲁棒性提高的同时并未兼顾系统运行的经济性;文献^[18]基于源荷不确定性建立两阶段鲁棒模型实现经济调度,未计及电网规模及复杂度提升时非线性调度模型的求解难题;文献^[19]对于风电出力边界的选取依赖于不确定变量的预设区间,难以在恶劣情况下基于风电最优出力区间修正调度策略。现有鲁棒算法对于调度策略的优化基于不确定变量的预设区间,未能兼顾多种灵活性资源参与调度运行时,临近安全边界的部分运行点受扰动影响超越安全边界干扰系统稳定运行状态的问题,且由于系统调度中鲁棒性的提高以牺牲部分经济性为代价,因此仅通过鲁棒优化所得调度策略存在一定保守性,未能进一步提升电网的风电消纳能力。

为优化系统安全运行区域^[20],构建基于风电与灵活性资源互动特性的运行边界^[21],在风电并网系统中从域的视角出发,通过鲁棒优化算法对各时段不同运行约束的超平面进行切割,以精确可行域范围,根据运行点与可行域(dispatchable

region)边界的相对关系进行调度决策,能够实现控制策略的鲁棒性及经济性平衡。文献^[22]基于风电可行域提出了一种多区域互联网络的鲁棒调度策略,但并未考虑灵活性资源在风电并网系统中促进削峰填谷、实现能量时移对于风电利用率的提升;文献^[23]将风电出力可行域定义为运行约束限制下固定边界内所能消纳的风电功率范围,并未针对影响可行域几何形态的灵活性资源特性对调度策略的影响进行系统分析。现有研究根据可行域理论在风电出力边界^[24]内进行系统调度策略调整,但电网规模的提升及灵活性资源接入增加了非线性模型的求解难度,难以实时掌握风电及灵活性资源间的互动关系,因此建立灵活性资源与风电协同互动特性的可行域,并根据可行域的几何特性进行控制策略优化具有重要研究价值。

综上所述,现有研究根据系统拓扑结构构建的可行域范围是唯一且确定的,但并未计及不同调度时段灵活性资源运行状态对于风电可行域的影响。随着电网规模提升,系统运行中新能源机组与灵活性资源间协同互动关系趋于复杂,制约了风电消纳能力,调度决策难度增大。针对上述问题,本文提出可消纳风电波动量、储能及电动汽车充放电功率调节区间的综合可行域构建方法,其可视化特征能够辅助调度人员快速了解电网运行状态,并根据系统调度需求迅速发送指令,基于可行域进行电网调度,优化不同时刻各机组及灵活性资源最优出力状态,以充分挖掘灵活性资源的调节能力。考虑恶劣场景下根据可行域几何形态指标检验系统的调度运行效率,若几何指标低于阈值,则继续添加可行域边界判别约束进一步优化几何形态,基于优化后的域空间制定各机组出力计划及灵活性资源的充放电策略,本文方法通过提升圆润度指标实现能量的有序转移并缓解调峰压力;同时,综合考虑了风电与灵活性资源协同互动的鲁棒性与经济性,提高了风电的消纳水平。最后,通过算例分析证明所提模型和方法对于保障电网安全运行以及提升风电消纳能力方面的有效性。

1 灵活性资源与风电协同互动特性及可行域构建

1.1 灵活性资源与风电互动能力分析

风电出力具有随机性,通过常规火电机组间

的调度运行提升风电消纳能力的空间有限，储能系统、电动汽车等灵活性资源可通过充放电实现电能转移，储存负荷低谷时段的过剩风电，在负荷高峰期向电网放电，促进削峰填谷^[14]，减小火电机组调峰压力。电网的安全稳定运行受功率平衡约束及各设备运行约束制约，且大规模电动汽车接入电网后采取不同的充电模式，均会对系统中的风电消纳水平产生影响。因此，进行灵活性资源与风电协同调度是减少弃风量、提升风电消纳能力的有效途径。

大规模电动汽车通过充电桩接入电网，调度系统终端通过采集各类电动汽车行驶行为及电池荷电状态对电动汽车进行聚合，并与储能及各机组协同参与调度。在负荷高峰时段，风电与灵活性资源集合共同释放电能供给常规负荷需求，随着夜间常规负荷需求量下降，大量电动汽车入网参与充电，风电与储能系统供能给电动汽车充电；在负荷低谷时段，灵活性资源集合吸收多余风电在负荷高峰期投入使用，达到削峰填谷目的，并实现了能量的双向流动，促进了灵活性资源与风电的协同互动。

图 1 给出风电与灵活性资源间的协同调度体系，调度中心根据负荷及风电功率预测值，制定灵活性资源及火电、风电机组的日前调度策略，并基于灵活性资源集的调节功率与可消纳风电出力波动量的可行域在恶劣场景下进行日内调度计划修正，以实际调度与计划调度结果偏差最小化为目标，优化灵活性资源集合的充放电功率与风电、火电出力，将调度系统指令发送至灵活性资源集与风电场、火电厂，并通过其内部分配给各个调度单元，灵活性资源集合内的储能及电动汽车根据指令进行充放电操作，并将运行状态反馈至上层集合，保证灵活性资源与风电协同运行的同时提升风电资源的利用率。

1.2 基于灵活性资源与风电协同互动的可行域构建

将系统中各设备运行约束线性化构成与灵活性资源优化目标相关联的系数矩阵参与运算，排除不可行点形成安全运行边界构建综合可行域，为系统的风电、火电机组、储能系统及电动汽车的协同调度提供了一个可视化参考并基于综合可行域提出优化调度策略，满足条件的调度策略集合为： $\{\Delta P_{g,t}^*, \Delta P_{w,t}, \Delta P_{s,t}, \Delta P_{z,t}\}$ 。其中： $\Delta P_{g,t}^*$ 为传统机组调节功率； $\Delta P_{w,t}$ 为可消纳风电功率波动量；

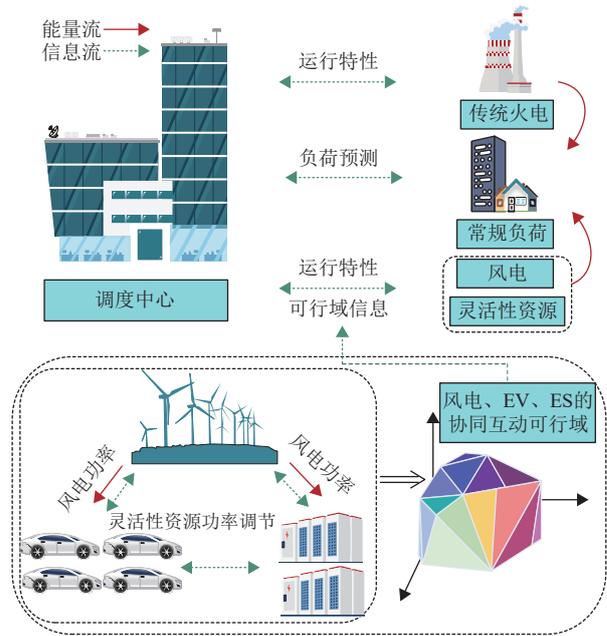


图 1 风电与灵活性资源协同调度示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cooperative scheduling of wind power and flexible resources

$\Delta P_{s,t}$ 为储能调节功率； $\Delta P_{z,t}$ 为电动汽车功率调整量。基于 $\Delta P_{w,t}$ 、 $\Delta P_{s,t}$ 、 $\Delta P_{z,t}$ 的运行状态点集 ΔB 构成综合可调节功率可行域表征在系统安全运行约束限制内，保证系统运行成本最小时各灵活性资源的协同出力状态，并找到可行点。

$$P_g^{\min} \leq P_{g,t} + \Delta P_{g,t}^* \leq P_g^{\max} \quad (1)$$

式中： P_g^{\max} 、 P_g^{\min} 分别为传统机组出力上下限； $P_{g,t}$ 为传统机组 t 时刻出力。

$$\Delta P_{w,t}^- \leq \Delta P_{w,t} \leq \Delta P_{w,t}^+ \quad (2)$$

式中 $\Delta P_{w,t}^+$ 、 $\Delta P_{w,t}^-$ 分别为风电出力波动上下界。

$$0 \leq U_{s,t}(P_{s,t}^{\text{dis}} + \Delta P_{s,t}) \leq U_{s,t} P_s^{\max} \quad (3)$$

$$0 \leq (1 - U_{s,t})(P_{s,t}^{\text{ch}} + \Delta P_{s,t}) \leq (1 - U_{s,t}) P_s^{\max} \quad (4)$$

