

考虑多重不确定性和博弈欺诈的 多微网-共享储能系统运行优化策略

宋以宇, 窦震海, 李汝斌, 徐浩, 闫毅, 陈佳佳
(山东理工大学电气与电子工程学院, 山东省淄博市 255000)

摘 要:【目的】多个综合能源微网与共享储能电站协同运行是未来能源发展的重要方向之一,然而可再生能源出力与电价的不确定性以及各微网与共享储能间交易的欺诈行为对系统运行构成挑战,为此,提出了一种考虑多重不确定性和博弈欺诈的多微网-共享储能系统运行优化策略。【方法】考虑微网与共享储能间的协同运行,建立多微网-共享储能系统纳什谈判优化模型,并将原问题转换成系统电能交互和合作收益分配子问题。前者采用 Wasserstein 分布鲁棒应对新能源出力与电价的不确定性并实现系统效益最大化,后者建立考虑共享储能与微网间欺诈行为的中介交易机制,实现系统欺诈均衡。模型采用自适应交替方向乘子法进行分布式求解。【结果】仿真结果表明,相较于独立运行,本文所提系统合作模型使收益提升 8.05%,碳排放降低 27.49%,验证了其提升主体效益的有效性。【结论】Wasserstein 分布鲁棒与欺诈中介交易机制确保了系统在不确定环境及欺诈风险下的鲁棒性与合作稳定性。

关键词:综合能源多微网;共享储能电站;纳什谈判;Wasserstein 分布鲁棒;博弈欺诈

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2026)07-0195-18

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2026.07.015

Operation Optimization Strategy for Multi-Microgrid and Shared Energy Storage Systems Considering Multiple Uncertainties and Gaming Fraud

SONG Yiyu, DOU Zhenhai, LI Rubin, XU Hao, YAN Yi, CHEN Jiajia

(College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology,
Zibo 255000, Shandong Province, China)

ABSTRACT: [Objective] The coordinated operation of multiple integrated energy microgrids with a shared energy storage facility represents a key direction for future energy development. However, uncertainties in renewable energy generation and electricity prices, coupled with potential fraudulent trading behavior between microgrids and the shared energy storage system, pose challenges to system operation. To address this, this study proposes an operational optimization strategy for multi-microgrid-shared energy storage systems that accounts for multiple uncertainties and gaming fraud. [Methods] Considering the coordinated operation between microgrids and shared energy storage, a Nash bargaining optimization model is established for the multi-microgrid-shared energy storage system. The original problem is decomposed into two subproblems: system energy exchange and cooperative benefit allocation. The energy exchange subproblem employs a Wasserstein distributionally robust approach to address the uncertainties in renewable energy generation and electricity prices while maximizing system benefits. The benefit allocation subproblem establishes an intermediary trading mechanism that accounts for fraudulent behavior between shared energy storage and microgrids to achieve a system fraud equilibrium. The model is solved using the adaptive alternating direction method of multipliers (ADMM). [Results] Simulation results demonstrate that, compared to independent operation, the proposed cooperative system model increases revenue by 8.05% and reduces carbon emissions by 27.49%, thereby validating its effectiveness in enhancing the benefits for all participants. [Conclusions] The Wasserstein distributionally robust approach and the fraud-mitigating transaction mechanism ensure system robustness and cooperative stability in the presence of uncertainty and fraud risks.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No. 52377110).

KEYWORDS: integrated energy multi-microgrid; shared energy storage power station; Nash bargaining; Wasserstein

distributionally robust approach; gaming fraud

0 引言

在“双碳”目标与新型电力系统建设背景下,清洁能源在电力系统中的渗透率逐步提高,然而单一综合能源微网(integrated energy microgrid, IEM)在面对大规模、高比例可再生能源接入和日益增长的负荷多样性时难以实现多能协同和灵活调度,需要借助储能资源实现能量的时间平移。用户自建储能装置成本较高,短期经济效益不明显,通常难以负担,限制了储能装置在用户侧的应用。在共享经济以及万物互联时代潮流下,随着区域内 IEM 数量的增加,各 IEM 通过共享储能(shared energy storage system, SESS)资源实现能量集中存储,相邻的多个 IEM 与 SESS 组成联盟系统,通过协同运行实现联盟内部的能量合作,不仅可以优化 IEM 的资源配置,更有助于提高储能的灵活性和经济性^[1-4]。然而综合能源多微网-共享储能系统(integrated energy multi-microgrid-shared energy storage system, IEMMG-SESS)在运行过程中面临较多的不确定性风险,并且 SESS 以及各 IEM 隶属于不同的利益主体,因此,如何合理调控系统在实际运行过程中遇到的多重不确定性风险,以及处理各参与主体间的收益分配问题成为研究重点^[5-9]。

目前,关于 IEM 面临的不确定性风险已有一些研究。分布鲁棒优化(distributionally robust optimization, DRO)由于综合了随机优化和鲁棒优化的优点,利用历史数据建立概率分布模糊集,近年来已成为应对不确定性问题的研究热点^[10-11]。文献[12]基于风电出力的均值和方差,在 DRO 框架下构建矩不确定集,处理风电出力的不确定性。文献[13]通过 KL(Kullback-Leibler)散度构建描述新能源出力真实概率分布的模糊不确定集,建立了两阶段 DRO 模型,提升了系统应对出力预测不确定性的鲁棒性。文献[14]基于 Wasserstein 距离构建风光出力预测误差的模糊集,并以此进行 DRO 优化,能够更好地模拟新能源出力的随机性,平衡系统的经济性与鲁棒性。基于 Wasserstein 距离可以更全面地利用样本数据,适用性更强,并且可以通过调节 Wasserstein 球半径,平衡系统的经济性与鲁棒性,成为应对能源系统不确定性问题的研究热点。

博弈论是研究理性决策者间战略互动的数学模型,模拟具有利益冲突的参与者在相互影响下制定竞争或合作的决策过程,为解决 IEMMG-SESS 的协同运行问题提供了有效支持^[15-16]。文献[17]建立了以

SESS 电站为领导者,产消者集群为追随者的主从博弈模型,实现各方收益的提升,充分发挥 SESS 的主动性。文献[18]以共享电-氢储能为领导者,验证在长、短时间尺度下系统低碳运行的效用。但主从博弈追随者丧失主动权,只能被动接受,导致长期收益被压缩,且系统各参与者只注重自身利益,缺乏有约束力的协议,往往不能保证实现 Pareto 最优。合作博弈注重整体利益,通常建模纳什谈判模型实现各主体的电能合作,能够得到稳定的纳什均衡解,实现 Pareto 最优。文献[19]建立了基于纳什谈判的 SESS-多微电网合作运行谈判模型,将原问题转化为系统效益最大化和合作收益分配子问题,采用交替方向乘子法(alternating direction multiplier method, ADMM)进行分布式求解,有效提高了各主体运行效益。文献[20]建立了多微网-共享储能系统(multi-microgrid-shared energy storage system, MMG-SESS)纳什谈判优化模型,基于纳什谈判理论完成系统内部电能交互和合作收益分配,实现系统的低碳经济调度。文献[21]在多微网-SESS 纳什模型基础上进一步考虑氢能利用和绿证-碳交易机制,实现能源的高效利用和系统的低碳经济运行。

IEMMG-SESS 通过纳什谈判实现各主体间的协同运行,参与方之间的合作和信任是纳什谈判的关键,但在实际运行中难以要求各方提供对等的信息共享以实现完全的信任关系。并且由于系统参与用户众多、信息交换复杂,各参与者隶属于不同的利益主体,具有为追求自身利益最大化而欺诈的动机,各主体有可能会出于自身利益的需要故意提供虚假信息,从而使自身获得更大收益,导致联盟系统合作运行破裂,影响系统整体收益,而且系统无法检测这种欺诈行为以及具体的欺诈程度。文献[22]中的纳什谈判模型考虑了参与者的不诚实行为,研究用户的合作矛盾心理和不诚实行为对议价结果的影响,并为每个参与者的不诚实行为提供了动态原则,以实现弹性合作。文献[23]提出一种中介交易模式,设置欺诈因子进行迭代更新,得到最优欺诈报价,实现各 IEM 间的欺诈均衡。文献[24-25]针对多微网点对点(peer to peer, P2P)电能共享欺诈问题,通过应用第三方中介模型来实现欺诈均衡,保证有效的能源合作。关于 IEM 间 P2P 的博弈欺诈问题已有较多研究,然而针对 IEMMG-SESS 的博弈欺诈问题鲜少关注,尽管 SESS 运营商可以得到与各 IEM 的交互功率,但难以准确得到各 IEM 的运行成本信息,各 IEM 通过与

SESS协同运行实现自身优化,亦无法得到SESS运行成本以及合作收益的提升情况。各IEM间以及IEM与SESS间的私有信息不透明且无法被检测^[26],导致各方均具有欺诈的动机,因此,针对这些不透明信息所引发的欺诈行为,建立考虑SESS与IEM间欺诈行为的应对机制尤为重要。

传统ADMM算法的收敛性能高度依赖固定惩罚因子,固定惩罚因子过大或者过小会破坏原始残差与对偶残差的平衡关系,进而降低收敛效率。文献[27]提出通过高斯惩罚函数调整惩罚因子的大小,提高算法的收敛性和稳定性。文献[28]提出可变惩罚参数ADMM算法,通过检测原始残差和对偶残差的变化,动态调整惩罚因子,提高收敛速度。目前通过ADMM求解IEMMG-SESS协同运行问题需要对子问题进行多次迭代求解,求解时间较长,计算效率较低,因此有必要提高ADMM算法的计算效率。

综上,本文针对IEMMG-SESS运行中面临的不确定性风险以及IEM与SESS间的欺诈行为展开研究,主要贡献如下:

1)考虑各主体间的协同运行,建立IEMMG-SESS纳什谈判优化模型,并将原问题转换成系统电能交互和合作收益分配子问题。前者采用Wasserstein分布鲁棒应对新能源出力与电价的不确定性并实现系统效益最大化。后者针对系统各主体间的欺诈行为,建立考虑SESS与各IEM间欺诈行为的中介交易机制,实现系统欺诈均衡,得到最优欺诈报价进行合作议价,保证合作的稳定性。

2)为提高模型的求解效率,提出自适应ADMM算法,通过检测原始残差和对偶残差的变化,动态调整惩罚因子,有效提高算法的求解速度。

1 IEMMG-SESS框架

本文研究的IEMMG-SESS运行框架由上级电网、天然气网、SESS和多个含氢IEM组成,其中含氢IEM包含电热气多能协同的综合能源系统和氢能系统。综合能源系统由新能源发电设备、热电联产(combined heating and power, CHP)机组和电、热负荷等组成,实现电热气多能协作,氢能系统由电解槽(electrolytic cell, EC)、燃料电池(fuel cell, FC)和储氢罐组成,实现能量转换与存储。文中构建的IEMMG-SESS框架如图1所示。

氢能系统通过EC电解水制氢,将氢能储存在储氢罐中,通过FC将氢能转化为电能以满足用电需求,实现系统能量的转换与存储。系统产生的绿氢,有利于减少天然气和高碳电源电量的购入需求,实现

