

# 计及共享氢储能和虚拟储能的多园区综合能源系统协同规划

严嘉鑫<sup>1</sup>, 范宏<sup>1</sup>, 贾庆山<sup>2</sup>, 孙岩<sup>1</sup>

(1.上海电力大学电气工程学院, 上海 200090;

2.清华大学自动化系智能与网络化系统研究中心, 北京 100084)

**摘要:**为了实现多园区综合能源系统的经济运行,研究了氢储能系统的热电联储联供特性,提出一种多园区综合能源系统与负荷侧虚拟储能以及共享氢储能相互协作的联合规划策略。该策略以系统的年投资成本和年运行成本之和最低为目标建立了相应数学模型,将其转化为计及新能源出力波动性的两阶段鲁棒模型,并利用列和约束生成算法转化为两个子问题进行了优化求解。通过某地多园区综合能源系统的算例仿真,验证了共享氢储能作为独立主体参与多园区综合能源系统的协同规划对系统运行经济性的促进作用。

**关键词:**多园区综合能源系统;共享氢储能;虚拟储能;鲁棒优化;列和约束生成算法

中图分类号:TM715

文献标志码:A

DOI:10.20204/j.sp.2025.06002

## Collaborative Planning of Multi-park Integrated Energy Systems Considering Shared Hydrogen Energy Storage and Virtual Energy Storage

YAN Jiaxin<sup>1</sup>, FAN Hong<sup>1</sup>, JIA Qingshan<sup>2</sup>, SUN Yan<sup>1</sup>

(1.College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Research Center for Intelligent and Networked Systems, Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 10084, China)

**Abstract:** To achieve the economic operation of multi-park integrated energy systems (MIES), this paper investigates the thermal-electric co-storage and co-supply characteristics of hydrogen energy storage systems. A collaborative planning strategy is proposed, integrating MIES with load-side virtual energy storage and shared hydrogen energy storage. The strategy establishes a mathematical model aiming to minimize the total annual investment and operational costs of the system. This model is transformed into a two-stage robust optimization framework that accounts for renewable energy output fluctuations and is solved through a column-and-constraint generation (C&CG) algorithm decomposed into two subproblems. Case simulations on a real-world MIES demonstrate that the participation of shared hydrogen energy storage as an independent entity in cooperative planning significantly enhances the system's operational economy.

**Key words:** MIES; shared hydrogen energy storage; virtual energy storage; robust optimization; C&CG

## 0 引言

园区综合能源系统<sup>[1-3]</sup>(Park Integrated Energy System, PIES)是一种高度集成的能量管理系统,通过对各种能量耦合设备的利用可以实现多种能源的协调转换和高效利用,从而满足园区用户多样化的用能需求。在PIES的架构中,储能系统的引入

不仅是提升系统运行经济性和综合能效的关键策略,更是推动能源系统向灵活化和可持续方向发展的关键一步。然而,传统储能技术受限于其有限的能量转换能力,往往很难充分吸纳并有效利用新能源间歇性和波动性的发电量,从而在能量利用效率和碳减排等方面并无优势。相比之下,氢储能作为一种新兴的绿色储能技术,以其独特的电热联储联供特性<sup>[4]</sup>,为PIES的未来发展开辟了新路径。氢储能不仅能够高效储存并灵活调度资源,还能够在发电、供暖等多个领域实现低碳乃至零碳的能源供应,与我国积极倡导的“碳达峰、碳中和”目标<sup>[5]</sup>高度契

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFA1004600)

Project Supported by National Key R & D Project (2022YFA1004600)

合。

目前,针对含氢储能的PIES规划研究已经越来越完善,文献[6]提出了含氢储能的PIES结构,建立了以全寿命周期等年值最小和年运行成本最小为目标的双层规划模型,通过仿真对比分析验证了储氢系统在PIES规划中起到的显著效果。文献[7]根据氢储能的多能联储联供特性建立了低碳运行的PIES结构,以碳排放成本和运行成本为优化目标提出了相应的容量规划模型,分析了电、热负荷特性和碳减排政策以及氢储能投资成本等因素对规划目标的影响。文献[8]针对受地理限制和气候因素影响的地区所存在的能源长期供给不稳定的问题,建立了光伏储氢独立供能系统,提出了计及光伏成本等因素的规划模型。文献[6-8]研究在推动新能源并网、增强混合发电系统灵活性与经济性方面取得了显著进展<sup>[9-11]</sup>,然而,其视角尚局限于单一PIES内部,未充分探讨多个PIES之间潜在的协同作用与互动机制。

而在共享储能的框架下,各园区被紧密连接成一个动态平衡、相互支撑的能源网络,促进了能源的自由流动与优化配置,激发了市场活力,鼓励了多元化的投资与技术创新。文献[12]构建了电池容量与电量双重共享的园区级别电池共享模型,为储能资源的优化配置与高效利用开辟了新的路径。文献[13]聚焦于分布式储能的潜力,通过整合构建了云储能运营商模式,实现了储能资源的广泛共享与灵活调度。文献[14]设计了一套能够与多个工业用户实现能量交互从而有效降低用户的投资与用电成本的多层级共享储能系统,为工业领域的能源管理提供了高效、经济的解决方案。文献[15]整合跨领域的多种储能资源构建了混合储能系统,及其与新能源电站之间紧密的交互模式。

目前,共享储能领域的主导力量仍然是电化学储能<sup>[16-18]</sup>,但面临着充电与放电不能同步进行的局限,其灵活性和响应速度受限。相比之下,氢储能系统的制氢、储氢和用氢过程高度解耦,这一特性赋予了氢储能更加灵活多变的储能资源调度能力,能够轻松实现储能资源的多维度时空共享。文献[19]针对PIES内能源系统运营商的氢储能优化配置问题,根据多主体主从博弈机制提出计及个体理性的各主体收益模型验证了氢储能能在多PIES的规划过程中对能量供需平衡和运营商收益的改善作用。文献[20]根据各PIES的用能差异互补性,提出基于合作博弈的联合规划模型以及相应的氢储能

共建成本分摊方法,验证了共享氢储能作为参与协作的独立主体的可行性。文献[21]研究了氢储能在共享运营时与多PIES之间复杂的利益交互关系,提出基于主从博弈的共享氢储能交易定价策略以及相应的规划模型,缩短了氢储能投资回收年限。但是文献[19-21]研究未考虑新能源发电的不确定性对系统可能造成的影响。