式中： $P_{s,t}^{\text{dis}}$ 、 $P_{s,t}^{\text{ch}}$ 分别为 t 时刻储能充电及放电功率； P_s^{\max} 为储能允许的最大充放电功率； $U_{s,t}$ 为储能的充放电状态，放电状态取值为 1，充电状态取值为 0。

$$\Delta P_{z,t} = P_{z,t} - \sum_{v=1}^{Z_v} p_{z,v,t} \quad (5)$$

式中： $P_{z,t}$ 为聚合商 z 在时段 t 内所管辖电动汽车的充放电功率， $\Delta P_{z,t} > 0$ 时为充电状态， $\Delta P_{z,t} < 0$ 时为放电状态； $p_{z,v,t}$ 为聚合商 z 的第 v 辆电动汽车

在时段 t 的实际调度结果。

此时，系统中各运行点集合为

$$M = \{\Delta\beta | \exists H, AL^* + EH + D\Delta\beta \leq C\} \quad (6)$$

式(6)保证了在当前调度策略下，风电波动及储能、电动汽车功率变化在系统运行约束下的可行性。式中： L^* 为火电、风电机组出力、储能及电动汽车的充放电功率及状态； H 为常规机组可上下调节的出力范围； A 、 E 、 C 、 D 为相应系数矩阵，运行点集合具有如下的多面体形式：

$$M = \{\Delta\beta | u^T(C - AL^* - D^*\Delta\beta) \leq 0, \forall u \in U\} \quad (7)$$

式中： $U = \{u | E^T u = 0, -1 \leq u \leq 0\}$ ， u 为松弛变量，可基于文献[23]中的自适应算法生成综合可行域边界，避免了利用逐点法大量搜索极限点。

基于可行域内进行电网调度为调度人员提供了可视化参考，实现了灵活性资源及风电调度范围的进一步精确，较未经超平面切割的系统初始运行约束空间提升了运行点的搜索效率。

1.3 基于可行域几何特征对调度策略的影响分析

基于生成的可行域，其体积表示区域内部可容纳安全运行工作点的空间大小，其表面积代表消耗资源，可行域体表比^[25]表征实现单位功率调节量所需资源，随着体表比的增加，可行域圆润度趋近于1，证明其形状越接近于圆形，可容纳风电波动量变化时，可行域圆润度越高，将处于其边界的运行点调整至域内所需的灵活性资源的功率调节量越少，域的 shape 效率越高，如式(8)–(12)所示，反映了基于可行域实现优化调度的运行效率。

$$S_M = \sum_{i=1}^m S_{sei} \quad (8)$$

式中： S_M 为可行域表面积； m 为可行域边界个数； S_{sei} 为可行域边界 i 的面积。

通过多重积分曲面面积算法^[25]，可知边界 i 的表面积为

$$S_{sei} = \int_M \dots \int \sqrt{\det(J^T J)} d\Delta P_{w,t} d\Delta P_{s,t} d\Delta P_{z,t} \quad (9)$$

式中 J 为雅克比矩阵。

$$J = \left(\frac{\partial \beta_i}{\partial \Delta P_{w,t}}, \frac{\partial \beta_i}{\partial \Delta P_{s,t}}, \frac{\partial \beta_i}{\partial \Delta P_{z,t}} \right)^T \quad (10)$$

基于文献[25]中蒙特卡洛采样法计算可行域体积。

$$L_M = \frac{V_M/S_M}{\sqrt[2n]{2^n V_M}} \quad (11)$$

$$I_M = \frac{(2.92n^2 L_o - 2n) L_M^2 + (1 - 2.92n^2 L_o^2) L_M}{L_o - 2n L_o^2} \quad (12)$$

式中： L_M 为 n 维空间中可行域体表比； V_M 为可行域体积； I_M 为 n 维空间中可行域圆润度； L_o 为 n 维球体的体表比，如图2所示，随着可行域圆润度提升，相同空间内可覆盖更多范围的运行点，减小了在域内进行调度计划修正所需的灵活性资源功率调节量。

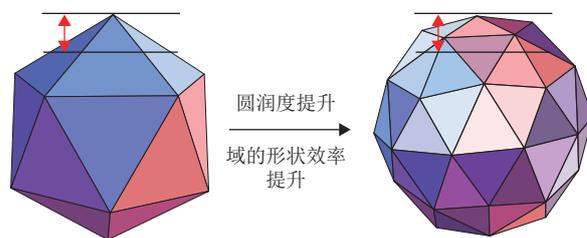


图2 圆润度指标

Fig. 2 Index of roundness

2 基于灵活性资源与风电协调互动可行域的鲁棒优化调度模型

基于风电并网后储能系统及大规模电动汽车与风电机组间灵活调度的需求，建立灵活性资源与风电间协同互动的鲁棒优化调度模型，调度流程如附录图A1所示。一阶段根据风电预测出力，运用鲁棒优化理论^[23]构建风电、火电及灵活性资源的日前优化模型，基于风电预测出力值制定日前调度策略；二阶段为日内调度模型，在日前调度策略下保证恶劣场景下各机组及灵活性资源的功率平衡，并实现再调度成本的最小化。基于系统初始运行约束进行超平面切割形成的可行域有助于调度人员明确风电及各灵活性资源间的安全边界，有效缩减了调度范围，实现调度策略优化。

2.1 一阶段调度模型

根据风电出力预测值安排区域内机组出力，建立优化调度模型，最小化运行成本。

$$\min Q = F_g + F_w + F_s + F_z \quad (13)$$

式中： F_g 为常规机组运行成本； F_w 为风电出力惩罚成本； F_s 为储能系统运行成本； F_z 为电动汽车集群调度成本。

$$F_g = \sum_{g=1}^{N_g} c_{g1} P_{g,t}^2 + c_{g2} P_{g,t} + c_{g0} + s_g q_{g,t} + d_g (1 - q_{g,t}) \quad (14)$$

式中： $P_{g,t}$ 为传统机组各时段出力值； c_{g1} 、 c_{g2} 、 c_{g0} 为机组燃料成本系数； s_g 、 d_g 为传统机组启停成本； $q_{g,t}$ 、 $1 - q_{g,t}$ 为传统机组启停状态变量。

风电出力惩罚成本

$$F_w = c_w \sum_{w=1}^{N_w} (P_{w,t}^u - P_{w,t}) \quad (15)$$

式中： $P_{w,t}^u$ 、 $P_{w,t}$ 分别为风电机组在 t 时刻出力预测值及日前期望出力； c_w 为弃风惩罚系数。

储能系统调度成本：

$$F_s = c_s \sum_{s=1}^{N_s} (P_{s,t}^{\text{dis}} - P_{s,t}^{\text{ch}}) \quad (16)$$

式中： c_s 为储能运行单位充放电成本。

电动汽车调度成本

$$F_z = c_z \sum_{z=1}^{N_z} P_{z,t} \quad (17)$$

式中： c_z 为电动汽车调度成本系数，其数值可视为负荷峰、平、谷 3 个不同时段电价。

1) 风电出力约束。

$$0 \leq P_{w,t} \leq P_{w,t}^u \quad (18)$$

2) 储能运行约束。

储能系统运行约束包含充放电功率限制约束、充放电不同时约束、调度周期内始末容量平衡约束。

$$0 \leq P_{s,t}^{\text{dis}} \leq U_{s,t} P_s^{\text{max}} \quad (19)$$

$$0 \leq P_{s,t}^{\text{ch}} \leq (1 - U_{s,t}) P_s^{\text{max}} \quad (20)$$

$$\eta \sum_{s=1}^{N_s} P_{s,t}^{\text{ch}} - \frac{1}{\eta} \sum_{s=1}^{N_s} P_{s,t}^{\text{dis}} = 0 \quad (21)$$

$$\tilde{P}_s^{\text{min}} \leq \tilde{P}_{s,t0} + \eta \sum_{s=1}^{N_s} P_{s,t}^{\text{ch}} - \frac{1}{\eta} \sum_{s=1}^{N_s} P_{s,t}^{\text{dis}} \leq \tilde{P}_s^{\text{max}} \quad (22)$$

