

基于数据驱动与供需灵活性的综合能源系统 两阶段鲁棒优化低碳调度

胡利,程静,王贵召

(新疆大学 可再生能源发电与并网控制教育部工程研究中心,乌鲁木齐 830017)

摘要:针对大规模可再生能源并网导致综合能源系统运行中资源灵活性利用不足的问题,提出一种基于数据驱动与供需灵活性的综合能源系统两阶段鲁棒优化低碳调度策略。为充分利用 H_2 与 NH_3 的低碳特性,搭建包含掺氢燃气轮机、掺氢燃气锅炉、掺氨火电机组、电转气设备与电转氨设备协同运行的供电结构,并与电动汽车、需求响应负荷等共同构成供需灵活响应模型;采用无穷维高斯混合模型对风电实际出力数据进行聚类,生成基于数据驱动的风电不确定集,从而建立以系统综合运行成本最低为目标的四层两阶段鲁棒优化低碳调度模型;以西北某地区样本数据进行算例分析,结果表明所提策略与供需灵活响应模型能有效提高系统的可靠性、灵活性、低碳性与经济性。

关键词:综合能源系统;供需灵活性;数据驱动;两阶段鲁棒优化;低碳调度;电转氨

中图分类号: TM721

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202512018

0 引言

采用新能源能够促进经济高质量发展,能源消耗低碳清洁,但风光出力具有不确定性,会给综合能源系统(integrated energy system, IES)运行造成困难^[1]。针对这个问题,需要对其不确定性进行建模,一般采用随机规划、场景分析法、鲁棒优化等方法处理。其中,鲁棒优化把不确定性用一个不确定集合表示,得到最恶劣场景下的优化策略,但其调度计划常常过于保守。随着历史数据的累积,数据驱动的鲁棒优化逐渐被重视^[2-3],考虑 Wasserstein 距离^[4]与主成分分析的不确定集^[5]被提出,但实际风光分布往往非常复杂,具有多模态的特点,使得这些方法在实际应用中难以适用。

随着新能源装机占比越来越高,具有灵活调节能力的常规机组占比越来越少,导致消纳问题日益凸显^[6]。文献[7]采用碳捕集(carbon capture, utilization and storage, CCUS)来提高能源利用效率并减少 CO_2 排放。文献[8]将CCUS与电转气(electric to gas conversion, P2G)耦合,降低了系统运行成本的

同时减少了碳排放。文献[9]提出了一种考虑P2G、CCUS和氢燃料电池协调运行的低碳经济调度方法,进一步促进了消纳和低碳运行。文献[10]利用含溶液存储器的碳捕集将 CO_2 的吸收环节与再生环节分离,提供了新的灵活性储备。同时,氨气作为一种零碳能源,在IES中使用也有利于风光消纳与碳排放减少。文献[11]综述了氨气作为微型燃气轮机(gas turbine, GT)燃料具有减少机组运行成本、燃烧效率高、绿色燃烧等特点。文献[12]将电转氨(power to ammonia, P2A)与火电机组(thermal power, TP)燃烧相结合,提高了IES的风光利用率。文献[13]开发了包含氢和氨储能的聚合分布式能源电-氢-氨综合能源系统,提高了系统的运行成本与高可再生能源渗透率。上述文献只考虑了供应侧的灵活性运行,未考虑将其与需求侧进行协同运行。

需求响应作为需求侧管理的手段之一,不仅能够促进风光消纳,还能提高系统可靠性^[14]。文献[15]引入了需求响应机制,促进系统低碳经济运行和能源可持续发展。文献[16]提出了一种具有需求响应灵活性值的功率可控可变制冷剂流量系统。文献[17]充分挖掘了电动汽车(electric vehicle, EV)的集群可调度潜力,降低了系统成本,提高了负荷侧的灵活性。以上文献在多样化需求响应负荷引入IES优化调度中取得了良好的效果,但未充分协调利用源侧灵活性调度资源,实现源荷两侧灵活响应,共同提高系统灵活性。

基于此,本文提出一种基于数据驱动与供需灵活性的IES两阶段鲁棒优化低碳调度策略。首先,在耦合CCUS、P2G与阶梯碳交易机制实现 CO_2 循环利用的基础上,在源侧引入P2A、GT、燃气锅炉(gas

收稿日期:2024-11-12;修回日期:2025-05-08

在线出版日期:2026-01-26

基金项目:新疆维吾尔自治区重大研发专项(2022A01001-4);
国家重点研发计划项目(2021YFB1506902);新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2022B01003-3)

Project supported by the Major Research and Development Project of Xinjiang Uygur Autonomous Region(2022A01001-4), the National Key Research and Development Program Project(2021YFB1506902) and the Key Research and Development Program Project of Xinjiang Uygur Autonomous Region(2022B01003-3)

boiler, GB)、TP、储能储气等设备,通过在机组中掺氢、掺氨实现能源低碳化,并与荷侧的EV、需求响应负荷等部分共同构成供需灵活响应模型,提高IES的灵活性与消纳能力。然后,采用无穷维高斯混合模型(infinite Gaussian mixture model, IGMM)对风电进行聚类^[18],从而建立基于数据驱动的风电不确定集。最后,搭建4层min-max-max-min两阶段鲁棒优化调度模型,采用嵌套列与约束生成(nested column and constraint generation, NC&CG)算法对模型进行求解,通过引入不确定调节参数来灵活选择模型的保守程度,控制IES的鲁棒性。

1 IES模型搭建

IES是综合电、热、气、氢、氨等多种能源耦合而成的能源系统,该结构如附录A图A1所示。其中,源侧包含风电厂、GT、GB、TP、P2G、P2A、CCUS、电加热(electrical heating, EH);能源储存设备包含储氢罐、储氨罐、电储能、热储能;荷侧包含EV、电热负荷,系统与上级气网相连。考虑到GT与P2A在工作中会产生大量余热,通过余热回收和利用,可作为热源输入配热网供应热负荷。

2 IES供需灵活响应模型

将IES中的灵活性资源按照源、荷、储进行分类,并对这3个分类进行详细建模。

2.1 源侧灵活响应建模

源侧灵活性供电资源包括GT、GB、TP等设备,通过与P2G、P2A与CCUS设备耦合可以实现各能源之间的相互流动。由于H₂与NH₃的低碳特性,在GT、GB掺氢与TP掺氨,能提高机组发电效率,实现能源低碳化,提升IES的风电消纳能力。当电负荷低谷时,将供给电负荷的剩余电能通过P2A、EH、P2G等设备,将电能转化为热能与气体资源或储存起来。电储能因其具有时移特性,当电负荷高峰时,能够将低谷时储存的电能在高峰时放出,实现源侧的灵活响应。