综上所述,本文构建了多园区综合能源系统(Multi-park Integrated Energy System, MIES)架构,其储能枢纽为具有热电联储联供特点的共享氢储能,建立了将共享氢储能视为独立主体的协同规划运行模型,并将其转换为计及可再生能源出力波动性的两阶段鲁棒优化模型。通过列和约束生成算法(Column Sum Constraint Generation, C&CG)实现了优化求解,最后通过算例分析验证了MIES与共享氢储能联合规划相较于独立规划在系统性能方面的优越性。

## 1 系统建模

### 1.1 MIES模型

本文所构建的含共享氢储能的多园区综合能源系统架构如图1所示。

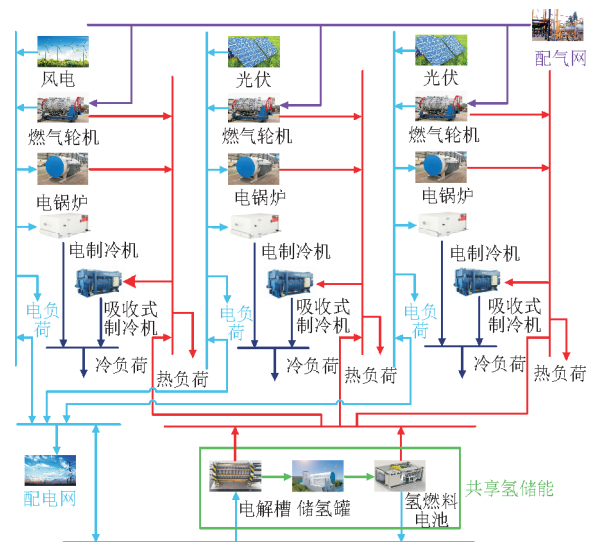


图1 含共享氢储能的多园区综合能源系统架构  
Fig.1 Structure of multi-park integrated energy system with shared hydrogen energy storage

由图1可以看出,风电与光伏为3个PIES提供了电能。集成电解槽、储氢罐及燃料电池的共享氢储能系统在电解水制氢与氢燃料电池发电的过程中产生的热能,通过各PIES部署的水循环系统进行回收和循环利用。为了进一步增强系统的供能稳定性与灵活性,配置了燃气轮机和电锅炉作为辅助

能源设备,能够在必要时迅速响应,为系统提供额外的电能与热能支持,从而确保整个 MIES 在多变能源需求环境下的可靠运行与高效管理。MIES 的冷负荷由吸收式制冷机和电制冷机联合供应。

### 1.2 设备建模

1)燃气轮机(Gas Turbine,GT)模型为:

$$P_{e,GT}^t = \eta_{GT}^e M_{GT}^t \quad (1)$$

$$P_{h,GT}^t = \eta_{GT}^h M_{GT}^t (1 - \eta_{GT}^e) \quad (2)$$

式中: $P_{e,GT}^t, P_{h,GT}^t, M_{GT}^t$  分别为燃气轮机在  $t$  时段的供电、供热功率和天然气消耗量; $\eta_{GT}^e, \eta_{GT}^h$  分别为燃气轮机的发电、发热效率。

2)电锅炉(Electric Boiler,EB)模型为:

$$P_{h,EB}^t = \lambda_{EB} P_{e,EB}^t \quad (3)$$

式中: $P_{h,EB}^t, P_{e,EB}^t, \lambda_{EB}$  分别为电锅炉在  $t$  时段的产热、用电功率和电转热效率。

3)吸收式制冷机(Absorption Chiller,AC)模型为:

$$P_{e,AC}^t = \lambda_{AC} P_{h,AC}^t \quad (4)$$

式中: $P_{e,AC}^t, P_{h,AC}^t, \lambda_{AC}$  分别为吸收式制冷机在  $t$  时段的制冷、吸热功率和能效比。

4)电制冷机(Electrical Chiller,EC)模型为:

$$P_{e,EC}^t = \lambda_{EC} P_{e,EC}^t \quad (5)$$

式中: $P_{e,EC}^t, P_{e,EC}^t, \lambda_{EC}$  分别为电制冷机在  $t$  时段的制冷、用电功率和能效比。

5)电解槽(Electrolyser,EL)模型<sup>[22]</sup>为:

$$M_{EL}^t = \eta_{EL}^e P_{e,EL}^t \quad (6)$$

$$P_{h,EL}^t = \eta_{EL}^h (1 - \eta_{EL}^e) P_{e,EL}^t \quad (7)$$

式中: $P_{e,EL}^t, M_{EL}^t, P_{h,EL}^t$  分别为电解槽  $t$  时段的用电、产氢、产热功率; $\eta_{EL}^e, \eta_{EL}^h$  分别为电解槽耗电制氢、余热利用效率。

6)氢燃料电池(Hydrogen Fuel Cell, HFC)模型<sup>[22]</sup>为:

$$P_{e,HFC}^t = \eta_{HFC}^e M_{HFC}^t \quad (8)$$

$$P_{h,HFC}^t = \eta_{HFC}^h (1 - \eta_{HFC}^e) P_{e,HFC}^t \quad (9)$$

式中: $P_{e,HFC}^t, M_{HFC}^t, P_{h,HFC}^t$  分别为氢燃料电池  $t$  时段的发电、耗氢、产热功率; $\eta_{HFC}^e, \eta_{HFC}^h$  分别为氢燃料电池的燃氢放电、余热利用效率。

7)虚拟储能模型。本文中涉及的虚拟储能<sup>[23]</sup>只考虑可削减负荷和可转移负荷,数学模型如式(10)所示:

$$P_{i,e,L}^t = P_{i,e,L0}^t + P_{i,e,Cut}^t + P_{i,e,Trans}^t \quad (10)$$

$$P_{i,h,L}^t = P_{i,h,L0}^t + P_{i,h,Cut}^t \quad (11)$$

式中: $P_{i,e,L0}^t, P_{i,e,L}^t, P_{i,h,L0}^t, P_{i,h,L}^t$  分别为考虑虚拟储能资源管理前、后第  $i$  个 PIES 在  $t$  时刻的电、热负荷; $P_{i,e,Cut}^t, P_{i,h,Cut}^t, P_{i,e,Trans}^t$  为第  $i$  个 PIES 在  $t$  时刻可削减

