

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241499

基于 MIGDT 的工业园区综合能源系统鲁棒运行优化

董颖超^{1,2}, 王杰¹, 蒋甲丁¹, 叶家豪³

(1. 新疆工程学院能源工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830023; 2. 新疆绿氢制储用技术重点实验室(新疆工程学院), 新疆 乌鲁木齐 830023; 3. 阜阳师范大学物理与电子工程学院, 安徽 阜阳 236000)

摘要: 需求响应和可再生能源接入给综合能源系统(integrated energy systems, IES)运行带来了诸多不确定性和灵活性, 增加了系统运行优化的复杂度。为提高含可再生能源的 IES 运行经济性和可靠性, 研究了集成装配制造系统的工业园区 IES 鲁棒运行问题。首先, 深入分析了工业园区中集成装配制造系统的需求响应特性, 构建了以系统运行成本最小化为目标的工业园区 IES 优化模型。其次, 针对风光出力的不确定性, 提出了一种基于多目标信息间隙决策理论(multi-objective information gap decision theory, MIGDT)的鲁棒双层运行模型, 并设计了一种结合随机二分法与 GUROBI 求解器的双层求解算法。最后, 通过算例对所提模型和不确定处理算法的有效性进行验证, 并与确定性优化和随机优化方法进行对比, 验证了所提模型和方法的有效性。

关键词: 综合能源系统; 运行优化; 需求响应; 鲁棒优化; 不确定性

Robust operation optimization of integrated energy system in industrial park based on MIGDT

DONG Yingchao^{1,2}, WANG Jie¹, JIANG Jiading¹, YE Jiahao³

(1. School of Energy Engineering, Xinjiang University of Engineering, Urumqi 830023, China; 2. Key Laboratory of Green Hydrogen Production, Storage and Utilization Technology in Xinjiang (Xinjiang University of Engineering), Urumqi 830023, China; 3. School of Physics and Electronic Engineering, Fuyang Normal University, Fuyang 236000, China)

Abstract: The integration of demand response and renewable energy into the operation of integrated energy systems (IES) introduces significant uncertainties and flexibility, increasing the complexity of system operation optimization. To improve the economic efficiency and reliability of IES with renewable energy, this paper investigates the robust operation of IES in industrial parks featuring integrated assembly manufacturing systems. First, the demand response characteristics of such manufacturing systems are thoroughly analyzed, and an optimization model for the industrial park IES is constructed with the objective of minimizing system operating costs. Second, to address the uncertainty of wind and photovoltaic power outputs, a robust bi-level operation model based on multi-objective information gap decision theory (MIGDT) is proposed. A bi-level solution algorithm is designed by combining the stochastic bisection method with the GUROBI solver. Finally, the effectiveness of the proposed model and uncertainty-handling algorithm is verified through case studies. A comparative analysis with deterministic optimization and stochastic optimization methods validate the effectiveness of the proposed model and approach.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 72361033 and No. 52266018).

Key words: integrated energy system; operation optimization; demand response; robust optimization; uncertainty

0 引言

随着工业的快速发展和能源需求的不断上升,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(72361033, 52266018); 新疆天山英才青年科技拔尖人才项目资助(2022TSYCCX0053)

能源的高效利用与分配已成为学术界和工业界研究的热点^[1-2]。综合能源系统(integrated energy systems, IES)因其能够综合利用电力、供热和制冷等能源而受到广泛关注, 从而提高能源利用效率, 减少环境污染^[3-5]。IES 是一种具有可持续发展的复杂能源系统, 包括能源转换、分配和储存设备以及各种终端用户。它能够同时提供电力、制冷、供热等多种负

载。然而, 多种能源系统的复杂耦合特性与可再生能源发电的不确定性, 使得高效调度运行方案的开发面临重大挑战^[6-8]。

IES 运行优化是实现多能源互补和高效能源利用的关键, 国内外学者对此进行了广泛研究。文献[9]考虑需求响应(demand response, DR)和碳捕集-电转气的协调运行, 提出了一种多时间尺度 IES 低碳优化调度方法。文献[10]提出了一种可吸收二氧化碳排放的区域 IES 运行优化模型, 实现了系统节能减排。文献[11]提出一种计及垃圾焚烧烟气处理与电转甲醇的 IES 运行优化模型, 以促进新能源消纳, 提升系统的环境效益和经济效益。然而, 上述研究均忽略了可再生能源出力不确定性对系统运行优化产生的影响。为此, 文献[12]提出了一种考虑“燃煤+”耦合发电与灵活性资源备用的 IES 低碳经济调度模型, 并采用随机优化方法对风电的不确定性进行处理。文献[13]基于两阶段鲁棒优化方法, 提出一种考虑源荷不确定性的电-气-热综合多能微网运行优化策略。文献[14]提出了一种基于机会约束规划的风能、太阳能和建筑物集成的多智能体能源系统分布式协同运行策略。然而, 随机优化和机会约束规划中不确定变量的精确概率分布难以获取^[15]; 鲁棒优化是在不确定性最恶劣场景下作出的决策, 因此其获得的运行方案通常过于保守^[16]。此外, 虽然上述研究考虑了不确定因素给 IES 运行带来的影响, 但却未能量化不确定因素的波动范围^[17]。

信息间隙决策理论(information gap decision theory, IGDT)^[18-19]作为一种高效的不确定风险管控模型, 常用于管理涉及分析不确定参数潜在影响的优化问题。目前 IGDT 已经在能源优化领域得到了广泛应用, 例如, 文献[20]提出一种基于 IGDT 的 IES 多能源零售商优化调度策略。文献[21]面向煤炭伴生资源的循环利用和伴生资源强扰动下的高可靠运行需求, 提出一种基于 IGDT 的含电转气煤矿 IES 鲁棒运行策略。文献[22]提出一种基于 IGDT 的风光水储聚合商多元市场竞标决策模型。文献[23]提出一种基于多代理微网的日前运行优化框架, 并采用 IGDT 处理市场电价的不确定性。

目前, 针对 IES 的研究主要集中于居民和商业园区领域, 而对于特定工业园区 IES 的研究相对较少。然而, 工业部门的电力消费量远超其他终端使用部门, 并在 DR 计划中发挥了关键作用, 其中工业用户占据参与用户的 95%以上^[24-25]。针对工业园区的 IES 优化研究, 文献[26]提出了一种面向电力 DR 的含电解铝工业园区 IES 调控模型, 显著提升了园区负荷参与电网 DR 的能力, 同时有效促进了

新能源的就地消纳。文献[27]则从余热回收利用的角度出发, 构建了一种含高温蒸汽热泵的工业园区 IES 双层优化模型, 以充分利用工业余热并提升系统运行能效。然而, 针对集成装配制造系统的工业园区 IES 研究仍属空白领域。

综上, 本文研究了含集成装配制造系统的工业园区 IES 鲁棒运行优化问题。首先, 以系统运行成本最小化为目标函数, 考虑风电和光伏出力的不确定性, 为保证系统运行的安全性, 构建了基于多目标信息间隙决策理论(multi-objective information gap decision theory, MIGDT)的 IES 鲁棒双层运行优化模型。然后, 设计一种结合随机二分法和 GUROBI 求解器的求解算法对所提鲁棒模型进行求解。最后, 以典型日为案例进行研究, 验证了所提 DR 计划和不确定处理方法的有效性和优势。

