

考虑双侧响应与碳捕集的虚拟电厂低碳经济调度

李军祥^{1,2}, 张三杰¹, 邵馨平¹

(1. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093; 2. 上海理工大学 智慧应急管理学院, 上海 200093)

摘要: 随着可再生能源例如风电、光伏等并网规模的不断增加, 电力系统的调峰压力逐渐增大, 碳捕集电厂不仅能够降低系统碳排放量, 也能够减轻系统调峰压力, 在电力系统中得到广泛应用。在此背景下, 引入了综合灵活运行碳捕集电厂来调动供给侧灵活响应资源, 并深入分析了其综合灵活运行方式的特性, 同时考虑需求响应来充分调动需求侧的灵活性资源, 在此基础上建立考虑供需双侧响应与综合灵活运行碳捕集的虚拟电厂低碳经济调度模型。基于 Matlab 调用 YALMIP 工具箱和 GUROBI 求解器对模型进行仿真验证。算例表明, 所提模型能进一步减少“弃光弃风”和碳排放, 缓解调峰压力, 能够为电力系统低碳经济调度提供参考。

关键词: 碳捕集电厂; 综合灵活运行方式; 需求响应; 碳减排; 虚拟电厂

中图分类号: TM 732 文献标志码: A

Low carbon economic dispatch of virtual power plants considering dual response and carbon capture

LI Junxiang^{1,2}, ZHANG Sanjie¹, SHAO Xiping¹

(1. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. School of Intelligent Emergency Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: With the continuous increase of grid connection scale of renewable energy sources such as wind power and photovoltaic, the peak shaving pressure of the power system is gradually increasing. Carbon capture power plants can not only reduce the system's carbon emissions, but also alleviate the peak shaving pressure of the system, and are widely used in the power system. In this context, an integrated flexible operation carbon capture power plant was introduced to mobilize flexible response resources on the supply side, and the characteristics of its integrated flexible operation mode were analyzed in depth. At the same time, demand response was considered to fully mobilize demand side

收稿日期: 2023-09-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (72071130, 71871144); 教育部产学研合作协同育人项目 (220501791121846); 上海理工大学大学生创新项目 (XJ2024137)。

通信作者: 李军祥 (1971-), 男, 教授。研究方向: 管理科学与工程。E-mail: lijx@usst.edu.cn

引文格式: 李军祥, 张三杰, 邵馨平. 考虑双侧响应与碳捕集的虚拟电厂低碳经济调度[J]. 上海理工大学学报, 2025, 47(1): 79-88.

Citation: LI Junxiang, ZHANG Sanjie, SHAO Xiping. Low carbon economic dispatch of virtual power plants considering dual response and carbon capture[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2025, 47(1): 79-88.

flexible resources. On this basis, a virtual low carbon economic dispatch model for power plants was established that considered both supply and demand responses and integrated flexible operation carbon capture. Based on Matlab, the YALMIP toolbox and GUROBI solver was called to simulate and verify the model. The calculation example shows that the proposed model can further reduce the "waste of solar energy and wind energy" and carbon emissions, alleviate peak shaving pressure, and provide reference for low carbon economic dispatch of power systems.

Keywords: *carbon capture power plant; integrated flexible operation mode; demand response; carbon reduction; virtual power plant*

为应对全球气候问题, 贯彻落实可持续发展的目标, 我国提出了“双碳”目标, 大力发展风电、光伏等可再生能源^[1-2]。但光伏、风电的出力均具有波动性与随机性, 其大规模并网为电网的稳定性带来诸多挑战^[3]。碳捕集与封存(carbon capture and storage, CCS)技术是当前实现“双碳”目标的有力手段之一。在可再生能源大规模并网的背景下, 系统内仍需要一定比例的传统电厂来维持系统的稳定性^[4], 但是传统电厂的最小出力技术限制了可再生能源消纳和碳减排力度, CCS技术能够改造传统电厂, 大量减少其碳排放量。改造后的碳捕集电厂相较于传统电厂也有更大的出力范围, 能够更好地应对电力系统的负荷波动和消纳可再生能源, 提升电网的稳定性。但是, 碳捕集电厂静态运行方式下存在CO₂捕集与再生过程耦合的问题^[5], 在负荷要求较高时导致碳捕集电厂净功率下降, 这与系统内更大的负荷需求相矛盾。而碳捕集电厂灵活运行方式能够将CO₂捕集与再生过程解耦, 能增加电力系统灵活性, 增强调峰能力。尤其在综合灵活运行方式之下, 能够更好地调度供给侧资源, 提高电网灵活性, 降低碳排放, 增加经济效益, 促进可再生能源的发展。

周任军等^[6]建立了考虑碳捕集综合灵活运行方式的日前-实时双阶段调度模型, 分析了综合灵活运行方式对系统调度的影响。崔杨等^[7]进一步考虑综合灵活运行碳捕集电厂的调峰能力, 并对综合灵活运行方式下的能量时移特性进行理论分析。廖跃洪等^[8]、高瑞阳等^[9]构建了碳捕集电厂综合灵活运行下综合能源系统的低碳调度模型, 通过综合能源系统内不同供能单元和碳捕集电厂的协作达到对系统的优化。韩丽等^[10]建立了考虑风电爬坡灵活调节的碳捕集电厂低碳经济调度模型, 利用储液罐的灵活调节能力来应对风电的波

动性, 降低了系统的碳排放。黄文涛等^[11]则考虑了灵活碳捕集电厂与抽水蓄能的联合运行, 利用灵活运行碳捕集电厂的能耗时移特性和抽水蓄能的大容量储能, 实现了深度调峰下的新能源消纳与碳减排。

以上研究表明, 在供给侧优化碳捕集电厂运行方式能够在一定程度上提升系统调峰能力、促进综合能源系统协调运行, 但是没有考虑到需求侧的响应资源。如果能够在优化调度供给侧资源的同时, 充分发挥需求侧资源的灵活性, 既能够促进碳捕集电厂的优化运行, 也能够平滑负荷曲线, 对于系统整体优化运行具有积极作用。

碳捕集电厂往往在多能协作系统中发挥自身的作用, 而系统内各种发电站往往在空间布局上较为分散, 虚拟电厂(virtual power plant, VPP)能够在一定程度上改善这个问题。作为一个电源管理系统, VPP可以将可再生能源、传统发电厂、需求负载和储能系统等相结合, 并作为特殊电厂分散安装在整个配电网中, 参与电网运行和电力市场交易, 这能够有效降低电网调度难度, 促进可再生能源的消纳并保证电力系统的安全稳定运行^[12-13]。李鹏等^[14]、袁桂丽等^[15]在虚拟电厂架构下考虑了碳捕集参与的综合能源系统, 分析了虚拟电厂对于综合能源系统调度的优化作用。