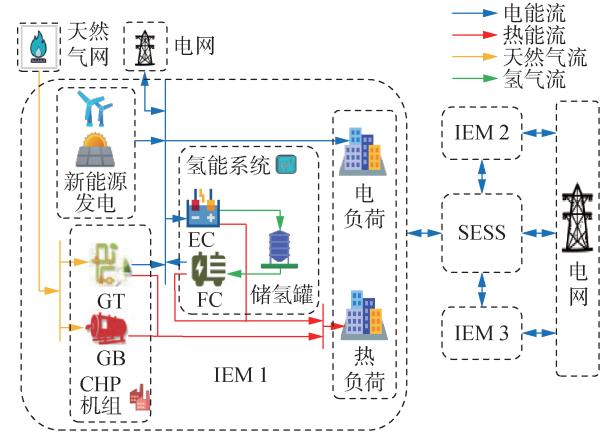


图1 IEMMG-SESS框架

Fig. 1 IEMMG-SESS framework

低碳经济供能,产生的余热与CHP机组共同满足热负荷需求,实现能量的高效利用。

多个IEM能量产消特性各异,当呈现一定的电量盈余或缺额时,优先通过SESS进行电能交互,实现系统内部的电能合作。第一阶段进行电能交互功率谈判,以系统效益最大化为目标,交互功率为协商变量进行分布式优化,得到各IEM与SESS的最优电能交易量,实现最低运行成本和可靠的电能供应。第二阶段进行合作议价,根据第一阶段电能交易量,以交易电价为协商变量进行分布式优化,确定各IEM与SESS的交易价格,分配电能支付收益^[29-30]。在收益分配中,针对各主体的欺诈行为,建立考虑SESS与各IEM间欺诈行为的中介交易机制,实现系统欺诈均衡,得到最优欺诈报价并反馈至各主体进行合作议价,避免欺诈行为导致收益不均,甚至合作破裂,保证合作的稳定性。本文采用自适应ADMM算法进行分布式求解,保护各参与主体隐私,提高求解速度,具有一定现实意义。

2 考虑多重不确定性的IEMMG-SESS模型

2.1 氢能系统模型

系统通过EC电解水制氢,并释放余热,其转换模型和约束条件如下^[31-32]:

$$\begin{cases} P_{t,EC} = n_{t,H_2} G_{HHV} + H_{t,EC} \\ \eta_{EC} = \frac{n_{t,H_2} G_{HHV}}{P_{t,EC}} \end{cases} \quad (1)$$

$$P_{EC,min} \leq P_{t,EC} \leq P_{EC,max} \quad (2)$$

式中: $P_{t,EC}$ 、 $H_{t,EC}$ 分别为EC电解水的耗电功率与产热量; G_{HHV} 为氢气的高热值; n_{t,H_2} 、 η_{EC} 分别为EC的制氢速率与效率; $P_{EC,max}$ 、 $P_{EC,min}$ 分别为EC耗电功率的上下限。

系统通过FC将氢能转换为电能,并释放余热,其转换模型和约束条件如下:

$$\begin{cases} m_{t,H_2} G_{HHV} = P_{t,FC} + H_{t,FC} \\ \eta_{FC} = \frac{P_{t,FC}}{m_{t,H_2} G_{HHV}} \end{cases} \quad (3)$$

$$P_{FC,min} \leq P_{t,FC} \leq P_{FC,max} \quad (4)$$

式中: $P_{t,FC}$ 、 $H_{t,FC}$ 分别为 FC 的发电功率与产热量; m_{t,H_2} 、 η_{FC} 分别为 FC 的耗氢速率与效率; $P_{FC,max}$ 、 $P_{FC,min}$ 分别为 FC 的发电功率的上下限。

储氢罐存储系统中产生的氢能,实现能量的时间平移,储氢罐约束条件如下:

$$M_{t+1,H_2} = M_{t,H_2} + \eta_{EC} P_{t,EC} - \frac{P_{t,FC}}{\eta_{FC}} \quad (5)$$

$$M_{H_2,min} \leq M_{t,H_2} \leq M_{H_2,max} \quad (6)$$

式中: M_{t,H_2} 为 t 时刻储氢罐的储氢量; $M_{H_2,max}$ 、 $M_{H_2,min}$ 分别为储氢罐中储氢量的上下限。

本文 CHP 机组中燃气轮机(gas turbine, GT)采用“以热定电”的运行模式,优先与燃气锅炉(gas boiler, GB)和氢能系统满足系统热负荷需求。并且,在 IEM 中引入需求响应机制和阶梯式碳交易机制,实现系统的低碳灵活运行^[33-34],具体设备模型不再赘述。

2.2 IEM、SESS 电站与上级电网交互模型

IEM 与上级电网通过联络线实现电能的交互传输,约束条件如下:

$$0 \leq P_{t,buy} \leq P_{buy,max} u_{t,buy} \quad (7)$$

$$0 \leq P_{t,sell} \leq P_{sell,max} u_{t,sell} \quad (8)$$

$$u_{t,buy} + u_{t,sell} \leq 1 \quad (9)$$

式中: $P_{t,buy}$ 为 IEM 向上级电网的购电功率; $P_{t,sell}$ 为 IEM 向上级电网的售电功率; $P_{buy,max}$ 、 $P_{sell,max}$ 分别为 IEM 向上级电网购、售电功率的上限; $\mu_{t,buy}$ 、 $\mu_{t,sell}$ 分别为 IEM 向上级电网的购、售电状态位。

SESS 电站与上级电网的交互传输约束条件如下:

$$0 \leq P_{t,SESS,buy} \leq P_{SESS,buy,max} u_{t,SESS,buy} \quad (10)$$

$$0 \leq P_{t,SESS,sell} \leq P_{SESS,sell,max} u_{t,SESS,sell} \quad (11)$$

$$u_{t,SESS,buy} + u_{t,SESS,sell} \leq 1 \quad (12)$$

式中: $P_{t,SESS,buy}$ 为 SESS 电站向上级电网的购电功率; $P_{t,SESS,sell}$ 为 SESS 电站向上级电网的售电功率; $P_{SESS,buy,max}$ 、 $P_{SESS,sell,max}$ 分别为 SESS 电站向上级电网的购、售电功率上限; $\mu_{t,SESS,buy}$ 、 $\mu_{t,SESS,sell}$ 分别为 SESS 电站向上级电网的购、售电状态位。

2.3 SESS 电站运行策略模型

IEMMG-SESS 通过 SESS 电站实现系统内部的能量合作,具体模型如下:

$$S_{t+1,SESS} = S_{t,SESS} + \eta_{SESS,ch} P_{t,SESS,ch} - \frac{P_{t,SESS,dis}}{\eta_{SESS,dis}} \quad (13)$$

$$S_{SESS,min} \leq S_{t,SESS} \leq S_{SESS,max} \quad (14)$$

$$0 \leq P_{t,SESS,ch} \leq \mu_{t,SESS,ch} P_{SESS,ch,max} \quad (15)$$

$$0 \leq P_{t,SESS,dis} \leq \mu_{t,SESS,dis} P_{SESS,dis,max} \quad (16)$$

$$\mu_{t,SESS,ch} + \mu_{t,SESS,dis} \leq 1 \quad (17)$$

式中: $S_{t,SESS}$ 为 SESS 电站 t 时刻的储电量; $P_{t,SESS,ch}$ 、 $P_{t,SESS,dis}$ 分别为 SESS 电站 t 时刻的充、放电功率; $\eta_{SESS,ch}$ 、 $\eta_{SESS,dis}$ 分别为 SESS 电站的充、放电效率; $S_{SESS,max}$ 、 $S_{SESS,min}$ 分别为 SESS 的储电容量上下限; $P_{SESS,ch,max}$ 、 $P_{SESS,dis,max}$ 分别为 SESS 的充、放电功率上限; $\mu_{t,SESS,ch}$ 、 $\mu_{t,SESS,dis}$ 分别为 SESS 电站的充、放电状态位。

SESS 电站通过与上级电网及各 IEM 进行电能交互实现系统内部功率平衡,并且利用自身储能作用实现能量的时间平移,储能的充放电量为与电网及各 IEM 电能交互的电量之和。SESS 电站的交互模型如下:

$$P_{i-SESS,ex,min} \leq P_{i-SESS,ex} \leq P_{i-SESS,ex,max} \quad (18)$$

$$P_{t,SESS,ch} - P_{t,SESS,dis} = \sum_{i=1}^N P_{i-SESS,t,ex} + P_{t,SESS,buy} - P_{t,SESS,sell} \quad (19)$$

式中: $P_{i-SESS,ex}$ 为 IEM 与 SESS 电站的交互功率; $P_{i-SESS,ex,max}$ 、 $P_{i-SESS,ex,min}$ 分别为 IEM 与 SESS 电站交互功率上下限; N 为 IEM 个数。

2.4 Wasserstein 模糊集约束

在纳什谈判模型中,目标函数为最大化联盟合作前后效益提升的纳什乘积,求得 Pareto 最优分配方案。然而在实际运行中,各方效益提升情况受随机参数影响,尤其是可再生能源出力与上级电网电价的不确定性,直接影响各主体电能合作的经济性与安全运行。所以本文采用基于 Wasserstein 距离的 DRO 方法处理上述不确定性,降低系统运营风险。

基于 Wasserstein 距离的 DRO 原理为通过 Wasserstein 距离量化真实概率分布与经验分布之间的偏差,构建出概率分布模糊集,优化最坏情况下系统的性能,Wasserstein 距离和模糊集具体定义见文献[35]。本文基于历史经验分布,利用 Wasserstein 距离构造模糊集,并通过半径参数调节模型对经验数据的信任程度与保守性,以刻画预测的不确定性。上级电网电价预测值的 Wasserstein 模糊集约束为:

$$\begin{cases} d_w(\hat{r}_{t,buy}, \tilde{r}_{t,buy}) = \min_{\Phi_b} \int_{\Xi^2} \|\theta_b - \xi_b\|_1 \Phi_b(d\theta_b, d\xi_b) \leq \kappa_b \\ P\{d_w(\hat{r}_{t,buy}, \tilde{r}_{t,buy}) \leq \kappa_b\} \geq \rho_b \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} d_w(\hat{r}_{t,sell}, \tilde{r}_{t,sell}) = \min_{\Phi_s} \int_{\Xi^2} \|\theta_s - \xi_s\|_1 \Phi_s(d\theta_s, d\xi_s) \leq \kappa_s \\ P\{d_w(\hat{r}_{t,sell}, \tilde{r}_{t,sell}) \leq \kappa_s\} \geq \rho_s \end{cases} \quad (21)$$

式中: $d_w(\cdot)$ 为 Wasserstein 距离函数; $P\{\cdot\}$ 为 $\{\cdot\}$ 成立的

概率; $\hat{r}_{i,t,\text{buy}}, \hat{r}_{i,t,\text{sell}}$ 分别为向上级电网购、售电电价样本的概率分布; $\tilde{r}_{i,t,\text{buy}}, \tilde{r}_{i,t,\text{sell}}$ 分别为向上级电网购、售电电价预测值的恶劣概率分布; θ_b 为服从 $\hat{r}_{i,t,\text{buy}}$ 分布的随机变量; ξ_b 为服从 $\tilde{r}_{i,t,\text{buy}}$ 分布的随机变量; Φ_b 为 θ_b 和 ξ_b 的联合概率分布; Ξ 为随机变量的支撑集; κ_b, κ_s 分别为向上级电网购、售电价 Wasserstein 球的半径; ρ_b, ρ_s 分别为向上级电网购、售电价的置信水平。可再生能源出力预测值的 Wasserstein 模糊集约束与式(20)和(21)类似,不再赘述。