1 工业园区 IES 框架及负荷特性分析

1.1 工业园区 IES 框架

本文针对一个典型的工业园区 IES 进行了研究, 该多能园区包括电力、热能、冷能和天然气异质能源。工业园区 IES 的整体结构如图 1 所示, 该多能系统包含风力发电机(wind generator, WG)、光伏发电系统(photovoltaic cell, PV)、热电联产(combined heating and power, CHP)、电锅炉(electric boiler, EB)、燃气锅炉(gas boiler, GB)、电制冷机(electric chiller, EC)、吸收式制冷机(absorption chiller, AC)、电储能(battery storage, BS)、冷储能(cooling storage, CS)和热储能(heat storage, HS)装置。

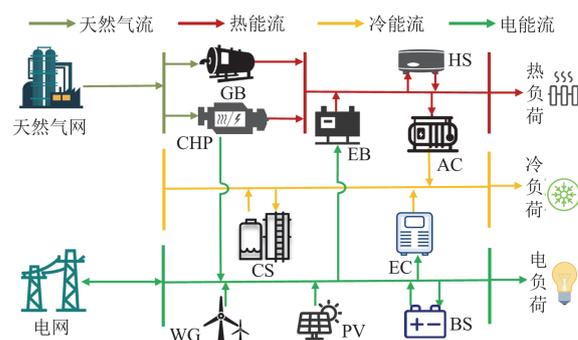


图 1 工业园区 IES 框架

Fig. 1 IES framework in industrial park

1.2 制造装配系统建模

本文研究的工业园区为一个加工机器零件的制造工厂, 考虑如图 2 所示的典型离散制造装配系统, 包括机器和缓冲区^[28]。在图 2 中, 共有 S 个组件生产线和 1 条装配线。生产线和装配线均通过机器 m_j 按照串行方式处理零件, 其中 $i = 0, 1, \dots, S$, $j = 1, \dots, M_i$ 。

当 $i \geq 1$ 时, m_{ij} 表示第 i 个组件生产线中的第 j 台机器, M_i 表示第 i 个组件生产线中的机器数量。当 $i = 0$ 时, $m_{0j} (j = 1, \dots, M_0)$ 表示装配线中的第 j 台机器, M_0 表示装配线中的机器数量。 m_{01} 对来自组件生产线的零件进行装配, 装配好的产品将由所有机器 $m_{0j} (j > 1)$ 按照 m_{01} 之后的顺序进一步处理。

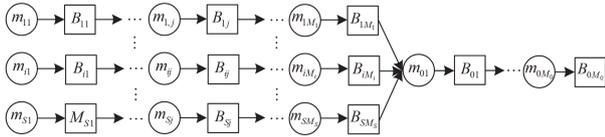


图2 实际工厂制造环境中的装配系统
Fig. 2 Assembly systems in a real factory manufacturing environment

该制造装配系统的定义如下^[29]: 1) 机器 m_{ij} 处理一个零件需要固定时间 τ_{ij} ; 2) 缓冲区 B_{ij} 存储来自机器 m_{ij} 的零件, 并提供给后续机器; 3) 缓冲区 B_{ij} 的容量限制为 C_{ij} ; 4) 对于 $i (i = 1, \dots, S)$ 和 $j (j = 1, \dots, M_i - 1)$, 如果缓冲区 $B_{ij} = 0$, 则机器 $m_{i(j+1)}$ 会出现饥饿状态; 5) 对于 $i (i = 1, \dots, S)$, 机器 m_{i1} 永远不会出现饥饿, 但如果任何一个缓冲区 $B_{iM_i} = 0$, 则机器 m_{01} 会处于饥饿状态; 6) 如果缓冲区 $B_{ij} = C_{ij}$, 则机器 m_{ij} 被阻塞; 7) 装配系统应满足每日生产任务总量 D_{total} ; 8) 任何饥饿或阻塞的机器应停止运行。

令 $x_{ij,t}$ 表示机器 m_{ij} 在 t 时段的运行状态, 如式(1)所示。

$$x_{ij,t} = \begin{cases} 1, & \text{if } m_{ij} \text{ is on} \\ 0, & \text{if } m_{ij} \text{ is off} \end{cases} \quad (1)$$

如果一台机器状态定义为“on”, 则它正常运行; 如果一台机器状态为“off”, 则表明该机器被断电, 处于关闭状态, 没有任何功能。

此外, 缓冲存储区和机器状态之间的关系定义如式(2)~式(4)所示。

1) 对于 $i = 0, \dots, S$ 且 $j = 1, \dots, M_i - 1$

$$B_{ij,t} = B_{ij,t-1} + n_{ij}x_{ij,t} - \alpha_{ij,t}n_{i(j+1)}x_{i(j+1),t} \quad (2)$$

2) 对于 $i = 1, \dots, S$ 且 $j = M_i$

$$B_{ij,t} = B_{ij,t-1} + n_{ij}x_{ij,t} - \alpha_{ij,t}n_{01}x_{01,t} \quad (3)$$

3) 对于 $i = 0$ 且 $j = M_0$

$$B_{ij,t} = B_{ij,t-1} + n_{ij}x_{ij,t} \quad (4)$$

式中: $B_{ij,t}$ 表示 t 时段缓冲区的存储量; n_{ij} 表示机器 m_{ij} 的生产率, $n_{ij} = \Delta t / \tau_{ij}$, Δt 为单位时长, 本研究

取 1 h ; $\alpha_{ij,t}$ 表示 t 时段机器的消耗率, 其表示 t 时段从缓冲区 B_{ij} 供给后续机器以生产一个工件的零件数量。另外, 假设生产率 n_{ij} 和缓冲容量 C_{ij} 均为正整数。

在设备的工作时间内, 被定义为“on”状态的机器 m_{ij} 不应该出现饥饿或阻塞。因此, 机器的运行应考虑以下约束。

1) 缓冲区阻塞

$$0 \leq B_{ij,t} \leq C_{ij}, i = 0, \dots, S; j = 1, \dots, M_i \quad (5)$$

$$x_{ij,t} \leq C_{ij} - B_{ij,t-1}, i = 0, \dots, S; j = 1, \dots, M_i \quad (6)$$

约束条件式(6)要求如果缓冲区 $B_{ij,t-1}$ 已满, 则 $x_{ij,t}$ 必须为 0。

2) 机器饥饿

$$x_{i(j+1),t} \leq B_{ij,t-1}, i = 0, \dots, S; j = 1, \dots, M_i - 1 \quad (7)$$

$$x_{01,t} \leq B_{ij,t-1}, i = 1, \dots, S; j = M_i \quad (8)$$

若缓冲区 $B_{ij,t-1}$ 为空, 则约束条件式(7)和式(8)会强制在 t 时段, 缓冲区 B_{ij} 后连续的机器 $m_{i(j+1)}$ 处于“off”状态。