电、热负荷功率和可转移电负荷功率。

8)新能源发电机组模型。新能源出力的预测误差一般在短时间内满足均值为 0 的正态分布<sup>[24]</sup>。根据包含所有概率分布的不确定集建立基于机会约束的鲁棒优化模型,风电(Wind Turbine, WT)和光伏(Photovoltaic, PV)的发电功率模型如式(12)所示:

$$P_{i,WT}^t P_{i,\overline{WT}}^t + N\left(0, (\delta_{i,WT}^t)^2\right) \quad (12)$$

$$P_{i,PV}^t P_{i,\overline{PV}}^t + N\left(0, (\delta_{i,PV}^t)^2\right)$$

式中: $N$  为正态分布函数; $P_{i,\overline{WT}}^t, P_{i,\overline{PV}}^t, P_{i,WT}^t, P_{i,PV}^t$  分别为第  $i$  个 PIES 在  $t$  时刻风机、光伏出力的预测值和实际值; $(\delta_{i,WT}^t)^2, (\delta_{i,PV}^t)^2$  分别为风电和光伏机组对应的短期预测误差的方差; $P_{i,WT}^t, P_{i,PV}^t$  分别为服从于以  $P_{i,\overline{WT}}^t$  和  $P_{i,\overline{PV}}^t$  为均值、以  $(\delta_{i,WT}^t)^2$  和  $(\delta_{i,PV}^t)^2$  为方差的正态分布。

## 2 MIES 的联合规划模型

### 2.1 目标函数

规划模型的优化对象包括 MIES 的年投资成本  $C_{inv}$  和年运行成本  $C_{ope}$ ,优化目标是使二者之和最小,其中系统的年运行成本由 2 部分组成,分别是各 PIES 向配电网的购能成本  $C_{DS\_PIES}$  和虚拟储能调度成本  $C_{ves}$ 。具体表达式如下:

$$\min C = C_{inv} + C_{ope} \quad (13)$$

$$C_{inv} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{r(1+r)^{d_{i,x}}}{(1+r)^{d_{i,x}} - 1} \sum_q \sum_x I_{i,x} P_{i,x} C_{i,x} \right) \quad (14)$$

$$C_{ope} = 365 \times (C_{DS\_PIES} + C_{ves} + \Gamma) \quad (15)$$

$$C_{DS\_PIES} = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{24} (\lambda_{i,e,b}^t P_{i,e,b}^t + \lambda_{i,e,s}^t P_{i,e,s}^t + \lambda_{i,g,b}^t F_{i,g,b}^t) \Delta t \quad (16)$$

$$C_{ves} = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{24} (C_{i,Cut}^t + C_{i,Trans}^t) \Delta t \quad (17)$$

$$C_{i,Cut}^t = \lambda_{e,Cut}^t P_{i,e,Cut}^t + \lambda_{h,Cut}^t P_{i,h,Cut}^t \quad (18)$$

$$C_{i,Trans}^t = \lambda_{e,Trans}^t P_{i,e,Trans}^t \quad (19)$$

式中: $n$  为 PIES 的数量; $r$  为贴现率; $d_{i,x}$  为设备  $x$  的全寿命周期, $x$  为设备 GT, HFC, EL, EB, EC 和 AC 的集合; $q$  为设备类型; $I_{i,x}, P_{i,x}, C_{i,x}$  分别为第  $i$  个 PIES 设备  $x$  的安装、状态容量及单位容量安装成本,取值为 1 表示安装,取值为 0 表示不安装; $C_{i,Cut}^t, C_{i,Trans}^t$  分别为第  $i$  个 PIES 在  $t$  时刻管理终端用户可削减、可转移负荷的补偿费用; $\Gamma$  为多 PIES 与共享氢储能的交易成本; $P_{i,e,b}^t, P_{i,e,s}^t, F_{i,g,b}^t$  分别为第  $i$  个 PIES 在  $t$  时刻的购电、售电、购气功率; $\lambda_{i,e,b}^t, \lambda_{i,e,s}^t,$

$\lambda_{i,g,b}^t, \lambda_{e,Cut}^t, \lambda_{h,Cut}^t, \lambda_{e,Trans}^t$  分别为第  $i$  个 PIES 在  $t$  时刻的购、售电、购气价格、可削减电、热负荷及可转移电负荷的单位补偿费用。

## 2.2 约束条件

1) 功率平衡约束为:

$$\begin{cases} P_{i,grid}^t + P_{i,WI}^t + P_{i,PV}^t + P_{i,e,GT}^t + P_{i,e,HFC}^t = P_{i,e,hess}^t + P_{i,e,EB}^t + \\ P_{i,e,EL}^t + P_{i,e,EC}^t + P_{i,e,L}^t \\ P_{i,h,GT}^t + P_{i,h,EB}^t + P_{i,h,EL}^t + P_{i,h,HFC}^t = P_{i,h,hess}^t + P_{i,h,AC}^t + P_{i,h,L}^t \\ P_{i,e,EC}^t + P_{i,e,AC}^t = P_{i,e,L}^t \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $P_{i,e,L}^t, P_{i,h,L}^t$  为调用虚拟储能资源后第  $i$  个 PIES 在  $t$  时刻的电、热负荷;  $P_{i,e,hess}^t, P_{i,h,hess}^t$  为第  $i$  个 PIES 在  $t$  时刻与共享氢储能的交互电、热功率。

2) 设备出力限制为:

$$P_{i,e,x,min}^t \leq P_{i,e,x}^t \leq P_{i,e,x,max}^t \quad (21)$$

式中:  $P_{i,e,x,min}^t, P_{i,e,x,max}^t$  分别为第  $i$  个 PIES 的设备  $x$  在  $t$  时刻运行出力的最小值和最大值。