2.5 考虑多重不确定性的目标函数

基于2.1—2.4节建立的 IEM 和 SESS 模型,考虑系统的不确定性风险,建立考虑多重不确定性的 IEMMG-SESS 模型, IEM 侧目标函数如下所示:

$$\begin{cases} \max \sum_{i=1}^N - (C_{i,\text{GT}} + C_{i,\text{GB}} + C_{i,\text{gas}} + C_{i,\text{grid}} + \\ C_{i,\text{DR}} + C_{i,\text{CO}_2} + C_{i,\text{H}_2} - \tau_{i,\text{ex}}) \\ \text{s.t.} \\ P_{i,t,\text{re}} + P_{i,t,\text{GT}} + P_{i,t,\text{FC}} + P_{i,t,\text{buy}} = P_{i,t,\text{load}} + \\ P_{i,t,\text{sell}} + P_{i,t,\text{EC}} + P_{i-\text{SESS},t,\text{ex}} \\ H_{i,t,\text{GT}} + H_{i,t,\text{GB}} + H_{i,t,\text{EC}} + H_{i,t,\text{FC}} = H_{i,t,\text{load}} \end{cases} \quad (22)$$

$$C_{i,\text{GT}} = \sum_{t=1}^T k_{\text{GT}}^{\text{om}} P_{i,t,\text{GT}} \quad (23)$$

$$C_{i,\text{GB}} = \sum_{t=1}^T k_{\text{GB}}^{\text{om}} H_{i,t,\text{GB}} \quad (24)$$

$$C_{i,\text{gas}} = \sum_{t=1}^T c_{\text{gas}} (F_{i,t,\text{GT}} + F_{i,t,\text{GB}}) \quad (25)$$

$$C_{i,\text{grid}} = \sum_{t=1}^T (r_{t,\text{buy}} P_{i,t,\text{buy}} - r_{t,\text{sell}} P_{i,t,\text{sell}}) \quad (26)$$

$$C_{i,\text{DR}} = C_{i,\text{cut}} + C_{i,\text{tran}} \quad (27)$$

$$C_{i,\text{cut}} = \sum_{t=1}^T (\lambda_{\text{cut},e} |P_{i,t,\text{load},\text{cut}}| + \lambda_{\text{cut},h} |H_{i,t,\text{load},\text{cut}}|) \quad (28)$$

$$C_{i,\text{tran}} = \sum_{t=1}^T \lambda_{\text{tran},e} |P_{i,t,\text{tran}}| \quad (29)$$

$$C_{i,\text{H}_2} = C_{i,\text{EC}} + C_{i,\text{FC}} + C_{i,\text{sto}} \quad (30)$$

$$C_{i,\text{EC}} = \sum_{t=1}^T k_{\text{EC}}^{\text{om}} P_{i,t,\text{EC}} \quad (31)$$

$$C_{i,\text{FC}} = \sum_{t=1}^T k_{\text{FC}}^{\text{om}} P_{i,t,\text{FC}} \quad (32)$$

$$C_{i,\text{sto}} = \sum_{t=1}^T k_{\text{sto}}^{\text{om}} M_{i,t,\text{H}_2} \quad (33)$$

$$\tau_{i,\text{ex}} = \sum_{t=1}^T r_{i-\text{SESS},t,\text{ex}} P_{i-\text{SESS},t,\text{ex}} \quad (34)$$

式中: T 为调度周期时段数; $C_{i,\text{GT}}, C_{i,\text{GB}}$ 分别为 GT、GB 的日运维成本; $k_{\text{GT}}^{\text{om}}, k_{\text{GB}}^{\text{om}}$ 分别为 GT、GB 的单位运维成本系数; $P_{i,t,\text{GT}}$ 为 GT 的产电功率; $H_{i,t,\text{GB}}$ 为 GB 的产热功率; $C_{i,\text{gas}}$ 为 IEM 与上级天然气网每日交易成本; c_{gas} 为 IEM 与上级天然气网交易的购气价; $F_{i,t,\text{GT}}, F_{i,t,\text{GB}}$ 分别为 GT、GB 的燃气消耗量; $C_{i,\text{grid}}$ 为 IEM 与上级电网每

日交易成本; $r_{t,\text{buy}}, r_{t,\text{sell}}$ 分别为 IEM 与上级电网交易的购售电价; $C_{i,\text{DR}}$ 为 IEM 每日需求响应成本; $C_{i,\text{cut}}$ 为可削减负荷日调度成本; $C_{i,\text{tran}}$ 为可转移负荷日调度成本; $P_{i,t,\text{load},\text{cut}}, H_{i,t,\text{load},\text{cut}}$ 分别为电、热可削减负荷; $P_{i,t,\text{tran}}$ 为可转移电负荷; $\lambda_{\text{cut},e}, \lambda_{\text{cut},h}$ 分别为电、热可削减负荷调度成本系数; $\lambda_{\text{tran},e}$ 为可转移电负荷调度成本系数; C_{i,CO_2} 为 IEM 每日的阶梯式碳交易成本; C_{i,H_2} 为氢能系统每日运维成本; $C_{i,\text{EC}}, C_{i,\text{FC}}$ 和 $C_{i,\text{sto}}$ 分别为 EC、FC 和储氢罐的每日运维成本; $k_{\text{EC}}^{\text{om}}, k_{\text{FC}}^{\text{om}}$ 和 $k_{\text{sto}}^{\text{om}}$ 分别为 EC、FC 和储氢罐的单位运维成本系数; $\tau_{i,\text{ex}}$ 为第 i 个 IEM 与 SESS 交互后的电能支付收益; $r_{i-\text{SESS},t,\text{ex}}$ 为第 i 个 IEM 和 SESS 进行电能交互的交易电价; $P_{i-\text{SESS},t,\text{ex}}$ 为第 i 个 IEM 与 SESS 的电能交易量, $P_{i-\text{SESS},t,\text{ex}} > 0$ 表示第 i 个 IEM 向 SESS 输送电能, $P_{i-\text{SESS},t,\text{ex}} < 0$ 表示第 i 个 IEM 向 SESS 接收电能。

上述模型为确定性模型,考虑实际情况存在多重不确定性因素,模型转换如下:

$$\begin{cases} \max \left[\sum_{i=1}^N - (C_{i,\text{GT}} + C_{i,\text{GB}} + C_{i,\text{gas}} + C_{i,\text{DR}} + \right. \\ \left. C_{i,\text{CO}_2} + C_{i,\text{H}_2} - \tau_{i,\text{ex}}) + \right. \\ \left. \min \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (\tilde{r}_{i,t,\text{sell}} P_{i,t,\text{sell}} - \tilde{r}_{i,t,\text{buy}} P_{i,t,\text{buy}}) \right] \\ \text{s.t.} \\ P_{i,t,\text{load}} + P_{i,t,\text{sell}} + P_{i,t,\text{EC}} - P_{i,t,\text{FC}} - P_{i,t,\text{GT}} - \\ P_{i,t,\text{buy}} + P_{i-\text{SESS},t,\text{ex}} \leq \tilde{P}_{i,t,\text{re}} \\ H_{i,t,\text{GT}} + H_{i,t,\text{GB}} + H_{i,t,\text{EC}} + H_{i,t,\text{FC}} = H_{i,t,\text{load}} \end{cases} \quad (35)$$

式中: $\tilde{P}_{i,t,\text{re}}$ 为可再生能源出力的恶劣概率分布。

DRO 优化问题中的不确定性集合呈凸性,将模型进行改进为:

$$\begin{cases} \max \left\{ \sum_{i=1}^N - (C_{i,\text{GT}} + C_{i,\text{GB}} + C_{i,\text{gas}} + C_{i,\text{DR}} + C_{i,\text{CO}_2} + C_{i,\text{H}_2} - \tau_{i,\text{ex}}) + \right. \\ \left. \min \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \left[P_{i,t,\text{sell}} \frac{1}{|N_{\text{price}}|} \sum_{l \in N_{\text{price}}} (\hat{r}_{l,i,t,\text{sell}} - \Delta r_{l,i,t,\text{sell}}) - \right. \right. \\ \left. \left. P_{i,t,\text{buy}} \frac{1}{|N_{\text{price}}|} \sum_{l \in N_{\text{price}}} (\hat{r}_{l,i,t,\text{buy}} - \Delta r_{l,i,t,\text{buy}}) \right] \right\} \\ (36) \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{i,t,\text{load}} + P_{i,t,\text{sell}} + P_{i,t,\text{EC}} - P_{i,t,\text{FC}} - P_{i,t,\text{GT}} - \\ P_{i,t,\text{buy}} + P_{i-\text{SESS},t,\text{ex}} \leq \min \frac{1}{|N_{\text{re}}|} \sum_{m \in N_{\text{re}}} (\hat{P}_{m,i,t,\text{re}} - \Delta P_{m,i,t,\text{re}}) \\ \frac{1}{|N_{\text{price}}|} \sum_{l \in N_{\text{price}}} |\Delta r_{l,i,t,\text{sell}}| \leq \kappa_s \rightarrow \lambda_{i,t}^1 \\ \frac{1}{|N_{\text{price}}|} \sum_{l \in N_{\text{price}}} |\Delta r_{l,i,t,\text{buy}}| \leq \kappa_b \rightarrow \lambda_{i,t}^2 \\ \frac{1}{|N_{\text{re}}|} \sum_{m \in N_{\text{re}}} |\Delta P_{m,i,t,\text{re}}| \leq \kappa_{\text{re}} \rightarrow \lambda_{i,t}^3 \\ H_{i,t,\text{GT}} + H_{i,t,\text{GB}} + H_{i,t,\text{EC}} + H_{i,t,\text{FC}} = H_{i,t,\text{load}} \end{cases} \quad (37)$$

式中: N_{price} 、 N_{re} 分别为上级电网电价和可再生能源出力样本数据集; $|N_{\text{price}}|$ 、 $|N_{\text{re}}|$ 分别为上级电网电价和可再生能源出力对应样本数据总数; $\hat{r}_{l,i,t,\text{buy}}$ 、 $\hat{r}_{l,i,t,\text{sell}}$ 和 $\Delta r_{l,i,t,\text{buy}}$ 、 $\Delta r_{l,i,t,\text{sell}}$ 分别为第 l 个向上级电网购、售电电价的样本值和偏差值; $\hat{P}_{m,i,t,\text{re}}$ 、 $\Delta P_{m,i,t,\text{re}}$ 分别为第 m 个可再生能源出力的样本值和偏差值; $\lambda_{i,t}^1$ 、 $\lambda_{i,t}^2$ 、 $\lambda_{i,t}^3$ 分别为向上级电网购、售电电价和可再生能源出力 Wasserstein 球半径约束的对偶乘子。

根据对偶理论将 max-min 模型转化为 max 模型, 得到目标函数:

$$\max \left\{ \sum_{i=1}^N \left(-C_{i,\text{GT}} + C_{i,\text{GB}} + C_{i,\text{gas}} + C_{i,\text{DR}} + C_{i,\text{CO}_2} + C_{i,\text{H}_2} - \tau_{i,\text{ex}} \right) + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \left[P_{i,t,\text{sell}} \frac{1}{|N_{\text{price}}|} \sum_{l \in N_{\text{price}}} (\hat{r}_{l,i,t,\text{sell}}) - P_{i,t,\text{buy}} \frac{1}{|N_{\text{price}}|} \sum_{l \in N_{\text{price}}} (\hat{r}_{l,i,t,\text{buy}}) - \lambda_{i,t}^1 k_s - \lambda_{i,t}^2 k_b \right] \right\} \quad (38)$$

$$\begin{cases} P_{i,t,\text{load}} + P_{i,t,\text{sell}} + P_{i,t,\text{EC}} - P_{i,t,\text{FC}} - P_{i,t,\text{GT}} - P_{i,t,\text{buy}} + P_{i-\text{SESS},t,\text{ex}} \leq \max \frac{1}{|N_{\text{re}}|} \sum_{m \in N_{\text{re}}} (\hat{P}_{m,i,t,\text{re}} - \lambda_{i,t}^3 \kappa_{\text{re}}) \\ \lambda_{i,t}^1 \geq P_{i,t,\text{sell}} \\ \lambda_{i,t}^2 \geq P_{i,t,\text{buy}} \\ \lambda_{i,t}^1 \geq 0 \\ \lambda_{i,t}^2 \geq 0 \\ \lambda_{i,t}^3 - 1 \geq 0 \\ \lambda_{i,t}^3 \geq 0 \\ H_{i,t,\text{GT}} + H_{i,t,\text{GB}} + H_{i,t,\text{EC}} + H_{i,t,\text{FC}} = H_{i,t,\text{load}} \end{cases} \quad (39)$$