2.1.1 掺氢GT

GT总输出功率 P_{PH} 包括产电功率 P_{CHP} 与产热功率 R_{CHP} ,其出力及爬坡功率约束如式(1)所示。

$$\begin{cases} P_{PH} = P_{CHP} + R_{CHP} \\ P_{CHP}^{\min} \leq P_{CHP} \leq P_{CHP}^{\max} \\ R_{CHP}^{\min} \leq R_{CHP} \leq R_{CHP}^{\max} \\ \Delta P_{CHP}^{\text{down}} \leq P_{CHP}^t - P_{CHP}^{t-1} \leq \Delta P_{CHP}^{\text{up}} \\ \Delta R_{CHP}^{\text{down}} \leq R_{CHP}^t - R_{CHP}^{t-1} \leq \Delta R_{CHP}^{\text{up}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{CHP}^{\min} 与 R_{CHP}^{\min} 分别为GT电、热功率下限; P_{CHP}^{\max} 、 R_{CHP}^{\max} 分别为GT电、热功率上限; $\Delta P_{CHP}^{\text{up}}$ 、 $\Delta R_{CHP}^{\text{up}}$ 和 $\Delta P_{CHP}^{\text{down}}$ 、 $\Delta R_{CHP}^{\text{down}}$ 分别为GT电功率、热爬坡功率的上限

和下限; P_{CHP}^t 、 R_{CHP}^t 分别为 t 时段GT的产电、产热功率。

GT掺氢需要满足的等式约束如式(2)所示。

$$\begin{cases} P_{CHP} = (Q_{CH_4, CHP} + H_{H_2, CHP}) \eta_{CHP}^P \\ R_{CHP} = (Q_{CH_4, CHP} + H_{H_2, CHP}) \eta_{CHP}^R \\ K_{H_2, CHP} = \frac{H_{H_2, CHP} / L_{H_2}}{Q_{CH_4, CHP} / L_{CH_4} + H_{H_2, CHP} / L_{H_2}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $Q_{CH_4, CHP}$ 、 $H_{H_2, CHP}$ 分别为GT消耗天然气、氢气的功率; η_{CHP}^P 、 η_{CHP}^R 分别为GT的电、热效应; $K_{H_2, CHP}$ 为GT掺氢比; L_{H_2} 为氢气热值; L_{CH_4} 为天然气热值。

2.1.2 掺氢GB

GB出力及爬坡功率约束如式(3)所示。

$$\begin{cases} R_{GB}^{\min} \leq R_{GB} \leq R_{GB}^{\max} \\ \Delta R_{GB}^{\text{down}} \leq R_{GB}^t - R_{GB}^{t-1} \leq \Delta R_{GB}^{\text{up}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: R_{GB} 为GB产热功率; R_{GB}^{\max} 、 R_{GB}^{\min} 分别为GB热功率的上、下限; $\Delta R_{GB}^{\text{up}}$ 、 $\Delta R_{GB}^{\text{down}}$ 分别为GB热爬坡功率的上、下限。

GB掺氢需要满足的等式约束如式(4)所示。

$$\begin{cases} R_{GB} = (Q_{CH_4, GB} + H_{H_2, GB}) \eta_{GB}^R \\ K_{H_2, GB} = \frac{H_{H_2, GB} \rho_{H_2} / m_{H_2} L_{H_2}}{Q_{CH_4, GB} \rho_{CH_4} / m_{CH_4} L_{CH_4} + H_{H_2, GB} \rho_{H_2} / m_{H_2} L_{H_2}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $Q_{CH_4, GB}$ 与 $H_{H_2, GB}$ 为GB消耗CH₄与H₂的功率; η_{GB}^R 为GB热效应; $K_{H_2, GB}$ 为GB掺氢比; m_{H_2} 、 m_{CH_4} 分别为H₂、CH₄的相对分子质量; ρ_{H_2} 、 ρ_{CH_4} 分别为H₂、CH₄的密度。

2.1.3 掺氨TP

TP出力 P_{th} 及爬坡功率约束如式(5)所示。

$$\begin{cases} u_{th} P_{th}^{\min} \leq P_{th} \leq u_{th} P_{th}^{\max} \\ \Delta P_{th}^{\text{down}} \leq P_{th}^t - P_{th}^{t-1} \leq \Delta P_{th}^{\text{up}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: u_{th} 为TP运行状态,是二进制变量; P_{th}^{\max} 、 $\Delta P_{th}^{\text{up}}$ 分别为TP发电、爬坡功率的上限; P_{th}^{\min} 、 $\Delta P_{th}^{\text{down}}$ 分别为TP发电、爬坡功率的下限; P_{th}^t 为在 t 时段TP的产电功率。

TP掺氨燃烧约束如式(6)所示。

$$\begin{cases} M_m^i = a_i (P_{th}^i)^2 + b_i P_{th}^i + c_i \\ M_{m, NH_3}^i = M_m^i - m_{NH_3} L_{NH_3} L_m \\ K_{NH_3, th} = m_{NH_3} L_{NH_3} / (L_m M_{m, NH_3}^i) \\ 0 \leq K_{NH_3, th} \leq K_{NH_3, th}^{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_{th}^i 为第 i 个TP的发电功率; M_m^i 、 M_{m, NH_3}^i 分别为未掺氨燃烧、掺氨燃烧时的煤耗; a_i 、 b_i 与 c_i 为煤耗特性系数; m_{NH_3} 、 $K_{NH_3, th}$ 分别为掺氨量、掺氨比例; L_{NH_3} 、 L_m 分别为NH₃、煤炭的热值; $K_{NH_3, th}^{\max}$ 为最大掺氨比例。

2.2 荷侧灵活响应建模

荷侧灵活性资源包括EV和电热需求响应负荷。系统可引导用户将具有可转移性质的电、热负荷,从

负荷高峰时段转移到负荷低谷时段。同时,电、热负荷之间在同一时段具有相互替代作用,用户可选择不同类型的能源供给来满足负荷需求^[19]。集群EV建模、可转移需求响应电热负荷建模与可替代需求响应电热负荷建模见文献[20]。

2.3 储侧灵活响应建模

储能设备包括电储能与热储能,储气设备包括储氢罐与储氨罐。储能与储气设备储存条件相同,因此仅对储能设备约束进行描述,储气设备同理可得。储能设备建模见文献[21]。

3 考虑供需灵活性的IES两阶段鲁棒优化低碳调度模型

3.1 基于数据驱动的风电不确定集

为了减少风电出力不确定性对运行的影响,本文采用数据驱动方式描述其不确定性。

首先,采用IGMM对风电实际出力数据 e_t 进行聚类,如式(7)所示。

$$\begin{cases} D_e = [e_1, \dots, e_{N_t}] \\ e_1, \dots, e_{N_t} \sim \sum_{k=1}^{\infty} (\pi_k N(\boldsymbol{\mu}_k, \boldsymbol{\Phi}_k)) \end{cases} \quad (7)$$

