

基于绿证-碳交易联合机制的多区域综合能源系统 分布式鲁棒优化调度

于永进, 杨宪鲁, 刘琪

(山东科技大学电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 针对可再生能源出力不确定性以及绿证-碳交易市场割裂问题, 提出了基于绿证-碳交易联合机制的多区域综合能源系统分布式鲁棒优化调度方法。首先, 构建了包含电、热、气、冷多能流的多区域综合能源系统互联架构。其次, 设计了一种基于价格联动的绿证-碳交易联合交互机制。通过引入动态折算系数, 量化绿证环境权益与碳配额的转化关系, 刻画绿证与碳市场间的价值传导过程, 从而实现两类市场环境价值的协同激励。最后, 基于综合范数约束构建风光出力概率分布模糊集, 建立了以系统综合运行成本最小为目标的两阶段分布鲁棒优化调度模型。算例结果表明, 绿证-碳交易联合机制能够有效降低系统运行成本和碳排放水平。

关键词: 综合能源系统; 阶梯碳交易; 绿证交易; 分布鲁棒优化

Distributed Robust Optimization Dispatch of Multi-Regional Integrated Energy Systems Based on the Green Certificate-Carbon Trading Joint Mechanism

YU Yongjin, YANG Xianlu, LIU Qi

(College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: To address the uncertainty of renewable energy output and the fragmentation between green certificate and carbon trading markets, a distributed robust optimization scheduling method for multi-regional integrated energy systems based on a green certificate-carbon trading joint mechanism is proposed. Firstly, an interconnected architecture for multi-regional integrated energy systems encompassing electricity, heat, gas, and cooling multi-energy flows is constructed. Secondly, a price-linked green certificate-carbon trading joint interaction mechanism is designed. By introducing a dynamic conversion coefficient, the transformation relationship between the environmental rights of green certificates and carbon quotas is quantified, capturing the value transmission process between the green certificate-carbon trading markets, thereby achieving synergistic incentives for the environmental value of both markets. Finally, a two-stage distributionally robust optimization scheduling model is established, aiming to minimize the system's comprehensive operating costs, based on constructing a fuzzy set for the probability distribution of wind and solar power output under comprehensive norm constraints. Case study results demonstrate that the green certificate-carbon trading joint mechanism can effectively reduce system operating costs and carbon emission levels.

Key words: integrated energy system; tiered carbon trading; green certificate trading; distributed robust optimization

基金项目: 国家自然科学基金青年资助项目(52307115); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2022ME219)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52307115); the Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2022ME219).

0 引言

随着化石能源枯竭与环境污染加剧,以风电和光伏为代表的可再生能源迅速发展^[1-4]。在“双碳”目标背景下构建多能耦合综合能源系统(integrated energy system, IES)已成为研究热点^[5-6]。然而,受限于资源禀赋差异,IES 面临源荷匹配度低、调节能力受限等瓶颈^[7]。为此,通过物理联络线构建多区域综合能源系统(multi-regional integrated energy system, MRIES),利用区域间能源时空互补特性协同互济,是提升系统消纳能力的有效途径^[8]。

随着可再生能源渗透率的提升,其出力的随机性与波动性对 IES 的稳定运行产生了巨大影响^[9]。目前,处理该问题的方法主要包括:随机优化(stochastic optimization, SO)、鲁棒优化(robust optimization, RO)和分布鲁棒优化(distributionally robust optimization, DRO)^[10-12]。SO 利用概率分布函数描述不确定变量的统计特征,但在实际应用中,获取风电和光伏精确的真实分布极为困难^[13]。相比之下,RO 通过构建不确定合集来规避极端风险。但是,基于最恶劣场景的决策往往导致结果过于保守^[14]。鉴于上述方法的局限性,DRO 结合了两者的优势,逐渐成为研究的热点^[15-16]。文献[17]基于一阶和二阶矩信息构建概率分布模糊集,建立了可再生能源不确定性能量与备用联合分布鲁棒调度模型。文献[18]利用 Wasserstein 距离度量经验分布与真实分布的差异,构建了包含真实概率分布的模糊集。该方法既避免了 SO 因分布误差而带来的风险,又克服了 RO 过于保守的缺陷,能够平衡系统的经济性与鲁棒性。

在低碳经济调度领域,我国相继推行碳交易(carbon emission trading, CET)与绿色证书交易(green certificate trading, GCT)等多种市场政策及交易制度,并逐步应用于综合能源系统的规划与运行中。针对碳交易机制,文献[19]系统分析了 CET 对 IES 规划与运行决策的影响机理,揭示了碳信号对系统减排路径的引导作用。在此基础上,文献[20-21]引入阶梯碳交易,从价格激励角度验证了其提升综合能源系统低碳性的有效性。相比之下,绿证交易侧重于通过可再生能源配额约束来促进清洁能源消纳^[22]。文献[23]将区块链技术引入绿色证

书交易体系,在促进能源消纳的同时提升了交易透明度。鉴于单一市场机制的局限性,国内外学者开始关注两种市场的协同运行模式。文献[24]引入了绿色证书-碳交易联合机制,验证了多种市场协同在促进系统减排方面的优势。文献[25]进一步设计了考虑动态碳减排曲线的交互模型,量化绿色证书所隐含的碳减排能力。然而,现有研究多采用成本简单叠加或固定比例的静态折算方式描述两种市场关系,仍停留在以经济指标为主导的浅层协同阶段。该静态建模方式忽略了综合能源系统物理运行状态对环境权益价值的实时反馈作用,难以刻画系统电源和负荷波动、可再生能源消纳水平变化与市场价格信号之间的耦合关系。当多区域系统资源禀赋和供需结构发生动态变化时,固定折算机制难以准确反映清洁能源在不同消纳水平下的环境价值,易导致价格信号偏离其真实环境价值。

针对上述问题,本文提出一种考虑绿证—碳交易联合机制的多区域综合能源系统分布鲁棒优化调度方法。首先,构建集成 CCUS-P2G 耦合单元的多区域互联架构,利用区域间能源的时空互补特性提升系统的独立性与调节能力;其次,设计基于绿证-碳交易联合交互机制,通过动态折算系数量化环境权益在双边市场间的价值传导关系,打破市场壁垒以实现协同低碳激励目标;进而,利用 Copula 函数刻画风光出力的多维时空相关性,并基于综合范数构建概率分布模糊集,建立两阶段分布式鲁棒优化模型;最后,采用列与约束生成(column and constraint generation, C&CG)算法对上述模型进行求解,并通过算例分析验证了所提调度方法在协调系统经济性、低碳性与鲁棒性方面的有效性。

1 多区域综合能源系统模型

1.1 多区域系统拓扑与互联架构

IES 拓扑架构耦合了电、热、气、冷等多能流。内部涵盖风电(wind power, WP)、光伏(photovoltaic, PV)、热电联产机组(combined heat and power, CHP)、燃气锅炉(gas boiler, GB)及碳捕集-电转气(carbon capture, utilization and storage-power to gas, CCUS-P2G)耦合单元,并配置电、热、冷多元储能设备,形成了“源-网-荷-储”协同系统的 IES。其具体结构如图 1 所示。