3) 虚拟储能约束为:

$$-\alpha_z P_{i,z,L0}^t \leq P_{i,z,Cut}^t \leq 0, z = \{e, h\} \quad (22)$$

$$-\alpha_e P_{i,e,L0}^t \leq P_{i,e,Trans}^t \leq \alpha_e P_{i,e,L0}^t \quad (23)$$

$$\sum_{t=1}^{24} P_{i,e,Trans}^t \Delta t = 0 \quad (24)$$

式中:  $\alpha_z$  为第  $z$  种(电、热)能源的可削减负荷比例;  $\alpha_e$  为电负荷的可转移负荷比例。

4) 与共享氢储能的交互功率约束为:

$$0 \leq P_{i,e,hess,b}^t \leq U_{i,b}^t P_{i,e,hess,max}^t \quad (25)$$

$$0 \leq P_{i,e,hess,s}^t \leq U_{i,s}^t P_{i,e,hess,max}^t \quad (26)$$

$$U_{i,b}^t + U_{i,s}^t \leq 1 \quad (27)$$

式中:  $P_{i,e,hess,b}^t, P_{i,e,hess,s}^t$  分别为第  $i$  个 PIES 在  $t$  时刻向共享氢储能购/售的电功率;  $P_{i,e,hess,max}^t$  为交互电功率的最大值;  $U_{i,b}^t, U_{i,s}^t$  为购/售共享氢储能的状态位。

5) 从上级电网购电功率  $P_{i,grid}^t$ :

$$0 \leq P_{i,grid}^t \leq P_{i,grid,max}^t \quad (28)$$

式中:  $P_{i,grid,max}^t$  为第  $i$  个 PIES 在  $t$  时刻向上级电网购电的最大功率。

6) 共享氢储能的能量转换及充、放功率约束为:

$$\begin{cases} S_{hess}^{max} = \sigma P_{hess}^{max} \\ S_{hess}^t = S_{hess}^{t-1} + (\eta_{EL}^e P_{hess,c}^t - 1/\eta_{HFC}^e P_{hess,d}^t) \\ S_{hess,min}^t \leq S_{hess}^t \leq S_{hess,max}^t \\ 0 \leq P_{hess,c}^t \leq P_{hess,max}^t \\ 0 \leq P_{hess,d}^t \leq P_{hess,max}^t \end{cases} \quad (29)$$

式中:  $\sigma$  为共享氢储能能量倍率;  $S_{hess}^t, S_{hess,max}^t, S_{hess,min}^t$  为共享氢储能在  $t$  时刻储存的能量以及储存的能量上下限;  $P_{hess,c}^t, P_{hess,d}^t$  分别为共享氢储能的充、放电

率;  $\eta_{EL}^e, \eta_{HFC}^e$  分别为共享氢储能的电氢转换效率和氢电转换效率。

$$\sum_{i=1}^N P_{i,hess,b}^t - P_{i,hess,s}^t = P_{hess,d}^t - P_{hess,c}^t \quad (30)$$

共享氢储能与各 PIES 的购、售电功率之和等于共享氢储能的充、放电功率。

6) 设备规划数量约束为:

$$0 \leq \sum_q \sum_x I_{i,x} \leq N_{i,x}^{max} \quad (31)$$

式中:  $N_{i,x}^{max}$  为设备的最大安装数量。

## 3 MIES 的两阶段鲁棒优化模型

### 3.1 可再生能源出力不确定性

利用 K-means 聚类算法将已知的  $n$  个可再生能源数据样本缩减至  $S$  个时序离散场景  $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_s$ , 场景  $\Omega_s$  中包含  $L_s$  个原始场景, 每个原始场景的初始概率  $\omega_s^0$  为:

$$\omega_s^0 = L_s / n \quad (32)$$

采用不确定集合描述可再生能源出力的不确定性<sup>[25]</sup>:

$$D = \left\{ \omega_s \left| \begin{array}{l} \omega_s \geq 0, s = 1, 2, \dots, S \\ \sum_{s=1}^S \omega_s = 1 \\ \sum_{s=1}^S |\omega_s - \omega_s^0| \leq \delta_1 \\ \max_{s=1, 2, \dots, S} |\omega_s - \omega_s^0| \leq \delta_\infty \end{array} \right. \right\} \quad (33)$$

式中:  $D$  为不确定集合;  $\omega_s$  为场景的概率;  $\delta_1, \delta_\infty$  分别为 1 范数和  $\infty$  范数概率的允许偏移量。

### 3.2 两阶段鲁棒规划模型

目标函数式(13)可转化为如下两阶段鲁棒规划模型<sup>[26]</sup>:

$$\min_x \left\{ C_{inv} + \max_D \min_y C_{ope} \right\} \quad (34)$$

式中:  $x, y$  分别为第 1, 2 阶段的决策变量。

将可再生能源出力的最恶劣场景用其概率分布表示, 式(34)可改写为:

$$\min_x \left\{ C_{inv} + \max_{\Omega \in D} \left\{ E_\Omega(C_{ope}) \right\} \right\} \quad (35)$$

式中:  $E_\Omega(C_{ope})$  为第二阶段优化运行成本的期望值。

彼此独立运行的各个场景同时求解可以提高计算效率。并列计算的表达式如下:

$$\min_x \left\{ C_{inv} + \max \left\{ \sum_{s=1}^S \omega_s \min_y (C_{ope}) \right\} \right\} \quad (36)$$

矩阵形式的鲁棒优化模型如下所示:

$$\begin{cases} \min c^T x + \max \left\{ \sum_{s=1}^S \omega_s \min d^T y \right\} \\ \text{s.t. } Ax \geq g \\ \quad Ex + Fy \geq h \\ \quad Ex + Fy = i \\ \quad \omega_s \in D \end{cases} \quad (37)$$

式中： $A, E, F$ 为相关的矩阵形式参数； $c, d$ 为适应度函数中的列向量参数； $g, h, i$ 为约束条件中的列向量参数。

### 3.3 基于C&CG算法的求解步骤

C&CG算法通过在迭代过程中动态引入新的变量和约束,不断逼近最优解,在处理大规模的复杂问题时求解效率高。

先将式(37)分解为一个主问题和一个子问题:

$$\begin{cases} \min c^T x + \rho \\ \text{s.t. } \rho \geq \sum_{s=1}^S \omega_s^z \min d^T y^z \\ \quad Ax \geq g \end{cases} \quad (38)$$

$$\begin{cases} \max \left\{ \sum_{s=1}^S \omega_s (d^T y) \right\} \\ \text{s.t. } Ex^z + Fy \geq h \\ \quad Ex^z + Fy = i \\ \quad \omega_s \in D \end{cases} \quad (39)$$