式中: D_e 为风电原始数据集; N_t 为样本总数; k 为簇数,取为样本序列数; $N(\boldsymbol{\mu}_k, \boldsymbol{\Phi}_k)$ 为均值矩阵 $\boldsymbol{\mu}_k$ ($\boldsymbol{\mu}_k \in \mathbb{R}^n$)、协方差矩阵 $\boldsymbol{\Phi}_k$ ($\boldsymbol{\Phi}_k \in \mathbb{R}^{n \times n}$)的高斯分布;i.i.d表示独立同分布; π_k 为分布的权重。

然后,采用中国餐馆随机过程^[22]作为先验分布,再采用Metropolis Hastings算法进行间接采样,得到风电聚类结果如式(8)所示。

$$e_1, \dots, e_{N_t} \sim \sum_{k=1}^{n_c} (\pi_k N(\boldsymbol{\mu}_k, \boldsymbol{\Phi}_k)) \quad (8)$$

式中: $n_c = |\{\pi_k\}|$,为组件总数。

引入不确定性调节参数 Γ ,最终得到不确定集矩阵 U 如式(9)所示。

$$U = \bigcup_{k=1}^{n_c} U_k, U_k = \left\{ u \left| \begin{array}{l} u = \boldsymbol{\mu}_k + \boldsymbol{\Phi}_k^{-\frac{1}{2}} \boldsymbol{B} \\ \|\boldsymbol{B}\|_2 \leq \Gamma \end{array} \right. \right\} \quad (9)$$

式中:不确定集 U 为 n_c 个椭球型不确定集 U_k 的并集^[23]; u 为风电不确定变量; \boldsymbol{B} 为二进制变量矩阵。因为包含的组件数量是无限的,所以从本质上来看,上述方法是一种数据驱动的方法。

3.2 目标函数

以综合成本 F 最小为目标函数,表达式如式(10)所示。

$$\min F = \sum_{i=1}^{24} (F_{CO_2} + F_{th} + F_{cur} + F_{buy} + F_{DR} + F_{EV}) \quad (10)$$

式中: F_{CO_2} 为碳交易与碳封存成本; F_{th} 为TP启停、煤

耗与运维成本; F_{cur} 为弃风成本; F_{buy} 为购气成本; F_{DR} 为需求响应补偿成本; F_{EV} 为EV充电成本。

碳交易与碳封存成本、TP启停、煤耗与运维成本、弃风成本、购气成本、需求响应补偿成本与EV充电成本如附录A式(A1)~(A6)所示。

3.3 约束条件

3.3.1 P2G设备

P2G设备运行约束如式(11)所示。

$$\begin{cases} L_{H_2} H_{P2H} = \eta_{P2H} P_{P2H} \eta_{P2R} \\ Q_{CH_4} = \eta_{CH_4} H_{CH_4} \\ P_{P2H}^{\min} \leq P_{P2H} \leq P_{P2H}^{\max} \\ \Delta P_{P2H}^{\downarrow} \leq P_{P2H}^t - P_{P2H}^{t-1} \leq \Delta P_{P2H}^{\uparrow} \\ M_{CO_2, CH_4} = \rho_{CO_2} \times 3600 \times Q_{CH_4} / L_{CH_4} \end{cases} \quad (11)$$

式中: P_{P2H} 、 H_{P2H} 分别为电解槽的能耗、产氢功率; H_{CH_4} 、 Q_{CH_4} 分别为甲烷化耗氢功率、产生甲烷功率; η_{P2H} 、 η_{CH_4} 分别为 H_2 、 CH_4 的转化效率; η_{P2R} 为1 kW·h电能转换为热能的效率; P_{P2H}^{\max} 、 P_{P2H}^{\min} 分别为电解槽能耗的上、下限; $\Delta P_{P2H}^{\uparrow}$ 、 $\Delta P_{P2H}^{\downarrow}$ 分别为能耗爬升的上、下限; M_{CO_2, CH_4} 为甲烷化所需 CO_2 质量; ρ_{CO_2} 为 CO_2 密度。

3.3.2 含储液的CCUS设备

碳捕集设备吸收系统内排放的 CO_2 并向电转气设备提供碳原料,实现了 CO_2 的循环利用。

CCUS总能耗 $P_{CCUS, all}$ 包括固定能耗 P_F 和运行能耗 P_{CCUS} ,具体约束如式(12)所示。

$$\begin{cases} P_{CCUS, all} = P_{CCUS} + P_F \\ P_{CCUS} = \mu_{CCUS} M_{CO_2} \\ P_{CCUS}^{\min} \leq P_{CCUS} \leq P_{CCUS}^{\max} \end{cases} \quad (12)$$

式中: μ_{CCUS} 为处理单位质量 CO_2 的能耗; M_{CO_2} 为处理的 CO_2 质量; P_{CCUS}^{\max} 、 P_{CCUS}^{\min} 为CCUS能耗的上、下限。

CCUS主动释放 CO_2 降低能耗的约束如式(13)所示。

$$\begin{cases} M_{CO_2, CCUS} = M_{all} - m_{out} \\ M_{all} = M_{CO_2, CHP} + M_{CO_2, GB} + M_{CO_2, th} \\ 0 \leq M_{CO_2, CCUS} \leq \mu_{CO_2} M_{all} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $M_{CO_2, CCUS}$ 为吸收的 CO_2 质量; M_{all} 为 CO_2 总排放量; m_{out} 为直接排入大气的 CO_2 质量; $M_{CO_2, CHP}$ 、 $M_{CO_2, GB}$ 与 $M_{CO_2, th}$ 分别为GT、GB与TP产生的 CO_2 质量; μ_{CO_2} 为CCUS吸收的 CO_2 质量占 M_{all} 的最高比例。

加装储液设备, t 时刻的容量约束如式(14)所示。

$$\begin{cases} V_F^t = V_F^{t-1} + v_{F, in}^t - v_{F, out}^t \\ V_P^t = V_P^{t-1} + v_{P, in}^t - v_{P, out}^t \end{cases} \quad (14)$$

式中: V_F^t 、 V_P^t 分别为富、贫液的体积; $v_{F, in}^t$ 、 $v_{P, in}^t$ 与 $v_{F, out}^t$ 、 $v_{P, out}^t$ 分别为富、贫液储存设备流进与流出的流量体积。

其中,储液设备相应的容量约束如式(15)所示。

$$\begin{cases} V_F^{\min} \leq V_F \leq V_F^{\max} \\ V_P^{\min} \leq V_P \leq V_P^{\max} \\ V_P + V_F = V_{PF}^{\max} \\ \sum_{t=1}^{24} (v_{P, \text{in}}^t - v_{F, \text{out}}^t) = 0 \\ \sum_{t=1}^{24} (v_{F, \text{in}}^t - v_{P, \text{out}}^t) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中： V_F^{\min} 与 V_P^{\min} 分别为富、贫液最小储量体积； V_F^{\max} 与 V_P^{\max} 分别为富、贫液最大储量体积； V_{PF}^{\max} 为储液设备容量的最大体积。后2行约束储液设备在一个运行周期结束后容量保持不变，有利于循环调度。