上述研究多侧重于多能协同系统中碳捕集电厂综合灵活运行的经济调度和运行特性, 对于碳捕集电厂综合灵活运行模式下的供给侧的响应资源的进一步利用, 以及这部分资源所能带来的经济效益研究较少。碳捕集电厂综合灵活运行模式下, 发电厂在满足负荷需求的同时, 根据系统运行状况灵活调整自身碳捕集能耗, 对此进行研究具有一定的意义。

综上所述, 本文同时考虑供给侧碳捕集电厂

的综合灵活运行方式与需求侧的需求响应计划, 建立供、需两侧协同运行的虚拟电厂优化调度模型。首先, 对碳捕集电厂综合灵活运行方式进行分析, 对该模式下通过 CO₂ 暂存达成的能量时移特性进行介绍; 其次, 对基于分时电价的用户模糊需求响应模型进行介绍; 最后, 构建考虑碳捕集电厂综合灵活运行方式的电力系统调度模型, 分析其低碳经济效益, 通过算例验证了本文所构建模型的可行性和优越性。

1 VPP 系统结构与运行原理分析

本文考虑一个由风电厂、光伏电站和包含 N 个机组的碳捕集电厂以及用户构成的 VPP 系统, 在一个划分为 T 个时段的运行周期内的最优调度问题。

1.1 碳捕集电厂基础运行原理

目前, 主流的碳捕获方法主要包括燃烧前捕获法、燃烧后捕获法和富氧燃烧法^[16]。其中, 使用最为广泛的是燃烧后捕获法, 本文考虑的碳捕集电厂即采用这种方法。

碳捕集电厂由常规发电机组加装碳捕集设备后改造而成, 在其运行过程中, 由发电机组运行产生功率并输出电能。输出功率 P_c 会被分为两部分: 一部分输出至电厂外部系统, 称为“净输出功率” P_c^{net} ; 另一部分为供给碳捕集设备的能耗 P_c^c , 即

$$P_c = P_c^c + P_c^{\text{net}} \quad (1)$$

碳捕集设备能耗 P_c^c 分为维持能耗 P_c^m 和运行能耗 P_c^o , 即

$$P_c^c = P_c^m + P_c^o \quad (2)$$

维持能耗与碳捕集设备运行状态无关, 即 P_c^m 为固定值; 运行能耗 P_c^o 会随着碳捕集设备的运行状态而变化, 与 CO₂ 捕集量正相关。在 t 时段, 碳捕集设备的运行能耗 $P_{c,t}^o$ 可表示为

$$P_{c,t}^o = P_{c,t} \xi \gamma \beta \quad (3)$$

式中: $P_{c,t}$ 为碳捕集电厂 t 时段总功率, $t \in \{1, 2, 3, \dots, T\}$; ξ 为碳捕集电厂的碳排放强度; γ 为捕获单位 CO₂ 所需要的能耗; β 为碳捕集设备的碳捕集效率。

1.2 碳捕集电厂综合灵活运行方式

碳捕集电厂的灵活运行方式分为两种, 分别是烟气分流运行方式和储液式运行方式^[17]。

烟气分流运行方式下, 碳捕集电厂通过控制烟气旁路系统的烟气分流比, 将发电机组产生的烟气按比例排入碳捕集系统中进行处理。这种方式下, 电厂可以根据系统运行情况调节碳捕集设备对 CO₂ 的吸收量。

储液式运行方式下, 碳捕集设备由吸收塔、储液罐、再生塔和 CO₂ 压缩装置组成。储液罐位于吸收塔和再生塔之间, 是储液式碳捕集设备中的储存设备, 被称为中间储液罐或者再循环储液罐。这种设备可以动态调节 CO₂ 的储存与释放, 以适应系统不同的运行模式和负荷需求。在碳捕集电厂内引入烟气旁路系统时, 在吸收塔与解析塔之间装设一组储液罐, 用来暂存吸收了 CO₂ 的化合物溶液, 这种结合了两种运行结构的碳捕集电厂运行方式被称为综合灵活运行方式。由式(1)和(2)可知, 综合灵活运行模式下碳捕集机组功耗满足以下条件:

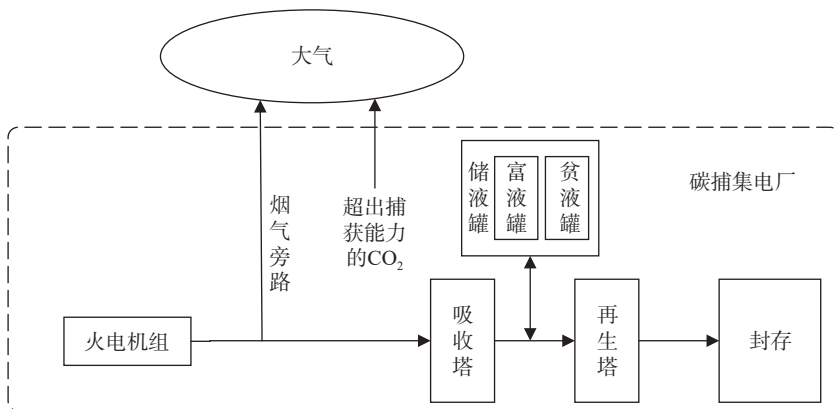
$$\begin{cases} P_{G_{i,t}} = P_{N_{i,t}} + P_{F_{i,t}} + P_{C_{i,t}} \\ P_{C_{i,t}} = \gamma E_{CO_{2,i,t}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{G_{i,t}}$ 、 $P_{N_{i,t}}$ 、 $P_{F_{i,t}}$ 和 $P_{C_{i,t}}$ 分别为 t 时段碳捕集电厂的总功率、净输出功率、碳捕集设备的固定维持能耗和运行能耗, $i \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$; $E_{CO_{2,i,t}}$ 为第 i 个机组碳捕集系统在 t 时段所捕集的 CO₂ 量, 取决于机组在 t 时段产生的 CO₂ 量以及储液罐提供的 CO₂ 量, 且受限于机组最大功率, 有