式中： $\rho$ 为惩罚因子； $x^z$ 为规划方案。

在惩罚因子 $\rho$ 的约束下,以各PIES可再生能源出力预测的基准场景作为最恶劣场景求解主问题式(38)获得最优投资规划方案 $x^z$ ,并更新下界的值 $B^l$ 。将 $x^z$ 作为已知量对子问题式(39)进行求解,计及可再生能源的不确定性,并行计算每个场景下各PIES的最优经济运行策略 $y^*$ ,并更新上界的值 $B^u$ 。更新各PIES优化运行的最恶劣场景和可再生能源出力的概率分布 $\omega_s$ 。若满足收敛条件则输出最优解,否则以可再生能源出力期望为新的最恶劣场景重新计算主问题,随后将最优解作为已知条件用于求解子问题,循环往复直至达到收敛条件。

### 3.4 基于纳什谈判的多主体间利益分配

由于各PIES与共享氢储能进行交易的能力存在差异,设置不当的交易价格可能会影响整个合作联盟的稳定性。纳什谈判模型可以量化各PIES的谈判能力,作为一种事后分配机制,可以在MIES的两阶段鲁棒规划模型计算结果的基础上进行利益再分配。

$$\begin{cases} \max \left[ \prod_{i=1}^n (C_i^{\text{PIES},\Delta} - M_i^{\text{PIES}} - P_{i,H} \lambda_{i,H}) \right] \left( C^{\text{HESS},\Delta} - M^{\text{HESS}} + \sum_{i=1}^n P_{H,i} \lambda_{H,i} \right) \\ \text{s.t. } C_i^{\text{PIES},\Delta} - M_i^{\text{PIES}} - P_{i,H} \lambda_{i,H} \geq 0 \\ \quad C^{\text{HESS},\Delta} - M^{\text{HESS}} + \sum_{i=1}^n P_{H,i} \lambda_{H,i} \geq 0 \\ \quad P_{i,H} \lambda_{i,H} = \sum_{i=1}^n P_{H,i} \lambda_{H,i} \end{cases} \quad (40)$$

式中： $C_i^{\text{PIES},\Delta}$ 为未参与合作博弈第 $i$ 个PIES的最优成本； $C^{\text{HESS},\Delta}$ 为未参与合作博弈对共享氢储能的最优成本； $M_i^{\text{PIES}}$ 为参与合作博弈后第 $i$ 个PIES的最优成本； $M^{\text{HESS}}$ 为参与合作博弈后共享储能的最优成本； $P_{i,H}, P_{H,i}$ 分别为第 $i$ 个PIES(共享氢储能)期望与共享氢储能(第 $i$ 个PIES)的交易电功率； $\lambda_{i,H}, \lambda_{H,i}$ 分别为各自期望的交易价格。

## 4 算例分析

### 4.1 算例说明

为了验证本文所提模型有效性,以某地的MIES为研究对象,对多个具有用能差异性和互补性的PIES与共享氢储能之间的多主体合作行为进行了仿真分析。3个PIES的典型日负荷和可再生能源出力预测曲线如图2所示。

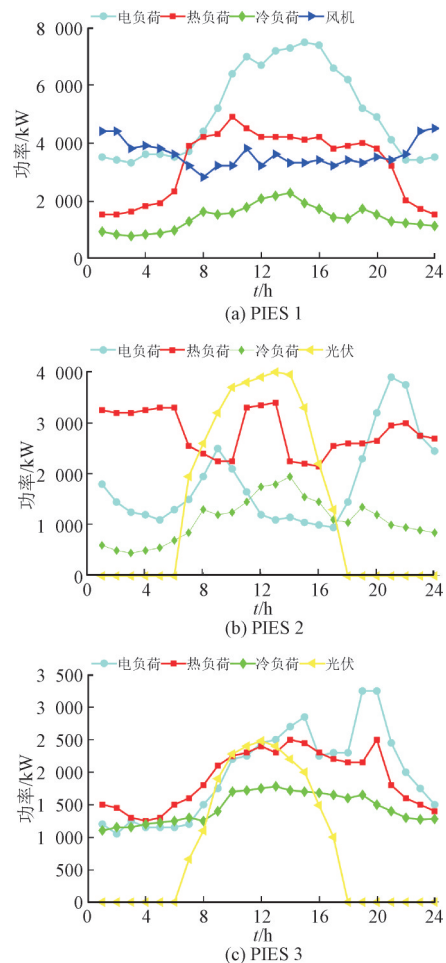


图2 各PIES风光出力及负荷预测

Fig.2 Wind and solar power output and load forecasting for each PIES

本文主要研究计及虚拟储能时各PIES与共享氢储能之间的能量交易对MIES规划与运行结果的

影响,不考虑风电和光伏机组的容量优化,2个用于进行对比分析的场景设置如下:场景1)不考虑共享氢储能,各PIES独立规划;场景2)考虑共享氢储能,各PIES联合规划,通过纳什谈判进行利益再分配。

### 4.2 仿真分析

#### 4.2.1 规划结果对比分析

各PIES中设备的型号配置及对应的单位成本等数据如表1所示。

表1 各PIES候选设备参数  
Table 1 Parameters of each PIES candidate device

设备	类型	容量/ kW	投资成本/[元· (kW) <sup>-1</sup> ]	效率	生命 周期/ /年	功率 (容量 上下限)/ kW
EL	I	1 000	1 800	0.58	20	1 000(10)
	II	1 200	2 080	0.60	20	1 200(12)
	III	1 500	2 260	0.65	20	1 500(15)
HFC	I	2 000	4 050	电:0.60 热:0.80	20	2 000(20)
	II	2 500	4 580	电:0.62 热:0.85	20	2 500(25)
	III	3 000	5 060	电:0.65 热:0.90	20	3 000(30)
GT	I	3 000	5 000	电:0.35 热:0.80	30	3 000(30)
	II	2 000	6 080	电:0.37 热:0.78	30	2 500(25)
	III	1 500	7 060	电:0.39 热:0.75	30	1 500(15)
EB	I	500	3 000	0.90	20	500(5)
	II	800	2 500	0.95	20	800(8)
EC	I	400	1 200	4.0	20	400(4)
	II	600	1 000	4.2	20	600(6)
AC	I	1 000	1 000	1.2	20	1 000(10)
	II	1 500	860	1.4	20	1 500(15)