式中： η 为储能系统的充放电效率。为防止因储能系统频繁充电放电而减少使用寿命，约束(20)保证了储能在调度的始末时刻容量相等，有利于储能的循环调度，延长了储能使用年限。 $\tilde{P}_{s,t0}$ 为储能在调度初始时刻的容量， \tilde{P}_s^{max} 和 \tilde{P}_s^{min} 为储能在调度过程中允许的最大/最小剩余容量。

3) 电动汽车聚合商运行约束。

$$P_{z,t}^l \leq P_{z,t} \leq P_{z,t}^u \quad (23)$$

$$P_{z,t}^u = Z_v P_{z,v,\text{max}}^C \quad (24)$$

$$P_{z,t}^l = -Z_v P_{z,v,\text{min}}^D \quad (25)$$

式中： $P_{z,t}^u$ 和 $P_{z,t}^l$ 分别为聚合商 z 在时段 t 的调度上下限^[10]； $P_{z,v,\text{max}}^C$ 和 $P_{z,v,\text{min}}^D$ 分别为聚合商 z 的第 v 辆电动汽车的最大最小充放电功率； Z_v 为第 z 个电动汽车聚合商的电动汽车数量，电动汽车功率平衡约束详见参考文献[10]。

传统机组最大、最小起停机时间约束及机组爬坡约束、功率平衡约束及线路传输容量约束详见参考文献[5]、[21]。

2.2 二阶段调度模型

为应对风电出力不确定性的影响，保证调度计划安全可靠，第二阶段根据风电实际出力，在第一阶段调度策略的基础上，以火电、风电、电动汽车、储能设备等灵活性资源实现功率平衡的再调度成本最小化为目标，实现协同调度。

$$\max \min F = \sum_{g=1}^{N_g} (c_1 P_{g,t}^+ + c_2 P_{g,t}^-) + \sum_{w=1}^{N_w} c_w (\Delta P_{w,t}^* - \Delta P_{w,t}) + \sum_{s=1}^{N_s} c_s \Delta P_{s,t} + \sum_{z=1}^{N_z} c_z \Delta P_{z,t} \quad (26)$$

式中： $\Delta P_{w,t}^*$ 为风电出力波动总量。外层 \max 为风电出力的不确定性集，变量为各种风电出力极端场景；内层 \min 为运行集，包含不确定性集下运行的相关变量。常规机组出力调节约束见式(1)、(27)，储能功率调节约束见式(3)、(4)、(28)、(29)，电动汽车功率调节约束见式(5)、(30)、(31)：

$$P_{g,t}^* = P_{g,t} + P_{g,t}^+ - P_{g,t}^- \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \tilde{P}_s^{\text{min}} &\leq \tilde{P}_{s,t0} + \eta (P_{s,t}^{\text{ch}} + \Delta P_{s,t}) (1 - U_{s,t}) \\ -\frac{1}{\eta} U_{s,t} (P_{s,t}^{\text{dis}} + \Delta P_{s,t}) &\leq \tilde{P}_s^{\text{max}} \end{aligned} \quad (28)$$

$$P_{s,t}^* = U_{s,t} (P_{s,t}^{\text{dis}} + \Delta P_{s,t}) - (1 - U_{s,t}) (P_{s,t}^{\text{ch}} + \Delta P_{s,t}) \quad (29)$$

式中： $P_{g,t}^+$ 、 $P_{g,t}^-$ 为火电机组向上、向下调节功率； $P_{g,t}^*$ 、 $P_{s,t}^*$ 为火电机组、储能 t 时刻实际出力。

4) 电动汽车运行约束。

$$X_{z,v,t} + Y_{z,v,t} \leq 1 \quad (30)$$

$$P_{z,v,t} = X_{z,v,t} P_{z,v,t}^J - Y_{z,v,t} P_{z,v,t}^F \quad (31)$$

式中： $X_{z,v,t}$ 、 $Y_{z,v,t}$ 为聚合商 z 的第 v 辆电动汽车 t

时段的充放电状态； $X_{z,v,t}$ 取1时为充电状态； $Y_{z,v,t}$ 取1时为放电状态； $p_{z,v,t}^J$ 、 $p_{z,v,t}^F$ 为聚合商 z 的第 v 辆电动汽车在时刻 t 的充放电功率。

5) 风电出力不确定性约束。

$$W = \{P_{w,t}^* | P_{w,t}^* = P_{w,t} + \Delta P_{w,t}(h_{w,t}^+ - h_{w,t}^-)\} \quad (32)$$

$$h_{w,t}^+ + h_{w,t}^- \leq 1, h_{w,t}^+, h_{w,t}^- \in \{0, 1\} \quad (33)$$

$$\Delta P_{w,t}^- \leq \Delta P_{w,t} \leq \Delta P_{w,t}^+ \quad (34)$$

$$\sum_{t=1}^T \frac{|P_{w,t}^* - P_{w,t}|}{\Delta P_{w,t}} \leq \Gamma_w^T = T\tau + \sqrt{T}\vartheta^{-1}(\alpha)\theta \quad (35)$$

式中： $P_{w,t}^*$ 为 t 时刻风电机组实际出力； $h_{w,t}^+$ 、 $h_{w,t}^-$ 为0/1变量； $\Delta P_{w,t}^+$ 、 $\Delta P_{w,t}^-$ 为初始风电出力波动上下界； T 为调度时段数； Γ_w^T 为风电出力的时间约束参数； α 为鲁棒保守度因子； $\vartheta^{-1}(\alpha)$ 为关于 α 的正态分布累积概率密度函数的反函数； τ 和 θ 为经统计分析后得到的期望值与方差。

6) 可行域约束。

$$M = \left\{ \begin{array}{l} \sum_g P_{g,t} + \sum_w P_{w,t} + \sum_s P_{s,t} + \sum_z P_{z,t} \\ + K_P \Delta\beta = \sum_q P_{q,t} \\ -F_l^{\max} \leq \sum_{g=1}^{N_g} T_{gl} P_{g,t} + \sum_{w=1}^{N_w} T_{wl} P_{w,t} + \sum_{s=1}^{N_s} T_{sl} P_{s,t} \\ + \sum_z P_{z,t} + K_F T_{\text{trans}} \Delta\beta - \sum_{q=1}^{N_q} T_{ql} P_{q,t} \leq F_l^{\max} \\ \left\{ \begin{array}{l} \Delta\beta \in (\Delta P_{w,t}, \Delta P_{s,t}, \Delta P_{z,t}) \\ u^T (C - AL^* - D^* \Delta\beta) \leq 0, \forall u \in U \end{array} \right\} \end{array} \right. \quad (36)$$

式中： $P_{q,t}$ 为 t 时段负荷值； T_{gl} 、 T_{wl} 、 T_{sl} 、 T_{zl} 、 T_{ql} 为各节点到线路 l 的功率传输分布因子； F_l^{\max} 为线路 l 的最大传输容量； K_P 、 K_F 为功率平衡约束与线路传输容量约束中可消纳风电波动量、储能及电动汽车功率调节变量的系数矩阵，表征所接入变量的功率分布特点； T_{trans} 为风电、储能、电动汽车的综合功率传输分布因子矩阵，具体表达式为

$$T_{\text{trans}} = \begin{bmatrix} T_{wl} \\ T_{sl} \\ T_{zl} \end{bmatrix} \quad (37)$$

基于第二阶段运行约束条件下，优化调度变量为：可消纳风电功率波动量 $\Delta P_{w,t}$ 、储能调节功率 $\Delta P_{s,t}$ 、电动汽车调节功率 $\Delta P_{z,t}$ 、传统机组向上调节功率 $P_{g,t}^+$ 、传统机组向下调节功率 $P_{g,t}^-$ 。选取

$\Delta P_{w,t}$ 、 $\Delta P_{s,t}$ 、 $\Delta P_{z,t}$ 构成运行点集合，在储能及电动汽车的调节能力范围内，满足系统运行约束限制下表征系统中的风电消纳能力。

3 鲁棒优化模型求解

基于灵活性资源与风电互动特性的描述，结合系统两阶段调度模型及式(6)可知，研究系统内风电消纳能力的鲁棒问题实际上是一种max-min的双层问题，即在系统灵活性最差的可再生能源出力场景下，提出基于储能功率、电动汽车功率的调度策略。外层问题本质是在寻找最差可再生能源出力场景完成可行域构建，内层问题基于可行域内选取最优运行点实现调度策略优化，精确了各机组及灵活性资源的调度范围简化求解过程。