$$0 \leq E_{CO_{2,i,t}} \leq \mu K_i \xi_i P_i^{\text{max}} \quad (5)$$

式中: μ 为再生塔和压缩机的最大工作系数; K_i 为碳捕集机组 i 的碳捕集效率; P_i^{max} 为机组功率上限。

如图 1 所示, 在这种碳捕集综合灵活运行方式中, 火电机组产生烟气中的 CO₂ 一部分流向烟气旁路, 被直接排放, 另一部分被吸收到吸收剂中, 吸收剂随后被送往中间储液罐进行储存。当需要释放储存的 CO₂ 时, 储液罐中的吸收剂被送回再生塔中, CO₂ 从吸收剂中释放出来, 随后被压缩机进行处理。其中, 储液罐分为富液罐与贫液罐, 对应两种不同的溶液状态, 当储液罐向碳捕集设备释放 CO₂ 时, 富液罐会将储有高浓度 CO₂ 的溶液放出, 经过设备操作后, CO₂ 含量低的溶液流入贫液罐。同理, 当储液罐吸收 CO₂ 时, 贫液罐会将 CO₂ 含量低的溶液放出, 经过设备操作后, 形成含有高浓度 CO₂ 的溶液, 流回富液罐。则机组 i 碳捕集系统在 t 时段所捕集的 CO₂ 量 $E_{CO_{2,i,t}}$ 可表示为

图1 综合灵活运行模式下系统 CO₂ 流向图Fig.1 CO₂ flow chart of the system under comprehensive flexible operation mode

$$E_{CO_2,i,t} = E_{SGi,t} + K_i L_{i,t} E_{Gi,t} \quad (6)$$

式中： $E_{SGi,t}$ 为机组*i*的溶液储罐在*t*时段内提供的待捕集 CO₂ 的质量； $L_{i,t}$ 为碳捕集机组*i*在*t*时段的烟气分流比； $E_{Gi,t}$ 为碳捕集机组*i*在*t*时段产生的 CO₂ 总量，可表示为

$$E_{Gi,t} = \xi P_{Gi,t} \quad (7)$$

储罐系统通过上述操作，可以在不影响碳捕集效率的前提下，根据负荷需求动态调整储存和释放 CO₂ 的量，从而实现碳捕集设备的灵活运行。则由式(4)~(7)可知，碳捕集电厂的净输出功率为

$$P_{Ni,t} = (1 - \gamma K_i L_{i,t} \xi_i) P_{Gi,t} - P_{Fi,t} - \gamma E_{SGi,t} \quad (8)$$

由式(8)可知，净输出功率与设备自身的各项参数和储罐所提供的 CO₂ 量相关，通过对储罐所提供的 CO₂ 量的调整，调节碳捕集能耗。即在负荷高峰时段，储罐暂存部分系统产生的 CO₂，降低碳捕集能耗；负荷低谷时段，储罐释放暂存的 CO₂，增加碳捕集能耗，达到对碳捕集能耗进行时移的效果，从而平滑机组出力曲线。同时，结合碳捕集设备的最大运行状态约束，可得出储罐提供 CO₂ 量的范围：

$$-K_i L_{i,t} \xi_i P_{Gi,t} \leq E_{SGi,t} \leq \mu K_i \xi_i P_i^{\max} - K_i L_{i,t} \xi_i P_{Gi,t} \quad (9)$$

在本文所考虑的模型中，储罐中所用溶液为乙醇胺(MEA)溶液，需要考虑储罐中乙醇胺溶液体积与 CO₂ 质量的关系^[18]，乙醇胺溶液体积可表示为

$$V_{CA,t} = E_{SGi,t} M_{MEA} / (M_{CO_2} \varphi \theta_M \rho_M) \quad (10)$$

式中： $V_{CA,t}$ 为*t*时段储罐释放出的 CO₂ 所需的溶液体积； M_{MEA} 、 M_{CO_2} 分别为乙醇胺和 CO₂ 的摩

尔质量； φ 为再生塔对溶液中 CO₂ 的吸收率； θ_M 、 ρ_M 分别为 MEA 溶液的浓度和密度。

1.3 虚拟电厂的组成结构与运行原理

本文所构建的虚拟电厂模型如图2所示。常规火电厂加装碳捕集设备后，采取综合灵活运行方式，与风电厂、光伏电站、控制中心以及具有响应意愿的用户共同组成虚拟电厂。碳捕集电厂通过操控烟气旁路系统，按照比例捕集部分 CO₂，当 CO₂ 进入碳捕集设备后，由于捕集效率限制，仍会有部分 CO₂ 排入大气中。火电厂、碳捕集设备、用户、风电厂和光伏电站分别与虚拟电厂调度中心交流系统运行信息。在该架构下，供给侧在碳捕集电厂综合灵活运行方式下，由于储罐带来的能量时移特性，能够在低负荷时段产生额外的碳捕集能耗，使得电厂有更大的出力范围，提高风电、光伏上网率，促进新能源消纳，在负荷高峰时段降低碳捕集功耗，减轻系统负担。进一步引入分时电价来调动需求侧的灵活性资源，用户通过对分时电价的响应在 VPP 中起到

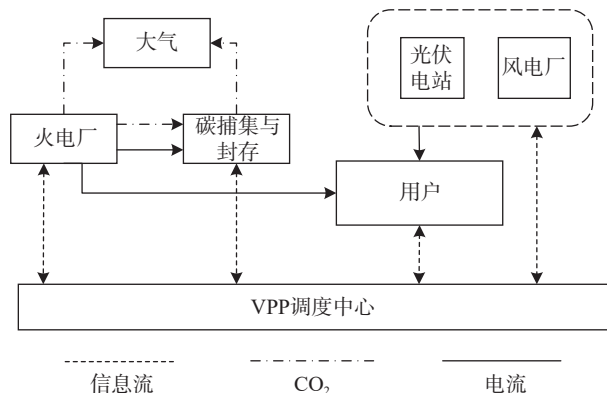


图2 考虑供需双侧响应的虚拟电厂架构图

Fig.2 The architecture diagram of virtual power plant considering the response of supply and demand sides

削峰填谷的效果。并且, 在负荷低谷时段, 根据分时电价, 谷时段电价相比于峰时段电价更低, 通过储液罐将负荷峰时段的碳捕集功耗转移到负荷谷时段, 在经济效益上能够减少碳捕集电厂的碳捕集能耗成本。虚拟电厂协调控制中心充分调动供给侧与需求侧的灵活性资源, 促进系统对可再生能源的消纳, 提升系统总收益的同时降低系统的碳排放量。