为实现跨区域能量与信息流交互,各子系统均

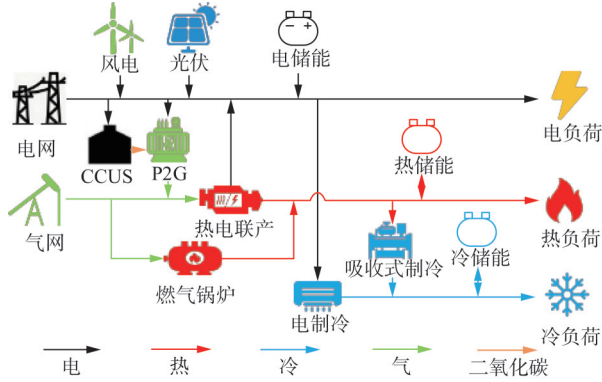


图1 综合能源系统结构图

Fig. 1 Structure of the integrated energy system

配置独立的能源管理系统 (energy management system, EMS), 并通过电力联络线构建了物理互联架构。整体拓扑结构如图2所示。

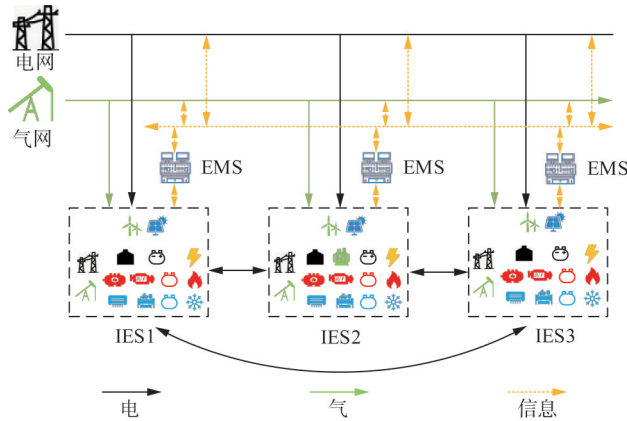


图2 多区域综合能源系统互联结构图

Fig. 2 Structure of the interconnected multi-region integrated energy system

1.2 设备模型

1.2.1 CCUS-P2G耦合系统模型

CCUS-P2G耦合系统通过整合CCUS与P2G构建了电-碳-气回路以实现碳减排。

1.2.1.1 CCUS运行模型

CCUS运行能耗由设备基础固定功率与随CO₂捕集量变化的运行功率组成。其数学模型如下。

$$P_{CCUS,i,t} = \mu_{CCUS,i,t} P_{CCUS,i}^{base} + \lambda_{cap,i} E_{cap,i,t} \quad (1)$$

$$P_{CCUS,i}^{min} \leq P_{CCUS,i,t} \leq P_{CCUS,i}^{max} \quad (2)$$

$$-R_{CCUS,i}^{down} \leq P_{CCUS,i,t} - P_{CCUS,i,t-1} \leq R_{CCUS,i}^{up} \quad (3)$$

式中: $P_{CCUS,i,t}$ 为 t 时刻 CCUS 设备 i 的运行功率, kW; $\mu_{CCUS,i,t}$ 为 t 时刻 CCUS 设备 i 的运行状态变量; $P_{CCUS,i}^{base}$ 为 CCUS 设备 i 的基础运行功率, kW;

$P_{CCUS,i}^{max}$ 、 $P_{CCUS,i}^{min}$ 分别为 CCUS 设备 i 运行功率的上下限, kW; $R_{CCUS,i}^{up}$ 、 $R_{CCUS,i}^{down}$ 分别为 CCUS 设备 i 的向上、向下爬坡功率限制, kW; $\lambda_{cap,i}$ 为捕集单位质量 CO₂ 消耗的功率, kW/kg; $E_{cap,i,t}$ 为 t 时刻 CCUS 设备 i 捕集的 CO₂ 的质量, kg。

1.2.1.2 P2G运行模型

P2G通过电解水与甲烷化反应将CO₂转化为天然气。其运行功率与CO₂利用率及产气量之间的关系如下。

$$G_{util,i,t} = P_{P2G,i,t} \eta_{P2G,i} / L_{NG} \quad (4)$$

$$E_{util,i,t} = \rho_{CO_2} G_{util,i,t} \quad (5)$$

$$G_{P2G,i,t} = \alpha_{P2G} G_{util,i,t} \quad (6)$$

式中: $G_{util,i,t}$ 为 t 时刻 P2G 设备 i 利用的 CO₂ 的体积, m³; $\eta_{P2G,i}$ 为 P2G 设备 i 运行效率; L_{NG} 为天然气热值, kWh/m³; $E_{util,i,t}$ 为 t 时刻 P2G 设备 i 利用的 CO₂ 的质量, kg; ρ_{CO_2} 为标准状态下 CO₂ 的密度, kg/m³; α_{P2G} 为 P2G 生成单位体积天然气所需 CO₂ 的体积; $G_{P2G,i,t}$ 为 t 时刻 P2G 设备 i 生成天然气的体积, m³。

为保证设备安全稳定运行, 需考虑其运行功率及爬坡约束, 模型如下。

$$P_{P2G,i}^{min} \leq P_{P2G,i,t} \leq P_{P2G,i}^{max} \quad (7)$$

$$-R_{P2G,i}^{down} \leq P_{P2G,i,t} - P_{P2G,i,t-1} \leq R_{P2G,i}^{up} \quad (8)$$

式中: $P_{P2G,i,t}$ 和 $P_{P2G,i,t-1}$ 分别为 t 时刻和 $t-1$ 时刻 P2G 设备 i 的运行功率, kW; $P_{P2G,i}^{max}$ 、 $P_{P2G,i}^{min}$ 分别为 P2G 运行功率的上下限, kW; $R_{P2G,i}^{up}$ 、 $R_{P2G,i}^{down}$ 分别为 P2G 向上、向下爬坡功率限制, kW。

1.2.1.3 碳平衡约束

本文对CCUS-P2G耦合环节中碳流过程进行理想化处理。假设CO₂在捕集-利用-封存过程中遵循无损耗的质量守恒, 即忽略捕集过程损耗及P2G转化效率对CO₂平衡的扰动。理想状态下的碳平衡约束如下。

$$E_{cap,i,t} = E_{util,i,t} + E_{seal,i,t} \quad (9)$$

式中: $E_{seal,i,t}$ 为 t 时刻 CCUS 设备 i 封存的 CO₂ 的质量; $E_{cap,i,t}$ 为 t 时刻 CCUS 设备 i 捕集的 CO₂ 的质量; $E_{util,i,t}$ 为 t 时刻 P2G 设备 i 利用的 CO₂ 的质量。

1.2.2 其他设备模型

关于GB、CHP、AC、EC以及电、热、冷多元储能装置, 文献[26-27]对其运行特性与物理约束进行了构建。

2 绿证-碳交易联合交互机制

为充分挖掘双边市场中的协同效益,本文提出基于价格联动的绿证-碳交易联合交互机制。通过引入动态折算系数构建价值传导通道,允许将盈余绿证环境权益转化为碳配额,实现低碳经济价值最大化。

2.1 绿证交易机制

绿色证书(green certificate, GC)是表征可再生能源上网电量环境权益的电子凭证^[28]。基于碳配额考核第*i*个 IES 在调度周期内的绿证配额需求 $N_{RPS,i}$ 与实际持有 $N_{Hold,i}$ 分别为:

$$N_{RPS,i} = \sum_{t=1}^T (\kappa_{quote} P_{load,i,t}) / 1000 \quad (10)$$

$$N_{Hold,i} = \sum_{t=1}^T [\kappa_{req} (P_{WT,i,t} + P_{PV,i,t}) / 1000] \quad (11)$$

式中: $N_{RPS,i}$ 为第*i*个 IES 在调度周期内的绿证配额需求数量; $N_{Hold,i}$ 为在调度周期内的绿证实际持有量, 本; κ_{quote} 为设定的绿证配额系数, 本/MW; $P_{load,i,t}$ 为电负荷, kW; $P_{WT,i,t}$ 、 $P_{PV,i,t}$ 分别为风电、光伏实际消纳功率, kW; κ_{req} 为绿证转化系数, 本/MW; T 为调度周期。

2.2 碳交易机制

碳交易机制通过价格信号引导系统减排, IES 需根据实际碳排放量与配额的差额进行交易结算。本文采用基准线方法对碳配额进行分配^[29], 第*i*个 IES 的初始碳配额模型如下。

$$Q_{Grid,i} = \delta_{Grid,i} \sum_{t=1}^T P_{Grid,i,t}^{buy} \quad (12)$$

$$Q_{GB,i} = \delta_{GB,i} \sum_{t=1}^T H_{GB,i,t} \quad (13)$$

$$Q_{CHP,i} = \delta_{CHP,i} \sum_{t=1}^T P_{CHP,i,t} + \delta_{CHP,h,i} \sum_{t=1}^T H_{CHP,i,t} \quad (14)$$

$$Q_{total,i} = Q_{Grid,i} + Q_{GB,i} + Q_{CHP,i} \quad (15)$$

式中: $Q_{Grid,i}$ 为第*i*个 IES 购电碳配额, kg; $Q_{GB,i}$ 为第*i*个 GB 运行碳配额, kg; $Q_{CHP,i}$ 为第*i*个 CHP 运行碳配额, kg; $P_{Grid,i,t}^{buy}$ 为第*i*个 IES 购电功率, kW; $H_{GB,i,t}$ 为第*i*个 GB 产热功率, kW; $P_{CHP,i,t}$ 、 $H_{CHP,i,t}$ 分别为第*i*个 CHP 发电、产热功率, kW; $\delta_{Grid,i}$ 、 $\delta_{GB,i}$ 、 $\delta_{CHP,i}$ 、 $\delta_{CHP,h,i}$ 分别为第*i*个 IES 购电、第*i*个 GB 产热、第*i*个 CHP 发电、产热的碳配额分配基准, kg/kWh; $Q_{total,i}$ 为总碳配额, kg。