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{\Delta\beta} \min_{H, k^+, k^-} 1^T k^+ + 1^T k^- \\ \text{s.t. } AL + B\sigma + EH + D\Delta\beta \leq C \end{array} \right. \quad (38)$$

式中：问题(38)为调度模型的紧凑形式，其中的约束条件包含引入松弛变量后的常规机组出力相关约束、电动汽车运行约束与储能运行约束； L 为日前调度阶段变量，包含火电、风电机组出力、储能及电动汽车的充放电功率及状态； σ 为日内调度阶段火电、风电机组出力、储能及电动汽车的充放电功率及状态； H 为火电机组向上、向下调节功率； k^+ 、 k^- 为 H 中 $P_{g,t}^+$ 、 $P_{g,t}^-$ 对应的松弛变量，基于 $\Delta P_{w,t}$ 、 $\Delta P_{s,t}$ 、 $\Delta P_{z,t}$ 构成的运行状态点集合为 $\Delta\beta$ ；上述各阶段调度变量对应系数矩阵为 A 、 B 、 E 、 D 。

由于式(38)目标函数非凸，采用拉格朗日函数利用对偶理论将目标函数转换为凸函数便于求解， u 为对偶变量，且 L 为日前调度阶段变量，因此在二阶段调度可视为常量，令 $C^\ell = C - AL$ ，则式(39)成立。

$$\begin{aligned} \psi &= 1^T k^+ + 1^T k^- + u^T (C^\ell - B\sigma - k^+ - k^- - EH \\ &\quad - D\Delta\beta) \\ &= (1 - u^T) k^+ + (1 + u^T) k^- - u^T EH + u^T (C^\ell - B\sigma \\ &\quad - D\Delta\beta) \end{aligned} \quad (39)$$

由于对偶函数存在下界，且 k^+ 、 k^- 为正数，其系数必然满足 $1 - u^T \geq 0$ 、 $1 + u^T \geq 0$ ，同时 H 的系数矩阵必然为0，否则会存在最小值为 $-\infty$ ，函数无效。因此，目标函数可转化为

$$\begin{cases} \max_u u^T(C^\ell - B\sigma - D\Delta\beta) \\ \text{s.t. } E^T u = 0, -1 \leq u \leq 0 \end{cases} \quad (40)$$

各运行点集合 M 可表征为如下形式

$$u^T D\Delta\beta \geq u^T(C^\ell - B\sigma) \quad (41)$$

由文献 [23] 可知, M 是使式 (40) 成立的最大集合, 当 $\Delta\beta^r \notin M$ 时, 存在 $u^r \in U$ 使得下式成立

$$(u^r)^T(C^\ell - B\sigma - D\Delta\beta^r) > 0 \quad (42)$$

基于式 (41) 形成的边界, 将 M 集合内 $\Delta\beta^r$ 向量分离。

$$\begin{aligned} R(\sigma) = \max_{u \in U} (u^T(C^\ell - B\sigma) + \max_{\Delta\beta \in M} (-u^T D\Delta\beta)) \\ \text{s.t. } V\Delta\beta \geq r : y \end{aligned} \quad (43)$$

在系统中各运行约束限制下, 建立初始运行点集合 $M^{\text{all}} = \{\Delta\beta | V\Delta\beta \geq r\}$, 使 $M \subseteq M^{\text{all}}$, 其中 V 、 r 为系数矩阵, y 为集合 M 中约束的对偶变量。通过识别相应的临界运行点分离集合 M 中 $\Delta\beta^r \notin M$ 的外部运行点, 直至所有运行点均可保证式 (41) 成立, 此时 $R(\sigma)$ 取最优值, 确定可行域集合为 M 。

由于 $-1 \leq u \leq 0$, 最优值 $R(\sigma)$ 为非负值。若 $R(\sigma)$ 取 0, 则 $\Delta\beta \in M$, 式 (41) 对于集合 U 和 M , 以及 $M \subseteq M^{\text{all}}$ 均成立。由于线性约束 (44)、(45) 具有强对偶性, 因此式 (46) 成立:

$$D^T u + V^T y = 0 \quad (44)$$

$$0 \geq y \perp r - V\Delta\beta \leq 0 \quad (45)$$

$$-u^T D\Delta\beta = r^T y \quad (46)$$

式 (46) 可以将约束条件中 $-u^T D\Delta\beta$ 替换为线性项 $r^T y$, 非线性项转移至约束 (45) 中, 并通过析取法线性化, 求解过程可进行如下等效 [23]

$$\begin{cases} R(\sigma) = \max u^T(C^\ell - B\sigma) + y^T r \\ \text{s.t. } u \in U, \theta \in \{0, 1\}^{N_C} \\ D^T u + V^T y = 0 \\ -\lambda\theta \leq r - V\Delta\beta \leq 0 \\ -\lambda(1 - \theta) \leq y \leq 0 \end{cases} \quad (47)$$

式中: θ 为由 N_C 二元变量组成的向量; N_C 为 M 中线性不等式的个数; λ 是一个足够大的正数。对于给定的集合 M , 式 (47) 中二进制变量的数量依赖于 M 中约束的数量, 在 N_C 较小的情况下, 式 (47) 可以有效求解大规模电力系统, 随着计算的不断进行, 集合 λ 中的约束数量不断增加, 具体

步骤如下:

1) 选择初始运行集合 M^{all} , 设置 $\delta > 0$ 。

2) 基于当前 M^{all} 求解 (47), 最优解为 $\Delta\beta^*$, 最优值是 $R(\sigma)$ 。

3) 若 $R(\sigma) \leq \delta$, 终止, 报告 $M^{\text{all}} = M$; 否则, 向 M^{all} 继续添加约束 (41), 更新 M^{all} 中的矩阵 V 和向量 r , 执行步骤 2) 至 $R(\sigma) \leq \delta$, 最终得到不确定性变量可行域空间为 M^{SZ} , 并基于所求可行域空间进行调度策略优化以提升调度经济性:

$$\begin{aligned} \min F \\ \text{s.t. } \begin{cases} C^* - B^* \sigma^* - D^* \Delta\beta \geq 0 \\ \Delta\beta \in M^{SZ} \end{cases} \end{aligned} \quad (48)$$

式中: σ^* 为基于可行域进行调度策略优化后各机组及灵活性资源的出力值, 随着圆润度的提升, 在关于各状态运行点 $\Delta\beta$ 组成的可行域空间 M^{SZ} 内基于相同风电功率波动量, 能够最大限度减少灵活性资源调节量。

4 算例分析

本文选取 IEEE39 节点系统进行算例验证, 网络拓扑结构如附录图 A2, 风电出力如附录图 A3。风电场装机容量为 600 MW, 接入节点为 31, 储能容量 200 MW·h, 额定功率为 50 MW, 充、放电效率为 90%, 接入节点为 4。基于大规模电动汽车接入电网后与储能、风电场协同调度情况进行系统分析, 车辆类型及参数如附录表 A1, 各线路参数如附录表 A2 所示, 负荷曲线如附录图 A4 所示。算例在 MATLAB2019 平台上采用 Yalmip 编程, 选择 Cplex 求解器工具求解最优调

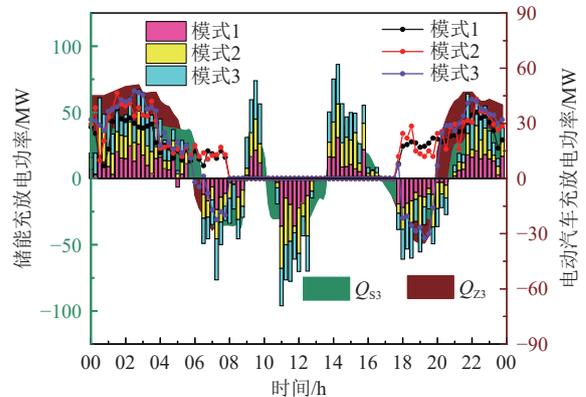


图 3 不同充电模式下的灵活性资源充放电功率

Fig. 3 Flexible resource charging and discharging power in different charging modes