碳封存约束如式(16)所示。

$$\begin{cases} 0 \leq M_{\text{CO}_2, \text{sto}} \leq M_{\text{CO}_2, \text{sto}}^{\max} \\ M_{\text{CO}_2} = M_{\text{CO}_2, \text{CH}_4} + M_{\text{CO}_2, \text{sto}} \end{cases} \quad (16)$$

式中： $M_{\text{CO}_2, \text{sto}}$ 为CCUS再生的碳封存量； $M_{\text{CO}_2, \text{sto}}^{\max}$ 为碳最大封存量。

阶梯碳交易约束及碳交易成本如附录A式(A7)~(A9)所示，IES中 CO_2 的流向如图1所示。

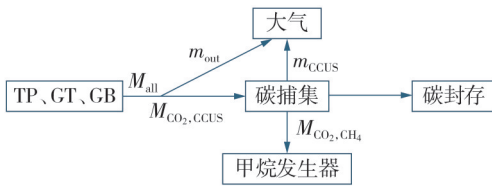


图1 IES中 CO_2 流向图

Fig.1 CO_2 flow diagram of IES

3.3.3 EH设备

$$R_{\text{EB}} = \eta_{\text{EB}} P_{\text{EB}} \quad (17)$$

式中： R_{EB} 、 P_{EB} 分别为EH的产热功率、耗电功率； η_{EB} 为EH热效率，一般可以达到98%。

3.3.4 P2A设备

P2A的出力 P_{NH_3} 及爬坡功率约束如式(18)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{NH}_3}^{\min} \leq P_{\text{NH}_3} \leq P_{\text{NH}_3}^{\max} \\ \Delta P_{\text{NH}_3}^{\text{down}} \leq P_{\text{NH}_3}^t - P_{\text{NH}_3}^{t-1} \leq \Delta P_{\text{NH}_3}^{\text{up}} \end{cases} \quad (18)$$

式中： $P_{\text{NH}_3}^{\max}$ 、 $P_{\text{NH}_3}^{\min}$ 分别为P2A能耗的上、下限； $\Delta P_{\text{NH}_3}^{\text{up}}$ 、 $\Delta P_{\text{NH}_3}^{\text{down}}$ 分别为P2A爬坡功率的上、下限。

P2A的运行约束如式(19)所示。

$$\begin{cases} M_{\text{NH}_3} = P_{\text{NH}_3} / w_{\text{NH}_3} \\ R_{\text{NH}_3} = \eta_r R_{\text{NH}_3}^r M_{\text{NH}_3} \\ M_{\text{NH}_3}^{\text{H}_2} = \mu_{\text{H}_2\text{N}} M_{\text{NH}_3} \\ H_{\text{P2H}} = \rho_{\text{H}_2} M_{\text{NH}_3}^{\text{H}_2} \end{cases} \quad (19)$$

式中： M_{NH_3} 为制取的 NH_3 质量； w_{NH_3} 为P2A单位能耗； R_{NH_3} 为P2A的热功率； η_r 为P2A用于供热的热释放比例； $R_{\text{NH}_3}^r$ 为生成单位质量 NH_3 释放的反应热； $M_{\text{NH}_3}^{\text{H}_2}$ 为

P2A所需的 H_2 质量； $\mu_{\text{H}_2\text{N}}$ 为P2A所需 H_2 与 NH_3 质量的比值。

3.3.5 功率平衡约束

IES内部包括电、热、气、氢4种能量流，其功率平衡约束为：

$$\begin{cases} P_{\text{WT}} + P_{\text{CHP}} + P_{\text{th}} + P_{\text{E}}^{\text{dis}} = P_{\text{P2H}} + P_{\text{CCUS}} + P_{\text{NH}_3} + P_{\text{EB}} + \\ \quad P_{\text{E}}^{\text{ch}} + P_{\text{con}} + P_{\text{tran}} + P_{\text{cut}} + P_{\text{n, ch}} \\ R_{\text{CHP}} + R_{\text{GB}} + R_{\text{EB}} + R_{\text{E}}^{\text{dis}} + R_{\text{NH}_3} = R_{\text{E}}^{\text{ch}} + R_{\text{con}} + R_{\text{tran}} + R_{\text{cut}} \\ Q_{\text{G}} + Q_{\text{CH}_4} = Q_{\text{CH}_4, \text{CHP}} + Q_{\text{CH}_4, \text{GB}} \\ H_{\text{P2H}} + H_{\text{E}}^{\text{dis}} = H_{\text{CH}_4} + H_{\text{H}_2, \text{CHP}} + H_{\text{H}_2, \text{GB}} + H_{\text{E}}^{\text{ch}} \end{cases} \quad (20)$$

式中： P_{E}^{ch} 、 $P_{\text{E}}^{\text{dis}}$ 分别为电储能的充、放电功率； P_{con} 为常规电负荷的充电负荷； P_{tran} 、 P_{cut} 分别为可转移、可替代需求响应电负荷的充电功率； $P_{\text{n, ch}}$ 为集群EV的充电功率； P_{WT} 为风电机组的供电功率； Q_{G} 为向天然气管购买的天然气功率； R_{E}^{ch} 、 $R_{\text{E}}^{\text{dis}}$ 分别为热储能的充、放热功率； R_{con} 为常规热负荷的充热负荷； R_{tran} 、 R_{cut} 分别为可转移、可替代需求响应热负荷的充热功率； H_{E}^{ch} 、 $H_{\text{E}}^{\text{dis}}$ 分别为储氢罐的充、放氢功率。

3.4 模型求解

由于本文目标函数为4层结构，单阶段鲁棒优化方法处理困难且结果过于保守，而两阶段鲁棒优化可将问题分成2个阶段，让第2个阶段根据第1个阶段的决策结果制定更好的策略，由此应对不确定性的影响。这种方法能降低保守性，提高模型的鲁棒性，故本文采用两阶段鲁棒优化方法来处理求解模型。

目标函数如式(21)所示。

$$\begin{cases} \min_x \left(\sum_{t=1}^{24} \max_{k \in \{1, \dots, n_t\}} \max_{u \in U_k} \min_{y \in \Omega(x, u)} F \right) \\ \text{s.t.} \begin{cases} Dx \geq d \\ Ny \geq n \\ Ky = k \\ Fx + Gy + Eu \geq h \\ I_u y = u \end{cases} \end{cases} \quad (21)$$