SESS 电站侧目标函数如下所示:

$$\begin{cases} \max [-(C_{\text{SESS},\text{om}} + C_{\text{SESS},\text{grid}} - \tau_{\text{SESS},\text{ex}})] \\ \text{s.t. 式(19)} \end{cases} \quad (40)$$

$$C_{\text{SESS},\text{om}} = \sum_{t=1}^T k_{\text{SESS}}^{\text{om}} (P_{t,\text{SESS},\text{ch}} + P_{t,\text{SESS},\text{dis}}) \quad (41)$$

$$C_{\text{SESS},\text{grid}} = \sum_{t=1}^T (r_{t,\text{buy}} P_{t,\text{SESS},\text{buy}} - r_{t,\text{sell}} P_{t,\text{SESS},\text{sell}}) \quad (42)$$

$$\tau_{\text{SESS},\text{ex}} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T r_{\text{SESS}-i,t,\text{ex}} P_{\text{SESS}-i,t,\text{ex}} \quad (43)$$

式中: $C_{\text{SESS},\text{om}}$ 为 SESS 电站每日运维成本; $k_{\text{SESS}}^{\text{om}}$ 为 SESS 的单位运维成本系数; $C_{\text{SESS},\text{grid}}$ 为 SESS 与上级电网每日交易成本; $\tau_{\text{SESS},\text{ex}}$ 为 SESS 与各 IEM 交互后的电能支付收益。

对上述确定性模型进行转换, 模型转换如下:

$$\begin{cases} \max [-(C_{\text{SESS},\text{om}} - \tau_{\text{SESS},\text{ex}}) + \min \sum_{t=1}^T (\tilde{r}_{t,\text{sell}} P_{t,\text{SESS},\text{sell}} - \tilde{r}_{t,\text{buy}} P_{t,\text{SESS},\text{buy}})] \\ \text{s.t. 式(19)} \end{cases} \quad (44)$$

DRO 优化问题中的不确定性集合呈凸性, 可以转化为下述模型:

$$\begin{cases} \max \left\{ -(C_{\text{SESS},\text{om}} - \tau_{\text{SESS},\text{ex}}) + \min \sum_{t=1}^T \left[P_{t,\text{SESS},\text{sell}} \frac{1}{|N_{\text{price}}|} \sum_{l \in N_{\text{price}}} (\hat{r}_{l,t,\text{sell}} - \Delta r_{l,t,\text{sell}}) - P_{t,\text{SESS},\text{buy}} \frac{1}{|N_{\text{price}}|} \sum_{l \in N_{\text{price}}} (\hat{r}_{l,t,\text{buy}} - \Delta r_{l,t,\text{buy}}) \right] \right\} \\ \text{s.t.} \\ \frac{1}{|N_{\text{price}}|} \sum_{l \in N_{\text{price}}} |\Delta r_{l,t,\text{sell}}| \leq \kappa_s \rightarrow \lambda_t^4 \\ \frac{1}{|N_{\text{price}}|} \sum_{l \in N_{\text{price}}} |\Delta r_{l,t,\text{buy}}| \leq \kappa_b \rightarrow \lambda_t^5 \end{cases} \quad \text{式(19)} \quad (45)$$

式中: λ_t^4 、 λ_t^5 为电价扰动约束对应的对偶乘子

根据对偶理论将 max-min 模型转化为 max 模型, 得到目标函数:

$$\begin{cases} \max \left\{ -(C_{\text{SESS},\text{om}} - \tau_{\text{SESS},\text{ex}}) + \sum_{t=1}^T \left[P_{t,\text{SESS},\text{sell}} \frac{1}{|N_{\text{price}}|} \sum_{l \in N_{\text{price}}} (\hat{r}_{l,t,\text{sell}}) - P_{t,\text{SESS},\text{buy}} \frac{1}{|N_{\text{price}}|} \sum_{l \in N_{\text{price}}} (\hat{r}_{l,t,\text{buy}}) - \lambda_t^4 k_s - \lambda_t^5 k_b \right] \right\} \\ \text{s.t.} \\ \lambda_t^4 \geq P_{t,\text{SESS},\text{sell}} \\ \lambda_t^5 \geq P_{t,\text{SESS},\text{buy}} \\ \lambda_t^4 \geq 0 \\ \lambda_t^5 \geq 0 \end{cases} \quad \text{式(19)} \quad (46)$$

3 考虑多重不确定性和博弈欺诈的 IEMMG-SESS 纳什谈判优化模型

纳什谈判理论是合作博弈的一种, 目标函数为最大化联盟合作前后效益提升的纳什乘积, 各主体以实现自身效益最大化为目标共同寻求纳什谈判解, 最终实现各主体 Pareto 最优。本文基于各 IEM 和 SESS 模型, 建立考虑多重不确定性和博弈欺诈的 IEMMG-SESS 纳什谈判优化模型, 为降低求解难度, 将模型转换为系统电能交互和合作收益分配两个子问题进行求解。

3.1 考虑多重不确定性的系统电能交互子问题 (P1)

电能交互子问题等价于求系统成本最小化问题, 各主体以自身成本最小化为目标, 通过电能交互降低运行成本, 同时考虑系统运行中存在的多重不

确定性因素,基于纳什谈判理论构建的电能交互模型如下:

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^N C_i + C_{\text{SESS}} \\ \text{s.t.} \\ \text{式(1)—(19), (22)—(46)} \\ P_{i-\text{SESS},t,\text{ex}} = -P_{\text{SESS}-i,t,\text{ex}} \end{cases} \quad (47)$$

式中: C_i 、 C_{SESS} 分别为不考虑收益分配的各 IEM 和 SESS 的运行成本; $P_{i-\text{SESS},t,\text{ex}}$ 为 SESS 期望接收电量,当 $P_{i-\text{SESS},t,\text{ex}} = -P_{\text{SESS}-i,t,\text{ex}}$ 时表示 IEM 与 SESS 间电能交互达成共识,即期望输送的电能等于期望接收的电能,实现系统内部的电能合作。并且,引入式(35)—(39)和(44)—(46),采用基于 Wasserstein 距离的 DRO 方法处理系统运行中存在的多重不确定性问题,降低不确定性因素对系统运行的影响。

3.2 考虑博弈欺诈的系统合作收益分配子问题(P2)

通过纳什谈判模型,以各 IEM 与 SESS 间的交易电价作为协商变量,实现系统的合作收益分配。基于纳什谈判理论模型构建的系统合作收益分配模型中,IEM 侧合作收益分配模型如下:

$$\begin{cases} \min [-\ln(C_i^0 - C_i^* + \tau_{i,\text{ex}})] \\ \text{s.t.} \\ C_i^0 - C_i^* + \tau_{i,\text{ex}} > 0 \\ r_{i-\text{SESS},t,\text{ex}} = r_{\text{SESS}-i,t,\text{ex}} \\ \sum_{i=1}^N \tau_{i,\text{ex}} + \tau_{\text{SESS},\text{ex}} = 0 \end{cases} \quad (48)$$

式中: C_i^0 为各 IEM 的独立运行成本; C_i^* 为子问题 P1 求得的各 IEM 最优运行成本; $C_i^0 - C_i^* + \tau_{i,\text{ex}} > 0$ 代表各 IEM 合作前后实现正向收益,具有合作必要性; $r_{i-\text{SESS},t,\text{ex}}$ 为第 i 个 IEM 期望与 SESS 的交易电价; $r_{\text{SESS}-i,t,\text{ex}}$ 为 SESS 期望与第 i 个 IEM 的交易电价;当 $r_{i-\text{SESS},t,\text{ex}} = r_{\text{SESS}-i,t,\text{ex}}$ 表示系统最终实现交易价格共识。

SESS 电站侧合作收益分配模型如下:

$$\begin{cases} \min [-\ln(C_{\text{SESS}}^0 - C_{\text{SESS}}^* + \tau_{\text{SESS},\text{ex}})] \\ \text{s.t.} \\ C_{\text{SESS}}^0 - C_{\text{SESS}}^* + \tau_{\text{SESS},\text{ex}} > 0 \\ r_{i-\text{SESS},t,\text{ex}} = r_{\text{SESS}-i,t,\text{ex}} \\ \sum_{i=1}^N \tau_{i,\text{ex}} + \tau_{\text{SESS},\text{ex}} = 0 \\ r_{t,\text{eb}} \leq r_{\text{SESS}-i,t,\text{ex}} \leq r_{t,\text{es}} \end{cases} \quad (49)$$

式中: C_{SESS}^0 为 SESS 电站的独立运行成本; C_{SESS}^* 为子问题 P1 求得的 SESS 电站最优运行成本; $C_{\text{SESS}}^0 - C_{\text{SESS}}^* + \tau_{\text{SESS},\text{ex}} > 0$ 代表 SESS 合作后实现正向收益,具有合作必要性; $r_{t,\text{eb}}$ 为电网上网电价; $r_{t,\text{es}}$ 为电网分时电价;

$r_{t,\text{eb}} \leq r_{\text{SESS}-i,t,\text{ex}} \leq r_{t,\text{es}}$ 表明最终交易价格共识位于电网分时电价和上网电价区间以内。

在合作收益分配子问题中,针对 IEM 与 SESS 间的欺诈行为,建立一种考虑欺诈行为的中介交易机制,以各方都信任的第三方中介汇总欺诈报价,设置欺诈因子进行迭代求解,实现系统欺诈均衡,得到最优欺诈报价反馈至各主体进行合作议价,保证合作的稳定性。

针对系统各参与者为追求自身利益最大化而产生的欺诈行为,通过求解纳什谈判合作博弈模型得到各 IEM 的电能支付收益最优解和 SESS 电站的电能支付收益最优解^[36]。

$$C_i^{\text{gap}} = C_i^0 - C_i^* \quad (50)$$

$$C_{\text{SESS}}^{\text{gap}} = C_{\text{SESS}}^0 - C_{\text{SESS}}^* \quad (51)$$

$$\tau_{i,\text{ex}}^* = \left[\sum_{j \in N \setminus \{i\}} C_j^{\text{gap}} - NC_i^{\text{gap}} + C_{\text{SESS}}^{\text{gap}} \right] / (N + 1) \quad (52)$$

$$\tau_{\text{SESS},\text{ex}}^* = \left[\sum_{i \in N} C_i^{\text{gap}} - NC_{\text{SESS}}^{\text{gap}} \right] / (N + 1) \quad (53)$$

式中: C_i^{gap} 、 $C_{\text{SESS}}^{\text{gap}}$ 分别为各 IEM 和 SESS 电站电能交互前后的成本差值,且均不考虑电能支付收益; $\tau_{i,\text{ex}}^*$ 、 $\tau_{\text{SESS},\text{ex}}^*$ 分别为各 IEM 和 SESS 电站的电能支付收益最优解;由式(52)和(53)可知,若各 IEM 和 SESS 降低自身的成本差值 C_i^{gap} 和 $C_{\text{SESS}}^{\text{gap}}$,则可获得更大的电能支付收益,因此,在实际运行中各参与主体均具有为追求合作收益最大化而进行欺诈的动机,且是否欺诈及欺诈程度无法检测。