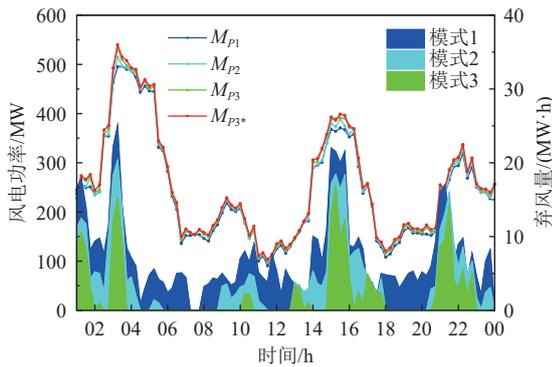


图4 不同充电模式下弃风量对比

Fig. 4 Comparison of air discard volume under different charging modes

表1 基于可行域的调度结果分析

Table 1 Scheduling result analysis based on feasible domain

指标	传统机组运行成本/万元	储能调度成本/万元	电动汽车调度成本/万元	弃风惩罚成本/万元	总成本/万元
模式1	220.66	1.71	8.04	3.23	233.64
模式2	218.23	1.62	7.15	1.95	228.95
模式3	216.57	1.68	6.66	1.54	226.45

度问题，运行流程如附录图A5。

4.1 基于电动汽车不同充电模式下的可行域调度结果分析

为研究电动汽车在无序充电模式、单向充电模式、双向充电模式下与风电、储能系统间的协同调度情况，设置无序充电模式与单向及双向有序充电模式下在0:00—8:00、18:00—24:00时间段内参与充放电，基于鲁棒优化模型所提出的调度策略，不同充电模式下灵活性资源充放电功率及风电并网系统弃风量如图3—4所示，运行成本如表1所示，模式1为无序充电模式，模式2为单向有序充电模式，模式3为双向有序充电模式。

风电出力具有随机性，无序充电模式下系统未能根据风电的不确定性变化实现可再生能源的高效利用，有序充电模式下可根据风电高发及低发的不同时刻灵活制定调度策略。双向充电模式下， Q_{S3} 、 Q_{Z3} 分别为储能及电动汽车的功率可行域边界，储能系统能够在日间的不同调度阶段进行风电的清洁高效利用，而在夜间1:00—4:00、21:00—24:00的风电高发时段，灵活性资源集合共同吸收系统中的多余风电，并在早晚负荷高峰时段释放电能，风电出力最小的18时段，储能放电功率为30.45 MW，电动汽车放电功率为23.31 MW；风电出力最高的3时段，储能及电动汽车充电功率分别为31.63 MW、45.21 MW，结合图4可知，与单向充电模式下的调度策略相比有效提升了风电利用率并实现了电动汽车清洁充电。图5为3种模式下基于可消纳风电功率波动区间、储能及电动汽车可调节功率区间构建的综合可行域。结合表1分析可知，无序充电模式下，运行成本为233.64万元，较有序充电模式中单向、双向充电模式分别增加了2%、3.1%，有序充电模式下更有利于提高系统运行的经济性。

如图4所示， M_{P3^*} 为基于模式3的风电可行域出力边界， M_{P1} 、 M_{P2} 、 M_{P3} 为基于不同运行模式下可行域的调度结果，由此可以看出，电动汽车在无序充电模式下的弃风量显著高于另外两种模式，结合图5可知，3种模式下可消纳风电波动区间为(-25.6,29.9)、(-29.2,34.5)、(-32.2,41.1)。电动汽车采用双向充电模式下，在负荷低谷时段，灵活性资源集合充电，双向有序充电模式下弃风量低于前两者；在负荷高峰时段，灵活性资源集合放电供给常规负荷用电需求，随着夜间常规负荷需求量下降，风电及储能系统向大规模电动汽

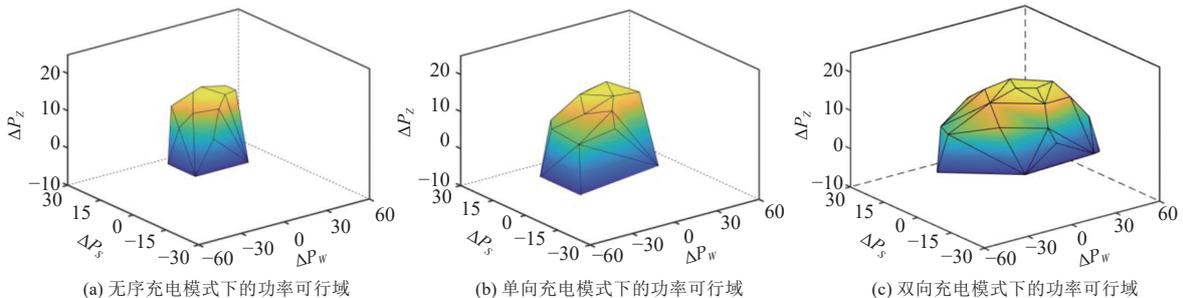


图5 3种模式下基于风电功率波动、储能及电动汽车可调节功率的可行域

Fig. 5 Security region based on wind power fluctuation, energy storage and electric vehicle adjustable power under the three modes

车释放电能，风电消纳量大幅度提升。调度时段内模式 3 弃风量较模式 2 进一步减小，同时优化了系统总运行成本。综上所述，在有序充电模式下，风电场与储能及电动汽车的协调调度有助于消纳电网中负荷低谷时段的风电，存储的风电量在负荷高峰期投入使用，促进了风电资源的合理利用。

不考虑表征上述灵活性资源与风电协同互动能力的综合可行域进行系统调度时，结合附录表 A3 可知，基于未经过超平面切割的系统初始运行约束下进行调度决策，未能精确掌握可消纳风电功率波动量 $\Delta P_{w,t}$ 、储能调节功率 $\Delta P_{s,t}$ 、电动汽车调节功率 $\Delta P_{z,t}$ 间的互动关联能力，难以根据风电实际出力对储能及电动汽车运行状态及时调控，造成了更多风电资源损失。综上，基于电网调度中初始运行约束空间内进行超平面切割形成的可行域下进行电网调度运行，优化了风电及灵活性资源的调度决策边界，能够合理分配各灵活性资源，有效减少弃风现象的产生并节约了运行成本，提升了清洁能源的利用率。

4.2 基于不同调度模型的可行域几何特性对调度决策能力的影响分析

本文所考虑的模型中存在发电机组、储能电池以及电动汽车等设备的协同配合，这些单元在直流潮流的网架内参与调度运行，经系统中不同调度时段的运行约束切割形成基于风电出力波动、储能及电动汽车集群出力调节功率的综合可行域，可视化分析储能及大规模电动汽车接入电网后的风电消纳能力。

风电波动量达 20 MW 及 30 MW 时，基于图 5(c) 中综合可行域区间作二维截面，如图 6(a)、(b) 所示。由图 6 分析可知：当风电波动量为 20 MW 时，电动汽车及储能系统的功率调节区间较风电波动量为 30 MW 时有所提升，随着储能调节功率增加，电动汽车功率可调节区间逐渐减小，为保证潮流平衡，受系统中线路传输容量及运行约束限制，电动汽车功率可调节区间增量随储能调节功率增加逐步达到安全边界。

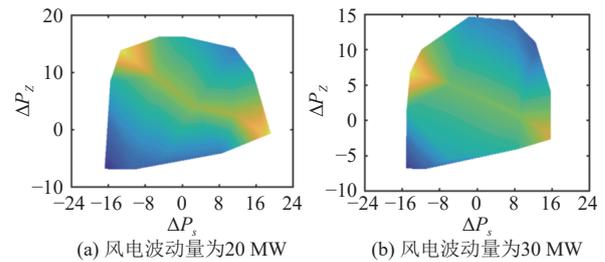


图 6 基于不同风电功率波动量的可行域截面
Fig. 6 Safety region cross-section based on different wind power fluctuations

受风电出力不确定性影响，可行域内各灵活性资源功率调节范围不同，在模式 2 及模式 3 中基于储能及电动汽车功率调节量作二维截面如图 7。由图 5 及图 7 可知，模式 3 的圆润度较模式 2 有所增加，电动汽车采用双向充电模式的时段内，电网中 1—4 时段、21—24 时段风电出力较大。为实现系统中风电资源的灵活利用，结合可行域形态及圆润度指标可知，体表比越大，域的形状效率越高，实现单位功用所需资源越少，模式 3 较模式 2 单位时间内基于可行域实现最优调度策略所进行的功率调整有所减少，电动汽车功率增长或减少同样的调节量，模式 3 可行点覆盖面积较模式 2 有所增大，可基于系统的不同运行态势做出更灵活的调度策略调整，若超出可行域运行范围，则系统中产生部分弃风，提高了系统中的弃风惩罚成本。基于模式 3 构建的可行域范围大于模式 2 及模式 1，这是由于电动汽车采用兼具充放电的双向动态模式与储能协同配合，能够提升对风电高发时段中多余风能的利用效率，进一步促进削峰填谷，提升了风电消纳能力。