2 基于分时电价的用户需求响应模型

分时电价下, 用户对电价产生响应的意愿主要取决于个体自身因素和峰谷电价差值情况。由消费心理学可知, 电价差过大、过小以及在电价变化处响应度曲线的平滑, 都会引起用户需求响应的变化。在电价的激励下, 用户的响应行为具有明显的随机性, 真实的需求响应曲线会处于乐观与悲观响应预测曲线之间, 具有模糊属性^[19]。本文基于 Logistic 函数的模糊需求响应机理模型^[20], 考虑峰谷负荷转移的负荷转移率为

$$\lambda_{pv}(\Delta p_{pv}) = \frac{a}{1 + e^{-(\Delta p_{pv} - c)/k}} + b \quad (11)$$

式中: λ_{pv} 为峰谷负荷转移率; Δp_{pv} 为峰谷电价差; a 、 c 和 k 为 Logistic 函数的已知量; b 为可变参数, 增加负荷转移率变化的自由度。

如图 3 所示^[19], a_{pv} 与 b_{pv} 为电价差划分区域分界点。在“死区”, $\Delta p_{pv} < a_{pv}$, 此时电价差较小, 用户响应度为乐观响应估计与悲观响应估计的平均值; 在“饱和区”, $\Delta p_{pv} > a_{pv}$, 电价差较大, 用户响应度与乐观响应估计吻合; 当在“响应区”时, 电价差 $a_{pv} \leq \Delta p_{pv} \leq b_{pv}$, 此时用户的积极性随着电价差变大而增大, 用乐观响应隶属度 m 来表征响应区某电价差下, 用户实际响应行为符合乐观响应的概率。在“响应区”中乐观响应隶属度 m 可表示为

$$m = \frac{\Delta p_{pv} - a_{pv}}{b_{pv} - a_{pv}}, \quad a_{pv} \leq \Delta p_{pv} \leq b_{pv} \quad (12)$$

结合 m 可得到用户的实际负荷转移率为

$$\tilde{\lambda}_{pv} = \begin{cases} \frac{\lambda_{pv}^{\max} + \lambda_{pv}^{\min}}{2}, & 0 \leq \Delta p_{pv} \leq a_{pv} \\ \lambda_{pv}^{\min} + \frac{\lambda_{pv}^{\max} - \lambda_{pv}^{\min}}{2}(1+m), & a_{pv} < \Delta p_{pv} < b_{pv} \\ \lambda_{pv}^{\max}, & \Delta p_{pv} \geq b_{pv} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\tilde{\lambda}_{pv}$ 为峰转谷实际负荷转移率; λ_{pv}^{\max} 、 λ_{pv}^{\min}

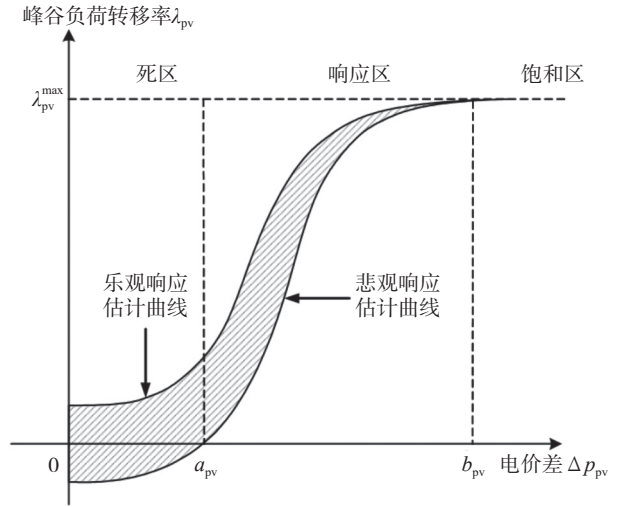


图 3 模糊需求响应机理模型

Fig.3 Mechanism model of fuzzy demand response

分别为乐观、悲观响应预测的负荷转移率。同理, 可分别求出峰转平、平转谷的实际负荷转移率 $\tilde{\lambda}_{pf}$ 、 $\tilde{\lambda}_{fv}$, 则用户需求响应产生的负荷转移量 D_t 为

$$D_t = \begin{cases} -\tilde{\lambda}_{pf}\bar{L}_p - \tilde{\lambda}_{fv}\bar{L}_p, & t \in T_p \\ \tilde{\lambda}_{pf}\bar{L}_p - \tilde{\lambda}_{fv}\bar{L}_f, & t \in T_f \\ \tilde{\lambda}_{pv}\bar{L}_v - \tilde{\lambda}_{fv}\bar{L}_f, & t \in T_v \end{cases} \quad (14)$$

式中: T_p 、 T_f 、 T_v 分别为峰、平、谷时段集合; \bar{L}_p 、 \bar{L}_f 、 \bar{L}_v 分别为实施分时电价前峰、平、谷时段的负荷平均值。则需求响应后负荷值 L_t 为

$$L_t = L_{t0} + D_t \quad (15)$$

式中, L_{t0} 为 t 时段实施分时电价前的负荷值。

3 考虑综合灵活运行碳捕集的虚拟电厂调度模型

3.1 目标函数

在满足系统各项要求下, 本文考虑建立 VPP 在 24 h 调度周期内的低碳经济调度, 因此, 目标函数为成本函数, 各项成本包括火电厂发电成本 C_Y 、碳交易成本 C_{CO_2} 、弃光弃风成本 C_Q 、碳捕集设备运行功耗成本 C_U , 则成本函数 F 为

$$F = C_Y + C_Q + C_{CO_2} + C_U \quad (16)$$

a. 发电成本。

火电机组发电成本主要是煤耗成本, 本文采用二次函数来进行描述。

$$C_Y = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (a_i(P_{Gi,t})^2 + b_i P_{Gi,t} + c_i) \quad (17)$$

式中, a_i 、 b_i 、 c_i 分别为各个机组的发电成本参数, 由机组的结构性质决定^[21-22]。

b. 弃光弃风成本。

当系统内风电、光伏和火电机组出力之和在满足系统负荷需求的情况下仍有剩余时, 系统将进行弃光弃风操作, 此时会产生弃光弃风的惩罚成本^[23], 弃光弃风惩罚成本可表述如下:

$$C_Q = \sum_{t=1}^T P_{q,t} C_q \quad (18)$$

式中: $P_{q,t}$ 为 t 时段的弃光弃风量; C_q 为单位弃光弃风惩罚成本。

c. 碳交易成本。

碳交易成本即为供电企业在政府标准下由于实际碳排放量多于或少于政府所分配的免费碳配额而在碳交易市场上购买或出售碳配额的成本。当供电企业的实际碳排放量小于分配到的碳排放额度, 就可以出售多余的碳配额得到收益; 反之, 就要从碳交易市场购买超出部分的碳配额。