各 IEM 的欺诈报价和 SESS 电站的欺诈报价分别表示如下:

$$C_{i,\text{R}}^{\text{gap}} = C_i^{\text{gap}} - \gamma_i |C_i^{\text{gap}}| \quad (54)$$

$$C_{\text{SESS},\text{R}}^{\text{gap}} = C_{\text{SESS}}^{\text{gap}} - \gamma_{\text{SESS}} |C_{\text{SESS}}^{\text{gap}}| \quad (55)$$

式中: $C_{i,\text{R}}^{\text{gap}}$ 、 $C_{\text{SESS},\text{R}}^{\text{gap}}$ 分别为各 IEM 和 SESS 的欺诈报价; γ_i 、 γ_{SESS} 分别为各 IEM 和 SESS 的欺诈因子,欺诈因子越大,代表各主体欺诈程度越高,当欺诈因子为 0 时,参与主体无欺诈。

考虑到各 IEM 和 SESS 电站的合作理性,各主体为追求合作收益最大化,会尽可能避免合作失败。因此考虑欺诈行为后,应满足如下约束:

$$\sum_{i=1}^N C_{i,\text{R}}^{\text{gap}} + C_{\text{SESS},\text{R}}^{\text{gap}} > 0 \quad (56)$$

为满足式(56),各参与主体欺诈因子具有上限:

$$\gamma_i^{\text{limit}} = \left(C_i^{\text{gap}} + \sum_{j \in N \setminus \{i\}} C_{j,\text{R}}^{\text{gap}} + C_{\text{SESS},\text{R}}^{\text{gap}} \right) / |C_i^{\text{gap}}| \quad (57)$$

$$\gamma_{\text{SESS}}^{\text{limit}} = \left(\sum_{i \in N} C_{i,\text{R}}^{\text{gap}} + C_{\text{SESS}}^{\text{gap}} \right) / |C_{\text{SESS}}^{\text{gap}}| \quad (58)$$

各主体的欺诈因子必须小于欺诈因子上限,并

且为获得最大收益,各主体希望自身的欺诈因子尽可能达到上界。然而,各欺诈因子的上限随着其他参与主体的欺骗程度而动态变化,因此各主体应共同努力实现欺诈均衡。当 $\sum_{i=1}^N C_{i,R}^{\text{gap}} + C_{\text{SESS},R}^{\text{gap}} \approx 0$,即二者之和非常接近于0时,各参与主体达到欺诈均衡,即各主体都不能找到一个符合条件式(56)的更大的欺骗因子,在不损害其他主体利益的前提下提高自身收益,此时各主体都认为已经达到最优欺诈因子,实现了自身的收益最大化^[37]。

为实现系统的欺诈均衡,以各方都信任的第三方中介汇总欺诈报价,各主体更新欺诈因子,最终得到最优欺诈报价。考虑SESS与各IEM间欺诈行为的中介交易机制求解流程如图2所示。

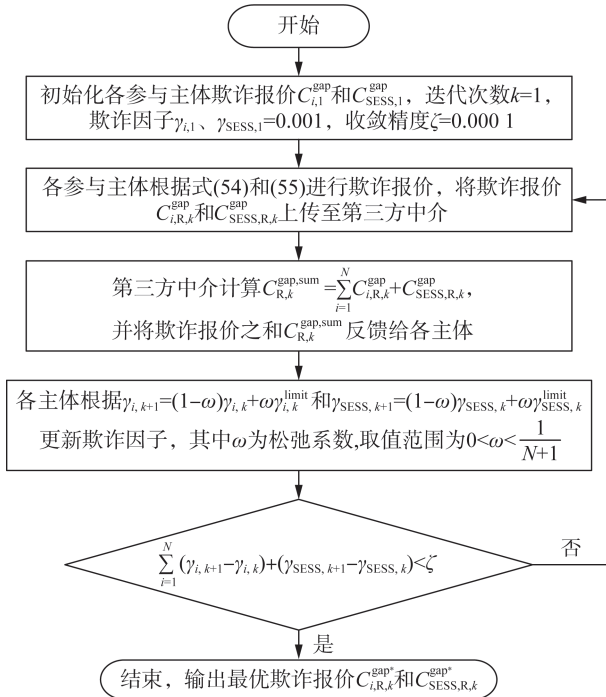


图2 考虑SESS与各IEM间欺诈行为的中介交易机制求解流程

Fig. 2 Solving process for the intermediary transaction mechanism of fraudulent activities between SESS and various IEMs

4 IEMMG-SESS 纳什谈判优化模型求解

4.1 基于自适应ADMM的系统电能交互子问题求解

为了保护各参与主体隐私,提高求解速度,采用自适应ADMM算法进行分布式求解,具体步骤如下:

1) 首先建立P1的增广拉格朗日函数,IEM侧的

增广拉格朗日函数如下:

$$L_i^{\text{P1}} = C_i + \sum_{t=1}^T \lambda_{i-\text{SESS}}^{\text{P1}} (P_{i-\text{SESS},t,\text{ex}} + P_{\text{SESS}-i,t,\text{ex}}) + \sum_{t=1}^T \frac{\rho^{\text{P1}}}{2} \|P_{i-\text{SESS},t,\text{ex}} + P_{\text{SESS}-i,t,\text{ex}}\|_2^2 \quad (59)$$

SESS电站侧的增广拉格朗日函数如下:

$$L_{\text{SESS}}^{\text{P1}} = C_{\text{SESS}} + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \lambda_{i-\text{SESS}}^{\text{P1}} (P_{i-\text{SESS},t,\text{ex}} + P_{\text{SESS}-i,t,\text{ex}}) + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \frac{\rho^{\text{P1}}}{2} \|P_{i-\text{SESS},t,\text{ex}} + P_{\text{SESS}-i,t,\text{ex}}\|_2^2 \quad (60)$$

式中: $\lambda_{i-\text{SESS}}^{\text{P1}}$ 为P1子问题中的拉格朗日乘子; ρ^{P1} 为P1子问题的惩罚因子。

2) 各IEM独立并行求解得到期望功率,SESS根据IEM期望功率计算得到自身期望功率,通过式(61)和(62)交替迭代更新,迭代更新策略步骤如下:

$$P_{i-\text{SESS},t,\text{ex}}(k+1) = \arg \min L_i^{\text{P1}} [\lambda_{i-\text{SESS}}^{\text{P1}}(k), P_{i-\text{SESS},t,\text{ex}}(k), P_{\text{SESS}-i,t,\text{ex}}(k)] \quad (61)$$

$$P_{\text{SESS}-i,t,\text{ex}}(k+1) = \arg \min L_{\text{SESS}}^{\text{P1}} [\lambda_{i-\text{SESS}}^{\text{P1}}(k), P_{i-\text{SESS},t,\text{ex}}(k+1), P_{\text{SESS}-i,t,\text{ex}}(k)] \quad (62)$$

式中: k 为迭代次数。

3) 判断收敛。

$$\begin{cases} \|R(k)\|_2 \leq \varepsilon^{\text{pri}} \\ \|S(k)\|_2 \leq \varepsilon^{\text{dual}} \end{cases} \quad (63)$$

式中: $\|R(k)\|_2$ 为原始残差; $\|S(k)\|_2$ 为对偶残差; ε^{pri} 、 $\varepsilon^{\text{dual}}$ 为原始残差和对偶残差的收敛阈值。当 $\|R(k)\|_2$ 和 $\|S(k)\|_2$ 小于 ε^{pri} 和 $\varepsilon^{\text{dual}}$ 时,算法收敛,迭代结束,否则继续迭代更新直至收敛,或者迭代次数达到最大迭代次数限制。

4) 每次迭代结束后,更新 $\lambda_{i-\text{SESS}}^{\text{P1}}$ 。

$$\lambda_{i-\text{SESS}}^{\text{P1}}(k) = \lambda_{i-\text{SESS}}^{\text{P1}}(k-1) + \rho^{\text{P1}} [P_{i-\text{SESS},t,\text{ex}}(k) + P_{\text{SESS}-i,t,\text{ex}}(k)] \quad (64)$$

惩罚因子的取值会显著影响算法的收敛速度。为加快收敛,通过实时监测原始残差与对偶残差的比值变化,实现惩罚因子的自适应优化^[38-39]。自适应惩罚因子更新公式如下:

$$\rho^{\text{P1}}(k+1) = \begin{cases} \rho^{\text{P1}}(k) \cdot \alpha_1, & \|R(k)\|_2 > \mu \|S(k)\|_2 \\ \rho^{\text{P1}}(k) / \alpha_2, & \|R(k)\|_2 < \mu \|S(k)\|_2 \\ \rho^{\text{P1}}(k), & \text{其他} \end{cases} \quad (65)$$

式中: $\rho^{\text{P1}}(k+1)$ 为P1子问题第 $k+1$ 次迭代的自适应惩罚因子; α_1 、 α_2 和 μ 为常数。

4.2 基于自适应ADMM的系统合作收益分配子问题求解

首先建立P2的增广拉格朗日函数,IEM侧的增广拉格朗日函数如下:

$$L_i^{P2} = -\ln(C_{i,R}^{gap*} + \tau_{i,ex}) + \sum_{t=1}^T \lambda_{i-SESS}^{P2} (r_{i-SESS,t,ex} - r_{SESS-i,t,ex}) + \sum_{t=1}^T \frac{\rho^{P2}}{2} \| (r_{i-SESS,t,ex} - r_{SESS-i,t,ex}) \|_2^2 \quad (66)$$

SESS电站侧的增广拉格朗日函数如下:

$$L_{SESS}^{P2} = -\ln(C_{SESS,R}^{gap*} + \tau_{SESS,ex}) + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \lambda_{i-SESS}^{P2} (r_{i-SESS,t,ex} - r_{SESS-i,t,ex}) + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \frac{\rho^{P2}}{2} \| (r_{i-SESS,t,ex} - r_{SESS-i,t,ex}) \|_2^2 \quad (67)$$

式中: λ_{i-SESS}^{P2} 为P2子问题中的拉格朗日乘子; ρ^{P2} 为P2子问题中的惩罚因子。

对于子问题P2同样采用自适应ADMM算法进行分布式求解,求解过程和P1相同,不再赘述。

5 算例分析

5.1 基本数据

文中采用图1所示IEMMG-SESS框架,系统包含上级电网、天然气网、SESS电站和3个含氢IEM,各IEM皆配备新能源发电设备、CHP机组和氢能系统,优化调度周期 T 为24 h,时间间隔为1 h。为刻画系

统多重不确定性,本文采用蒙特卡罗抽样生成了1000个随机场景,通过场景缩减技术,分别得到了IEM可再生能源出力的10个典型场景,以及SESS电站与IEM向上级电网购电价格的5个典型场景。典型场景共同构成不确定参数的离散经验分布,作为后续分布鲁棒优化模型中Wasserstein距离的基准分布。可再生能源出力和电网购电价典型场景以及系统电热负荷数据如附录A所示。系统具体运行参数如附录B所示。本文在Matlab R2021a运行环境下调用YALMIP工具箱以及商业求解器CPLEX和MOSEK来求解所提出的模型。

5.2 仿真结果分析

5.2.1 算法收敛性分析

本文采用自适应ADMM算法求解P1和P2子问题,P1子问题的迭代收敛结果情况如图3所示,P2子问题的迭代收敛结果情况如图4所示。

图3为P1子问题中各IEM及SESS电站运行成本的迭代收敛结果,所提算法在经过6次迭代后收敛,得到电能交互后系统各主体的运行成本。图4为P2子问题中各IEM及SESS电站议价的迭代收敛结果,本文算法在经过54次迭代后收敛,得到各主体的合作收益分配结果。