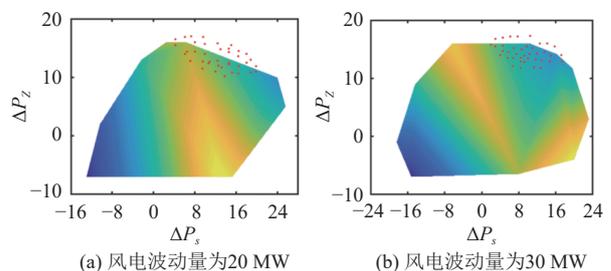


图 7 基于可行域几何特性的调度策略优化
Fig. 7 Scheduling strategy optimization based on geometry characteristics of feasible domain

将鲁棒优化方法及随机优化方法所得可行域的体表比及圆润度对比，在电动汽车双向充电模式下基于鲁棒优化方法所得可行域体表比及圆润

度均为最优状态,受双向充电模式下潮流平衡及充放电状态约束制约,可等效为基于长方体增加了斜面切割,圆润度有所提升。由表2可知,体表比越大,圆润度越接近1,表示可行域形态越接近于圆形,实现调度策略优化的运行效率越高。

表2 基于不同调度模型的几何特性分析
Table 2 Geometric characteristics analysis based on different scheduling models

模型	模式	体表比	圆润度
鲁棒优化模型	模式1	0.22	0.54
鲁棒优化模型	模式2	0.24	0.59
鲁棒优化模型	模式3	0.25	0.66
随机优化模型	模式3	0.17	0.56

配置灵活性资源后,将综合可行域中能够消纳的风电波动量范围定义为可消纳风电波动区间,如附录图A6所示,基于随机优化方法构建的综合可行域下,风电波动量为20 MW时,储能功率调节区间为(-10.62, 14.74) MW,电动汽车功率调整范围为(-4.76, 11.47) MW,随着风电功率波动量的提升,可行域内储能及电动汽车可调节功率增长效率逐步变缓最终达到可行域边界,较鲁棒优化方法中的可行域功率调节范围有所减小。结合附录表A4分析可知,采用鲁棒优化方法能够全面考虑风电不确定性对电网中风电消纳能力的影响,在电动汽车采取有序充电模式时所构建的基于风电、储能、电动汽车的功率可行域精确性均优于随机优化模型,在保证灵活性资源调节能力的基础上,基于可行域的运行策略下风电消纳能力均有所提升。

4.3 计算方法对比

为验证本文所提鲁棒优化模型的优越性,将电动汽车处于双向充电模式下的鲁棒优化方法与随机优化方法进行结果对比分析如图8所示,鲁棒优化方法的鲁棒保守度因子为0.9时,未基于可行域下的鲁棒优化方法其总成本及弃风量均超过了基于可行域下提出的随机优化模型,随机优化方法较鲁棒优化方法计算时间多60.3%~61.7%。鲁棒保守度因子降低至0.7以下时,鲁棒优化模型在计算效率、运行成本、弃风量方面均优于随机优化模型。鲁棒保守度因子相同时,基于各时段不同运行状态约束超平面切割后的可行域范围下采用鲁棒优化方法与未基于可行域下采用鲁棒

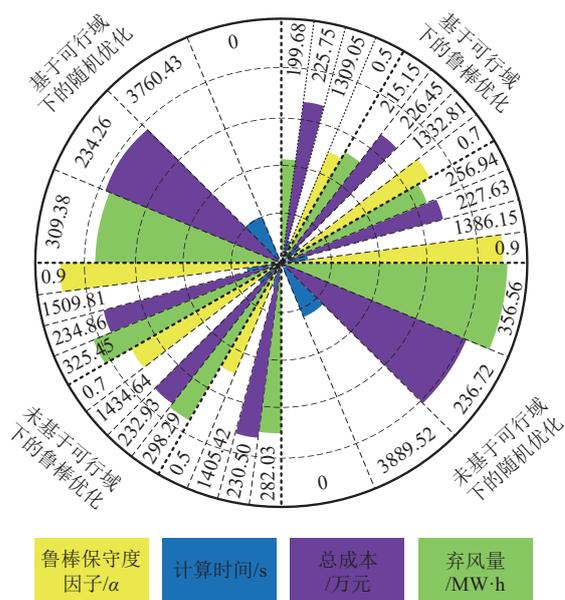


图8 计算方法对比

Fig. 8 Comparison of calculation methods

优化方法所得调度策略相比,计算效率有所提高,总成本能够减少2.2%~3.1%,弃风量相应减少22.3%~27.6%,随着鲁棒保守度因子的降低,系统中可消纳风电波动量的边界进一步精确,调度结果得以优化。因此,基于可行域范围内采用鲁棒优化方法促进了风电消纳,同时提升了系统运行的经济性及效率。

5 结论

1) 基于可消纳风电波动量、储能及电动汽车功率调节量构建的可行域能够为系统中灵活性资源的优化调度提供可视化参考,根据可行域提出的协同运行策略,有效缩减了风电与灵活性资源间的调度运行范围和决策时间。

2) 大规模电动汽车接入电网后,采用双向充电模式与储能及风电并网系统实现协同调度,提升了电网中风电消纳能力及运行经济性。

3) 计及风电预测出力不确定性,采用鲁棒优化方法对不确定集进行分析并建模,有效应对不确定风险,并对系统中风电消纳能力进行评估。

综上所述,基于综合可行域提出的优化调度策略有助于提升风电与灵活性资源的协同调度能力,能够有效应对风电出力不确定因素,保证电网运行安全性及经济性的同时促进了风电消纳。后续研究中,将针对各灵活性资源的调节能力展

开基于储能优化配置方面的研究。

(本刊附录请见网络版, 印刷版略)