式中： x 、 y 为决策变量矩阵； $\Omega(x, u)$ 为 y 的可行域， u 为不确定变量的集合； D 、 N 、 F 、 G 、 E 、 I_u 为系数矩阵； d 、 n 、 k 、 h 为常数列向量。

将式(21)解耦，得到主问题形式如式(22)所示。

$$\begin{cases} \min_x \left(c_1^T x + \sum_{t=1}^{24} q(x) \right) \\ \text{s.t.} \begin{cases} Dx \geq d \\ Fx + Gy_t \geq h \end{cases} \end{cases} \quad (22)$$

式中： c_1 为第1阶段成本系数； $q(x)$ 为子问题关于 x 的响应函数； y_t 为第 t 次迭代后主问题添加的新决策变量。

子问题形式为：

$$\begin{cases} q(x) = \max_{k=\{1, \dots, n_c\}} q_k(x) = \max_{k=\{1, \dots, n_c\}} \max_{u_k, y} y^T B y + c_2^T y + M I^T s \\ \text{s.t. } u_k^T M_k u_k + H_k u_k \leq g_k \end{cases} \quad (23)$$

式中: B 、 c_2^T 、 M_k 、 H_k 、 g_k 为系数矩阵; s 为松弛变量; $q_k(x)$ 为当恶劣场景 u 来源于第 k 个不确定集 u_k 时子问题的最优解; I 为全1矩阵; M 为1个足够大的正数。

通过 KKT 条件得到可行域 $\Omega(x, u_k)$ 如式(24)所示。

$$\Omega(x, u_k) = \begin{cases} 2By + c_2^T + N^T \lambda + K^T \nu + G^T \pi + A^T \gamma = 0 \\ MI - \pi + \tau = 0 \\ Ny - n \geq 0 \\ Ky - k = 0 \\ Fx + Gy - s - h \geq 0 \\ Ay + Eu_k - e = 0 \\ s \geq 0 \\ \lambda, \nu, \pi, \gamma, \tau \geq 0 \\ \lambda \circ (Ny - n) = 0 \\ \pi \circ (Fx + Gy - s - h) = 0 \\ \tau \circ s = 0 \end{cases} \quad (24)$$

式中: K 、 A 为常数矩阵; λ 、 ν 、 π 、 γ 、 τ 为对偶变量; “ \circ ” 表示 Hadamard 乘积。

由于哈达玛积无法直接求解,故引入 p 、 q 、 w 和 z 作为辅助变量,利用大 M 法将其转化为混合整数线性约束:

$$\begin{cases} \lambda \leq Mp, Ny - n \geq M(p - 1) \\ \pi \leq Mw, Fx + Gy - s - h \geq M(w - 1) \\ \tau \leq Mz, s \geq M(z - 1) \\ p, w, z \in [0, 1] \end{cases} \quad (25)$$

因模型子问题包含混合整数线性约束,列与约束生成(column and constraint generation, C&CG)算法需要将其中连续变量进行转化再求解,而 NC&CG 可直接进行求解,故本文采用 NC&CG 算法对模型进行求解,求解流程如附录 B 所示。

4 算例分析

4.1 参数设置及调度结果分析

为验证本文所提出的基于数据驱动与供需灵活

性的 IES 两阶段鲁棒优化低碳调度模型的有效性,设置对照试验进行仿真分析,仿真运行参数由文献[20-21]与文献[24]获得,如附录 C 表 C1、C2 所示,运行场景设置如附录 C 表 C3 所示。

在场景 1—6 之间进行对比,6 种场景下的 IES 调度成本如表 1 所示。结合表 1 与表 B3 可知,与场景 2 相比,场景 1 未考虑风电不确定性,使得总成本升高了约 1.33 倍,弃风成本升高了约 1.86 倍,其余成本都有一定升高,表明不考虑其不确定性会致使风电大规模被浪费,使得 IES 经济性与可靠性大幅降低。与场景 2 相比,场景 3 总成本下降了 51.82%,获得了一定碳交易利润,碳封存成本增加,其余成本有所降低,说明 P2G 与 CCUS 及其耦合的引入提升了风电消纳水平和低碳经济性。与场景 3 相比,场景 4 在机组中掺氢掺氨燃烧,使总成本降低至约 200 万元,进一步提升了风电消纳水平和低碳经济性。与场景 4 相比,场景 5 将 P2G 与 CCUS 及其耦合、燃气掺氢与火电掺氨、EV 与需求响应负荷、不确定性与阶梯碳交易联合考虑,总成本降低了 45.81 万元,在所有成本中最低(约 153 万元),碳交易利润继续提高,而需求响应补偿及 EV 调度成本升高,其余成本也持续降低。场景 5 采用阶梯型碳交易后 IES 的总成本最少,与场景 6 相比减少了 26.29%,碳封存成本提高了 6.7 倍,原因是阶梯式碳交易机制与碳捕集联合后一定程度上限制了系统的碳排放量,碳封存量减少的同时,其中的碳交易成本呈阶梯式增长,能刺激企业的减排意愿,因此能够在保证系统经济性的同时更加有效地引导系统降低碳排放量。综上可以说明,本文所提出的考虑供需灵活性的 IES 数据驱动鲁棒低碳优化调度模型的有效性与可靠性,不仅能在一定程度上提升风电消纳水平与低碳经济性,还能大幅降低 IES 的总运行成本。

4.2 机组掺氢与掺氨燃烧对系统的影响分析

为进一步分析 GT 与 GB 掺氢燃烧、TP 掺氨燃烧后对 IES 产生的影响,场景 3 与场景 4 下的各 CO_2 排放量与各项成本如表 2 所示,IES 中热负荷的热功率分布如图 2 所示。

结合表 1 与表 2 可知,与场景 3 相比,场景 4 引入 GT 与 GB 掺氢燃烧、TP 掺氨燃烧后,IES 总成本下降

表 1 6 种场景下 IES 的各项调度成本

Table 1 Various scheduling costs of new energy towns under six scenarios

场景	总成本 / 万元	碳交易成本 / 万元	碳封存成本 / 万元	煤耗成本 / 万元	启停成本 / 万元	弃风成本 / 万元	购气成本 / 万元	需求响应补偿及 EV 调度成本 / 万元
1	765.71	114.72	0	113.19	5.63	236.05	276.12	0
2	575.61	107.35	0	107.18	5.40	126.81	228.87	0
3	277.34	-64.98	12.17	79.66	3.79	78.63	168.07	0
4	199.29	-104.76	34.97	61.45	2.58	61.91	143.14	0
5	153.48	-116.81	57.19	46.72	1.97	20.58	92.08	51.75
6	668.05	89.24	0	91.23	4.29	236.05	176.12	71.12

表2 2种场景下 IES 的 CO₂排放量与各项成本Table 2 CO₂ emissions and each cost of IES in two scenarios