为验证自适应ADMM算法的有效性,将自适应ADMM算法与传统ADMM算法的求解特性进行对比分析,二者的对比情况如表1所示。

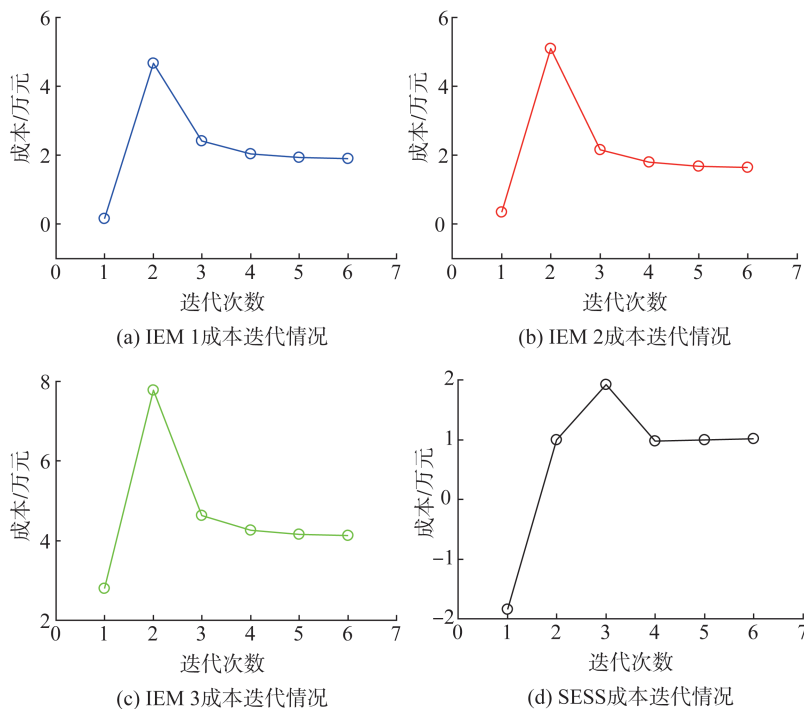


图3 系统电能交互子问题的迭代收敛结果

Fig. 3 Iterative convergence results for the system power interaction subproblem

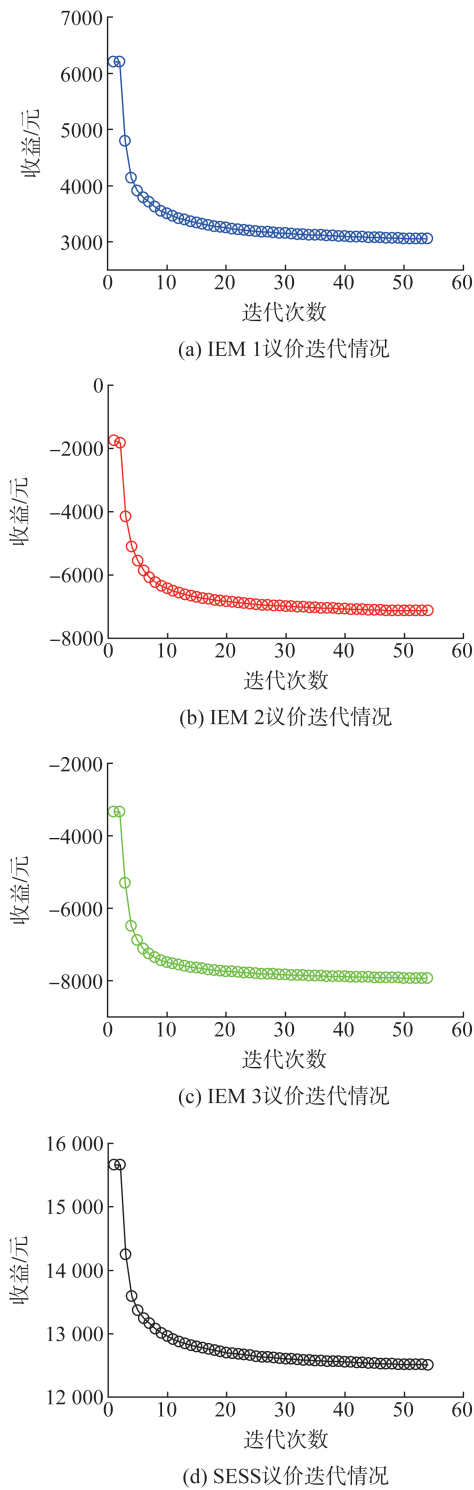


图 4 系统合作收益分配子问题的迭代收敛结果
Fig. 4 Iterative convergence results for the system cooperation revenue allocation subproblem

由表 1 可得,传统 ADMM 算法在 P1 和 P2 子问题求解中迭代次数分别为 23 次和 119 次,而本文所提自适应 ADMM 算法迭代次数为 6 次和 54 次,表明自适应 ADMM 算法能够在更少的迭代次数下达成系统的电能、电价交易共识,验证了自适应 ADMM 算法具有良好的收敛性和计算速度。

表 1 传统 ADMM 算法与自适应 ADMM 算法对比
Table 1 Comparison of traditional ADMM algorithm and adaptive ADMM algorithm

方法	子问题	迭代次数/次	求解时间/s
传统 ADMM	P1	23	55
	P2	119	289
自适应 ADMM	P1	6	15
	P2	54	132

5.2.2 系统电能交互运行结果分析

考虑多重不确定性的系统电能交互结果如图 5 所示。电能交互情况以 IEM 1 为例进行说明,IEM 1 在 01:00 到 06:00 和 12:00 到 22:00 大部分时段为多电型 IEM,存在富余电量,因此将电能输送给 SESS 电站;在 07:00 到 11:00 时段为缺电型 IEM,电能短缺,自身供电不足,因此由 SESS 电站进行电能输送。SESS 电站利用 IEM 各个时段电能需求的差异性和互补性制定电能交易计划,实现各主体的功率平衡和联盟内部能量合作,IEM 多余或不足的电能优先与 SESS 电站进行交互,避免直接向上级电网购售电,降低了对电网的依赖,扩大了系统的电能合作,确保系统经济效益最大化和稳定的电能供应。

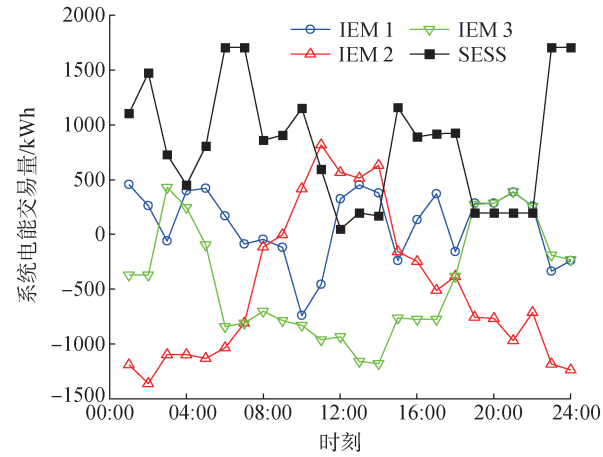


图 5 系统电能交互结果
Fig. 5 System power interaction results

IEM 1 的电能优化结果如图 6 所示,热能优化结果如图 7 所示。IEM 1 在低电价时段,从电网获取电能,减少 CHP 机组发电量;在高电价时段,减少电网购电量,增大 CHP 机组发电量,满足负荷需求。IEM 1 为实现自身效益最大化与 SESS 电站进行电能交互,与 SESS 电站的电能交易情况与图 5 一致。氢能系统实现能量的转换和存储,提高运行的灵活性,并且设备产生的余热用于满足系统热负荷需求,实现能量的高效利用。IEM 2 与 IEM 3 的电能与热能优化具体结果如附录 C 所示。

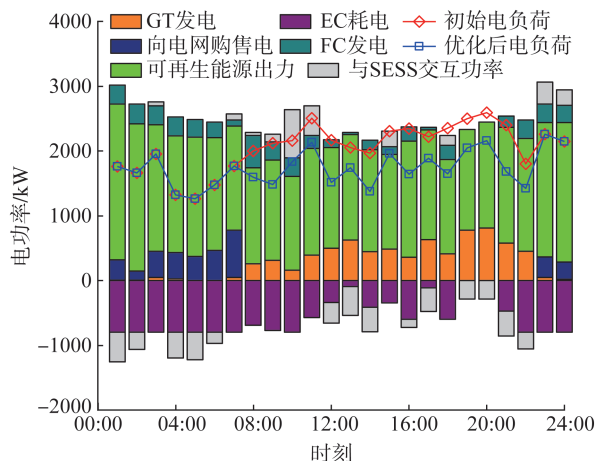


图6 IEM 1电能优化结果

Fig. 6 IEM 1 energy optimization results

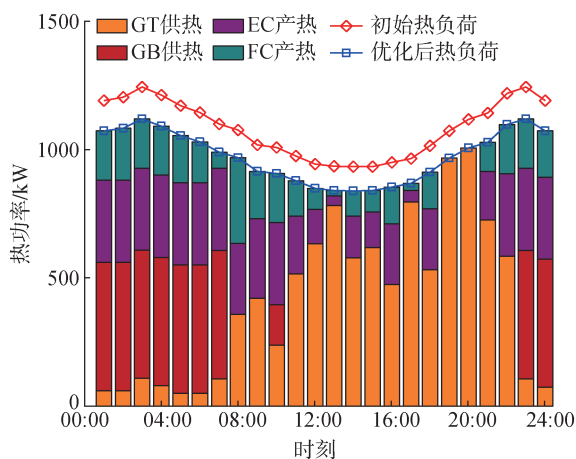


图7 IEM 1热能优化结果

Fig. 7 IEM 1 thermal energy optimization results

对于系统热能优化,CHP机组采用“以热定电”运行模式,与氢能系统中EC、FC等设备优先满足系统的热负荷需求,实现了能量的高效利用。

考虑多重不确定性和欺诈行为的IEMMG-SESS电能交易价格如图8所示。由图8可得,通过IEM与SESS间的交易电价实现合作收益分配,各时段IEM与SESS间的交易电价均处于电网分时电价和上网电价区间以内,因而各IEM能以低于电网分时电价购入电能,以高于上网电价售出电能,获得更高的电能支付收益,有效提高IEM的收益。

SESS电站的运行状态如图9所示。

由图9所得,SESS电站主要在02:00、05:00和07:00进行充电,在01:00、11:00到22:00进行放电。SESS电站与各IEM和上级电网进行电能交互实现系统内部功率平衡,并且利用自身储能作用实现能量的时间平移,储能系

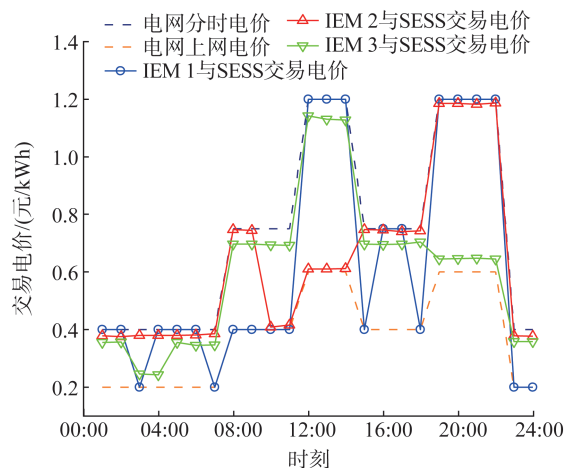


图8 IEM与SESS间电能交易价格

Fig. 8 Electricity trading price between IEM and SESS

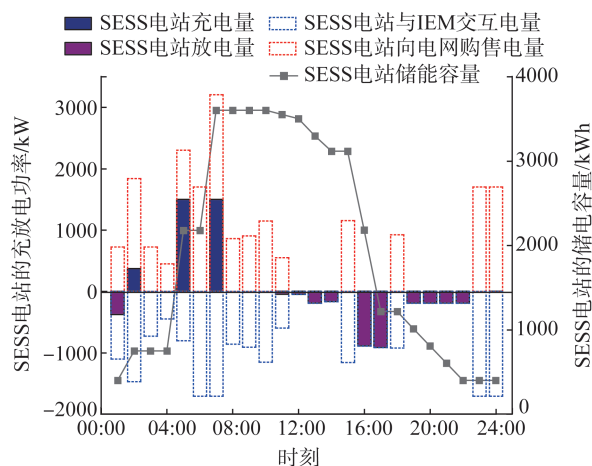


图9 SESS电站的运行状态

Fig. 9 Operational status of the SESS power station

统的充放电量为向电网购售和与各IEM电能交互的电量之和。SESS电站与IEM交互电量与图5一致,电站不足的电能从上级电网购得,维持系统功率平衡。SESS电站通过与上级电网和IEM的电能交互,利用规模优势套利实现收益的提高,并且充分地利用自身的储能作用,实现电能的时间平移,进一步实现收益的提高。