3) 生产任务

$$\sum_{t \in T} n_{0M_0} x_{0M_0,t} \geq D_{\text{total}} \quad (9)$$

式中: T 为系统运行调度周期, 24 h 。式(9)的左侧表示制造装配系统生产的累计产品数量, 该约束确保了所有日常生产任务的完成。

综上, 制造装配系统的机器启停具有灵活可调度性, 因此为了最大化工业园区整体收益, 机器的运行时段可以灵活调整, 只需满足工厂日生产任务总量即可, 具有需求响应特性。

2 工业园区 IES 运行优化模型

2.1 目标函数

本文中系统运营商对所有能源进行统一协调管理, 以系统整体运行成本最小为优化目标。

$$\min f = (C^{\text{grid}} + C^{\text{gas}} + C^{\text{om}})\Delta t \quad (10)$$

$$C^{\text{grid}} = \sum_{t=1}^T c_t^{\text{ele,buy}} P_t^{\text{ele,buy}} - \sum_{t=1}^T c_t^{\text{ele,sell}} P_t^{\text{ele,sell}} \quad (11)$$

$$C^{\text{gas}} = \sum_{t=1}^T c_t^{\text{gas}} (G_t^{\text{CHP}} + G_t^{\text{GB}}) \quad (12)$$

$$C^{\text{om}} = \sum_{t=1}^T (c_{\text{CHP}}^{\text{om}} P_t^{\text{CHP}} + c_{\text{GB}}^{\text{om}} H_t^{\text{GB}} + c_{\text{EB}}^{\text{om}} H_t^{\text{EB}} + c_{\text{EC}}^{\text{om}} C_t^{\text{EC}} + c_{\text{AC}}^{\text{om}} C_t^{\text{AC}} + c_{\text{Ps}}^{\text{om}} P_t^{\text{S}} + c_{\text{Pw}}^{\text{om}} P_t^{\text{W}} + c_{\text{BS}}^{\text{om}} P_t^{\text{BS,dis}} + c_{\text{BS}}^{\text{om}} P_t^{\text{BS,ch}} + c_{\text{HS}}^{\text{om}} P_t^{\text{HS,dis}} + c_{\text{HS}}^{\text{om}} P_t^{\text{HS,ch}} + c_{\text{CS}}^{\text{om}} P_t^{\text{CS,dis}} + c_{\text{CS}}^{\text{om}} P_t^{\text{CS,ch}}) \quad (13)$$

式中: C^{grid} 、 C^{gas} 和 C^{om} 分别为系统与上级电网交易成本、系统购气成本和设备维护成本; $c_{\text{CHP}}^{\text{om}}$ 、 $c_{\text{GB}}^{\text{om}}$ 、 $c_{\text{EB}}^{\text{om}}$ 、 $c_{\text{EC}}^{\text{om}}$ 、 $c_{\text{AC}}^{\text{om}}$ 、 $c_{\text{Ps}}^{\text{om}}$ 、 $c_{\text{Pw}}^{\text{om}}$ 、 $c_{\text{BS}}^{\text{om}}$ 、 $c_{\text{HS}}^{\text{om}}$ 和 $c_{\text{CS}}^{\text{om}}$ 分别为 CHP、GB、EB、EC、AC、PV、WG、BS、HS 和 CS 设备的单位维护成本; $c_t^{\text{ele,buy}}$ 、 $c_t^{\text{ele,sell}}$ 和 c_t^{gas} 分别为系统在 t 时段的单位购电价格、售电价格和天然气价格; $P_t^{\text{ele,buy}}$ 、 $P_t^{\text{ele,sell}}$ 、 G_t^{CHP} 和 G_t^{GB} 分别为 t 时段系统的购电量、售电量、CHP 购气量和 GB 购气量; P_t^{CHP} 、 H_t^{GB} 、 H_t^{EB} 、 C_t^{EC} 和 C_t^{AC} 分别为 t 时段对应能源设备的出力值; P_t^{W} 和 P_t^{S} 分别为 t 时段风电和光伏的出力; $P_t^{\text{BS,ch}}$ 、 $P_t^{\text{BS,dis}}$ 、 $P_t^{\text{HS,ch}}$ 、 $P_t^{\text{HS,dis}}$ 、 $P_t^{\text{CS,ch}}$ 和 $P_t^{\text{CS,dis}}$ 分别为电储能、热储能和冷储能的充/放功率。

2.2 约束条件

除了与工业园区离散制造装配系统相关的约束外, 本文的模型还包括系统安全约束、各能源转换设备以及储能运行特性约束。

1) 系统安全约束

系统安全约束主要指冷热电功率平衡约束式(14)一式(16)、购气约束式(17)和式(18)、系统与上级电网联络线之间的购售电约束式(19)一式(21), 具体为

$$P_t^{\text{ele,buy}} + P_t^{\text{W}} + P_t^{\text{S}} + P_t^{\text{CHP}} + P_t^{\text{BS,dis}} = P_t^{\text{ele,sell}} + P_t^{\text{DE}} + P_t^{\text{EB}} + P_t^{\text{BS,ch}} + P_t^{\text{EC}} \quad (14)$$

$$H_t^{\text{CHP}} + H_t^{\text{GB}} + H_t^{\text{EB}} + P_t^{\text{HS,dis}} = H_t^{\text{DE}} + P_t^{\text{HS,ch}} + H_t^{\text{AC}} \quad (15)$$

$$C_t^{\text{EC}} + C_t^{\text{AC}} + P_t^{\text{CS,dis}} = C_t^{\text{DE}} + P_t^{\text{CS,ch}} \quad (16)$$

$$G_t^{\text{gas}} = G_t^{\text{GB}} + G_t^{\text{CHP}} \quad (17)$$

$$0 \leq G_t^{\text{gas}} \leq G^{\text{gas,max}} \quad (18)$$

$$0 \leq P_t^{\text{ele,buy}} \leq P^{\text{ele,max}} \quad (19)$$

$$0 \leq P_t^{\text{ele,sell}} \leq P^{\text{ele,max}} \quad (20)$$

$$P_t^{\text{ele,buy}} P_t^{\text{ele,sell}} = 0 \quad (21)$$

式中: P_t^{DE} 、 H_t^{DE} 和 C_t^{DE} 分别为 t 时段电负荷功率、热负荷功率和冷负荷功率; P_t^{EB} 和 P_t^{EC} 分别为 t 时段 EB 和 EC 消耗的电功率; H_t^{CHP} 为 t 时段 CHP 产生的热功率; H_t^{AC} 为 t 时段 AC 消耗的热功率; G_t^{gas} 和 $G^{\text{gas,max}}$ 分别为 t 时段系统从上级气网购买的天然气量以及购买天然气量的上限; $P^{\text{ele,max}}$ 为系统的最大购售电功率。约束式(21)保证系统不会同时出现购售电的情况。

2) CHP 机组

CHP 是 IES 中的常见设备, 它可以同时生成电能和热能。CHP 的运行特性如式(22)所示。

$$\begin{cases} P_t^{\text{CHP}} = \eta^{\text{c}} G_t^{\text{CHP}} \\ 0 \leq P_t^{\text{CHP}} \leq P^{\text{CHP,max}} \\ H_t^{\text{CHP}} = \beta^{\text{CHP}} P_t^{\text{CHP}} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $P^{\text{CHP,max}}$ 为 CHP 的最大输出电功率; η^{c} 和 β^{CHP} 分别为 CHP 的产电效率和产热效率。