参考文献

- [1] 国家发展和改革委员会能源研究所. 中国2050高比例可再生能源发展情景暨路径研究[R]. 北京: 国家发展和改革委员会能源研究所, 2015.
- [2] SONG Yu, SHI Libao. Dynamic economic dispatch with chp and wind power considering different time scales[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2022, 58(5): 5734–5846.
- [3] 余光正, 陆柳, 汤波, 等. 考虑转折性天气的海上风电功率超短期分段预测方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(13): 4859–4870.
YU Guangzheng, LU Liu, TANG Bo, *et al.* Research on ultra-short-term subsection forecasting method of offshore wind power considering transitional weather[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(13): 4859–4870(in Chinese).
- [4] 余光正, 林涛, 汤波, 等. 计及谐波裕度-均衡度的分布式电源最大准入功率计算方法[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(9): 1857–1865.
YU Guangzheng, LIN Tao, TANG Bo, *et al.* Calculation method of distributed generator maximum access power considering balance degree of harmonic margin[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(9): 1857–1865(in Chinese).
- [5] 葛晓琳, 郝广东, 夏澍, 等. 高比例风电系统的优化调度方法[J]. *电网技术*, 2019, 43(2): 390–400.
GE Xiaolin, HAO Guangdong, XIA Shu, *et al.* Optimal dispatching method for high proportion wind power system[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(2): 390–400(in Chinese).
- [6] 李志刚, 吴文传, 张伯明. 消纳大规模风电的鲁棒区间经济调度(一): 调度模式与数学模型[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(20): 33–39.
LI Zhigang, WU Wenchuan, ZHANG Boming. A robust interval economic dispatch method accommodating large-scale wind power generation part one: dispatch scheme and mathematical model[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(20): 33–39(in Chinese).
- [7] 李正烁, 孙宏斌, 郭庆来, 等. 计及碳排放的输电网侧“风—车协调”研究[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(10): 41–48.
LI Zhengshuo, SUN Hongbin, GUO Qinglai, *et al.* Study on wind-ev complementation on the transmission grid side considering carbon emission[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(10): 41–48(in Chinese).
- [8] 宋天昊, 李柯江, 韩肖清, 等. 储能系统参与多应用场景的协同运行策略[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(19): 43–51.
SONG Tianhao, LI Kejiang, HAN Xiaoqing, *et al.* Coordinated operation strategy of energy storage system participating in multiple application scenarios[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(19): 43–51(in Chinese).
- [9] 张尧翔, 刘文颖, 庞清仑, 等. 高比例风电接入系统光热发电-火电旋转备用优化方法[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(21): 5478–5489.
ZHANG Yaoxiang, LIU Wenying, PANG Qinglun, *et al.* Optimal power spinning reserve method of concentrating solar power and thermal power for high-proportion wind power system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(21): 5478–5489(in Chinese).
- [10] 孙波, 董浩, 王璐, 等. 计及电动汽车需求响应的风储混合系统日前联合优化调度模型[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(4): 107–114.
SUN Bo, DONG Hao, WANG Lu, *et al.* Joint optimal scheduling model for wind-storage hybrid system considering demand response of electric vehicle[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(4): 107–114(in Chinese).
- [11] 刘东奇, 王耀南, 袁小芳. 电动汽车充放电与风力/火力发电系统的协同优化运行[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(3): 18–26.
LIU Dongqi, WANG Yaonan, YUAN Xiaofang. Cooperative dispatch of large-scale electric vehicles with wind-thermal power generating system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(3): 18–26(in Chinese).
- [12] 张峰, 张熙, 张利, 等. 区域风电场储能电站的优化配置及运行策略[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(14): 49–57.
ZHANG Feng, ZHANG Xi, ZHANG Li, *et al.* Size optimization and operating strategies for battery energy storage station in adjacent wind farms[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(14): 49–57(in Chinese).
- [13] YORINO N, ABDILLAH M, SASAKI Y, *et al.* Robust power system security assessment under uncertainties using bilevel optimization[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(1): 352–361.
- [14] 张刘冬, 袁宇波, 孙大雁, 等. 基于两阶段鲁棒区间优化的风储联合运行调度模型[J]. *电力自动化设备*, 2018, 32(12): 59–67.
ZHANG Liudong, YUAN Yubo, SUN Dayan, *et al.* Joint operation model of wind-storage system based on two stage robust interval optimization[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 32(12): 59–67(in Chinese).
- [15] 周博, 艾小猛, 方家琨, 等. 计及超分辨率风电出力不确定性的连续时间鲁棒机组组合[J]. *电工技术学报*, 2021,

- 36(7): 1456–1467.
ZHOU Bo, AI Xiaomeng, FANG Jiakun, *et al.* Continuous-time modeling based robust unit commitment considering beyond-the-resolution wind power uncertainty[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(7): 1456–1467(in Chinese).
- [16] 夏鹏, 刘文颖, 张尧翔, 等. 考虑风电高阶不确定性的分布式鲁棒优化调度模型[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(1): 189–200.
XIA Peng, LIU Wenying, ZHANG Yaoxiang, *et al.* A distributionally robust optimization scheduling model considering higher-order uncertainty of wind power[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(1): 189–200(in Chinese).
- [17] WU Wenchuang, CHEN Jianhua, ZHANG Boming, *et al.* A robust wind power optimization method for look-ahead power dispatch[J]. *IEEE Trans on Sustainable Energy*, 2014, 5(2): 507–515.
- [18] 刘一欣, 郭力, 王成山. 微电网两阶段鲁棒优化经济调度方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 38(14): 4013–4022.
LIU Yixin, GUO Li, WANG Chengshan. Economic dispatch of microgrid based on two stage robust optimization[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 38(14): 4013–4022(in Chinese).
- [19] 袁爽, 何银国, 戴朝华, 等. 风电时间相关性多面体不确定性建模与鲁棒机组组合优化[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(9): 293–301.
YUAN Shuang, HE Yinguo, DAI Chaohua, *et al.* Polyhedral uncertainty modeling and robust optimization in unit commitment considering wind temporal correlation[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2020, 41(9): 293–301(in Chinese).
- [20] 肖峻, 张诗豪. 有源配电网安全域的体积: 定义、算法与分析[J]. *电网技术*, 2021, 47(3):1196–1213.
XIAO Jun, ZHANG Shihao. Volume of active distribution network security region: definition, algorithm and analysis[J]. *Power System Technology*, 2021, 47(3):1196–1213(in Chinese).
- [21] 程瑜, 陈熙. 基于源-荷-储互动的储能对风电可消纳能力的影响分析[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(3): 84–93.
CHENG Yu, CHEN Xi. Analysis of influence of energy storage on acceptability for wind power based on source-load-storage interaction[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(3): 84–93(in Chinese).
- [22] 陈哲, 王橹裕, 郭创新, 等. 基于风险的多区互联电力系统分布式鲁棒动态经济调度[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(23): 113–122.
CHEN Zhe, WANG Luyu, GUO Chuangxin, *et al.* Risk-based distributed robust dynamic economic dispatch for interconnected multi-regional power systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(23): 113–122(in Chinese).
- [23] WEI Wei, LIU Feng, MEI Shengwei. Real-time dispatchability of bulk power systems with volatile renewable generations[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2015, 6(3): 738–747.
- [24] 于丹文, 杨明, 韩学山, 等. 计及风电概率分布特征的鲁棒实时调度方法[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(3): 727–737.
YU Danwen, YANG Ming, HAN Xueshan, *et al.* Robust real-time dispatch considering probabilistic distribution of wind generation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(3): 727–737(in Chinese).
- [25] 肖峻, 秋泽楷, 宋晨辉, 等. 配电网安全域的表面积、体表面积及圆润度[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(17): 5813–5826.
XIAO Jun, QIU Zekai, SONG Chenhui, *et al.* Surface area, volume to surface area and roundness of distribution system security region[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(17): 5813–5826(in Chinese).

收稿日期: 2023-01-19

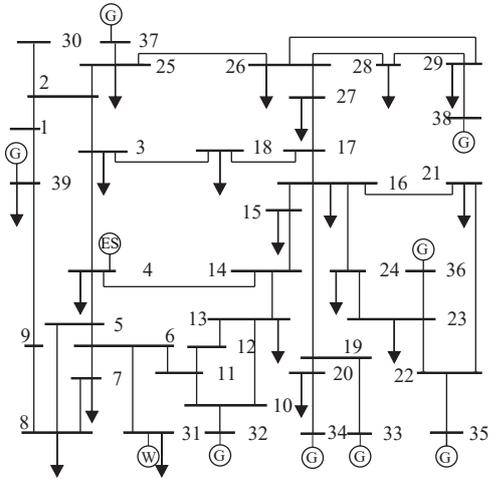
作者简介:

余光正(1987), 男, 博士, 硕士生导师, 研究方向为新能源电力系统调度、新能源出力预测等, E-mail: powerygz@shiep.edu.cn;

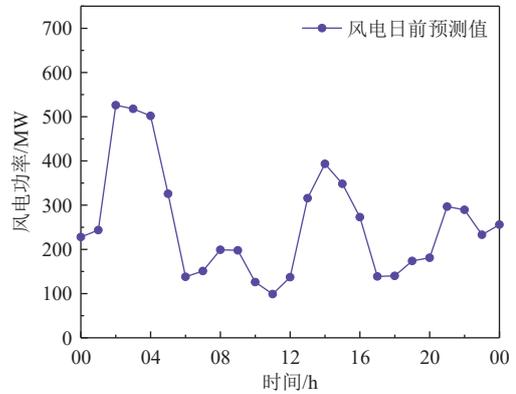
崔朝越(1996), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统调度, E-mail: 897192978@qq.com;

汤波(1984), 男, 博士, 高级工程师, 通信作者, 研究方向为高弹性电网规划、需求响应、电能质量分析与控制等, E-mail: tangbo@shiep.edu.cn。