5.3 情景对比分析

为了验证本文提出方法的经济性、实用性与考虑欺诈行为中介交易机制的有效性,本文设置4种情景进行对比分析。

情景1:IEMMG-SESS综合考虑多重不确定性和欺诈行为。

情景2:IEMMG-SESS只考虑欺诈行为。

情景3:IEMMG-SESS只考虑多重不确定性。

情景4:常规IEMMG-SESS。

表2给出4种情景下IEMMG-SESS各主体的电能

合作前后运行成本结果。

由表 2 可得,情景 2 各主体的最终成本均低于情

表 2 4 种情景下 IEMMG-SESS 合作前后成本
Table 2 Costs before and after IEMMG-SESS
collaboration across four scenarios

情景	主体	初始成本 差值	独立运行 成本	欺诈报价	最终运行 成本
1	IEM 1	-1 232.07	17 760.12	-2 990.56	15 937.82
	IEM 2	9 051.82	25 561.58	7 285.50	23 639.81
	IEM 3	9 839.04	51 070.25	8 071.93	49 162.26
	SESS	-10 598.65	-457.14	-12 366.52	-2 366.32
2	IEM 1	-1 205.18	16 817.50	-3 080.91	14 753.15
	IEM 2	8 976.38	25 292.00	7 092.88	23 219.93
	IEM 3	9 341.59	50 555.78	7 457.73	48 483.45
	SESS	-9 585.21	-484.75	-11 469.32	-2 557.35
3	IEM 1	-1 232.07	17 760.12	-1 232.07	16 012.75
	IEM 2	9 051.82	25 561.58	9 051.82	23 776.47
	IEM 3	9 839.04	51 070.25	9 839.04	49 304.54
	SESS	-1 0598.65	-457.14	-10 598.65	-2 219.40
4	IEM 1	-1 205.18	16 817.50	-1 205.18	14 935.90
	IEM 2	8 976.38	25 292.00	8 976.38	23 410.13
	IEM 3	9 341.59	50 555.78	9 341.59	48 670.67
	SESS	-9 585.21	-484.75	-9 585.21	-2 362.78

表 3 系统各主体参与合作运行前后的碳排放、运行成本及提升情况
Table 3 Carbon emissions, operational costs, and improvement levels before and after the
collaborative operation of all system entities

主体	独立运行碳排放/kg	合作运行碳排放/kg	碳排放减少量/kg	独立运行成本/元	最终运行成本/元	收益提升值/元
IEM 1	13 223.48	14 395.75	-1 172.27	17 760.12	15 937.82	1 822.30
IEM 2	24 500.17	12 018.03	12 482.14	25 561.58	23 639.81	1 921.77
IEM 3	33 806.96	25 451.89	8 355.07	51 070.25	49 162.26	1 907.99
SESS				-457.14	-2 366.32	1 909.18
IEMMG-SESS 系统	71 530.61	51 865.67	19 664.94	93 934.81	86 373.57	7 561.24

在考虑 SESS 与各 IEM 间欺诈行为的中介交易机制中,系统各主体间欺诈报价和欺诈因子的迭代情况分别如图 10 和图 11 所示。在迭代过程中,各主体迭代报价逐步降低,欺诈因子逐步增大至欺诈因子上限,最终实现系统的欺诈均衡,防止某一主体欺诈程度过高,损害其他主体利益,甚至导致合作破裂。通过得到的最优欺诈报价进行合作议价,实现欺诈背景下的合作收益合理分配。

5.4 灵敏度分析

表 4 给出了情景 1 下不同 Wasserstein 半径的系统各主体的运行成本。从表 4 可看出,随着 Wasserstein 半径的升高,各主体的运行成本随之增加。Wasserstein 半径的增大意味着考虑的更坏情况

景 4 的最终成本,表明考虑各主体的欺诈行为,通过建立考虑 SESS 与各 IEM 间欺诈行为的中介交易机制,采用最优欺诈报价进行合作议价,各主体得到更高的合作收益。情景 3 各主体的运行成本均高于情景 4,这是由于情景 3 考虑各系统的多重不确定性风险,以成本增加为代价提高系统应对不确定风险的能力,确保系统在面对未知变化时,性能不至于急剧下降。

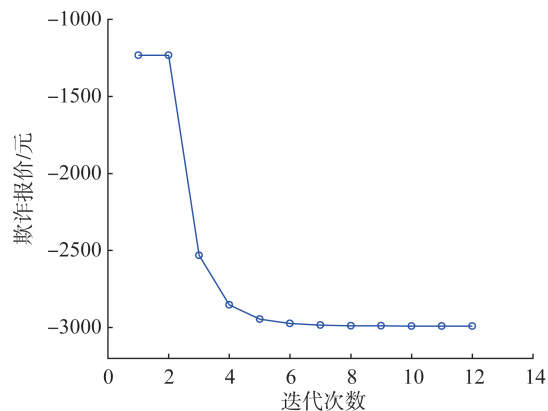
情景 1 为本文模型,综合考虑系统的多重不确定性和各主体间欺诈行为,相比于情景 3,本文方法考虑系统的欺诈行为,通过建立考虑 SESS 与各 IEM 间欺诈行为的中介交易机制,实现欺诈均衡,防止欺诈行为导致收益分配不均或合作破裂,保证合作的稳定性。相比于情景 2,本文以系统的运行成本增加为代价,提高了应对不确定风险的能力,更加符合现实运营的需要。

表 3 给出系统各主体在参与合作运行前后的碳排放、运行成本及收益提升情况。经计算,与独立运行相比,参与合作后系统碳排放减少 19 664.94 kg,降低 27.49%,收益提升 7 561.24 元,提升 8.05%。系统各参与主体通过合作效益均得到有效提升,实现低碳经济效益,合作呈现正向贡献,表明本文方法具有一定现实作用。

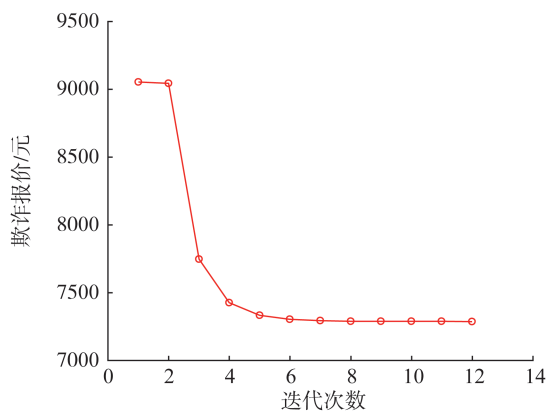
分布范围更广,模型为了免疫于这些更恶劣的分布,会采取更加保守的策略,从而可能导致更高的运行成本。当 Wasserstein 半径为 0 时,相当于完全信任经验分布,此时模型退化为一个随机优化问题,各主体的运行成本最低。通过调节 Wasserstein 半径,可以平衡系统的经济性与鲁棒性,以适应各类不确定情景,更加符合现实运行的要求。

6 结 论

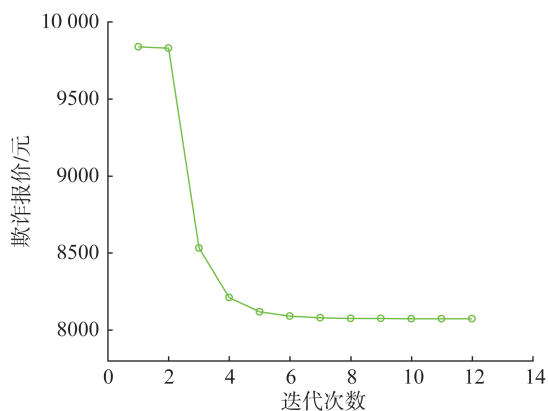
1) 基于自适应 ADMM 算法求解 IEMMG-SESS 运行优化模型,动态调整惩罚因子,有效提高了算法的求解速度,且各主体仅需交互有限的信息,能够有效保护各参与主体的隐私。



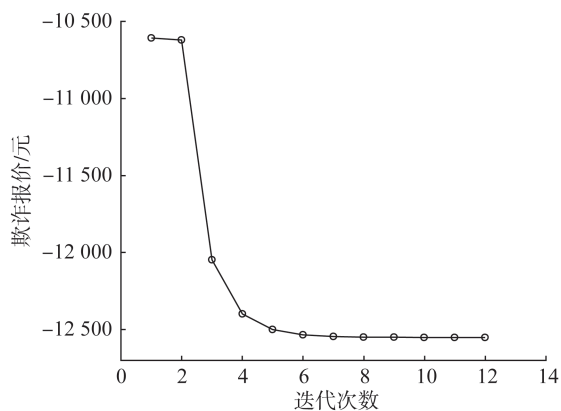
(a) IEM 1的欺诈报价迭代情况



(b) IEM 2的欺诈报价迭代情况



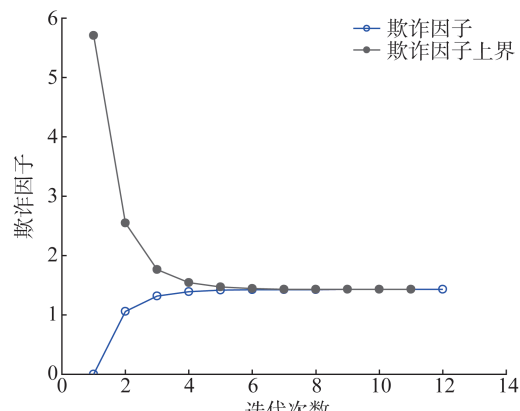
(c) IEM 3的欺诈报价迭代情况



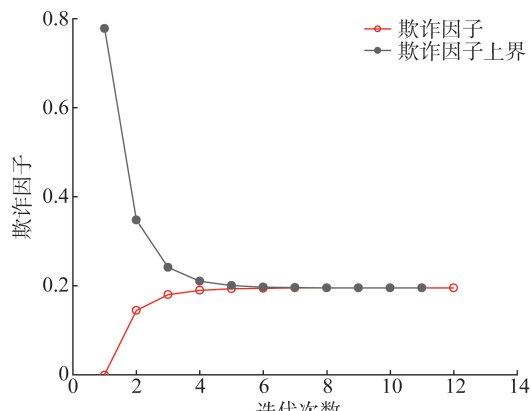
(d) SESS电站的欺诈报价迭代情况

图 10 系统各主体间欺诈报价迭代情况

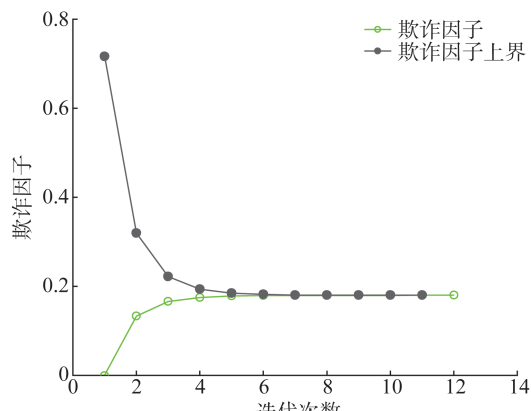
Fig. 10 Iterative fraudulent quotation patterns among system entities