碳捕集电厂中的发电机组产生的 CO_2 排放大部分被碳捕集设备捕获, 剩下部分由于功率限制无法充分捕获的 CO_2 会被排放至系统外部。则系统碳交易成本 C_{CO_2} 可表示为

$$C_{\text{CO}_2} = \sigma_T \left(E_c - \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \delta P_{G_i,t} \right) \quad (19)$$

式中: σ_T 为单位碳配额价格; δ 为碳排放量配额系数; E_c 为系统全调度周期的净碳排放量, 可表示为

$$E_c = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \xi P_{G_i,t} (1 - K_i L_{i,t}) \quad (20)$$

d. 碳捕集系统运行成本。

本文在总体成本上考虑用售电损失来作为碳捕集系统的运行成本。由于碳捕集电厂在运行时需要向碳捕集系统供给其所需的捕集能耗, 在常规电厂未安装碳捕集系统时, 该部分能量可以出售获利^[24]。因此, 从经济效益角度, 可以将安装碳捕集系统后损失的本应获得的利润定义为碳捕集系统运行成本, 可表示为

$$C_U = \sum_{t=1}^T p_t (P_{F_i,t} + P_{C_i,t}) \quad (21)$$

式中, p_t 为一个调度周期内 t 时段的电价。

3.2 约束条件

a. 系统功率平衡约束。

$$\sum_{i=1}^N P_{N_i,t} + P_{w,t} + P_{v,t} - P_{q,t} = P_{L,t} \quad (22)$$

式中: $P_{N_i,t}$ 为机组 i 在 t 时段的出力; $P_{w,t}$ 与 $P_{v,t}$ 分别为风电、光伏在时段 t 的出力; $P_{q,t}$ 为系统在 t 时段的弃光弃风量; $P_{L,t}$ 为系统内用户的负荷需求。

b. 火电厂机组相关约束。

火电机组出力上下限约束为

$$P_i^{\min} \leq P_{G_i,t} \leq P_i^{\max} \quad (23)$$

式中, P_i^{\max} 、 P_i^{\min} 分别为机组 i 出力的上下限。

火电机组爬坡约束为

$$-R_d \leq P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq R_u \quad (24)$$

式中: R_d 为机组的下爬坡速率; R_u 为机组的上爬坡速率。

系统旋转备用约束为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N (P_i^{\max} - P_{G_i,t}) \geq R_{u,t} \\ \sum_{i=1}^N (P_{G_i,t} - P_i^{\min}) \geq R_{d,t} \end{cases} \quad (25)$$

式中, $R_{u,t}$ 、 $R_{d,t}$ 分别为系统在时段 t 的正、负旋转备用容量。

c. 碳捕集电厂约束。

除式(1)~(4)外, 综合灵活运行碳捕集电厂还应满足如下相关约束:

$$\begin{cases} 0 \leq L_{i,t} \leq 1 \\ V_{FLi,t} = V_{FLi,t-1} - V_{CAi,t} \\ V_{PLi,t} = V_{PLi,t-1} + V_{CAi,t} \\ 0 \leq V_{FLi,t} \leq V_{Ri} \\ 0 \leq V_{PLi,t} \leq V_{Ri} \\ V_{FLi,0} = V_{FLi,T} \\ V_{PLi,0} = V_{PLi,T} \end{cases} \quad (26)$$

式中: $V_{FLi,t}$ 为碳捕集电厂 i 在 t 时段的富液罐容量; $V_{PLi,t}$ 为碳捕集电厂 i 在 t 时段的贫液罐容量; V_{Ri} 为碳捕集电厂 i 配置的储液罐容量; $V_{FLi,0}$ 、 $V_{PLi,0}$ 分别为富液罐、贫液罐初始溶液量, $V_{FLi,T}$ 、 $V_{PLi,T}$ 分别为富液罐、贫液罐调度周期结束时的溶液量。

综上所述, 本文构建的考虑供需双侧响应与综合灵活运行碳捕集的虚拟电厂低碳经济调度模型总结为如下模型:

$$\begin{aligned} \min F &= C_Y + C_Q + C_{\text{CO}_2} + C_U \\ \text{s.t. 式(4) ~ (10), 式(17) ~ (26)} \end{aligned} \quad (27)$$

3.3 模型求解

由前文分析可知, 本文在虚拟电厂背景下, 考虑供需双侧响应的综合灵活运行碳捕集电厂低

碳经济调度模型为多时段、大规模的非线性规划模型 (nonlinear programming, NLP)。基于 YALMIP 工具箱和 GUROBI 求解器相结合的求解策略是解决电力系统中此类问题的有效办法^[25], 因此, 本文基于 Matlab 调用 YALMIP 工具箱和 GUROBI 求解器来进行优化计算。具体步骤如下:

a. 输入风电、光伏发电、预测负荷曲线以及分时电价数据。

b. 由前文中所构建的需求响应模型计算可转移负荷量, 并形成优化负荷曲线。

c. 输入机组、碳捕集设备等相关数据, 依据需求响应后的负荷曲线, 以系统最低运营成本为目标, 对电厂出力、碳捕集设备运行情况进行优化。

4 算例分析

4.1 系统构成与参数

在本文考虑的虚拟电厂系统中, 包含 6 组由常规火力发电厂改造的碳捕集机组, 具体参数如表 1 所示。新能源装机容量为风电厂 750 MW 和光伏电站 500 MW, 其中风电、光伏出力和系统负荷预测值如图 4 所示。分时电价参考文献 [20], 设置为: 谷时段 0:00—7:00、14:00—18:00, 电价为 0.8118 元/(kW·h); 峰时段 7:00—14:00、18:00—22:00, 电价为 0.4438 元/(kW·h); 平时段 22:00—24:00, 电价为 0.5713 元/(kW·h)。算例以 1d 为一个运行周期, 将其划分为 24 个时段。各项参数设置如下: 碳捕集电厂捕集单位 CO₂ 所需能耗 γ 为 0.18 MW, 维持能耗 P_c^m 为 3 MW/h, 碳捕集效率 β 为 0.9, 碳排放成本单位碳配额价格 σ_T 为 300 元/t, 弃光弃风惩罚成本 C_q 为 500 元/MW, 储液罐的容量 V_{Ri} 为 400 m³, 碳配额分配额定强度 ξ 为 0.76, 机组的碳排放强度 δ 为 0.96。储液罐相关参数参考文献 [26]。需求响应相关参数设置如下: 乐观响应预测下 $a=0.1$, $b=0$, $c=0.4$, $k=0.1$; 悲观响应预测下 $a=0.104$, $b=-0.0036$, $c=0.4$, $k=0.1$; 电价差划分区域分界点 $a_{pv}=0.1$ 元/(kW·h), $b_{pv}=0.7$ 元/(kW·h)。