3) GB

GB 通过燃烧天然气将热量传输到热网, 其运行特性如式(23)所示。

$$\begin{cases} H_t^{\text{GB}} = \eta^{\text{GB}} G_t^{\text{GB}} \\ 0 \leq H_t^{\text{GB}} \leq H^{\text{GB,max}} \end{cases} \quad (23)$$

式中: η^{GB} 和 $H^{\text{GB,max}}$ 分别为 GB 的转换效率和最大输出功率。

4) EB

EB 是一种将电能转换为热能的设备, 其运行特性如式(24)所示。

$$\begin{cases} H_t^{\text{EB}} = \eta^{\text{EB}} P_t^{\text{EB}} \\ 0 \leq H_t^{\text{EB}} \leq H^{\text{EB,max}} \end{cases} \quad (24)$$

式中: η^{EB} 和 $H^{\text{EB,max}}$ 分别为 EB 的转换效率和最大输出热功率。

5) EC

EC 是一种将电能转换为冷能的设备, 其运行特性如式(25)所示。

$$\begin{cases} C_t^{\text{EC}} = \eta^{\text{EC}} P_t^{\text{EC}} \\ 0 \leq C_t^{\text{EC}} \leq C^{\text{EC,max}} \end{cases} \quad (25)$$

式中: η^{EC} 和 $C^{\text{EC,max}}$ 分别为 EC 的转换效率和最大输出功率。

6) AC

AC 是一种消耗热能生成冷能的设备, 具有较高的转换效率, 其运行特性如式(26)所示。

$$\begin{cases} C_t^{\text{AC}} = \eta^{\text{AC}} H_t^{\text{AC}} \\ 0 \leq C_t^{\text{AC}} \leq C^{\text{AC,max}} \end{cases} \quad (26)$$

式中: η^{AC} 和 $C^{\text{AC,max}}$ 分别为 AC 的转换效率和最大输出冷功率。

7) 储能运行约束

储能设备的荷电状态(state of charge, SOC)随充放电功率的变化关系如式(27)所示。另外, 为防止储能设备过度充放, 需对 SOC 范围进行约束, 见式(28)。式(29)规定储能设备的容量始终保持不变。

$$E_t^B = (1 - \lambda^B)E_{t-1}^B + \Delta t \left(P_t^{B,\text{ch}} \eta^{B,\text{ch}} - \frac{P_t^{B,\text{dis}}}{\eta^{B,\text{dis}}} \right) \quad (27)$$

$$E^{B,\text{min}} \leq E_t^B \leq E^{B,\text{max}} \quad (28)$$

$$E_0^B = E_T^B \quad (29)$$

式中： E_t^B 为 t 时段储能 B 的容量； B 为储能类型， $B \in \{\text{BS}, \text{HS}, \text{CS}\}$ ； λ^B 为储能自放率； $P_t^{B,\text{ch}}$ 和 $P_t^{B,\text{dis}}$ 分别为储能 B 在 t 时段的充能和放能功率； $\eta^{B,\text{ch}}$ 和 $\eta^{B,\text{dis}}$ 分别为储能的充能和放能效率； $E^{B,\text{max}}$ 和 $E^{B,\text{min}}$ 分别为储能容量的上下限； E_0^B 和 E_T^B 分别为储能 B 的始末容量大小。

此外，储能不能同时进行充放能，并且能量存储设备的充放功率应受到一定的限制，因此添加储能设备的充放功率约束为

$$0 \leq P_t^{B,\text{ch}} \leq P^{B-\text{ch,max}} \quad (30)$$

$$0 \leq P_t^{B,\text{dis}} \leq P^{B-\text{dis,max}} \quad (31)$$

$$P_t^{B,\text{ch}} P_t^{B,\text{dis}} = 0 \quad (32)$$

式中： $P^{B-\text{ch,max}}$ 和 $P^{B-\text{dis,max}}$ 分别为储能的充能和放能上限。式(30)和式(31)用于限制储能充放功率的大小，式(32)保证了同一时段储能不会同时充放能。

3 基于 MIGDT 的优化模型构建与求解

由于风光出力预测误差的存在，导致风光出力具有不确定性。因此，本文构建的工业园区 IES 运行优化模型含不确定参数，不能被直接求解。本节基于盒式集合对不确定性进行建模，提出一种 MIGDT 方法对风光出力的不确定性进行处理。

3.1 风光出力的不确定性建模

风电和光伏出力的数学模型如式(33)和式(34)所示。

$$\begin{cases} P_t^W = \hat{P}_t^W + \Delta P_t^W \\ -\alpha^W \hat{P}_t^W \leq \Delta P_t^W \leq \alpha^W \hat{P}_t^W \end{cases} \quad (33)$$

$$\begin{cases} P_t^S = \hat{P}_t^S + \Delta P_t^S \\ -\alpha^S \hat{P}_t^S \leq \Delta P_t^S \leq \alpha^S \hat{P}_t^S \end{cases} \quad (34)$$

式中： \hat{P}_t^W 、 ΔP_t^W 和 α^W 分别为风电出力的预测值、预测偏差和波动水平； \hat{P}_t^S 、 ΔP_t^S 和 α^S 分别为光伏出力的预测值、预测偏差和波动水平。

3.2 基于 MIGDT 的鲁棒优化模型建模

虽然 IGDT 模型处理不确定优化问题时具有一定的鲁棒性，但基本 IGDT 模型只能处理单一不确定优化问题。鉴于此，本文将多目标优化技术融入 IGDT 模型中，从而提出能够同时处理多重不确定性的 MIGDT 鲁棒模型。MIGDT 的具体定义为

$$\begin{cases} \max \{\alpha^W, \alpha^S\} \\ \text{s.t. } \alpha^W \geq 0, \alpha^S \geq 0 \\ f(\mathbf{x}, \mathbf{u}^W, \mathbf{u}^S) \leq f_c, f_c = (1 + \delta)f_0 \\ h(\mathbf{x}, \mathbf{u}^W, \mathbf{u}^S) = 0, g(\mathbf{x}, \mathbf{u}^W, \mathbf{u}^S) \leq 0 \\ \mathbf{u}^W \in U^W(\hat{\mathbf{u}}^W, \alpha^W) = \left\{ \mathbf{u}^W \left\| \frac{\mathbf{u}^W - \hat{\mathbf{u}}^W}{\hat{\mathbf{u}}^W} \right\| \leq \alpha^W \right\} \\ \mathbf{u}^S \in U^S(\hat{\mathbf{u}}^S, \alpha^S) = \left\{ \mathbf{u}^S \left\| \frac{\mathbf{u}^S - \hat{\mathbf{u}}^S}{\hat{\mathbf{u}}^S} \right\| \leq \alpha^S \right\} \end{cases} \quad (35)$$