场景	直接排入大气的 CO ₂ / t	间接排入大气的 CO ₂ / t	碳排放总量 / t	碳交易成本 / 万元	碳封存成本 / 万元	总成本 / 万元
3	815.44	270.63	1086.07	-104.76	34.97	199.29
4	317.42	152.23	469.65	-116.81	57.19	153.48

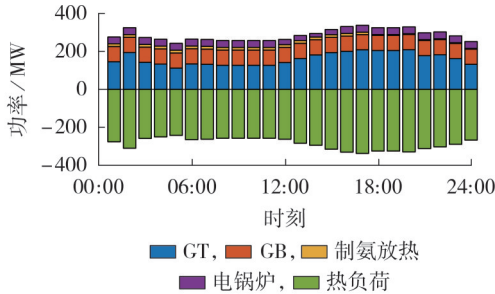


图2 热负荷的热功率分布图

Fig.2 Thermal power distribution diagram of heat load

了 28.14%，煤耗成本下降了 23.97%，购气成本下降了 14.83%，碳交易成本提高了 11.5%，弃风成本下降了 21.26%；在 CO₂ 排放方面，直接排入大气的 CO₂ 量下降了 61.07%，间接排入大气的 CO₂ 量降低了 43.75%，碳排放总量下降了 56.76%。结果表明，掺氢与掺氨燃烧有助于减少通过烟气风流直接排入大气的 CO₂ 的比例，在降低 IES 碳排放总量同时带来一定的经济效益，实现机组绿色低碳运行，还促进了风电消纳。从图 2 可以看出，由于合成氨为放热反应，其释放的热量可以被利用，作为热源输入 IES 中供应部分热负荷，同时 GT 运行产生的余热也可被利用，两者一定程度上减轻了 IES 的供热能耗压力，提升了 IES 的供热灵活性。

4.3 IES 供需灵活性分析

为了验证本文所提供需灵活响应模型的有效性，分别针对其供应侧与需求侧进行分析。

4.3.1 供应侧灵活性分析

场景 5 中 GT 与 TP 输出电功率分布如图 3 所示。由图 3 可以看出：在 00:00—09:00 时段，用电负荷少，主要由 GT 进行发电；在 00:00—07:00 时段，由于运行成本昂贵，TP 仅以最低功率运行；在 08:00—09:00 时段，TP 与 GT 协同发电；在 10:00—24:00 时

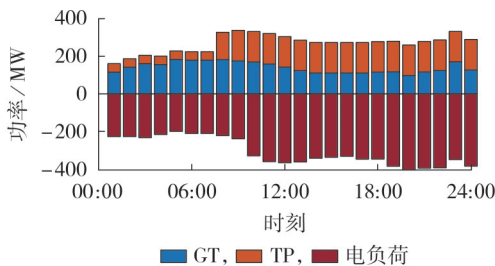


图3 GT与TP输出电功率分布图

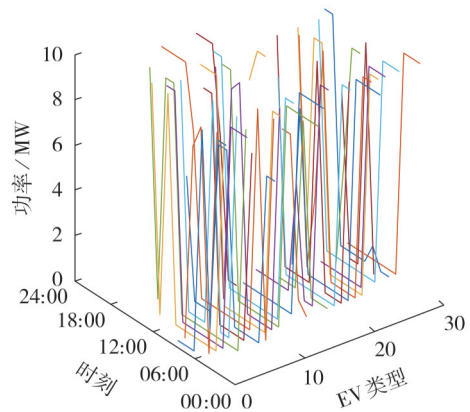
Fig.3 Distribution diagram of output power for GT and TP unit

段，为用电高峰时段，同时也是 TP 的主要发电时段，GT 协同发电。结合图 2 可以看出，00:00—12:00 时段为热负荷高峰时段，主要由 GT 供热，其余时段由 GT 与 GB 协同供热。由此可见，GT、TP 与 GB 都可以根据调度期间对负荷的不同需求，灵活选择出力时段，在满足不同负荷需求的同时实现供应侧的灵活响应。

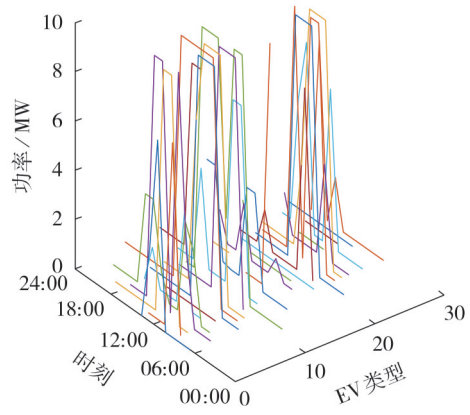
4.3.2 需求侧灵活性分析

场景 5 中 EV 的充放电曲线如图 4 所示；需求响应电热负荷调度分布如图 5 所示。可平移负荷为正时，负荷被平移到可平移负荷为负的时段；可消减负荷皆为负，表示对某些非关键负荷进行削减或暂时停用。EV 包含不同类型，不同类型 EV 充放电时刻有所差异，本文选取的 EV 类型包含 30 个元素。

从图 4(a)与(b)可以看出，由于白天电价更高，为降低用电费用，所以 EV 放电时间主要集中在 07:00—20:00，充电时间规避了用电高峰期，主要集



(a) 充电曲线



(b) 放电曲线

图4 EV的充放电曲线

Fig.4 Charge and discharge curves of EV

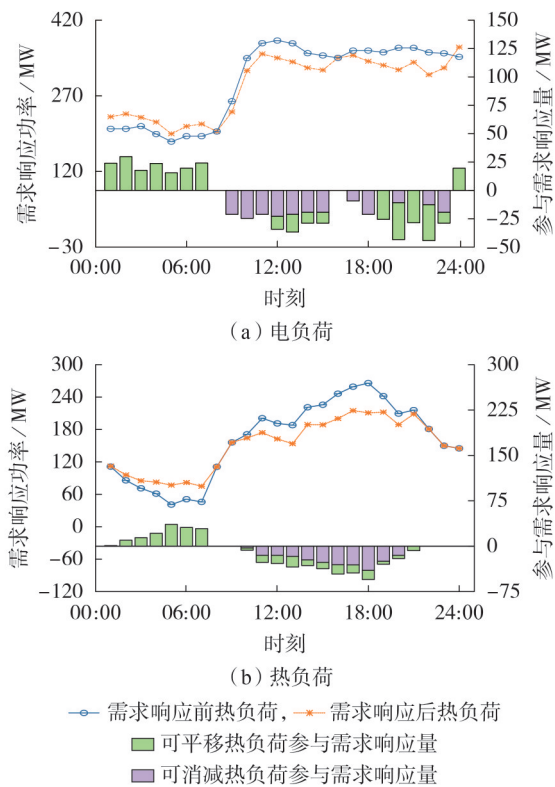


图5 需求响应电热负荷调度分布图

Fig.5 Distribution diagram of demand response electricity and heat load scheduling