根据是否采用碳捕集电厂综合灵活运行方式与分时电价需求响应来设定 3 种场景:

场景 1, 常规碳捕集电厂的系统调度运行情况。

场景 2, 采用综合灵活运行方式的碳捕集电厂系统调度运行情况。

表 1 碳捕集机组参数

Tab.1 Parameters of carbon capture unit

机组	P_i^{\max}/MW	P_i^{\min}/MW	$(R_d, R_u)/(\text{MW}\cdot\text{h}^{-1})$	燃料成本系数		
				a_i	b_i	c_i
1	300	100	(50,50)	0.0504	160.44	10232.6
2	300	100	(50,50)	0.0504	160.44	10232.6
3	300	100	(50,50)	0.1197	189.35	8075.9
4	300	100	(50,50)	0.0266	190.12	26351.5
5	300	100	(50,50)	0.0532	190.12	13175.4
6	400	100	(50,50)	0.1197	189.35	8075.9

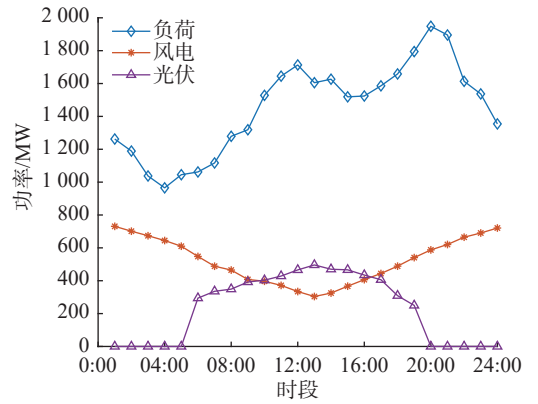


图 4 风电、光伏及电网负荷预测功率

Fig.4 Forecast power of wind power, photovoltaic and grid load

场景 3, 采用综合灵活碳捕集电厂并考虑需求响应的系统调度运行情况。

4.2 碳捕集设备灵活运行对 VPP 调度的影响

由表 2 可知, 场景 2 的运行总成本相比于场景 1 有了明显的减少, 在具体项目中主要表现为发电成本、弃光弃风成本与碳捕集成本的减少。这是因为在场景 2 中, 系统采用综合灵活运行碳捕集方式后, 由于系统内储液罐带来的能量时移特性, 使得系统内对 CO₂ 的处理集中在负荷低谷时。在负荷高峰时减少 CO₂ 捕集能耗, 在负荷低谷时增加 CO₂ 捕集能耗, 这减少了系统内碳捕集电厂的发电量, 同时增加了系统对于可再生能源的接纳容量, 显著减少了弃光弃风量, 从而减少了系统发电成本与弃光弃风成本。与此同时, 在储液罐的调节下, 大部分 CO₂ 被转移至碳捕集设备在负荷低谷时段进行处理, 电价也处于一天中的较低时段, 碳捕集能耗成本相较于场景 1 也有显著减少。在场景 3 中, 系统同时考虑需求响应与碳捕集综合灵活运行。在需求响应的调节之下, 用户负荷的峰谷差有了明显减小, 因此, 对

于可再生能源的接纳容量进一步增加。相较于场景2,系统弃光弃风量有了进一步减少,因此,系统的发电成本与弃光弃风成本也进一步降低。

表2 各场景主要成本对比

Tab.2 Comparison of main costs of each scenario

场景	F	C_Y	C_Q	C_{CO_2}	C_U
1	670.63	610.54	166.37	-364.44	258.16
2	517.25	586.15	84.37	-344.57	191.30
3	436.45	547.12	2.65	-313.03	199.72

图5为3种场景下的弃光弃风量。场景1由于碳捕集电厂功耗与机组出力高度相关,运行灵活性较差,在负荷低谷时段,系统消纳新能源能力较差,无法充分利用新能源电力。场景2由于碳捕集设备灵活运行机制的存在,能够在调度周期内吸收碳捕集进程中的 CO_2 ,调节碳捕集设备功耗。在低负荷时段,碳捕集设备功耗增大,处理储液罐中 CO_2 的同时,为系统提供更多的利用新能源的条件,因此,场景2的弃光弃风量显著少于场景1。而场景3在考虑需求响应后,由于需求响应的削峰填谷影响,负荷峰时的部分负荷转移至负荷谷时,因此,在负荷谷时段由于系统容纳量不足而被弃掉的新能源电力能够得以利用,场景3的弃光弃风量在前面两个场景的基础上进一步减少。场景2优于场景1的原因是:在场景1的基础上,场景2在供给侧增加了综合灵活运行机制,优化调度了供给侧的灵活性资源,实现了供给侧资源的最优配置。相较于场景2,场景3的弃风弃光量几近为0,原因在于场景3在供给侧最优调度的基础上引入了需求响应计划,充分调动了需求侧的灵活性资源,进一步促进了新能源的消纳。

图6为3种场景下的碳捕集能耗。场景1的碳捕集能耗在负荷谷时较少,在负荷峰时较多,总体趋势与负荷趋势较为类似。原因是常规碳捕集电厂为保证系统低碳运行,尽量吸收系统排放的 CO_2 ,造成其碳捕集功耗与电厂出力有相近的趋势。场景2与场景3的碳捕集功耗相较于场景1在负荷谷时有所增加,在负荷峰时有所减少,这是由于碳捕集综合灵活运行模式下,储液罐能够对碳捕集进程中的 CO_2 进行暂存,将峰时段产生的 CO_2 储存至谷时段进行处理,达到了碳捕集能耗

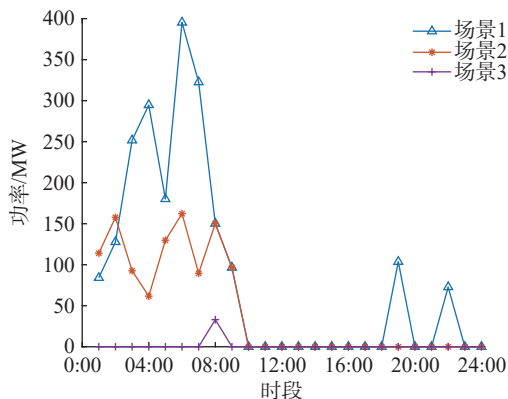


图5 3种场景下的弃光弃风量

Fig.5 Abandonment of wind power and photovoltaic power generation under three scenarios