2种场景下各PIES的规划方案如表2所示。表2中各设备选型对应的容量规划结果,表明各PIES在2种规划场景下,除了电锅炉的配置有所不同外,整体规划方案相差不大。这是由于各PIES与共享氢储能的交易电量相对较少,对联合规划的影响不明显。但是电锅炉配置的差异性表明,氢储能作为电能-热能双介质存储载体,在电能交易过程中提供了热负荷供应,反映了联合规划对系统热能需求更精细的调整。

表2 MIES的规划方案  
Table 2 Planning scheme for MIES

项目	场景	GT	HFC	EL	EB	EC	AC
PIES 1	1	I	I	I	—	I	III
	2	I	I	I	—	I	III
PIES 2	1	II	II	I	II	II	II
	2	II	II	I	II	II	II
PIES 3	1	III	II	III	II	I	I
	2	III	II	III	I	I	I

各PIES的各项投资运行成本如表3所示。

表3 MIES的年总投资成本与各项运行成本  
Table 3 Annual total investment cost and operational cost items of MIES

场景	项目	投资成本/ ×10 <sup>6</sup> 元	购气成本/ ×10 <sup>6</sup> 元	购电成本/ ×10 <sup>6</sup> 元	虚拟储能资源管理成本/ ×10 <sup>5</sup> 元
1	PIES 1	1.87	14.28	-3.77	4.01
	PIES 2	1.36	9.03	-2.64	1.62
	PIES 3	1.25	7.08	-2.38	1.37
	总计	4.66	30.61	-8.59	7.04
2	PIES 1	1.71	14.29	-4.62	4.09
	PIES 2	1.35	9.17	-3.51	1.63
	PIES 3	1.09	7.21	-3.96	1.48
	总计	4.44	31.02	-11.84	7.35

通过观察表3中的成本计算结果,可以得出以下结论:在总投资成本方面,场景2的年总投资成本相比场景1下降了4.72%。虽然下降幅度不大,但考虑到设备投资通常是长期且固定的支出,这一降低对于提升整个系统的经济性仍然具有重要意义。运行成本方面,场景2的总运行成本相比场景1降低了12.90%,这是一个显著的降低。其中,总购气成本增加了1.34%,但总购电成本降低了37.8%。这表明通过联合规划,系统更加有效地利用了共享氢储能,在电价低时购电制氢,在电价高时释放能量,从而降低了整体运行成本。此外,虚拟储能资源的总调度成本增加了4.4%,这表明联合规划增加了各PIES的可调用虚拟储能,而这一增加的成本相对于总运行成本的降低来说是可接受的。各PIES的供用能情况具有差异性和互补性,通过引入共享氢储能和虚拟储能实现了各PIES的功率平衡,减少了对外部电网的依赖,提高了系统的自给自足能力。

基于纳什谈判博弈所得的各PIES与共享氢储能的交易价格曲线如图3所示。

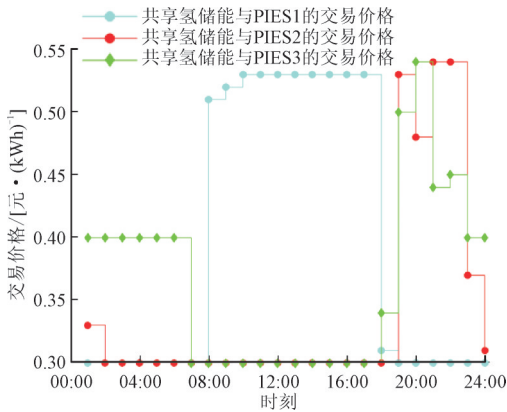


图3 各PIES与共享氢储能的交易价格  
Fig.3 Trading prices between each PIES and shared hydrogen energy storage

图3中所展示的各PIES与共享氢储能的交易价格充分体现了纳什谈判模型的利益分配机制的有效性。通过引入共享氢储能,各PIES能够根据自身的能源需求和供应情况,在合适的时间段交易电能,从而实现了能源的高效利用和成本优化。

表4为联合规划时经过纳什谈判后各PIES的各项成本与独立规划时的对比情况,结果表明通过协同规划和纳什谈判博弈,各PIES的年总成本均

实现了显著的降低。

表4 2种场景下PIES成本构成  
Table 4 Cost composition of each PIES under two scenarios  $\times 10^6$ 元

场景	区域	投资成本	运行成本	交易成本	总计
1	PIES 1	1.87	10.91	0	12.78
	PIES 2	1.36	6.55	0	7.91
	PIES 3	1.25	4.84	0	6.09
2	PIES 1	1.71	10.08	0.44	12.23
	PIES 2	1.35	5.82	-0.15	7.02
	PIES 3	1.09	3.40	0.61	5.10

#### 4.2.2 功率平衡分析

优化运行结果表明联合规划时各PIES的能量管理和运行策略相比独立规划时发生了显著变化。以PIES3为例,2种场景下的功率平衡情况如图4所示。

由图4可以看出,独立规划时,PIES3在7:00—17:00时段的电负荷需求低于光伏机组和燃气轮机的出力,因此一部分多余的电能将被售出,另一部分被电制冷机用于供应冷负荷。在上午至下午时段(10:00—15:00),电、热负荷需求达到高峰,此时燃气轮机的出力也相应增加,以确保电负荷的稳定