本文设定所购电能均来源于火电, 由 IES 承担

其排放责任。实际碳排放模型如下。

$$E_{Grid,i} = e_{Grid,i} \sum_{t=1}^T P_{Grid,i,t}^{buy} \quad (16)$$

$$E_{GB,i} = e_{GB,i} \sum_{t=1}^T H_{GB,i,t} \quad (17)$$

$$E_{CHP,i} = e_{CHP,i} \sum_{t=1}^T P_{CHP,i,t} + e_{CHP,h,i} \sum_{t=1}^T H_{CHP,i,t} \quad (18)$$

$$E_{total,i} = E_{Grid,i} + E_{GB,i} + E_{CHP,i} - \sum_{t=1}^T E_{cap,i,t} \quad (19)$$

式中: $E_{Grid,i}$ 为第*i*个 IES 购电碳排放量, kg; $E_{GB,i}$ 为第*i*个 GB 运行碳排放量, kg; $E_{CHP,i}$ 为第*i*个 CHP 运行碳排放量, kg; $e_{Grid,i}$ 、 $e_{GB,i}$ 、 $e_{CHP,i}$ 、 $e_{CHP,h,i}$ 分别为第*i*个 IES 购电、第*i*个 GB 产热、第*i*个 CHP 发电、产热的碳排放强度, kg/kWh; $E_{total,i}$ 为总碳排放量, kg。

2.3 绿证-碳交易联合交互机制

为打破市场壁垒, 构建基于动态折算系数的绿证-碳交易联合交互机制, 通过在 IES 调度层面引入环境权益转化关系, 实现两类市场激励信号的协同作用。其原理如图 3 所示。

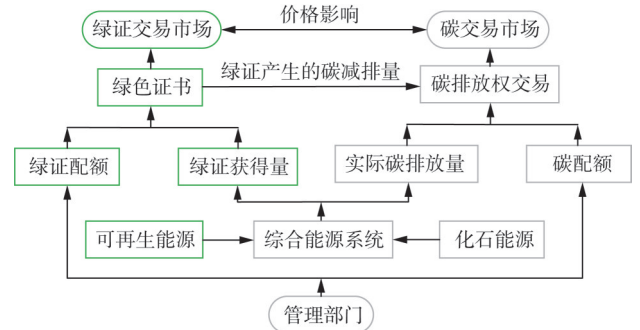


图3 绿证-碳交易联合交互机制架构图

Fig. 3 Architecture diagram of the joint interaction mechanism between green certificates and carbon trading

在该机制下, 盈余绿证可通过动态折算系数转化为碳配额, 其转化模型如下。

$$Q_{GC,i} = \chi_{GC,i} \gamma_{GC} N_{GC,i} \quad (20)$$

式中: $Q_{GC,i}$ 为盈余绿证转化为碳配额的数量, kg; γ_{GC} 为单位绿证对应的减排量转换基准, kg/本; $\chi_{GC,i}$ 为动态折算系数; $N_{GC,i}$ 为转化碳配额的绿证数量, 本。

相关研究表明, 提升可再生能源消纳水平能够降低系统碳排放, 并对其环境效益产生影响^[30]。基于此, 本文在文献[28]所构建基于价格比值的环境权益转换方法基础上, 引入可再生能源渗透率反馈

项进行拓展。动态折算系数数学表达式如下。

$$\chi_{GC,i} = \frac{\lambda_{GCT}}{\lambda_{CET}} (1 + \kappa \frac{P_{new,i}}{P_{load,i}}) \quad (21)$$

式中: λ_{GCT} 为绿证价格, 元; λ_{CET} 为碳交易基价, 元; $P_{new,i}$ 为可再生能源实际消纳功率, kW; $P_{load,i}$ 为实际负荷功率, kW; κ 为渗透率反馈调节系数, 表征可再生能源渗透率对环境权益折算强度的影响, 在本文中 κ 取 0.5。

从结构上看, 该表达式采用价格主导与渗透率调节的耦合形式, 其中价格比值决定折算系数的基础水平, 渗透率项对其进行动态修正。考虑到可再生能源渗透率对环境权益价值的影响呈现单调变化特性, 本文采用线性反馈的形式对其进行刻画。该形式可视为对其潜在非线性关系的一阶近似, 既能反映渗透率的变化对折算系数的调节作用, 又避免了高阶非线性函数可能带来的过度放大效应, 保证模型简洁性与计算稳定性。参数 κ 为渗透率反馈调节系数, 用于表征可再生能源消纳水平对环境权益折算强度的影响程度, 是相关政策或机制作用强度的综合体现。此外, 通过引入基准项, 使模型在渗透率趋于 0 时退化为仅有价格主导的形式, 满足边界合理性。

引入联合机制后, IES 实际参与交易的碳排放 $E_{net,i}$ 修正为总排放量 $E_{total,i}$ 扣除初始排放量 $Q_{total,i}$ 与转化配额 $Q_{GC,i}$ 之和。

$$E_{net,i} = E_{total,i} - (Q_{total,i} + Q_{GC,i}) \quad (22)$$

式中 $E_{net,i}$ 为第 i 个 IES 参与碳交易的质量, kg。

基于环境权益的唯一性原则, 转化为碳配额的绿证须从可交易绿证总量中剔除。修正后的绿证交易成本模型如下。

$$C_{GCT,i} = \lambda_{GCT} (N_{RPS,i} - N_{Hold,i} - N_{GC,i}) \quad (23)$$

式中: $C_{GCT,i}$ 为修正后的绿证交易成本, 元; $N_{GC,i}$ 为转化碳配额的绿证数量, 本。

2.4 阶梯式碳交易机制

阶梯式碳交易机制实行分级定价策略, 其边际购碳成本随排放量呈递增趋势, 从而形成价格约束。其数学模型如下。

$$C_{CET,i} = \begin{cases} \lambda_{CET} E_{net,i}, & E_{net,i} \leq l \\ \lambda_{CET} (1 + \alpha) (E_{net,i} - l) + \lambda l, & l < E_{net,i} \leq 2l \\ \lambda_{CET} (1 + 2\alpha) (E_{net,i} - 2l) + (2 + \alpha) \lambda l, & 2l < E_{net,i} \leq 3l \\ \lambda_{CET} (1 + 3\alpha) (E_{net,i} - 3l) + (3 + 3\alpha) \lambda l, & 3l < E_{net,i} \leq 4l \\ \lambda_{CET} (1 + 4\alpha) (E_{net,i} - 4l) + (4 + 6\alpha) \lambda l, & 4l < E_{net,i} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $C_{CET,i}$ 为碳交易成本, 元; l 为碳排放量区间长度, kg; α 为价格增长幅度。

3 基于数据驱动的分布鲁棒优化模型

随着可再生能源渗透率的不断提升, 风光出力的不确定性成为制约 IES 安全运行的关键因素。为准确刻画 MRIES 中风光出力特征, 本文采用基于数据驱动的离散场景建模, 通过挖掘历史数据特征生成典型场景, 并在此基础上构建概率分布模糊集。