中在夜晚,缓解了IES用电压力。由此可见,需求响应负荷与EV都可以通过经济奖励措施,鼓励电力用户在电力系统运行需求高时减少用电,或在需求低时增加用电,以此达到削峰填谷的目的,在满足不同负荷需求的同时实现需求侧的灵活响应。

由图5(a)中可以看出,10:00—24:00为用电高峰时段,因该时间段购电价格高,为减轻用电压力并降低用电成本,可平移电负荷在需求响应机制下被转移到购电价格低的时段,即大部分转移到夜间,而可消减电负荷于高峰期时段被消减,以减少供电压力。图5(b)中可以看出,16:00—21:00为热负荷高峰时段,11:00—13:00为次高峰时段,为缓解供热压力,在需求响应机制下将可平移热负荷转移到用热低谷期,可替代需求响应热负荷于高峰时段被替代。

4.4 不确定集合对系统经济性与鲁棒性的影响

选取中国西北地区某2座风电场365天的实际发电数据作为原始数据集,通过IGMM进行扩充,得到2000个样本点^[25],再通过本文1.2节方法聚类抽样生成基于数据驱动的风电不确定集。为验证本文所提不确定集的有效性,将其与盒式不确定集、多边形不确定集进行比较,3种不确定集区间范围对比结果如附录C图C1所示,3种不确定集下系统成本对比结果如表3所示。

通过图A2可以看出,盒式不确定集包含了极多

表3 3种不确定集下系统的成本

Table 3 Costs of systems under three uncertain sets

不确定集合	弃风成本 / 万元	总成本 / 万元
盒式不确定集	59.71	514.97
多边形不确定集	33.02	435.46
基于数据驱动的不确定集	20.58	387.88

的极低概率的区域,鲁棒性最强,保守度最高。多边形不确定集在盒式不确定集的基础上缩小了区间宽度,但仍包含较多的极低概率的区域。本文所提数据驱动的风电不确定集可视化后为2个置信椭圆的并集,不包含大部分概率极低的区域,充分利用了风电统计信息,在牺牲了一定鲁棒性的前提下获得了极低的保守度。

由表3可知,基于数据驱动的不确定集所需总成本最低,造成的弃风成本也最低,多边形不确定集其次,盒式不确定集最高。综合可知,基于数据驱动的风电不确定集不仅能够提高风电消纳,还能够保证鲁棒性的同时兼具一定的经济性。

5 结论

针对大规模可再生能源并网导致IES运行中灵活性资源越来越缺乏的问题,提出一种基于数据驱动与供需灵活性的IES两阶段鲁棒优化低碳调度策略,分析仿真结果如下。

1)模型中P2G与CCUS耦合能实现CO₂的循环利用并促进风电消纳,在此基础上引入GT、GB掺氢与TP掺氨,实现能源低碳化,进一步提升其低碳经济性和风电利用率,同时有效提升IES供应侧的灵活调节能力。

2)将供应侧与需求侧的需求响应灵活性负载结合,共同构成供需灵活响应模型,能进一步提高IES的灵活调节能力,促进风电消纳,使得IES电力运行更加可靠。

3)采用IGMM对风电进行聚类后抽样生成的基于数据驱动的风电不确定集可以充分利用风电原始数据的统计信息,有效剔除极端场景,从而建立4层两阶段鲁棒优化低碳调度模型,降低了模型的保守度,得到更准确和更经济的调度结果。

如何将运营商激励机制以及多时间尺度的协调优化引入到该模型中,促进IES更低碳经济、有效率的运行,将是下一步的研究工作。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 尹博艺,王灿,翟昕. 考虑SOFC精细化建模的综合能源系统不确定性调度[J]. 电力系统自动化,2025,49(21):149-165.
YIN Boyi,WANG Can,ZHAI Xin. Uncertainty scheduling of integrated energy system considering refined modeling of SOFC[J]. Automation of Electric Power Systems,2025,49(21):