式中： \mathbf{x} 为决策变量，对应于系统的运行方案； \mathbf{u}^W 和 \mathbf{u}^S 分别为风电和光伏出力不确定量； U^W 和 U^S 分别为风电和光伏不确定量的波动区间； $\hat{\mathbf{u}}^W$ 和 $\hat{\mathbf{u}}^S$ 分别为风电和光伏不确定量的预测值； f_0 为风光出力取其预测值时，求解工业园区 IES 运行优化模型得到的系统运行成本； f_c 为系统预设运行成本； δ 为目标偏差因子，其值越大，则表明决策者对目标变差的容忍度越大，鲁棒性越强，反之亦然。式(35)为鲁棒模型，其能够在风光出力的不确定量概率分布和波动范围未知的情况下量化不确定性风险，确保决策目标保持在可接受范围内，并最大化风光出力的波动范围。换言之，该鲁棒模型所求得系统运行成本能够在给定的风光出力波动水平下不超过预设运行成本 f_c 。

式(35)的最小运行成本无法直接求解，因其依赖于不确定性变量的波动范围，而波动范围本身也是优化目标，从而构成了一个双层优化模型。上层模型为多目标优化问题，在满足运行成本约束的条件下最大化风光的波动水平；下层模型为混合整数非线性规划问题，用于求解给定波动水平下的系统最小运行成本。通过分析目标函数式(10)可知，风电和光伏出力的维护成本远低于系统购电成本，因此风光出力越小，系统运行成本越高。当下层模型中的风光波动水平确定时，只需验证风光出力取下限系统运行成本是否满足预设成本即可。

3.3 模型求解

针对 MIGDT 模型的特点，本文设计了一种高效的混合求解算法。对于上层多目标问题，采用式(36)所示变换将其转换为一个单目标优化问题。

$$\begin{cases} \max \alpha^W \\ \text{s.t. } \alpha^W \geq 0 \\ \frac{\alpha^W}{\alpha^S} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \\ f(\mathbf{x}, \mathbf{u}^W, \mathbf{u}^S) \leq f_c \\ f_c = (1 + \delta)f_0 \end{cases} \quad (36)$$

式中: μ_1 和 μ_2 分别为给定的风电和光伏波动水平比例系数。因此, 对于式(36)只有 α^w 为决策变量, 而 α^s 可通过风电和光伏波动水平比例系数计算得到。

对于下层运行优化模型, 当上层风电和光伏的波动水平 α^w 和 α^s 传入下层模型时, 就可以得到风电和光伏的出力大小, 见式(37)。然后将式(37)代入下层优化模型进行求解, 可得到运行成本 f^* 。

$$\begin{cases} P_t^w = \hat{P}_t^w - \alpha^w \hat{P}_t^w \\ P_t^s = \hat{P}_t^s - \alpha^s \hat{P}_t^s \end{cases} \quad (37)$$

此外, 式(21)和式(32)中的系统同时购售电约束以及储能设备的同时充放电约束均为双线性项, 这些双线性项可以在不影响解最优性的情况下直接剔除。这里, 以式(21)为例来证明这个定理。

证明: 仅就 $P_t^{\text{ele, buy}}$ 和 $P_t^{\text{ele, sell}}$ 而言, 目标函数式(10)可以简化为

$$\min_{P_t^{\text{ele, buy}}, P_t^{\text{ele, sell}}} \sum_{t=1}^T (c_t^{\text{ele, buy}} P_t^{\text{ele, buy}} - c_t^{\text{ele, sell}} P_t^{\text{ele, sell}} + C_t^{\text{OT}}) \Delta t \quad (38)$$

式中: C_t^{OT} 为与 $P_t^{\text{ele, buy}}$ 和 $P_t^{\text{ele, sell}}$ 无关的等效成本。

类似地, 式(14)可以简化为

$$P_t^{\text{ele, buy}} - P_t^{\text{ele, sell}} = P_t^{\text{OT}} \quad (39)$$

式中: P_t^{OT} 为与 $P_t^{\text{ele, buy}}$ 和 $P_t^{\text{ele, sell}}$ 无关的净功率。

然后, 对于式(10)中关于 $P_t^{\text{ele, buy}}$ 和 $P_t^{\text{ele, sell}}$ 的系统运行成本目标, 可以在删除式(21)的情况下将其重写为

$$\min_{P_t^{\text{ele, buy}}, P_t^{\text{ele, sell}}} \sum_{t=1}^T \left(c_t^{\text{ele, buy}} P_t^{\text{OT}} + (c_t^{\text{ele, buy}} - c_t^{\text{ele, sell}}) P_t^{\text{ele, sell}} + C_t^{\text{OT}} \right) \Delta t \quad (40)$$

或

$$\min_{P_t^{\text{ele, buy}}, P_t^{\text{ele, sell}}} \sum_{t=1}^T \left((c_t^{\text{ele, buy}} - c_t^{\text{ele, sell}}) P_t^{\text{ele, buy}} + (c_t^{\text{ele, sell}} P_t^{\text{OT}} + C_t^{\text{OT}}) \right) \Delta t \quad (41)$$

由于系统在每个时段 $c_t^{\text{ele, buy}} > c_t^{\text{ele, sell}}$, 且 P_t^{OT} 和 C_t^{OT} 都是关于 $P_t^{\text{ele, buy}}$ 和 $P_t^{\text{ele, sell}}$ 优化问题的固定值, 因此最优解位于 $P_t^{\text{ele, buy}} = 0$ 或 $P_t^{\text{ele, sell}} = 0$ 。

证毕。

综上, 本文构建的双层模型上层为一个简单的关于 α^w 的一元方程求解问题 ($\alpha^w \geq 0$), 由于 α^w 的精度变化对下层优化目标不那么敏感, 本文采用随机二分法求解上层模型。下层模型为一个线性规划问题, 可采用 GUROBI 求解器得到全局最优解。鉴于所构建 MIGDT 模型的特点, 本文设计一种双层求解算法对其进行求解, 求解流程如下。

1) 将风光预测出力代入运行优化模型得到运行

成本 f_0 , 设置目标偏差因子 δ , 初始化风电波动水平 α^w 的下界 α_{\min}^w 和上界 α_{\max}^w 分别为 0 和 0.5, 设置风光波动水平比例系数 μ_1 和 μ_2 。

2) 从 $[\alpha_{\min}^w, \alpha_{\max}^w]$ 内取一个随机数 $\tilde{\alpha}$, 令波动水平 $\alpha^w = \tilde{\alpha}$, $\alpha^s = \alpha^w \mu_2 / \mu_1$, 将 α^w 和 α^s 代入下层运行优化模型, 通过式(37)计算风电和光伏出力, 然后调用 GUROBI 求解器对其进行求解, 得到下层模型的最优运行成本 f^* 。

3) 比较 f^* 与 $(1+\delta)f_0$ 的大小, 若 $f^* \leq (1+\delta)f_0$, 令 $\alpha_{\min}^w = \alpha^w$; 反之, 则令 $\alpha_{\max}^w = \alpha^w$ 。

4) 判断 $\tilde{\alpha}$ 是否达到收敛阈值, 若 $\alpha_{\max}^w - \alpha_{\min}^w \leq 10^{-4}$, 则停止迭代, 返回 α^w 值、 α^s 值和下层模型最优运行成本 f^* 值; 反之, 返回步骤 2)。