3.1 风光不确定性场景建模

首先, 针对多区域风光出力的不确定性建模, 考虑到可再生能源受环境等气象条件影响, 呈现出显著的非线性时空耦合特性, 传统的线性相关系数难以充分描述其复杂的依赖关系。为此, 本文采用 Copula 函数构建联合概率分布, 利用其能够独立处理边缘分布与相关结构的优势, 准确反映多变量间的非高斯依赖特征, 生成包含时空特性的初始场景集。其次, 为兼顾模型求解效率与场景代表性, 针对大规模初始场景直接优化会导致计算复杂度显著增加的问题, 采用 K-means++ 聚类算法提取 K 个典型场景及初始经验概率分布 $P_0 = \{P_1^0, P_2^0, \dots, P_K^0\}$ 。相较于传统 K-means 算法, 优化了初始聚类中心的选取概率策略, 有效降低了因随机初始化而陷入不良局部最优的风险, 确保缩减后的典型场景能较好地保留原始数据的统计特征。最后, 针对有限历史数据带来的经验分布误差, 直接利用经验分布往往对历史样本的依赖性较强。为此, 本文引入 1-范数与 ∞ -范数的综合范数约束构建概率分布模糊集。其中, 1-范数约束用于限制概率分布的总体统计偏差, ∞ -范数约束用于控制单个极端场景的概率波动。这种综合范数机制相比单一范数, 能够更灵活地调节模糊集半径, 有效避免因过度考虑极端小概率事件而导致的调度结果过于保守, 从而在系统的鲁棒性与经济性之间实现有效平衡。基于上述分析, 构建的概率分布模糊集数学形式如下。

$$\Omega = \left\{ P_w \left| \begin{array}{l} P_k \geq 0, k = 1, 2, \dots, K \\ \sum_{k=1}^K P_k = 1 \\ \sum_{k=1}^K |P_k - P_k^0| \leq \theta_1 \\ \max_{1 \leq k \leq K} |P_k - P_k^0| \leq \theta_\infty \end{array} \right. \right\} \quad (25)$$

式中: Ω 为风光出力场景可行域; θ_1 和 θ_∞ 分别为 1-范数与 ∞ -范数的允许偏差值; P_k 为后续迭代过程中第 k 组风光出力场景实际概率分布; P_k^0 为第 k 组风光出力场景初始概率分布; K 为缩减后典型场景数量。

3.2 两阶段分布鲁棒优化模型架构

基于上述模糊集, 构建两阶段分布鲁棒优化调度模型。该模型采用“min-max-min”三层嵌套结构, 将决策划分为不确定揭示前的预调度与揭示后的再调度阶段。目标函数旨在最小化第一阶段确定性成本与第二阶段最恶劣分布下期望成本之和, 其数学模型如下。

$$\min_{\mathbf{x} \in X} \left(\mathbf{c}^T \mathbf{x} + \max_{p \in \Omega} \mathbb{E}_p [Q(\mathbf{x}, \xi_k)] \right) \quad (26)$$

$$Q(\mathbf{x}, \xi_k) = \min_{\mathbf{y}_k \in Y(\mathbf{x}, \xi_k)} \mathbf{b}^T \mathbf{y}_k$$

式中: $\mathbf{c}^T \mathbf{x}$ 为第一阶段预调度成本矩阵, 其中 $\mathbf{c}^T$ 为各机组计划允许成本系数矩阵; $\mathbf{b}^T \mathbf{y}_k$ 为第二阶段再调度成本矩阵, 其中 $\mathbf{b}^T$ 为各机组再调度阶段调整成本系数矩阵; $\max_{p \in \Omega} \mathbb{E}_p [Q(\mathbf{x}, \xi_k)]$ 表示在所有可能的概率分布下第二阶段期望成本的最坏情况, 其中 $Q(\mathbf{x}, \xi_k)$ 为在第一阶段决策 $\mathbf{x}$ 和情景 ξ_k 时的最优再调度运行成本; $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{y}_k$ 分别为第一、二阶段决策矩阵; ξ_k 为第 k 个风光出力场景参数。

3.3 目标函数

系统以最小化调度周期内综合成本 F 为目标。综合考虑系统运行成本与环境成本, 其定义如下。

$$\min F = \sum_{i=1}^s \left(C_{\text{buy}, i} + C_{\text{curt}, i} + C_{\text{tie}, i} + C_{\text{ss}, i} + C_{\text{CET}, i} + C_{\text{GCT}, i} + C_{\text{store}, i} \right) \quad (27)$$

式中: F 为总成本, 元; s 为 IES 的数量; $C_{\text{buy}, i}$ 为 IES 设备 i 的购能成本, 元; $C_{\text{curt}, i}$ 为 IES 设备 i 的弃风弃光成本, 元; $C_{\text{tie}, i}$ 为 IES 设备 i 的能量传输成本, 元; $C_{\text{ss}, i}$ 为 IES 设备 i 的启停成本, 元; $C_{\text{store}, i}$ 为 IES 设备 i 的碳封存成本, 元。

3.3.1 购能成本

$$C_{\text{buy}, i} = \sum_{t=1}^T \left(\lambda_{\text{e}, t}^{\text{buy}} P_{\text{Grid}, i, t}^{\text{buy}} + \lambda_{\text{g}} G_{\text{Grid}, i, t}^{\text{buy}} \right) \quad (28)$$

式中: $G_{\text{Grid}, i, t}^{\text{buy}}$ 为 IES 设备 i 的购气体积, m^3 ; $\lambda_{\text{e}, t}^{\text{buy}}$ 为购电分时电价, 元/kWh; λ_{g} 为天然气单价, 元/ m^3 。

3.3.2 绿证交易成本

详见本文 2.3 节。

3.3.3 碳交易成本

详见本文 2.4 节。

3.3.4 碳封存成本

$$C_{\text{store}, i} = \sum_{t=1}^T \lambda_{\text{seal}} E_{\text{seal}, i} \quad (29)$$

式中: λ_{seal} 为单位 CO_2 封存成本, 元/kg; T 为时段数量。

3.3.5 弃风弃光成本

$$C_{\text{curt}, i} = \sum_{t=1}^T \left[\delta_{\text{WT}} (P_{\text{WT}, i, t}^{\text{pre}} - P_{\text{WT}, i, t}) + \delta_{\text{PV}} (P_{\text{PV}, i, t}^{\text{pre}} - P_{\text{PV}, i, t}) \right] \quad (30)$$

式中: δ_{WT} 、 δ_{PV} 分别为单位弃风、弃光惩罚成本, 元/kWh; $P_{\text{WT}, i, t}^{\text{pre}}$ 、 $P_{\text{PV}, i, t}^{\text{pre}}$ 分别为第 i 个 WT/PT 设备在 t 时刻的风、光伏预测功率, kW。

3.3.6 能量传输成本 $C_{\text{tie}, i}$

$$C_{\text{tie}, i} = \sum_{t=1}^T \lambda_{\text{tie}} (P_{\text{tie}, i, t}^{\text{in}} + P_{\text{tie}, i, t}^{\text{out}}) \quad (31)$$

式中: λ_{tie} 为联络线单位功率传输的成本系数, 元/kW; $P_{\text{tie}, i, t}^{\text{in}}$ 、 $P_{\text{tie}, i, t}^{\text{out}}$ 分别为通过联络线流入和流出 IES 的功率, kW。

3.3.7 设备启停成本

$$C_{\text{ss}, i} = \sum_{t=1}^T \left[\sigma_{\text{CHP}, i} (\mu_{\text{CHP}, i, t}^{\text{on}} + \mu_{\text{CHP}, i, t}^{\text{off}}) + \sigma_{\text{GB}, i} (\mu_{\text{GB}, i, t}^{\text{on}} + \mu_{\text{GB}, i, t}^{\text{off}}) \right] \quad (32)$$

式中: $\sigma_{\text{CHP}, i}$ 、 $\sigma_{\text{GB}, i}$ 分别为第 i 个 CHP 和 GB 的启停成本, 元; $\mu_{\text{CHP}, i, t}^{\text{on}}$ 、 $\mu_{\text{GB}, i, t}^{\text{on}}$ 、 $\mu_{\text{CHP}, i, t}^{\text{off}}$ 、 $\mu_{\text{GB}, i, t}^{\text{off}}$ 分别为表征 CHP、GB、CHP、GB 设备 i 在 t 时刻是否执行启停动作的二进制变量。

3.4 约束条件

为保障系统安全, 调度过程须严格遵循物理设备边界约束及多能流实时平衡约束, 具体包括:

3.4.1 功率平衡约束

3.4.1.1 电功率平衡约束

$$P_{\text{Grid}, i, t}^{\text{buy}} + P_{\text{WT}, i, t} + P_{\text{PV}, i, t} + P_{\text{CHP}, i, t} + P_{\text{EES}, i, t}^{\text{dis}} + P_{\text{tie}, i, t}^{\text{in}} = P_{\text{load}, i, t} + P_{\text{EES}, i, t}^{\text{chr}} + P_{\text{P2G}, i, t} + P_{\text{EC}, i, t}^{\text{in}} + P_{\text{tie}, i, t}^{\text{out}} \quad (33)$$

式中: $P_{\text{EES}, i, t}^{\text{chr}}$ 、 $P_{\text{EES}, i, t}^{\text{dis}}$ 分别为第 i 个电储能系统在 t 时刻充、放电功率, kW; $P_{\text{EC}, i, t}^{\text{in}}$ 为 EC 消耗的电能, kW。

3.4.1.2 热功率平衡约束

$$H_{\text{CHP}, i, t} + H_{\text{GB}, i, t} + P_{\text{TES}, i, t}^{\text{dis}} = H_{\text{load}, i, t} + P_{\text{TES}, i, t}^{\text{chr}} + H_{\text{AC}, i, t}^{\text{in}} \quad (34)$$

式中: $H_{\text{load}, i, t}$ 为热负荷功率, kW; $P_{\text{TES}, i, t}^{\text{chr}}$ 、 $P_{\text{TES}, i, t}^{\text{dis}}$ 分别为热储能系统储、放热功率, kW; $H_{\text{AC}, i, t}^{\text{in}}$ 为

AC消耗的热功率, kW。

3.4.1.3 冷功率平衡约束

$$C_{EC,i,t} + C_{AC,i,t} + P_{CCS,i,t}^{dis} = C_{load,i,t} + P_{CCS,i,t}^{chr} \quad (35)$$

式中: $C_{EC,i,t}$ 、 $C_{AC,i,t}$ 分别为第 i 个 EC、AC 在 t 时刻的制冷功率, kW; $C_{load,i,t}$ 为第 i 个冷负荷在 t 时刻的功率, kW; $P_{CCS,i,t}^{chr}$ 、 $P_{CCS,i,t}^{dis}$ 分别为第 i 个冷储能系统在 t 时刻的储、放冷功率, kW。

3.4.1.4 天然气平衡约束

$$G_{Grid,i,t}^{buy} + G_{P2G,i,t} = G_{CHP,i,t} + G_{GB,i,t} \quad (36)$$

式中 $G_{CHP,i,t}$ 、 $G_{GB,i,t}$ 分别为 CHP、GB 消耗的天然气体积, m^3 。

3.4.2 风光出力约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{WT,i,t} \leq P_{WT,i,t}^{pre} \\ 0 \leq P_{PV,i,t} \leq P_{PV,i,t}^{pre} \end{cases} \quad (37)$$

3.4.3 多区域联络线闭合约束

$$\sum_{t=1}^s (P_{tie,i,t}^{in} - P_{tie,i,t}^{out}) = 0 \quad (38)$$

式中 s 为 IES 的数量。

3.5 模型求解

本文构建的 TSDRO 模型具有典型的“Min-Max-Min”3 层嵌套结构, 故采用 C&CG 算法进行求解。该算法通过将原问题解耦为主问题与子问题, 并交替迭代实现收敛。相关研究已从理论上证明了 C&CG 算法在此类问题中的收敛性^[30-31]。在此基础上, 本文的具体求解流程参考文献[32]。

仿真测试环境, 本文所提模型及算法均在 MATLAB R2022b 环境下基于 YALMIP 工具箱编写, 调用 Gurobi 13.0 商业求解器求解。硬件平台配置为: Intel Core i5-1135G7 处理器 (2.4 GHz), 16 GB 内存, Windows 10 (64 位) 操作系统。

4 算例分析

为验证所提基于绿证-碳交易联合机制的分布式鲁棒优化调度模型的有效性, 本文选取地理位置相邻但在资源禀赋与负荷特性上存在显著差异的 3 个 IES 构建测试系统。其中, IES1 为商业区, 其负荷主要集中在日间工作时段, 受地理空间及环保约束影响, 该区域可配置的发电与耦合设备装机规模相对较小。IES2 为工业区, 其负荷水平全天较高且波动较小, 配置了较大容量的能量耦合与调节设备, 在满足自身用能需求的同时具备较强的对外供能能力。IES3 为居民区, 其负荷呈现典型的早晚双峰特

征, 可再生能源出力和耦合设备装机规模相对适中, 主要以满足区域内供能需求为目标。三者通过电力联络线互联, 实现跨区域能量互补与协同调度。调度周期为 24 h, 步长为 1 h。

系统参数设置方面, 选取山东某地区 2024 年风电和光伏数据作为样本, 利用 Copula 函数生成 500 个初始场景, 进而采用 K-means++ 算法进行场景缩减, 最终提取 5 个典型场景用于分析。在参数设定方面, 系统设备运行参数参考文献[33], 同时考虑到资源禀赋差异对多区域协同调度的影响, 本文在文献[33]的基础上对不同区域机组进行了差异化调整, 碳交易与绿证交易等参数参考文献[28]。

4.1 联合机制的低碳经济性分析

为了验证本文所提绿证-碳交易联合机制在多区域互联下的有效性, 设置 4 种对比场景。

场景 1: 仅考虑碳交易机制;

场景 2: 考虑绿证交易与碳交易, 但两种机制相互独立;

场景 3: 引入绿证-碳交易联合机制, 采用基于价格比值的环境权益折算方法;

场景 4: 在价格比值的基础上, 引入可再生能源渗透率构建动态折算系数。运行结果如表 1 所示。

表 1 场景 1—4 优化调度结果

Tab. 1 Optimized scheduling results for scenarios 1 - 4

场景	1	2	3	4
总成本/元	44 112.45	37 497.03	34 739.15	33 850.84
碳交易量/kg	4 140.06	4 138.38	2 087.75	1 977.00
碳交易成本/元	844.82	844.28	341.06	316.32
绿证成本/元		-6 633.32	-3 900.45	-4 533.61
互联成本/元	2 080.38	2 080.40	2 074.67	2 097.15

由表 1 可知, 相较于场景 1, 场景 2 中总成本降低了 15.00 %。场景 4 相较于场景 1 总成本和碳交易量分别减少了 23.26 % 和 52.25 %; 相较于场景 2 总成本和碳交易量分别减少了 9.72 % 和 52.23 %; 相较于场景 3 总成本和碳交易量分别减少了 2.56 % 和 5.30 %。

相较于场景 1, 场景 2 在引入绿证交易机制后, 虽然系统总成本显著降低, 但碳交易量并未表现出明显的下降趋势。这是因为, 在绿证市场与碳市场独立运行的模式下, 绿证机制主要发挥了经济补偿

效应,即通过绿证收益改善系统经济性,在引导系统进行深度低碳调度方面的激励作用有限,难以打破原有运行方式。

进一步对比场景4与场景2,引入绿证-碳交易联合机制后,系统总运行成本和碳交易量均显著下降,系统调度结果发生明显调整。此外,场景3与场景4本质区别在于折算系数的构建。相较于场景3,场景4在碳交易量以及碳交易成本方面进一步下降,表明所引入的渗透率项能够增强折算系数对系统运行状态的响应能力。在可再生能源消纳水平较高时,场景4中系统通过增加跨区域调度使得互联成本略有增加,以促进新能源的消纳,从而实现更低的碳排放水平。该变化趋势与动态折算系数的作用机理一致,表明所构建的动态折算系数能够有效刻画系统运行状态变化对环境权益价值的影响。

结果表明,绿证-碳交易联合机制并非两类市场机制的简单成本叠加,而是通过价格信号的协同作用改变了系统的最优运行方式,使系统在运行过程中能够更加主动地挖掘可再生能源和低碳技术的减排潜力,在兼顾系统经济性的同时,实现了碳排放水平的有效降低。

考虑到本文旨在探究多区域系统的宏观调度机制与市场交互策略,为简化模型求解,碳平衡约束中进行了理想化处理。若忽略捕集能耗损失及P2G转化效率差异,在一定程度上会高估系统的理论减排潜力;若计及上述损耗,系统为达成同等减排目标需提升设备运行功率或增加碳配额购买,导致实际净减排量略低于理论值或运行成本小幅上升。然而,该理想化处理主要影响结果的绝对数值水平,并未改变相对变化趋势,亦不影响绿证-碳交易联合机制在引导系统低碳运行方面的核心作用机理。因此,在调度优化与机制设计的研究尺度下,本文所采用的建模方式具有合理性与有效性。