时移的目的。换言之,供给侧以运行成本最小为目标的最优调度迫使系统将碳捕集能耗从高电价的负荷高峰时段转移至低电价的负荷低谷时段,使得运行成本最小的同时也能够实现移峰填谷,匹配供需,减轻系统供能压力。

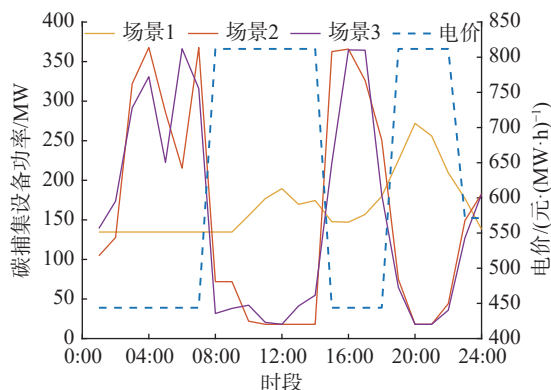


图6 3种场景下碳捕集能耗

Fig.6 System carbon capture energy consumption under three scenarios

图7为3种场景下系统碳排放量。由于碳捕集效率的限制,碳捕集电厂无法吸收运行过程中产生的 CO_2 ,一定比例的 CO_2 被直接排放至系统外部。由图可知,场景1由于碳捕集设备功耗与火电厂发电机组的高度耦合,其 CO_2 排放量变化曲线与电厂出力曲线趋势基本相同。场景2在调度周期内的碳排放量相较于场景1的峰时段较少,谷时段较多,原因是在综合灵活运行方式下,碳捕集系统的能量时移特性,将在负荷峰时的碳捕集能耗转移至负荷谷时,这部分功耗相对应的 CO_2 排放量也就被转移至负荷谷时。场景3在考虑需求响应的影响后,峰时段的部分负荷转移至谷时段,因此,调度周期内的碳排放量相比场景1和场景2峰时段较少,谷时段较多。

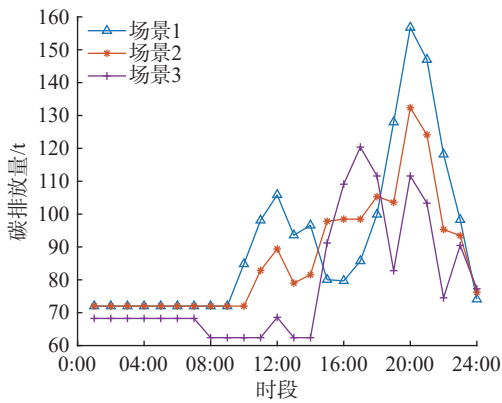


图7 3种场景下机组碳排放量

Fig.7 Carbon emission of units under three scenarios

图8为调度周期内储液罐系统提供溶液量的变化。由图可知, 储液罐系统在3:00—9:00时段和15:00—17:00时段负荷谷时, 由富液罐提供溶液, 向碳捕集设备释放 CO_2 , 来增加碳捕集设备的能耗, 降低碳捕集电厂的净出力, 给可再生能源的上网消纳留出更充足的空间。在10:00—14:00时段和20:00—24:00时段负荷峰时, 由贫液罐提供溶液, 储存碳捕集进程中的 CO_2 , 以此来减少碳捕集设备的功耗, 使系统能更加安全稳定地完成负荷峰时段的电力供给。除此以外, 结合分时电价可以看出, 部分高电价时段的碳捕集设备功耗被转移到了低电价时段, 实现了碳捕集设备在调度周期内对电价的响应。相较于常规碳捕集电厂, 综合灵活运行方式能够更好地对电价进行响应, 从提高系统经济效益的角度来看, 此举也有利于碳捕集电厂在市场中的持续运行。

4.3 系统相关配置灵敏度分析

图9为系统内不同储液罐容量下系统的弃光弃风成本与碳排放量变化趋势。由图可知, 随着储液罐容量的上升, 系统弃光弃风成本与碳排放量均呈现下降趋势, 最后趋于平稳。原因是: 随着储液罐容量的增加, 碳捕集设备在运行周期内进行能量时移的能力就越强, 系统对于负荷和电价的响应能力也就越强。当系统储液罐容量达到 4800 m^3 时, 系统弃光弃风成本与碳排放量均不再下降, 原因是此时储液罐容量已完全能够满足碳捕集设备在调度周期内所有时段对 CO_2 的相关处理操作。由于本文模型中未考虑储液罐设备的相关折旧成本, 因此, 储液罐容量是否增加, 取决于储液罐容量增加后碳排放减少带来的碳交易收益能否抵消储液罐容量上升带来的成本。

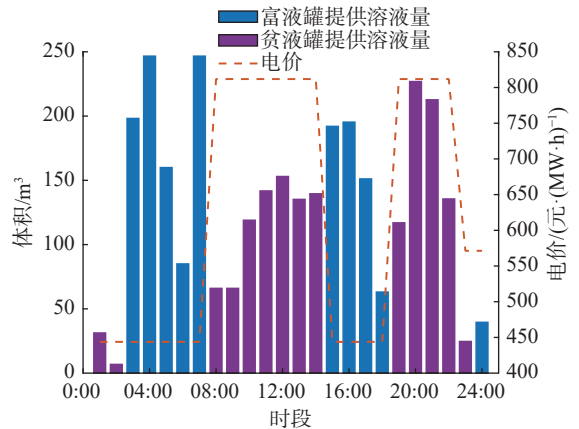


图8 储液罐供给溶液量变化

Fig.8 Trend of solution outflow from the storage tank

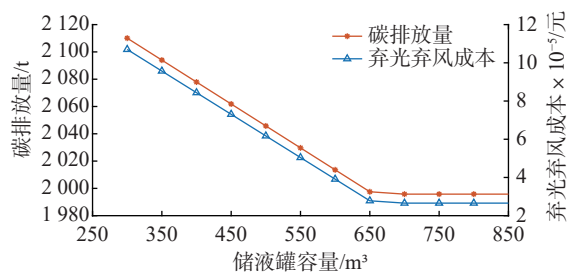


图9 不同储液罐容量下弃光弃风成本和碳排放量

Fig.9 Cost and carbon emissions of waste light and air under different storage tank capacities