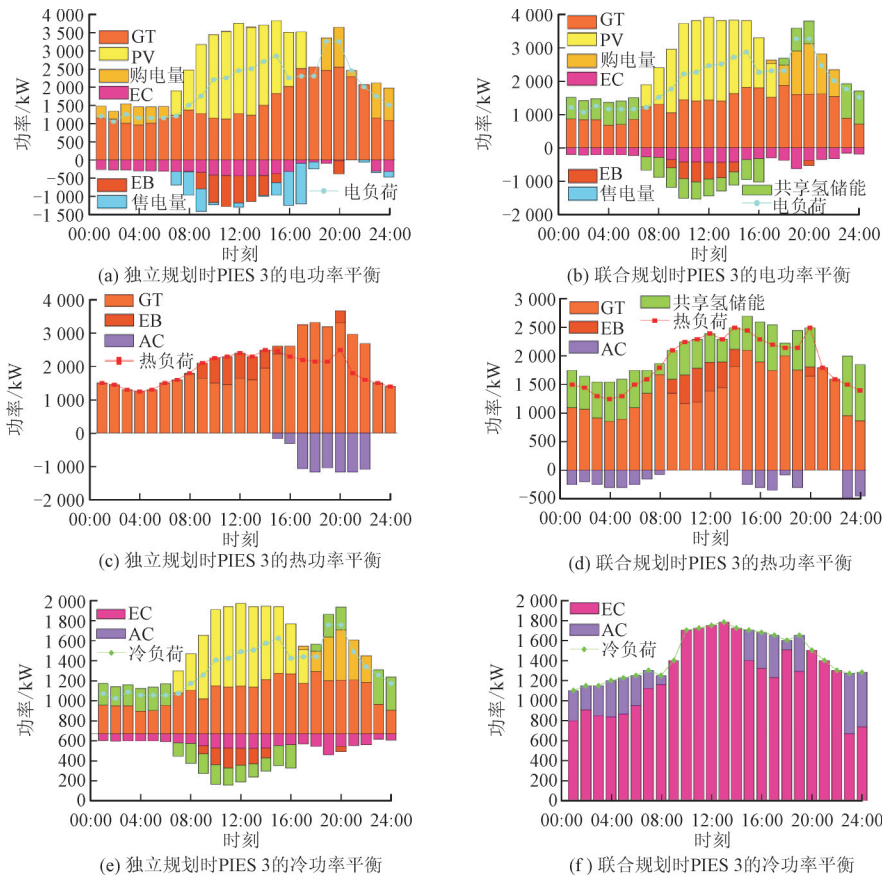


图4 PIES 3的功率平衡结果  
Fig.4 Power balance results of PIES 3

供应。在晚上至早上时段(19:00—6:00),由于电负荷需求较高,燃气轮机和光伏机组全力发电的情况下仍然需要额外购能。燃气轮机在发电过程中产生的热量不足以满足需求热负荷需求,因此需要配置电锅炉。在特定时段(15:00—22:00),燃气轮机所产生热负荷需求之外的多余热能将被吸收式制冷机转化为冷能,冷负荷需求的另外一部分由电制冷机满足。

在协同规划时,PIES 3 的能量管理策略发生了显著变化。PIES 3 在凌晨时段(23:00—6:00)通过共享氢储能获取了电能,补足了没有光伏出力时间段的电能缺额;日间时段(7:00—16:00)有了光伏的供电,PIES 3 将多余的部分电能出售给了共享氢储能。在与共享氢储能的电能购售过程中,PIES 3 获得了额外热能的供应,大幅降低了燃气轮机的出力,减少了购气成本,有效降低了系统的运行成本。在供应热能的过程中,电锅炉的出力也降低了,共享氢储能还改变了吸收式制冷机的热能利用策略,使其出力时段从傍晚延伸到了凌晨,对热能的利用进行了更精细的调控,实现了热能的优化利用。协同规划对于冷负荷供应的影响体现在吸收式制冷机的出力变化对电制冷机的出力改变,总体而言一定程度上降低了电制冷机的出力负担。

## 5 结语

本文针对 MIES 的协同规划问题,引入了共享氢储能和虚拟储能概念,建立了计及可再生能源出力波动的两阶段鲁棒优化模型,通过纳什谈判博弈确定了各 PIES 与共享氢储能之间的能源交易价格。算例分析表明了当共享氢储能作为独立主体参与多园区综合能源系统的协同规划时,可调用的虚拟储能容量得到了提升,各 PIES 对外部的能源依存度有了明显的下降,系统的运行经济性有了明显的提升。因此,本文所提计及共享氢储能和虚拟储能的 MIES 规划方法具有重要的工程应用价值。

### 参考文献

- [1] 范建斌,孟昭军,单沫文,等.综合能源系统关键技术与国际标准化综述[J].电网与清洁能源,2023,39(12): 1-9.  
FAN Jianbin, MENG Zhaojun, SHAN Mowen, et al. A review of key technologies and international standardization of multi energy coupling systems[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(12): 1-9.
- [2] 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. Optimization and scheduling of integrated energy systems in industrial parks with flexible thermal and electric response under the green certificate carbon trading mechanism[J]. Electric Power, 2024, 57(6): 110-120.
- [3] 李佳奇,刘闯.考虑碳排放及需求响应的多园区综合能源系统优化调度[J].电气应用,2024,43(4): 20-28.  
LI Jiaqi, LIU Chuang. Optimization and scheduling of multi park integrated energy systems considering carbon emissions and demand response[J]. Electric Power Application, 2024, 43(4): 20-28.
- [4] 尹文良,刘琳,张存山,等.含制氢储能的混合传动风电系统建模与运行特性分析[J].电力自动化设备,2020,40(10): 64-70.  
YIN Wenliang, LIU Lin, ZHANG Cunshan, et al. Modeling and operation performance analysis of hybrid drive wind power generation system with hydrogen energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 64-70.
- [5] WANG C S, LYU C X, LI P, et al. Modeling and optimal operation of community integrated energy systems: a case study from China [J]. Applied Energy, 2018, 230: 1242-1254.
- [6] 钟鹏元,杨晓宏,寇建玉.含储氢结构的园区综合能源系统优化配置研究[J].综合智慧能源,2022,44(9): 11-19.  
ZHONG Pengyuan, YANG Xiaohong, KOU Jianyu. Research on optimization configuration of comprehensive energy system in industrial parks with hydrogen storage structures[J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(9): 11-19.
- [7] 熊宇峰,陈来军,郑天文,等.考虑电热气耦合特性的低碳园区综合能源系统氢储能优化配置[J].电力自动化设备,2021,41(9): 31-38.  
XIONG Yufeng, CHEN Laijun, ZHENG Tianwen, et al. Optimization configuration of hydrogen energy storage in low-carbon park comprehensive energy system considering the coupling characteristics of electric and thermal gases[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 31-38.
- [8] 张栋顺,全恒立,谢桦,等.考虑碳交易机制与氢混天然气的园区综合能源系统调度策略[J].中国电力,2024,57(2):183-193.  
ZHANG Dongshun, QUAN Hengli, XIE Hua, et al. Considering carbon trading mechanism and scheduling strategy for integrated energy system of hydrogen mixed natural gas in industrial parks[J]. Electric Power, 2024, 57(2): 183-193.
- [9] 张红,袁铁江,谭捷,等.面向统一能源系统的氢能规划框架[J].中国电机工程学报,2022,42(1): 83-93.  
ZHANG Hong, YUAN Tiejia, TAN Jie, et al. Hydrogen energy system planning framework for unified energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 83-93.
- [10] 王永利,姜斯冲,郭璐,等.基于共享氢容量备用的多微网双层优化方法[J].电力建设,2024,45(11):65-78.  
WANG Yongli, JIANG Sichong, GUO Lu, et al. Multiple microgrid