4 算例分析

4.1 系统参数

本节将所提 MIGDT 应用于含风光不确定性和集成装配制造系统的工业园区运行优化问题, 以验证所提不确定处理方法和 DR 计划的有效性, 本实验中的 IES 结构如图 1 所示。与实验相关的参数和数据来自文献[30]。其中, 工业园区共包括 4 个如图 2 所示的离散制造装配系统, 每个装配系统的日生产任务总量为 2500 个零件。此外, 系统的天然气购买价格为 3.45 元/m³。所提双层求解算法上层随机二分法的收敛阈值为 10^{-4} 。本实验在 MATLAB (R2020b) 软件平台中通过 Yalmip 工具包调用 GUROBI 求解器进行算例仿真。

4.2 基于 MIGDT 的鲁棒运行优化结果分析

本节将所提 MIGDT 应用于构建的工业园区 IES 运行优化模型, 并对 MIGDT 的参数进行了详细分析。首先, 实验在不考虑风电和光伏出力的随机性的情况下, 对含 DR 计划的运行模型进行确定性优化, 得到的运行成本为 11 022 元。然后, 考虑风光出力的不确定性进行仿真实验, 表 1 列出了风光波动水平设置为 1:1 时, 在不同的目标偏差因子下 MIGDT 得到的运行优化结果。由表 1 可以看出, 当目标偏差因子为 0 时, MIGDT 为不考虑风光随机性的确定性优化。另外, 随着目标偏差因子的增大, 由于决策者愿意付出更大的运行成本以应对风电和光伏出力的随机性, 因此优化得到的运行成本和风光波动水平也随之增大。这表明当决策者的预设成本越高时, 优化得到的日前运行策略的鲁棒性越强, 即系统在日内运行时, 抵抗未知风电和光伏波动的能力就越强。

表 1 MIGDT 求解含需求响应的运行模型所得优化结果

Table 1 Optimization results of operation model with DR solved by MIGDT

目标偏差因子	预设成本/元	优化所得成本/元	风光波动水平
0	11 022	11 022	0
0.02	11 242	11 242	0.028
0.04	11 463	11 463	0.0554
0.06	11 683	11 683	0.0814
0.08	11 904	11 904	0.1067
0.1	12 124	12 124	0.131
0.12	12 345	12 345	0.1539
0.14	12 565	12 565	0.1766
0.16	12 786	12 786	0.1988
0.18	13 006	13 006	0.2207
0.2	13 226	13 226	0.2421

另外，图 3 展示了目标偏差因子为 0.1 时，所提双层求解算法的收敛曲线。由图 3 可知，当算法迭代 28 次时，风电波动水平的上界和下界差值约为 3.7×10^{-5} ，小于收敛阈值 10^{-4} ，表明所提算法已收敛，验证了其有效性。

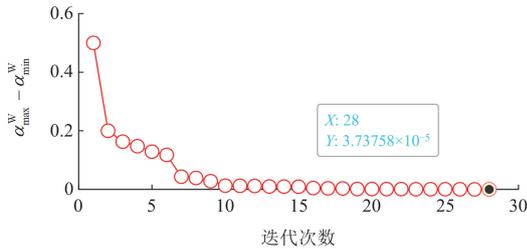


图 3 目标偏差因子为 0.1 时，所提求解算法的收敛曲线
Fig. 3 Convergence curve of the proposed solution algorithm when the objective deviation factor is 0.1

为了清晰展示日前运行策略的有效性，以目标偏差因子为 0.1 时得到的运行策略为例进行结果展示。图 4—图 6 分别展示了工业园区电热冷的供需结果。由图 4—图 6 可知，电热冷功率平衡约束均已得到满足，验证了 MIGDT 得到的运行策略的有

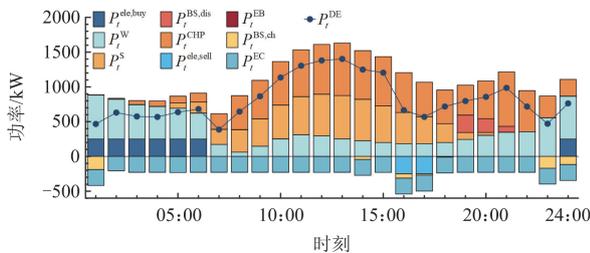


图 4 电功率供需运行优化结果
Fig. 4 Operation optimization results of power supply and demand

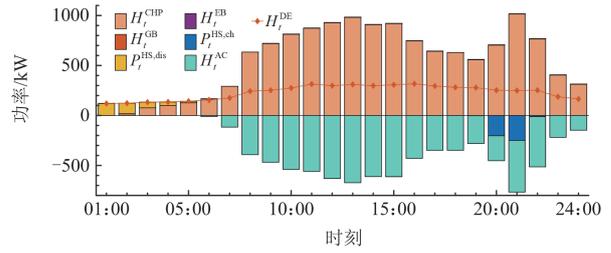


图 5 热功率供需运行优化结果
Fig. 5 Operation optimization results of thermal power supply and demand

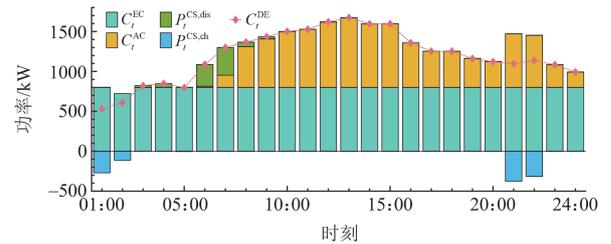


图 6 冷功率供需运行优化结果
Fig. 6 Operation optimization results of cold power supply and demand

效性。由图 4 可知，当系统购电价格较高，且电负荷较大时，系统不从主网购电，主要通过 CHP 机组供电，且部分时段电储能处于放电状态。相反，在 01:00—06:00 系统购电价格较低，且电负荷较小时，系统主要通过从电网购电以及风力发电满足供需平衡，此时部分时段电储能处于充电状态。由图 5 可知，由于热负荷较小，电锅炉和燃气锅炉几乎不工作，主要通过 CHP 机组和热储能设备提供热能，且吸收式制冷机和热储能吸收多余热能。相反，由图 6 可知，冷负荷较大，电制冷机处于满负荷状态，主要通过吸收式制冷机和电制冷机提供冷能。

4.3 需求响应的有效性分析

为验证 DR 计划的有效性，本节对比了含 DR 与无 DR 的运行结果。在风电和光伏波动水平为 1:1 的条件下，无 DR 的确定性优化运行成本为 11 519 元，而含 DR 的确定性优化运行成本为 11 022 元，降低了 497 元。结果表明，DR 计划能够根据实时电价调整设备运行状态，灵活调节工业区用电负荷，从而优化系统经济性。图 7 和图 8 展示了目标偏差因子为 0.1 时工业园区的机器启停状态及柔性负荷变化。由图 7 可见，机器启停状态随电价时段显著变化：在购电高峰时段，机器大多关闭；在电价低谷时段，机器开启。系统通过调整机器启停状态改变柔性电负荷，从而降低购电成本，提升经济效益。