4.2 多区域互联下电能调度特性分析

在多区域互联条件下,各区域能够通过联络线实现电能互济,其区域间电能交换情况如图4所示。由图4可知,在风光出力较高的时段,IES1和IES2向外输送电能,IES3为资源匮乏区,接收IES1和IES2多余的电能。区域间功率交换呈现出与可再生能源出力特性一致的时序分布。

为进一步分析在绿证-碳交易联合机制在多区

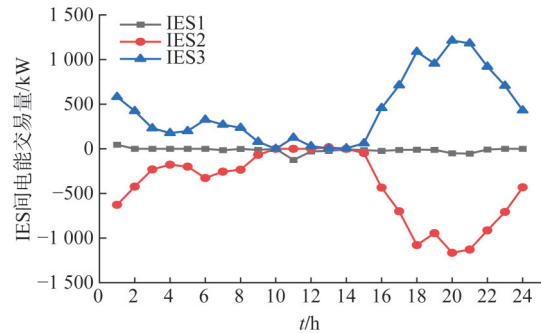


图4 区域间电能交互结果

Fig. 4 Results of inter-regional power exchange

域互联情况下的运行特性,以资源相对匮乏的IES3作为分析对象,对其电功率进行分析。其电功率平衡情况如图5所示,CCUS运行功率变化如图6所示。

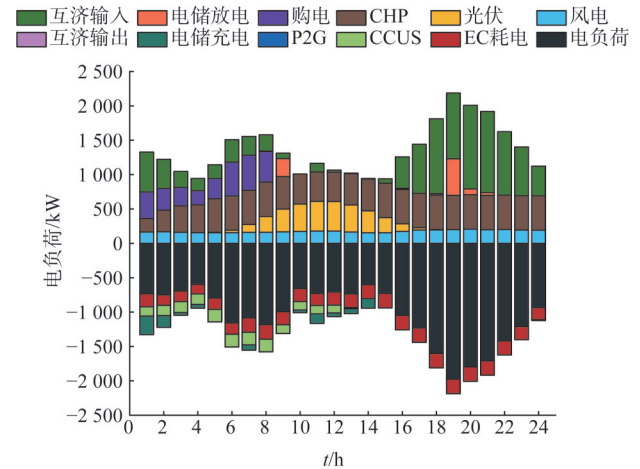


图5 电功率平衡

Fig. 5 Electrical power balance

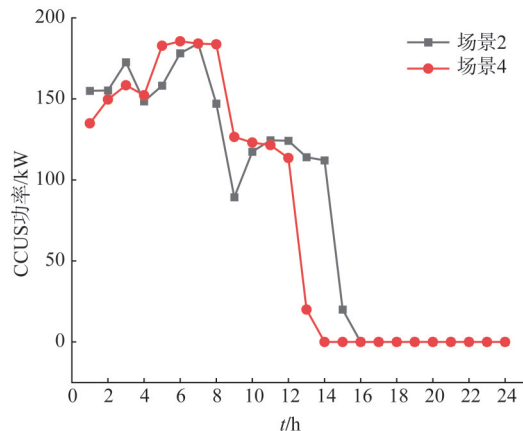


图6 CCUS运行功率对比

Fig. 6 Comparison of CCUS operating power

引入绿证-碳交易联合机制后,功率交换的规模 and 方向未发生突变,但电源结构及调度结果的经济属性发生了明显变化。由图5可知,在绿证-碳交易联合机制作用下,IES3在负荷高峰时段更多地采用来自 IES1 与 IES2 的清洁电力输入,从而降低了本地高碳电源的出力占比。

同时,如图6所示,随着清洁能源的接入,系统总碳排放量显著下降,导致CCUS需要捕集的CO₂质量随之降低,其运行功率进一步降低,从而有效降低了系统对外部机组的依赖。

从绿色运行角度分析,引入绿证-碳交易联合机制后,系统调度过程中对清洁电力的优先利用程度显著提高,可再生能源出力的消纳比例提升,从而有效降低了高碳电源的出力占比,促进了系统运行结构的低碳化转型。

从运行安全角度分析,引入绿证-碳交易联合机制后,系统在高负荷时段对区域间清洁电力互济的利用程度提升,对本地高碳、高负荷机组的依赖程度下降,有助于缓解单一区域内部的供需矛盾。同时,多区域互联结构为系统提供了额外的调节通道,在可再生能源出力波动时,有效提高了系统运行的灵活性与安全裕度。

4.3 联合机制的价格激励灵敏度分析

当碳交易基价变化时,系统总运行成本与总碳排放量的变化如图7所示。

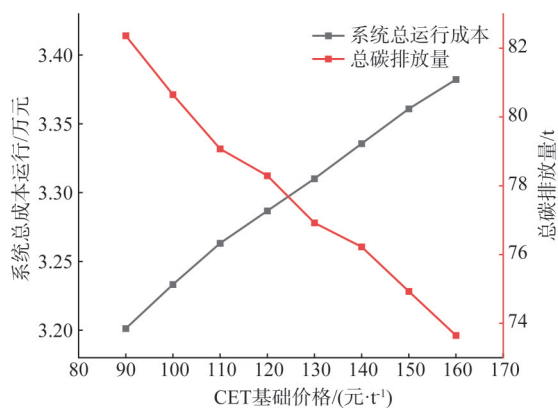


图7 碳基价变化对IES影响

Fig. 7 Impact of carbon base price variation on IES

由图7可见,随着碳基价由90元/t升至160元/t,系统总运行成本呈逐步上升趋势,而总碳排放量则显著下降。这是由于碳基价上升提高了单位碳排放的边际成本,使高碳机组运行受限,调度模型

倾向于优先利用可再生能源及跨区电力,同时增加CCUS-P2G等低碳技术的出力比例。尽管有效降低了系统碳排放水平,但其代价是系统需承担更高的环境交易成本,从而导致总成本上升。

当绿证价格变化时系统运行成本与总碳排放量的变化如图8所示。

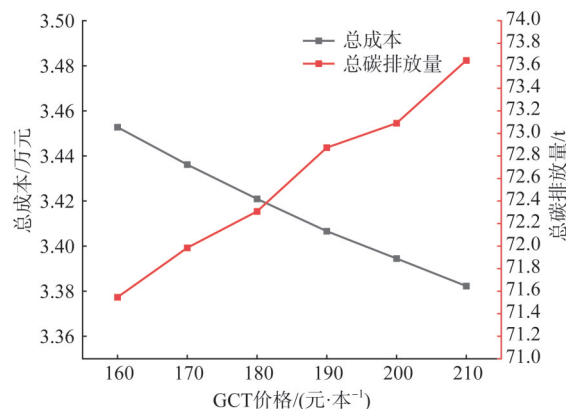


图8 绿证价格变化对IES影响

Fig. 8 Impact of green certificate price variation on IES

图8表明,随着绿证价格由160元/本升至210元/本,系统总运行成本呈下降趋势,而总碳排放量则有所上升。这主要是由于绿证价格上升增强了可再生能源的经济激励效应,在绿证-碳交易联合机制下,绿证所代表的环境权益可部分抵消碳交易成本,降低系统整体的环境交易支出。在此情况下,调度模型在满足碳交易约束的前提下允许部分高碳但运行成本较低的设备参与出力。由此实现了系统经济性的进一步提升。

结果表明,绿证-碳交易联合机制并非单纯追求碳排放量最低,而是根据绿证价格和碳交易基价等市场变化,在经济性与低碳性之间实现合理平衡。

4.4 分布鲁棒优化方法的有效性分析

为凸显本文TSDRO模型在处理不确定性方面的优势,在联合机制和多区域互联结构的基础上,进一步设置以下对比场景进行验证:

场景5:采用随机优化,绿证-碳交易联合机制,区域间电能交换;

场景6:采用鲁棒优化,绿证-碳交易联合机制,区域间电能交换;