- 149-165.
- [2] 赖博宏,郝俊红,杨天镇,等. 数字孪生支撑下综合能源系统的智慧运维发展与挑战[J]. 中国电机工程学报,2026,46(1):157-172.
LAI Bohong,HAO Junhong,YANG Tianzhen, et al. Development and challenges of intelligent operation and maintenance of integrated energy systems supported by digital twins[J]. Proceedings of the CSEE,2026,46(1):157-172.
- [3] 任洪波,张宇晨,吴琼,等. 面向韧性提升的综合能源系统规划与运行调度研究综述[J]. 电力系统自动化,2025,49(13):16-31.
REN Hongbo,ZHANG Yuchen,WU Qiong, et al. A review of comprehensive energy system planning and operation scheduling for resilience enhancement[J]. Automation of Electric Power Systems,2025,49(13):16-31.
- [4] YIN L F,LIN C. Matrix Wasserstein distance generative adversarial network with gradient penalty for fast low-carbon economic dispatch of novel power systems[J]. Energy,2024,298:131357.
- [5] 杨启帆,段大卫,李楠,等. 基于主成分分析的串联电池组故障诊断实用方法[J]. 电力自动化设备,2022,42(12):210-216.
YANG Qifan,DUAN Dawei,LI Nan, et al. A practical fault diagnosis method for series battery packs based on principal component analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2022,42(12):210-216
- [6] 任洪波,张宇晨,吴琼,等. 面向韧性提升的综合能源系统规划与运行调度研究综述[J]. 电力系统自动化,2025,49(13):16-31.
REN Hongbo,ZHANG Yuchen,WU Qiong, et al. Overview of research on resilience-oriented integrated energy system planning and operation scheduling[J]. Automation of Electric Power Systems,2025,49(13):16-31.
- [7] ELIASSON Å,FAHRMAN E,BIERMANN M, et al. Efficient heat integration of industrial CO₂ capture and district heating supply[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control,2022,118:103689.
- [8] 卢佳富,梁宁,徐慧慧,等. 动态碳-绿证交易交互机制下多综合能源系统协调优化调度[J]. 电力系统自动化,2025,49(9):52-60.
LU Jiafu,LIANG Ning,XU Huihui, et al. Multi comprehensive energy system coordinated optimization scheduling under dynamic carbon green certificate trading interaction mechanism [J]. Automation of Electric Power Systems,2025,49(9):52-60.
- [9] 程杉,卢渊涛,王灿. 考虑P2G-CCS-HFC协调运行的园区综合能源系统分布鲁棒优化调度[J]. 电力系统保护与控制,2025,53(10):87-101.
CHENG Shan,LU Yuantao,WANG Can. Distributed robust optimization scheduling of integrated energy system in industrial park considering coordinated operation of P2G-CCS-HFC[J]. Power System Protection and Control,2025,53(10):87-101.
- [10] 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.
PENG Yuan,LOU Suhua,WU Yaowu, et al. Low-carbon economic dispatch of power system with wind power considering solvent-stored carbon capture power plant [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2021,36(21):4508-4516.
- [11] MOHAMMED A G,MANSYUR N,HASINI H, et al. Review on the ammonia-blend as an alternative fuel for micro gas turbine power generation[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2024,82:428-447.
- [12] 袁文腾,陈亮,王春波,等. 基于氨储能技术的电转氨耦合风光-火综合能源系统双层优化调度[J]. 中国电机工程学报,2023,43(18):6992-7003.
YUAN Wenteng,CHEN Liang,WANG Chunbo, et al. Bi-level optimal scheduling of power-to-ammonia coupling wind-photo-voltaic-thermal integrated energy system based on ammonia energy storage technology[J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(18):6992-7003.
- [13] XIE H,GAO S,ZHENG J, et al. Distributed coordination of electricity-hydrogen-ammonia integrated energy system with aggregated distributed energy resources under high renewable energy penetration[J]. Energy,2025,339:139044.
- [14] 李振坤,游胜苒,李景岳,等. 计及动态定价机制和需求响应的社区综合能源系统优化运行[J]. 智慧电力,2025,53(9):56-63.
LI Zhenkun,YOU Shengran,LI Jingyue, et al. Optimized operation of community integrated energy systems considering dynamic pricing mechanism and demand response[J]. Smart Power,2025,53(9):56-63.
- [15] MA C C,HU Z J. Low-carbon economic scheduling of integrated energy system considering flexible supply-demand response and diversified utilization of hydrogen[J]. Sustainability,2025,17(4):1749.
- [16] REN P,CHEN L S,HUI H X. Power-controllable variable refrigerant flow system with flexibility value for demand response[J]. Energy,2024,313:133820.
- [17] 王义,靳梓康,王要强,等. 考虑电动汽车共享储能特性的园区综合能源系统低碳运行[J]. 电力系统自动化,2024,48(5):21-29.
WANG Yi,JIN Zikang,WANG Qianqiang, et al. Low-carbon operation of park-level integrated energy system considering shared energy storage features of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems,2024,48(5):21-29.
- [18] CHENG J F,YAN Z,WANG H, et al. A risk-controllable day-ahead transmission schedule of surplus wind power with uncertainty in sending grids[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2022,139:107649.
- [19] QI K,OWUSU E K,FRANCIS SIU M F, et al. A systematic review of construction labor productivity studies:clustering and analysis through hierarchical latent dirichlet allocation[J]. Ain Shams Engineering Journal,2024,15(9):102896.
- [20] 崔永玲,王成福,牛远方,等. 考虑综合需求响应不确定性的综合能源系统两阶段随机优化决策[J]. 电网技术,2025,49(6):2232-2242.
CUI Yongling,WANG Chengfu,NIU Yuanfang, et al. Two-stage stochastic optimization decision-making for integrated energy systems considering uncertainty of comprehensive demand response[J]. Power Grid Technology,2025,49(6):2232-2242.
- [21] JIA W H,DING T,SHAHIDEHPOUR M. Second-order cone programming for data-driven fluid and gas energy flow with a tight reformulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2021,36(2):1652-1655.
- [22] 陈登勇,刘方,刘帅. 基于阶梯碳交易的含P2G-CCS耦合和燃气掺氢的虚拟电厂优化调度[J]. 电网技术,2022,46(6):2042-2054.
CHEN Dengyong,LIU Fang,LIU Shuai. Optimization of virtual power plant scheduling coupling with P2G-CCS and doped with gas hydrogen based on stepped carbon trading[J]. Power System Technology,2022,46(6):2042-2054.
- [23] 梁俊鹏,张高航,李凤婷,等. 计及氢储能-制氨-碳捕集的综合能源系统低碳优化调度[J]. 电力自动化设备,2024,44(10):16-23.
LIANG Junpeng,ZHANG Gaohang,LI Fengting, et al. Low-carbon optimal scheduling of integrated energy system considering hydrogen storage ammonia production and carbon capture

- [J] Electric Power Automation Equipment,2024,44(10):16-23.
- [24] 王蓬蓬,宋运忠. 计及最恶劣场景概率和供需灵活性的综合能源系统分布鲁棒低碳优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2024,52(13):78-89.
WANG Pengpeng,SONG Yunzhong. Distributed robust low-carbon optimal scheduling of an integrated energy system considering worst-case scenario probability and flexibility of supply and demand[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(13):78-89.
- [25] 魏斌,乔森,孟润泉,等. 基于数据驱动不确定集的微电网两阶段鲁棒优化调度[J]. 高电压技术,2025,51(2):852-863.
WEI Bin,QIAO Sen,MENG Runquan,et al. Two-stage robust

optimization scheduling of microgrid based on data-driven uncertainty set[J]. High Voltage Technology,2025,51(2):852-863.

作者简介:

胡利(2000—),女,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统优化调度(**E-mail**:2622057460@qq.com);

程静(1980—),女,副教授,博士,主要研究方向为新能源发电与并网技术(**E-mail**:157511515@qq.com);

王贵召(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统优化调度(**E-mail**:1339127345@qq.com)。

(编辑 丁欣欣)

Two-stage robust optimization of low-carbon scheduling for integrated energy system based on data-driven and supply-demand flexibility

HU Li,CHENG Jin,WANG Guizhao

(Engineering Research Center of the Ministry of Education for Renewable Energy Power Generation and Grid Connection Control,Xinjiang University,Urumqi 830017,China)

Abstract: Aiming at the problem that the large-scale renewable energy integration leads to the insufficient resource flexibility utilization in integrated energy system, a two-stage robust optimization of low-carbon scheduling strategy for integrated energy system based on data-driven and supply-demand flexibility is proposed. To sufficiently utilize the low-carbon property of H_2 and NH_3 , a power supply structure including hydrogen-blended gas turbines, hydrogen-blended gas boilers, ammonia-fired power units, and power-to-gas equipment and power-to-ammonia equipment is constructed, and a flexible supply-demand response model is formed with electric vehicles, demand response loads and others. An infinite-dimensional Gaussian mixture model is used to cluster actual wind power output data and generate a wind power uncertainty set based on data-driven model, thereby a four-layer and two-stage robust optimization low-carbon scheduling model with the objective of minimizing the comprehensive operation cost of the system is established. A case study is conducted using the sample data from a region in Northwest China. The results demonstrate that the proposed strategy and the supply-demand flexible response model can effectively improve the reliability, flexibility, low-carbon performance, and economic efficiency of the system.

Key words: integrated energy system; supply-demand flexibility; data driven; two-stage robust optimization; low-carbon scheduling; power to ammonia