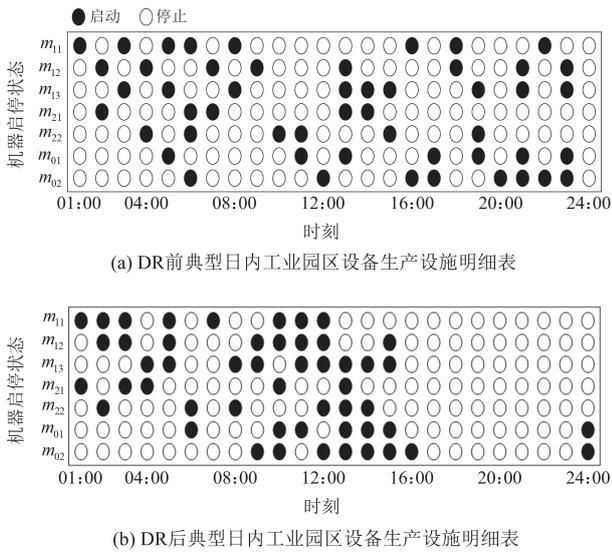


图 7 DR 前后工业园区机器的启停状态

Fig. 7 Machines' start-stop status of industrial park before and after DR

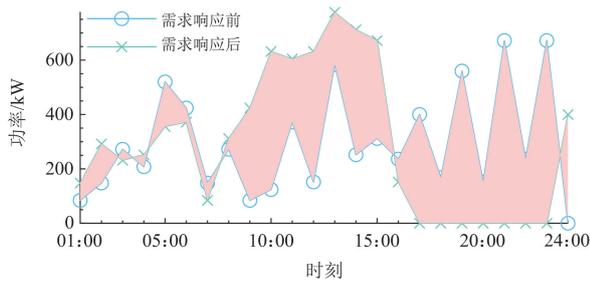


图 8 工业园区柔性负荷需求响应前后结果对比

Fig. 8 Comparison of results before and after flexible load DR in industrial park

4.4 不同方法对比分析

为了验证 MIGDT 方法的优势, 本节将 MIGDT 与确定性优化和随机优化方法得到的日前运行方案进行实验对比分析, 以验证所得运行方案在日内运行阶段的有效性。其中, 需在日前运行阶段决策确定 DR 计划以及冷热电储能设备的充/放功率, 而 CHP 机组、电锅炉、电制冷机、燃气锅炉、吸收式制冷机的出力以及系统与上级电网的交互量为日内可调决策变量。本实验以风电和光伏波动水平权重比值为 1:1、目标偏差因子为 0.2 时得到的日前运行方案为例, 进行仿真验证, 此时风光的波动水平为 0.2421。因此, 实验采用拉丁超立方采样技术分别抽样生成 2000 个随机风电和光伏出力场景。然后固定日前运行优化方案, 再分别将 2000 个风电和光伏出力场景代入运行优化模型, 对 MIGDT、确定性

优化和随机优化方法得到的日前运行方案进行验证。其中, 随机优化通过场景削减法选择 10 个典型风光场景进行优化求解。

表 2 列出了分别采用 3 种方法求解含 DR 模型得到的平均运行成本和可行率。由表 2 可以看出, 确定性优化得到的运行成本最小为 11 166 元, 但由于未考虑风电和光伏出力的随机性, 因此其得到的可行率较低, 为 77%, 这可能会对系统造成严重的经济损失, 甚至给系统的安全运行带来威胁。另外, 由于随机优化是在不同典型随机场景下的期望决策, 其考虑了风光出力的随机性, 因此其得到的平均运行成本与确定性优化十分接近, 且可行率较高, 为 89%, 但其仍存在不可行的情况。相反, 所提 MIGDT 方法是在风电和光伏出力最恶劣场景下作出的决策, 因此虽然 MIGDT 方法所得的平均运行成本较高, 为 11 299 元, 但可行率为 100%, 其能够保证系统的安全可靠运行, 这对系统在日内阶段的运行是极其有利的。此外, MIGDT 相比随机优化和确定性优化的另一个优势是可以给出运行成本对应的风电和光伏波动范围, 而这对于决策者具有重要意义。

表 2 3 种方法求解含 DR 模型的对比结果

Table 2 Comparison results of the model with DR solved by three methods

方法	确定性优化	随机优化	MIGDT
平均运行成本/元	11 166	11 176	11 299
可行率/%	77	89	100

5 结论

本文针对由集成装配制造系统、可再生能源发电、储能和不同能源转换装置组成的工业园区, 开发了一种 DR 计划, 以增强系统运行的灵活性, 并减小系统运行成本。此外, 为处理风光出力的不确定性提出一种基于 MIGDT 的运行优化模型。算例结果表明:

1) 在确定性优化中, 所提 DR 计划可根据系统的实时购售电价格, 灵活调整工业园区离散装配制造系统的开关机状态, 进而调整工业区的用电负荷, 相比无 DR, 系统的日前运行成本减少 497 元, 验证了 DR 计划的有效性;

2) 在 MIGDT 处理风光出力不确定性的实验中, 不同的目标偏差因子决定了运行方案的鲁棒性, 决策者可根据预设成本来确定目标偏差因子的大小, 以抵抗未知风险;