场景7:采用分布鲁棒优化,绿证-碳交易联合机制,区域间电能交换。

优化结果如表 2 所示。

表 2 不同优化方法的调度结果对比

Tab. 2 Comparison of scheduling results under different optimization methods

方法	随机优化	分布鲁棒	鲁棒优化
总成本/元	33 850. 84	35 834. 87	61 303. 12
碳交易量/kg	1 977. 00	2 141. 06	4 000. 00

由表 2 可知, 传统鲁棒优化通过覆盖极端恶劣场景确保了系统的绝对安全, 但其决策机制呈现出显著的过度保守性。为应对理论存在的极端边界情况, 系统被迫在日前调度阶段大量启动燃气机组以预留充足的旋转备用容量, 导致化石能源消耗激增。其总成本与碳交易量分别高达 61 303. 12 元和 4 000. 00 kg。相比之下, 随机优化虽然在经验分布下经济性指标最优, 但其未考虑概率分布的模糊性, 导致调度策略难以适应真实场景的波动, 鲁棒性较差。

本文提出的分布鲁棒方法引入 1-范数与 ∞ -范数的综合约束机制, 通过构建包含真实分布的模糊集, 在规避不确定性风险的同时, 排除发生概率极低的病态极端场景, 有效避免了鲁棒优化的保守陷阱。数据表明, 分布鲁棒优化总成本为 35 834. 87 元, 碳交易量为 2 141. 06 kg, 比随机优化分别高 5. 86 % 和 8. 30 %, 但各项指标远低于鲁棒优化。结果表明, 所提方法以牺牲少量经济性为代价, 实现了系统低碳性、经济性和鲁棒性的有效平衡。

为评估所提分布鲁棒优化调度模型的计算效率, 本文基于典型风光场景对模型求解过程进行了统计分析。采用 C&CG 算法对多区域综合能源系统调度问题进行求解, 结果表明该模型在 2 次迭代后达到 10^{-4} 收敛精度, 总计算耗时 57. 54 s。具体求解迭代与收敛过程如图 9 所示。

4.5 概率分布模糊集半径灵敏度分析

在分布鲁棒优化模型中, 模糊集的半径量化了决策者对风光预测误差的风险厌恶程度, 同时决定了调度策略的保守性水平。通过调整 1-范数与 ∞ -范数的约束半径, 可以灵活控制不确定集的覆盖范围。其结果如表 3—4 所示。

由表 3—4 的灵敏度分析结果可知, 系统总成本与碳排放量均随模糊集半径的增大递增, 当 θ_1 和 θ_∞ 取值较小时, 模糊集收敛于初始经验分布, 不确

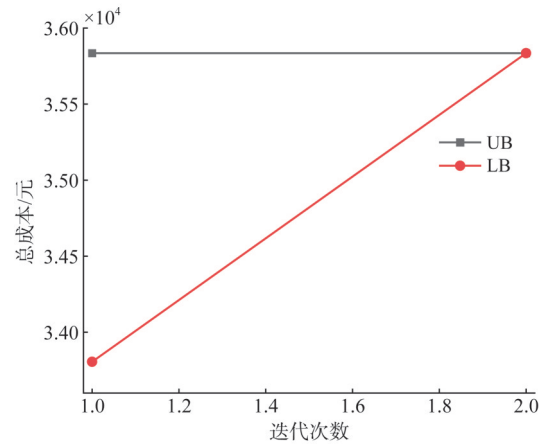


图 9 C&CG 算法迭代过程

Fig. 9 Iteration process of the C&CG algorithm

表 3 不同 1-范数下灵敏度分析($\theta_\infty=0.05$)

Tab. 3 Sensitivities analysis under different 1-norms ($\theta_\infty=0.05$)

θ_1	0.05	0.1	0.15
总成本/元	34 820. 48	35 834. 87	36 235. 77
碳交易量/kg	2 102. 25	2 141. 06	2 141. 31

表 4 不同 ∞ -范数下灵敏度分析 ($\theta_1=0.1$)

Tab. 4 Sensitivities analysis under different ∞ -norms ($\theta_1=0.1$)

θ_∞	0.01	0.02	0.05
总成本/元	34 372. 03	34 938. 21	35 834. 87
碳交易量/kg	2 029. 31	2 080. 19	2 141. 06

定性覆盖范围较窄, 调度结果趋近于随机优化结果, 此时系统经济性最优, 但应对极端分布扰动的能力弱。随着范数约束半径的增大, 模糊集半径扩大, 模型考虑的风光出力分布场景更加极端。为规避潜在的供需失衡风险, 系统被迫调用更多高成本的灵活性资源, 导致运行成本与碳排放量同步上升, 调度结果趋近于鲁棒优化结果。

5 结论

本文针对风光不确定性下多区域综合能源系统的低碳经济调度问题, 提出了一种基于绿证-碳交易联合机制的分布鲁棒优化调度方法。通过多场景算例验证与灵敏度分析, 得出结论如下。

1) 引入绿证-碳交易联合机制, 建立了绿证环境权益与碳配额的耦合关系。该机制通过引入动态折算系数, 在调度层面刻画环境权益动态价值传导过程, 激励多区域综合能源系统主动挖掘深层减排潜力, 实现了低碳性与经济性的协同优化。

2)灵敏度分析表明,联合机制并非单纯追求碳排放量最低,而是具备自适应调节能力。系统可根据市场价格与系统物理运行状态,动态调整调度策略,实现经济性与低碳性的合理权衡。

3)采用1-范数与 ∞ -范数的综合范数分布鲁棒优化模型,克服了随机优化的冒进与传统鲁棒优化的保守缺陷。同时通过灵敏度分析,调整约束半径,辅助决策者在风险规避与经济成本之间寻求平衡。

参考文献

- [1] 陈国平,董昱,梁志峰.能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J].中国电机工程学报,2020,40(17): 5493-5506.
CHEN Guoping, DONG Yu, LIANG Zhifeng. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with Chinese characteristics in energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5493-5506.
- [2] 施永浩,罗萍萍,林济铿.基于条件流模型的可再生能源短期出力场景生成[J].南方电网技术,2026,20(2): 105-114.
SHI Yonghao, LUO Pingping, LIN Jikeng. Short-term output scenario generation of renewable energy based on conditional flow model[J]. Southern Power System Technology, 2026, 20(2): 105-114.
- [3] 卢有飞,邹时容,刘璐豪,等.基于知识共享的高比例可再生能源系统发电控制[J].高压电器,2024,60(10): 33-45.
LU Youfei, ZOU Shirong, LIU Luhao, et al. Generation control of high percentage renewable energy systems based on knowledge sharing[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(10): 33-45.
- [4] 和萍,刘鑫,宫智杰,等.高比例可再生能源电力系统源荷储联合调峰分层优化运行[J].电力系统保护与控制,2024,52(18): 112-122.
HE Ping, LIU Xin, GONG Zhijie, et al. Hierarchical optimization operation model for joint peak-load regulation of source-load-storage in a high proportion of renewable energy power system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(18): 112-122.
- [5] FU X Q, SUN H B, GUO Q L, et al. Uncertainty analysis of an integrated energy system based on information theory[J]. Energy, 2017(122): 649-662.
- [6] 贾宏杰,王丹,徐宪东,等.区域综合能源系统若干问题研究[J].电力系统自动化,2015,39(7): 198-207.
JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207.
- [7] LI X Y, WU N. A two-stage distributed robust optimal control strategy for energy collaboration in multi-regional integrated energy systems based on cooperative game[J]. Energy, 2024(305): 132221.1-132221.10.
- [8] 吴嘉豪,曾成碧,苗虹.计及子区域间能量交换的多区域综合能源系统协调经济调度[J].电力建设,2019,40(11): 39-47.
WU Jiahao, ZENG Chengbi, MIAO Hong. Coordinated economic scheduling for multi-regional integrated energy system considering energy exchange between sub-regions[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(11): 39-47.
- [9] SU H, ZIO E, ZHANG J, et al. A systematic method for the analysis of energy supply reliability in complex integrated energy systems considering uncertainties of renewable energies, demands and operations[J]. Journal of Cleaner Production, 2020(267): 122117.1-122117.9.
- [10] ZHONG J, LI Y, CAO Y, et al. Stochastic optimization of integrated energy system considering network dynamic characteristics and psychological preference[J]. Journal of Cleaner Production, 2020(275): 122992.
- [11] ZHOU Y, WEI Z, SUN G, et al. A robust optimization approach for integrated community energy system in energy and ancillary service markets[J]. Energy, 2018(148): 1-15.
- [12] 钱帅帅,苏珈,杜欣慧,等.计及源-荷不确定性的综合能源系统分布鲁棒优化[J/OL].南方电网技术,1-13[2025-12-01].
<https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20251202.1752.024>.
QIAN Shuashuai, SU Jia, DU Xinhui, et al. Robust optimization of integrated energy system distribution taking into account source-load uncertainty[J/OL]. Southern Power System Technology, 1-13[2025-12-01].
<https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20251202.1752.024>.
- [13] 税月,刘俊勇,高红均,等.考虑风电不确定性的电热综合系统分布鲁棒协调优化调度模型[J].中国电机工程学报,2018,38(24): 7235-7247,7450.
SHUI Yue, LIU Junyong, GAO Hongjun, et al. A distributionally robust coordinated dispatch model for integrated electricity and heating systems considering uncertainty of wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7235-7247,7450.
- [14] 丁小强,袁至,李骥.基于混合Wasserstein两阶段分布鲁棒的多区域含氢综合能源系统合作运行优化[J].中国电力,2025,58(7): 1-14.
DING Xiaoqiang, YUAN Zhi, LI Ji. Cooperative operation optimization for multi-region hydrogen-integrated integrated energy system based on hybrid Wasserstein two-stage distributionally robust[J]. Electric Power, 2025, 58(7): 1-14.
- [15] 于馨玮,陈继明,仇志华.分布鲁棒优化在综合能源系统调度与规划中的应用综述[J].全球能源互联网,2023,6(2): 207-215.
YU Xinwei, CHEN Jiming, ZHANG Zhihua. A review of the application of distributionally robust optimization in integrated energy system dispatching and planning[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(2): 207-215.
- [16] 贺帅佳,阮贺彬,高红均,等.分布鲁棒优化方法在电力系统中的理论分析与应用综述[J].电力系统自动化,2020,44(14): 179-191.
HE Shuaijia, RUAN Hebin, GAO Hongjun, et al. Overview on theory analysis and application of distributionally robust optimization method in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 179-191.
- [17] WEI W, LIU F, MEI S W. Distributionally robust co-optimization of energy and reserve dispatch[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 289-300.
- [18] 刘鸿鹏,李宏伟,马建伟,等.考虑源-荷不确定性的电热联合系统分布鲁棒优化调度[J].电力自动化设备,2023,43(8): 1-8.
LIU Hongpeng, LI Hongwei, MA Jianwei, et al. Distribution-