- bilayer optimization method based on shared hydrogen capacity backup[J].Electric Power Construction, 2024, 45(11):65-78.
- [11] 陈乾,张沈习,程浩忠,等.计及热网蓄热特性的多区域综合能源系统多元储能规划[J].中国电机工程学报, 2023, 43(15): 5890-5903.  
CHEN Qian, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Multiple energy storage planning of multi-district integrated energy system considering heat storage characteristics of heat network[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 5890-5903.
- [12] LOMBARDI P, SCHWABE F. Sharing economy as a new business model for energy storage systems[J]. Applied Energy, 2017, 188: 485-496.
- [13] 张翔,廖海君,周振宇,等.含规模化5G基站租赁共享储能的配电网混合博弈优化调度[J].电测与仪表, 2023, 60(5):23-32.  
ZHANG Xiang, LIAO Haijun, ZHOU Zhenyu, et al. Hybrid game optimization scheduling of distribution network with large-scale 5G base station leasing and shared energy storage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 23-32.
- [14] 刘亚锦,代航,刘志坚,等.面向多类型工业用户的分散式共享储能配置及投资效益分析[J].电力自动化设备, 2021, 41(10): 256-264.  
LIU Yajin, DAI Hang, LIU Zhijian, et al. Configuration and investment benefit analysis of decentralized shared energy storage for multiple types of industrial users[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 256-264.
- [15] SUN L L, QIU J, HAN X, et al. Capacity and energy sharing platform with hybrid energy storage system: an example of hospitality industry[J]. Applied Energy, 2020, 280: 115897.
- [16] 邱伟强,王茂春,林振智,等.“双碳”目标下面向新能源消纳场景的共享储能综合评价[J].电力自动化设备, 2021, 41(10): 244-255.  
QIU Weiqiang, WANG Maochun, LIN Zhenzhi, et al. Comprehensive evaluation of shared energy storage for new energy consumption scenarios under the "dual carbon" goal[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 244-255.
- [17] 李咸善,解仕杰,方子健,等.多微电网共享储能的优化配置及其成本分摊[J].电力自动化设备, 2021, 41(10): 44-51.  
LI Xianshan, XIE Shijie, FANG Zijian, et al. Optimization configuration and cost allocation of shared energy storage in multiple microgrids[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 44-51.
- [18] 陈寒阳,刘洋,许立雄,等.考虑容量削减的居民用户共享储能优化配置[J].电力建设, 2023, 44(9):43-57.  
CHEN Hanyang, LIU Yang, XU Lixiong, et al. Optimal configuration of shared energy storage on residential user side considering capacity reduction[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(9): 43-57.
- [19] 熊宇峰,司杨,郑天文,等.基于主从博弈的工业园区综合能源系统氢储能优化配置[J].电工技术学报, 2021, 36(3):507-516.  
XIONG Yufeng, SI Yang, ZHENG Tianwen, et al. Optimal configuration of hydrogen storage in industrial park integrated energy system based on Stackelberg game[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 507-516.
- [20] 李笑竹,陈来军,殷骏,等.面向低碳供能的多园区共享氢储能系统容量规划[J].高电压技术, 2022, 48(7):2534-2544.  
LI Xiaozhu, CHEN Laijun, YIN Jun, et al. Capacity planning of multiple parks shared hydrogen energy storage system for lowcarbon energy supply[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2534-2544.
- [21] 尚怡铭,王维庆,李笑竹,等.计及共享交易机制的多微网氢储能容量规划[J].浙江大学学报(工学版), 2024, 58(2):426-436.  
SHANG Yiming, WANG Weiqin, LI Xiaozhu, et al. Multi microgrid hydrogen energy storage capacity planning considering shared trading mechanism[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2024, 58(2):426-436.
- [22] 司杨,陈来军,陈晓弢,等.基于分布鲁棒的风-氢混合系统氢储能容量优化配置[J].电力自动化设备, 2021, 41(10): 3-10.  
SI Yang, CHEN Laijun, CHEN Xiaotao, et al. Optimal capacity allocation of hydrogen energy storage in wind-hydrogen hybrid system based on distributionally robust[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 3-10.
- [23] 杨昆,刘通,柏林,等.基于谈判博弈的微电网群多主体共享储能容量优化配置策略[J].电测与仪表, 2024, 61(3): 33-41.  
YANG Kun, LIU Tong, BO Lin, et al. Optimal configuration strategy of shared energy storage capacity for micro-grid cluster based on multi-party bargaining game[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(3):33-41.
- [24] LOWERY C, MALLEY M. O. Impact of Wind Forecast Error Statistics Upon Unit Commitment[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(4): 760-768.
- [25] 肖白,韩康琦,张晓华.含氢储能的独立微电网IGDT鲁棒规划[J].电力建设, 2024, 45(4):77-88.  
XIAO Bai, HAN Kangqi, ZHANG Xiaohua. Robust IGDT planning for stand-alone microgrid with hydrogen energy storage[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(4):77-88.
- [26] 李笑竹,王维庆.区域综合能源系统两阶段鲁棒博弈优化调度[J].浙江大学学报(工学版), 2021, 55(1): 177-188, 212.  
LI Xiaozhu, WANG Weiqing. Bi-level robust game optimal scheduling of regional comprehensive energy system[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(1): 177-188, 212.

(责任编辑 钱文姝)

收稿日期:2024-10-16; 修改日期:2025-04-10

作者简介:严嘉鑫(1998),男,上海浦东人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化运行。E-mail:1245197562@qq.com