5 结论

为了充分调动含碳捕集电厂电力系统的灵活性资源, 本文同时考虑供给侧碳捕集电厂的综合灵活运行方式与需求侧的需求响应计划。供给侧以综合灵活运行碳捕集电厂为响应主体, 需求侧参考模糊需求相应机理建立基于分时电价的需求响应模型, 建立供、需两侧协同运行的虚拟电厂优化调度模型。对 CO_2 的捕集与再生过程进行解耦, 增强了系统的灵活性, 提升了系统的调峰能力, 减少了系统的弃光弃风量, 降低了系统的运行成本。进行算例仿真并对得到的结果进行分析, 得出的结论如下:

a. 碳捕集设备综合灵活运行方式能够有效地解决常规碳捕集设备捕集能耗与电厂发电功率高度相关的问题。相较于传统碳捕集电厂, 其能量时移特性能够调动供给侧的灵活资源, 增强系统对于可再生能源的消纳能力, 显著降低系统碳排放量和弃光弃风量。

b. 碳捕集电厂综合灵活运行结合电价需求响应后的供需双侧响应, 能够充分调动系统内响应

资源,降低碳捕集电厂运行成本,提升系统的经济性和环境友好性。

综上所述,本文所构建的模型相较于传统的需求响应模型,有更好的灵活性、经济性、环境友好性,能够帮助提升电力系统的可靠性和安全性。本文未考虑可再生能源的不确定性以及受不同地区、气候影响的负荷波动,后续研究将会进一步考虑这些因素。

参考文献:

- [1] CUI Y, ZHANG C, DENG G B, et al. Multi objective low carbon economic dispatch of power system considering integrated flexible operation of carbon capture power plant[C]//Proceedings of 2021 Power System and Green Energy Conference (PSGEC). Shanghai: IEEE, 2021: 321-326.
- [2] 代业明,高亚丽,尹慧,等.考虑售电可再生新能源补贴的电力市场综合需求响应策略研究[J/OL].中国管理科学, [2023-03-17]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.2441>.
- [3] 杜刚,赵冬梅,刘鑫.计及风电不确定性优化调度研究综述[J].中国电机工程学报,2023,43(7):2608-2626.
- [4] 张尧翔,刘文颖,李潇,等.高比例新能源接入电网光热发电火电联合调峰优化控制方法[J].电力自动化设备,2021,41(4):1-7,32.
- [5] 康重庆,季震,陈启鑫.碳捕集电厂灵活运行方法评述与展望[J].电力系统自动化,2012,36(6):1-10.
- [6] 周任军,孙洪,唐夏菲,等.双碳量约束下风电-碳捕集虚拟电厂低碳经济调度[J].中国电机工程学报,2018,38(6):1675-1683.
- [7] 崔杨,曾鹏,惠鑫欣,等.考虑碳捕集电厂综合灵活运行方式的低碳经济调度[J].电网技术,2021,45(5):1877-1885.
- [8] 廖跃洪,陈洁,杨彦飞,等.考虑碳捕集电厂综合灵活运行下的含P2G和光热电站虚拟电厂优化调度[J].电力建设,2022,43(4):20-27.
- [9] 高瑞阳,王新宝,高娴,等.考虑氢能利用与碳捕集联合灵活运行的综合能源系统源荷低碳优化[J].电力系统及其自动化学报,2024,36(5):37-47.
- [10] 韩丽,王冲,于晓娇,等.考虑风电爬坡灵活调节的碳捕集电厂低碳经济调度[J].电工技术学报,2024,39(7):2033-2045.
- [11] 黄文涛,罗杰,葛磊蛟,等.考虑灵活碳捕集电厂与抽水蓄能联合的广义经济调度策略[J].中国电机工程学报,2024,44(4):1430-1445.
- [12] WU G Q, HUA H J, NIU D X. Low-carbon economic dispatch optimization of a virtual power plant based on deep reinforcement learning in China's carbon market environment[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2022, 14: 056301.
- [13] 卫志农,余爽,孙国强,等.虚拟电厂的概念与发展[J].电力系统自动化,2013,37(13):1-9.
- [14] 李鹏,余晓鹏,张艺涵,等.计及碳捕集和电转气的农村虚拟电厂多目标随机调度优化模型[J].电力建设,2022,43(7):24-36.
- [15] 袁桂丽,钟飞,张睿,等.考虑碳捕集及需求响应的虚拟电厂热电联合优化调度[J].电网技术,2023,47(11):4458-4466.
- [16] 韩学义.电力行业二氧化碳捕集、利用与封存现状与展望[J].中国资源综合利用,2020,38(2):110-117.
- [17] 彭元,娄素华,吴耀武,等.考虑储液式碳捕集电厂的含风电系统低碳经济调度[J].电工技术学报,2021,36(21):4508-4516.
- [18] 陈海鹏,陈晋冬,张忠,等.计及灵活运行碳捕集电厂捕获能耗的电力系统低碳经济调度[J].电力自动化设备,2021,41(9):133-139.
- [19] 张智晟,于道林.考虑需求响应综合影响因素的RBF-NN短期负荷预测模型[J].中国电机工程学报,2018,38(6):1631-1638.
- [20] 杨世博,孙亮,陈立东,等.计及分时电价的含冷热电联供型微网的配电网系统协调优化调度[J].电力自动化设备,2021,41(4):15-23.
- [21] 高岩.基于需求侧管理实时电价优化方法综述[J].上海理工大学学报,2022,44(2):103-111,121.
- [22] QU D Q, LI J X, YONG M. Real-time pricing for smart grid considering energy complementarity of a microgrid interacting with the large grid[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 141: 108217.
- [23] 朱晔,兰贞波,隗震,等.考虑碳排放成本的风光储多能互补系统优化运行研究[J].电力系统保护与控制,2019,47(10):127-133.
- [24] 周任军,刘阳升,成天乐,等.考虑碳排放权价格敏感区间的碳捕集水平优化建模[J].电力系统自动化,2013,37(11):46-50,57.
- [25] 邱纯,应展烽,冯奕,等.计及碳配额的混合储能综合微能源网优化运行研究[J].电力工程技术,2022,41(2):119-127.
- [26] 王义军,李梦涵,齐岩.计及碳捕集电厂综合灵活运行方式的含P2G综合能源系统低碳经济调度[J].电力自动化设备,2023,43(1):1-8.

(编辑:董伟)