- ally robust optimal dispatching of integrated electricity and heating system considering source-load uncertainty [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(8): 1–8.
- [19] 万文轩, 冀亚男, 尹力, 等. 碳交易在综合能源系统规划与运行中的应用及展望[J]. 电测与仪表, 2021, 58(11): 39–48. WAN Wenxuan, JI Yanan, YIN Li, et al. Application and prospect of carbon trading in the planning and operation of integrated energy system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(11): 39–48.
- [20] 黄冬梅, 王干帅, 孙锦中, 等. 碳交易机制下园区综合能源系统优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(5): 90–98. HUANG Dongmei, WANG Ganshuai, SUN Jinzhong, et al. Optimal scheduling of park-level integrated energy system under carbon trading mechanism [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2024, 36(5): 90–98.
- [21] 周建华, 梁昌誉, 史林军, 等. 计及阶梯式碳交易机制的综合能源系统优化调度[J]. 中国电力, 2025, 58(2): 77–87. ZHOU Jianhua, LIANG Changyu, SHI Linjun, et al. Optimal optimal scheduling of integrated energy system considering the ladder-type carbon trading mechanism [J]. Electric Power, 2025, 58(2): 77–87.
- [22] 张虹, 孟庆尧, 马鸿君, 等. 面向提升绿证需求的跨区互联系统经济低碳调度策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 51–61. ZHANG Hong, MENG Qingyao, MA Hongjun, et al. Economic low-carbon dispatch strategy for cross-region interconnected system for promoting green certificate demand [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 51–61.
- [23] 骆钊, 秦景辉, 梁俊宇, 等. 含绿色证书跨链交易的综合能源系统运行优化[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1311–1320. LUO Zhao, QIN Jinghui, LIANG Junyu, et al. Optimal operation of integrated energy system with green certificate cross-chain transaction [J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1311–1320.
- [24] 陈兴龙, 曹喜民, 陈洁, 等. 绿证-碳交易机制下热电灵活响应的园区综合能源系统优化调度[J]. 中国电力, 2024, 57(6): 110–120. CHEN Xinglong, CAO Ximin, CHEN Jie, et al. Optimized dispatch of park integrated energy system with thermoelectric flexible response under green certificate-carbon trading mechanism [J]. Electric Power, 2024, 57(6): 110–120.
- [25] 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. Coordinated optimal dispatch of multiple integrated energy systems under dynamic carbon-green certificate trading interaction mechanism [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(9): 52–60.
- [26] 陈锦鹏, 胡志坚, 陈嘉滨. 考虑阶梯式碳交易与供需灵活双响应的综合能源系统优化调度[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3094–3106. CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Jiabin. Optimal dispatch of integrated energy system considering ladder-type carbon trading and flexible double response of supply and demand [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3094–3106.
- [27] 陆瑜, 何兆磊, 李琰, 等. 计及风光不确定性的综合能源系统容量配置双层优化[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(19): 127–138. LU Yu, HE Zhaolei, LI Yan, et al. Bi-level optimization for capacity allocation of integrated energy systems considering wind-solar uncertainty [J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(19): 127–138.
- [28] 陈霖, 王冰, 陈玉全, 等. 基于绿证-阶梯碳交易联合机制的综合能源系统多主体协同优化方法[J]. 智慧电力, 2025, 53(9): 10–18. CHEN Ji, WANG Bing, CHEN Yuquan, et al. A multi-agent collaborative optimization method for integrated energy systems based on green certificate-stepped carbon trading joint mechanism [J]. Smart Power, 2025, 53(9): 10–18.
- [29] 黄国日, 尚楠, 梁梓杨, 等. 绿色电力消费与碳交易市场的链接机制研究[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 668–678. HUANG Guori, SHANG Nan, LIANG Ziyang, et al. Research on the linkage mechanism between green power consumption and the carbon market [J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 668–678.
- [30] 纪 X, 李 M Y, 李 M, 等. Low-carbon dispatch of multi-regional integrated energy systems considering integrated demand side response [J]. Frontiers in Energy Research, 2024 (12): 1361306.1–1361306.10.
- [31] 叶琳浩, 申展, 许峰, 等. 考虑光伏不确定性和时序相关性的分布鲁棒光储协同优化配置方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(4): 132–143. YE Linhao, SHEN Zhan, XU Feng, et al. Distributionally robust collaborative optimal allocation method of photovoltaic and energy storage considering photovoltaic uncertainty and temporal correlation [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(4): 132–143.
- [32] 邱桂华, 区伟潮, 聂家荣. 基于 C&CG 算法的含高比例分布式光伏配电网双层优化调度策略[J]. 太阳能学报, 2025, 46(9): 555–563. QIU Guihua, OU Weichao, NIE Jiarong. Two-layer optimal scheduling strategy for distributed photovoltaic distribution networks with high proportion based on C&CG algorithm [J]. Acta Energias Solaris Sinica, 2025, 46(9): 555–563.
- [33] 郝丹宁, 胡志坚, 谈竹奎, 等. 考虑绿证-阶梯碳双向交互与碳捕集的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(2): 69–77. HAO Daning, HU Zhijian, TAN Zhukui, et al. Low-carbon economic scheduling of integrated energy system considering bidirectional interaction of green certificate-ladder carbon and carbon capture [J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(2): 69–77.

收稿日期: 2026-01-10;网络首发日期:2026-04-22

作者简介:

于永进(1980), 男, 教授, 博士, 研究方向为电力系统运行与控制, yajdto@163.com;

杨宪鲁(2002), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统低碳运行, yangxianlu0530@163.com;

刘琪(1992), 男, 副教授, 博士, 研究方向为直流配电系统运行控制, qi_liu@sdu.edu.cn。