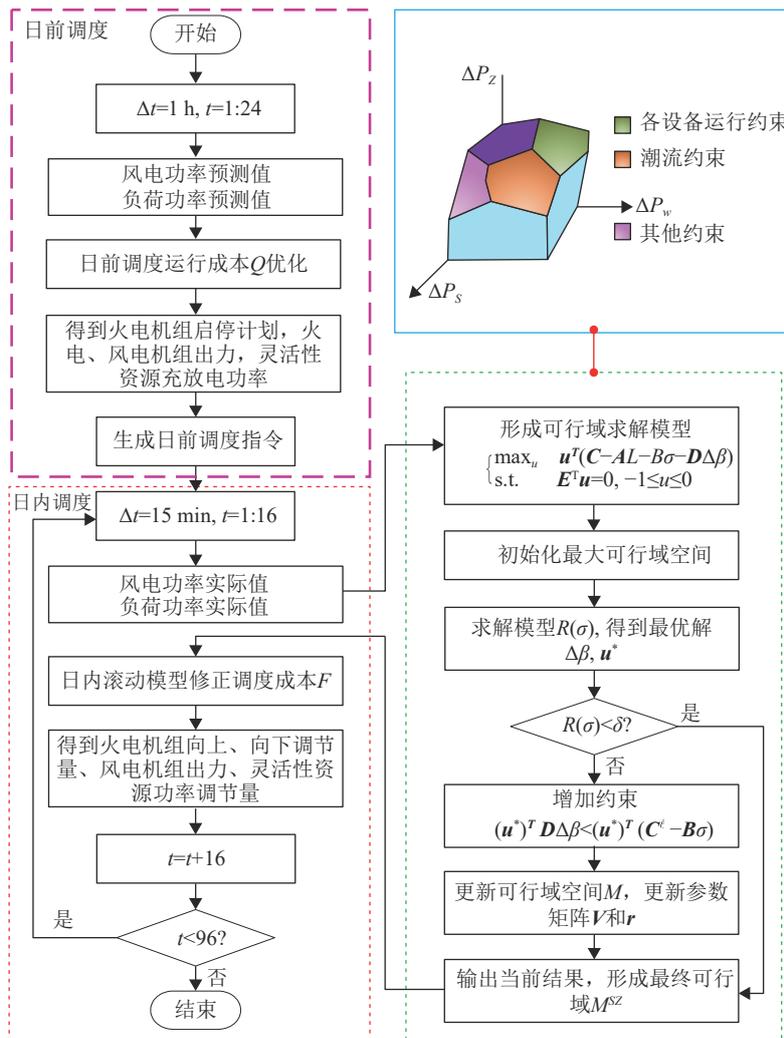
附录 A



附图 A1 IEEE39 节点系统
Fig. A1 IEEE39 node system

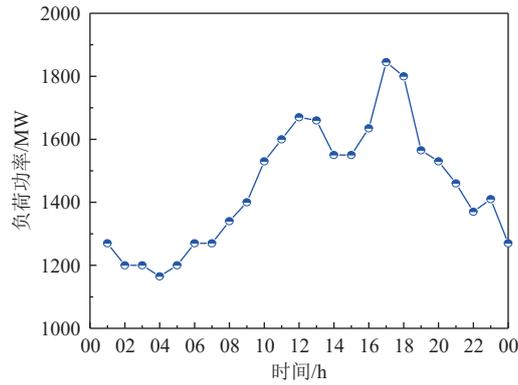


附图 A2 风电出力曲线
Fig. A2 Wind power output curve



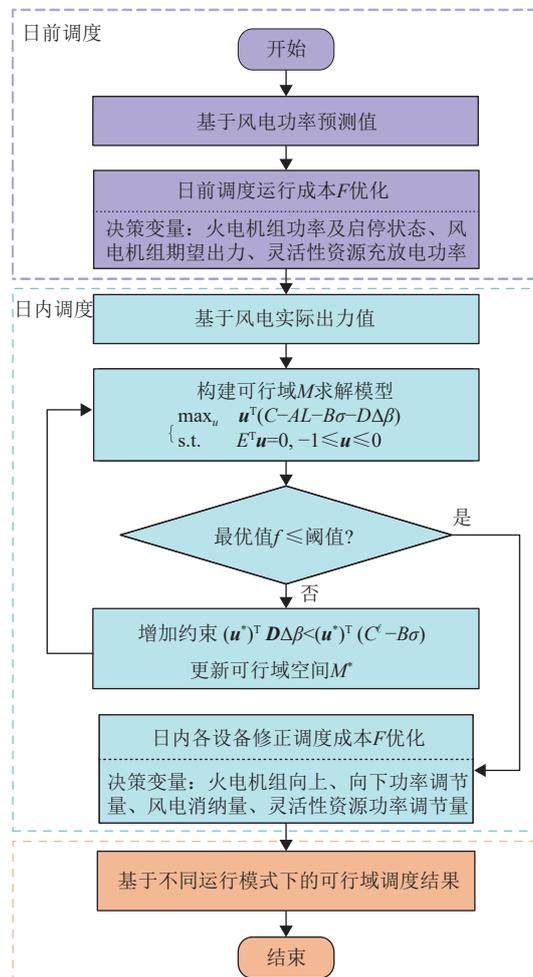
附图 A3 运行流程图

Fig. A3 Operation flow chart



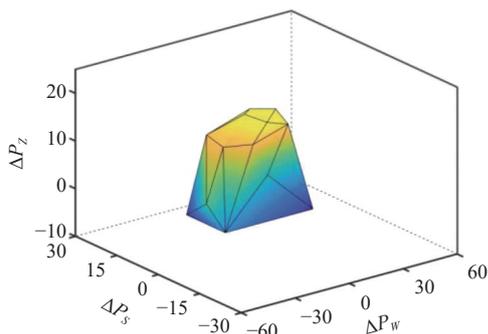
附图 A4 负荷曲线

Fig. A4 Load curve



附图 A5 基于风电与灵活性资源间协同互动的调度流程

Fig. A5 Scheduling process based on cooperative interaction between wind power and flexible resources



附图 A6 基于随机优化模型构建的综合可行域
 Fig. A6 Comprehensive security domain based on stochastic optimization model

附表 A1 电动汽车种类及功率

Table A1 Types and power of electric vehicles

类型	电池容量/(kW·h)	最大充放电功率/kW	占比/%
1	40	7.6	30
2	25	5.2	35
3	20	3.5	35

附表 A2 线路参数

Table A2 Line parameters

支路数	起始点	终点	支路电抗/pu	支路容量上限	支路数	起始点	终点	支路电抗/pu	支路容量上限
1	1	2	0.411	250	28	14	15	0.217	360
2	1	39	0.25	250	29	15	16	0.094	360
3	2	3	0.151	250	30	15	17	0.085	250
4	2	25	0.086	250	31	15	19	0.088	250
5	2	30	0.181	180	32	16	17	0.129	250
6	3	4	0.213	180	33	16	19	0.495	200
7	3	18	0.133	180	34	16	21	0.135	250
8	3	25	0.213	200	35	16	24	0.267	250
9	4	5	0.128	200	36	17	18	0.082	250
10	4	14	0.129	250	37	17	27	0.173	150
11	5	6	0.056	250	38	19	20	0.138	250
12	5	7	0.112	250	39	19	33	0.142	250
13	5	8	0.16	360	40	20	34	0.18	250
14	6	7	0.192	200	41	21	22	0.34	360
15	6	11	0.182	250	42	22	23	0.196	360
16	6	31	0.25	250	43	22	35	0.143	360
17	7	8	0.156	250	44	23	24	0.35	360
18	7	31	0.206	150	45	23	36	0.272	360
19	8	9	0.363	250	46	25	26	0.223	360
20	9	39	0.45	250	47	25	37	0.232	360
21	10	11	0.343	200	48	26	27	0.147	360
22	10	13	0.313	180	49	26	28	0.374	360
23	10	32	0.2	180	50	26	29	0.425	250
24	11	12	0.435	180	51	27	28	0.235	250
25	11	32	0.325	180	52	28	29	0.151	180
26	12	13	0.435	360	53	29	38	0.156	250
27	13	14	0.101	360					

附表 A3 未基于可行域的调度结果分析

Table A3 Analysis of scheduling results not based on safety region

指标	传统机组运行 成本/万元	储能调度 成本/万元	电动汽车调度 成本/万元	弃风惩罚 成本/万元	总成本/ 万元
模式1	224.94	1.78	8.63	3.69	239.04
模式2	222.84	1.7	8.03	2.44	235.01
模式3	221.17	1.66	7.97	2.13	232.93

附表 A4 基于不同调度模型的可消纳风电波动区间

Table A4 Acceptable wind power fluctuation range based on different dispatch models

模型	模式	可消纳风电波动区间
鲁棒优化模型	模式1	(-25.6, 29.9)
鲁棒优化模型	模式2	(-29.2, 34.5)
鲁棒优化模型	模式3	(-32.2, 41.1)
随机优化模型	模式3	(-26.4, 33.2)