3) 相比确定性优化和随机优化方法, MIGDT 得到的日前运行计划可以保证系统日内运行的安全

性,且可给出运行成本对应的风光波动范围,这对于决策者具有重要的意义。

参考文献

- [1] DONG Yingchao, WANG Cong, ZHANG Hongli, et al. A novel multi-objective optimization framework for optimal integrated energy system planning with demand response under multiple uncertainties[J]. *Information Sciences*, 2024, 663.
- [2] 苏娟, 李拓, 刘峻玮, 等. 综合能源系统下虚拟储能建模方法与应用场景研究综述及展望[J]. *中国电力*, 2024, 57(6): 53-68.
SU Juan, LI Tuo, LIU Junwei, et al. Review and prospect of modeling method and application scenarios of virtual energy storage under integrated energy system[J]. *Electric Power*, 2024, 57(6): 53-68.
- [3] BELLOCCHI S, COLBERTALDO P, MANNO M, et al. Assessing the effectiveness of hydrogen pathways: a techno-economic optimisation within an integrated energy system[J]. *Energy*, 2023, 263.
- [4] 张韶华, 王必恒, 石城, 等. 基于分布鲁棒优化的电热综合能源配网系统与氢能源站协同优化[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(12): 36-43.
ZHANG Shaohua, WANG Biheng, SHI Cheng, et al. Collaborative optimal dispatching of integrated electricity-heat energy distribution network system and hydrogen fueling station based on distributionally robust optimization[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(12): 36-43.
- [5] 王佳颖, 陆春光, 张帅, 等. 考虑碳交易的造纸综合能源系统用能优化策略[J]. *供用电*, 2024, 41(4): 62-71.
WANG Jiaying, LU Chunguang, ZHANG Shuai, et al. Optimization strategy of energy management of integrated energy system for papermaking considering carbon trading[J]. *Distribution & Utilization*, 2024, 41(4): 62-71.
- [6] 李红伟, 吴佳航, 王佳怡, 等. 计及P2G及碳捕集的风光氢储综合能源系统低碳经济调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(16): 26-36.
LI Hongwei, WU Jiahang, WANG Jiayi, et al. Low-carbon economic dispatch of a wind, solar, and hydrogen storage integrated energy system considering P2G and carbon capture[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(16): 26-36.
- [7] 陈焱, 何山. 多园区综合能源系统互联两阶段分布式运行优化策略[J]. *电网与清洁能源*, 2024, 40(8): 18-25, 35.
CHEN Yi, HE Shan. Optimization strategy of the two-stage distributed operation for multi-park integrated energy system interconnection[J]. *Power System and Clean Energy*, 2024, 40(8): 18-25, 35.
- [8] 聂永辉, 李宗楷. 基于纳什谈判和主从博弈的多园区综合能源系统优化调度[J]. *智慧电力*, 2024, 52(5): 37-43, 104.
NIE Yonghui, LI Zongkai. Optimal scheduling of multi-park integrated energy system based on nash negotiation and master-slave game[J]. *Smart Power*, 2024, 52(5): 37-43, 104.
- [9] 陈静, 杨坤漓, 张岩, 等. 多时间尺度下计及综合需求响应和碳捕集-电转气联合运行的综合能源系统优化调度[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(6): 68-76.
CHEN Jing, YANG Kunli, ZHANG Yan, et al. Optimal scheduling of integrated energy system considering integrated demand response and joint operation of carbon capture and power-to-gas under multiple time scales[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(6): 68-76.
- [10] LIU Shengchun, SONG Liying, WANG Tieying, et al. Negative carbon optimal scheduling of integrated energy system using a non-dominant sorting genetic algorithm[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 291.
- [11] 付波, 方文俊, 李超顺, 等. 考虑垃圾焚烧烟气处理与电转甲醇的综合能源系统优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(11): 112-126.
FU Bo, FANG Wenjun, LI Chaoshun, et al. Optimal scheduling of an integrated energy system considering waste incineration flue gas treatment and power-to-methanol conversion[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(11): 112-126.
- [12] 崔杨, 孙喜斌, 朱晗, 等. 考虑“燃煤+”耦合发电与灵活性资源备用的综合能源系统低碳经济调度[J/OL]. *中国电机工程学报*: 1-14[2024-11-04]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241219>.
CUI Yang, SUN Xibin, ZHU Han, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system considering “coal-fired+” coupling power generation and flexible resource reserve[J]. *Proceedings of the CSEE*: 1-14 [2024-11-04]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241219>.
- [13] ZHANG Rufeng, CHEN Yan, LI Zhengmao, et al. Two-stage robust operation of electricity-gas-heat integrated multi-energy microgrids considering heterogeneous uncertainties[J]. *Applied Energy*, 2024, 371.
- [14] DING Bing, LI Zening, LI Zhengmao, et al. A CCP-based distributed cooperative operation strategy for multi-agent energy systems integrated with wind, solar, and buildings[J]. *Applied Energy*, 2024, 365.
- [15] DONG Yingchao, ZHANG Hongli, MA Ping, et al. A hybrid robust-interval optimization approach for integrated

- energy systems planning under uncertainties[J]. *Energy*, 2023, 274.
- [16] KHALILI R, KHALEDI A, MARZBAND M, et al. Robust multi-objective optimization for the Iranian electricity market considering green hydrogen and analyzing the performance of different demand response programs[J]. *Applied Energy*, 2023, 334.
- [17] DONG Yingchao, ZHANG Hongli, WANG Cong, et al. Robust optimal scheduling for integrated energy systems based on multi-objective confidence gap decision theory[J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 228.
- [18] VAN P P, HUYNH T H B, PARK S, et al. An IGDT approach for the multi-objective framework of integrated energy hub with renewable energy sources, hybrid energy storage systems, and biomass-to-hydrogen technology[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 89.
- [19] 徐琴, 金海翔, 边晓燕, 等. 基于混合 IGDT 的电-气综合能源系统弹性提升灾前规划方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(21): 86-95.
- XU Qin, JIN Haixiang, BIAN Xiaoyan, et al. Pre-disaster planning method for resilience enhancement of integrated electric-gas energy system based on hybrid IGDT[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(21): 86-95.
- [20] LIU Yishu, ZHANG Qi, HUANG Lihua. Information gap-based scheduling strategy of a multi-energy retailer with integrated demand response program[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 78.
- [21] 吕超贤, 孙文, 梁睿, 等. 基于信息间隙决策理论的含电转气煤矿综合能源系统鲁棒调度[J]. *高电压技术*, 2023, 49(10): 4203-4212.
- LÜ Chaoxian, SUN Wen, LIANG Rui, et al. Information gap decision theory-based robust scheduling of coal mine integrated energy systems with power-to-gas[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(10): 4203-4212.
- [22] 谭颖, 管霖. 基于数据驱动信息间隙理论的风光水储聚合商多元市场竞标决策模型[J]. *电网技术*, 2024, 48(3): 979-991.
- TAN Ying, GUAN Lin. A data-driven information gap theory based joint decision model for aggregator with wind-solar-hydro power and storage resources in multiple power markets[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(3): 979-991.
- [23] YAO Ruiqiu, XIE Hao, WANG Chunsheng, et al. A multi-agent-based microgrid day-ahead optimal operation framework with liquid air energy storage by hybrid IGDT-STAJ[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 86.
- [24] 范宇辉, 姜婷玉, 黄奇峰, 等. 基于画像的工业园区需求响应潜力评估[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(1): 41-49.
- FAN Yuhui, JIANG Tingyu, HUANG Qifeng, et al. Portrait-based assessment on demand response potential of industrial parks[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(1): 41-49.
- [25] 徐箬, 孙宏斌, 郭庆来. 综合需求响应研究综述及展望[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(24): 7194-7205.
- XU Zheng, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Review and prospect of integrated demand response[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(24): 7194-7205.
- [26] 潘延哲, 王宗义, 杨晨, 等. 面向电力需求响应的工业园区综合能源系统优化调控研究[J]. *电力需求侧管理*, 2024, 26(6): 62-67.
- PAN Tingzhe, WANG Zongyi, YANG Chen, et al. Research on optimal dispatching of industrial parks integrated energy system for demand-side response[J]. *Power Demand Side Management*, 2024, 26(6): 62-67.
- [27] 王永利, 刘泽强, 陈鑫, 等. 基于梯级利用的工业园区综合能源系统双层优化[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(29): 12595-12603.
- WANG Yongli, LIU Zeqiang, CHEN Xin, et al. Double-layer optimization model of industrial park-level integrated energy system based on cascade utilization[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(29): 12595-12603.
- [28] DONG Yingchao, LI Zhengmao, ZHANG Hongli, et al. Robust coordinated planning of multi-region integrated energy systems with categorized demand response[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2024, 15(6): 5678-5692.
- [29] HUANG Chao, ZHANG Hongcai, SONG Yonghua, et al. Demand response for industrial micro-grid considering photovoltaic power uncertainty and battery operational cost[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(4): 3043-3055.
- [30] DONG Yingchao, WUKEN E, ZHANG Hongli, et al. Bi-level coordinated operation optimization of multi-park integrated energy systems considering categorized demand response and uncertainty: a unified adaptive robust optimization approach[J]. *Renewable Energy*, 2025, 241.

收稿日期: 2024-11-09; 修回日期: 2025-03-23

作者简介:

董颖超(1993—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为综合能源系统规划与运行、时间序列预测、智能优化; E-mail: dycxju@163.com

王杰(1990—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为综合能源系统规划与运行、电力系统优化调度。E-mail: bjewang@163.com

(编辑 许威)