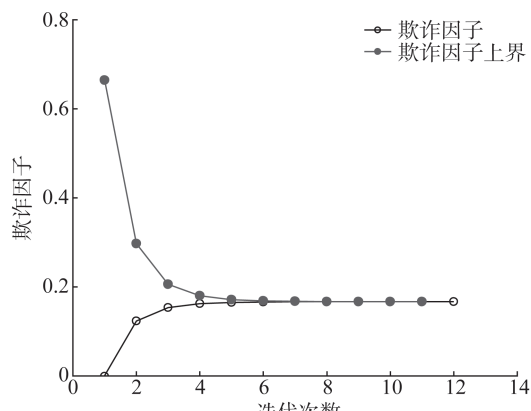
(a) IEM 1的欺诈因子迭代情况



(b) IEM 2的欺诈因子迭代情况



(c) IEM 3的欺诈因子迭代情况



(d) SESS电站的欺诈因子迭代情况

图 11 系统各主体间欺诈因子迭代情况

Fig. 11 Iteration of fraud factors among system entities

表 4 不同 Wasserstein 半径的系统各主体运行成本
Table 4 Operating costs for each component in systems with different Wasserstein radius 元

Wasserstein 半径	IEM1 成本	IEM2 成本	IEM3 成本	SESS 电站成本
0	17 707.48	25 233.49	50 864.71	-592.92
0.02	17 760.12	25 561.58	51 070.25	-457.14
0.04	17 812.76	25 889.67	51 275.35	-321.38
0.06	17 865.39	26 217.76	51 480.45	-185.61

2) 本文系统模型与各主体独立运行相比,碳排放减少 19 664.94 kg,降低 27.49%,收益提升 7 561.24 元,提升 8.05%,实现了 IEM 低碳经济运行,增加了 SESS 电站的经济效益,验证了 IEM 与 SESS 合作运行的效用。

3) 采用基于 Wasserstein 距离的 DRO 处理系统合作运行过程中的新能源出力与电价的不确定性,有效提高了系统应对不确定风险的能力。

4) 针对 IEM 与 SESS 电站间的欺诈行为,建立了考虑 SESS 与各 IEM 间欺诈行为的中介交易机制,实现了系统欺诈均衡,防止欺诈行为导致合作破裂,保证合作的稳定性。

此外,考虑 SESS 和 IEM 各自运行方式不同,获得的信息也不对称不平等,未来将进一步研究 SESS 和 IEM 在谈判过程中由于信息不对称所导致的欺诈行为,以实现更加公平、高效的交易。

利益冲突声明 (Conflict of Interests):
所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献声明 (Authors' Contributions):

宋以宇进行了研究方案、仿真算例的设计与仿真,撰写论文初稿;窦震海设计研究思路,提出研究方案;李汝斌、徐浩进行对比算例研究;闫毅、陈佳佳参与论文写作与修订。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

7 参考文献

[1] Vankudoth L, Badar A Q H. Development and analysis of scheduling strategies for utilizing shared energy storage system in networked microgrids [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 97: 112691.

[2] Cao S M, Zhang H L, Cao K, et al. Day-ahead economic optimal dispatch of microgrid cluster considering shared energy storage system and P2P transaction [J]. Frontiers in Energy Research, 2021, 9: 645017

[3] Han J P, Fang Y C, Li Y W, et al. Optimal planning of multi-microgrid system with shared energy storage based on capacity leasing and energy sharing [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,

2025, 16(1): 16-31.

[4] 张林垚, 吴桂联, 廖锦霖, 等. 考虑共享储能的配电网多主体协同调度策略[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(2): 44-52.

Zhang Linyao, Wu Guilian, Liao Jinlin, et al. Multi-agent cooperative dispatching strategy for distribution network considering shared energy storage [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 44-52.

[5] Siqin T N, He S, Hu B, et al. Shared energy storage-multi-microgrid operation strategy based on multi-stage robust optimization [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 97: 112785.

[6] 严嘉鑫, 范宏, 贾庆山, 等. 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[J]. 智慧电力, 2025, 53(6): 10-18.

Yan Jiaxin, Fan Hong, Jia Qingshan, et al. Collaborative planning of multi-park integrated energy systems considering shared hydrogen energy storage and virtual energy storage[J]. Smart Power, 2025, 53(6): 10-18.

[7] Chen B, Li Z K, Liu B J, et al. Dynamic cooperative scheduling and adaptive benefit allocation for multi-microgrid systems with shared energy storage under source-load uncertainty [J]. Journal of Energy Storage, 2025, 128: 117213.

[8] 张程, 江炜龙, 罗玉锦, 等. 考虑风光不确定性的多数据中心微网与共享储能协同优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(4): 72-84.

Zhang Cheng, Jiang Weilong, Luo Yujin, et al. Collaborative optimal operation of multiple data center microgrids and shared energy storage considering wind power and photovoltaic uncertainty [J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(4): 72-84.

[9] 邢家维, 程艳, 于芃, 等. 基于合作博弈的多园区互联综合能源系统低碳经济调度[J]. 山东电力技术, 2024, 51(5): 19-29.

Xing Jiawei, Cheng Yan, Yu Peng, et al. Low-carbon economic scheduling of multiple interconnected park-level integrated energy systems based on cooperative game [J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(5): 19-29.

[10] 沈进锐. 基于博弈论的园区综合能源系统低碳优化调度研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2024.

Shen Jinrui. Research on low-carbon optimal dispatch of campus integrated energy system based on game theory [D]. Nanning: Guangxi University, 2024.

[11] 林顺富, 郭宇霆, 周波, 等. 计及电价不确定性的多虚拟电厂与共享储能协同优化调度方法[J]. 智慧电力, 2025, 53(7): 20-27.

Lin Shunfu, Guo Yuting, Zhou Bo, et al. Collaborative optimal scheduling method for multi-virtual power plants and shared energy storage considering electricity prices uncertainty [J]. Smart Power, 2025, 53(7): 20-27.

[12] Chen Y, Wei W, Liu F, et al. Distributionally robust hydro-thermal-wind economic dispatch [J]. Applied Energy, 2016, 173: 511-519.

[13] 魏梅芳, 吴燕, 黎跃龙, 等. 基于分布鲁棒优化的微电网日前经济运行模型与求解方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(12): 81-90.

Wei Meifang, Wu Yan, Li Yuelong, et al. Day-ahead economic operation model of microgrid and its solving method based on distributed robust optimization [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(12): 81-90.

[14] 孟奕泽, 尹喆, 张一帆, 等. 基于分布鲁棒-非零和博弈的多微网分布式协同调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2025, 37(12): 86-95.

Meng Yize, Yin Zhe, Zhang Yifan, et al. Distributed collaborative

- scheduling of multi-microgrid based on distributionally robust optimization and non-zero-sum game[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2025, 37(12): 86-95.
- [15] Wen Y S, Ding R, Liang Y Q, et al. Multi-microgrid shared energy storage operation optimization strategy based on a mixed game theory[J]. Electric Power Systems Research, 2025, 246: 111643.
- [16] 侯朗博, 孙昊, 陈衡, 等. 基于需求响应与Stackelberg博弈的小区综合能源系统优化调度[J]. 发电技术, 2025, 46(2): 219-230.
- Hou Langbo, Sun Hao, Chen Heng, et al. Optimization scheduling of integrated energy systems in communities based on demand response and Stackelberg game[J]. Power Generation Technology, 2025, 46(2): 219-230.
- [17] 金鑫, 潘廷哲, 王宗义, 等. 主动式共享储能社区双层优化调度策略[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(3): 174-183.
- Jin Xin, Pan Tingzhe, Wang Zongyi, et al. Bi-level scheduling optimization strategy for active shared energy storage communities[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(3): 174-183.
- [18] 何良策, 王宇, 卢志刚, 等. 面向多区域综合能源系统低碳运行的共享电-氢储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(18): 52-63.
- He Liangce, Wang Yu, Lu Zhigang, et al. Optimal allocation of shared electricity-hydrogen storage for low-carbon operation of multiple regional integrated energy systems[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(18): 52-63.
- [19] 袁浩锋, 苗桂喜, 王鑫, 等. 基于纳什谈判的微电网与共享储能协同运行策略[J]. 东北电力技术, 2023, 44(12): 30-36.
- Yuan Haofeng, Miao Guixi, Wang Xin, et al. Cooperative operation strategy for microgrid and shared energy storage based on Nash negotiation[J]. Northeast Electric Power Technology, 2023, 44(12): 30-36.
- [20] 胡亚春, 窦震海, 张志一, 等. 基于分布鲁棒和改进纳什谈判的多微网-共享储能运行优化策略[J]. 电力建设, 2024, 45(7): 100-112.
- Hu Yachun, Dou Zhenhai, Zhang Zhiyi, et al. Multi-microgrid and shared energy storage operation optimization strategy based on distributionally robust and improved Nash bargaining[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(7): 100-112.
- [21] 刘佳佳, 田铭兴, 苏照旭, 等. 基于氢能多元利用与绿证-碳联合交易机制的多微网-共享储能运行优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(19): 52-67.
- Liu Jiajia, Tian Mingxing, Su Zhaoxu, et al. Operation optimization strategy for multiple microgrids with shared energy storage considering multi-utilization of hydrogen and green certificate-carbon joint trading mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(19): 52-67.
- [22] An L, Duan J, Chow M Y, et al. A distributed and resilient bargaining game for weather-predictive microgrid energy cooperation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(8): 4721-4730.
- [23] 杜佳男. 考虑电价不确定性和博弈欺诈行为的多微网电能合作运行优化策略[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4217-4230.
- Du Jianan. Optimization strategy of multi-microgrid electric energy cooperative operation considering electricity price uncertainty and game cheating behaviors[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4217-4230.
- [24] Zhao B X, Cao X D, Duan P F. Cooperative operation of multiple low-carbon microgrids: an optimization study addressing gaming fraud and multiple uncertainties[J]. Energy, 2024, 297: 131257.
- [25] Zhang K S, Gao C C, Zhang G, et al. Electricity and heat sharing strategy of regional comprehensive energy multi-microgrid based on double-layer game[J]. Energy, 2024, 293: 130655.
- [26] 唐明睿, 陈来军, 孙英聪, 等. 考虑投机行为的低碳园区共享储能优化运行策略[J/OL]. 电网技术, 2025-01-07. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.2014>.
- Tang Mingrui, Chen Laijun, Sun Yingcong, et al. Optimal operating strategy of shared energy storage in low-carbon park with the presence of speculative behavior [J/OL]. Power System Technology, 2025-01-07. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.2014>.
- [27] 王磊, 程杨, 江伟建, 等. 基于改进交替方向乘子法的大规模接地网腐蚀评估方法[J]. 电瓷避雷器, 2025(6): 69-78.
- Wang Lei, Cheng Yang, Jiang Weijian, et al. Large-scale grounding system corrosion assessment method based on improved alternating direction multiplier method [J]. Insulators and Surge Arresters, 2025(6): 69-78.
- [28] 张俊成, 黎敏, 刘志文, 等. 基于改进交替方向乘子法的配电网柔性负荷分层集群调控方法[J]. 中国电力, 2024, 57(1): 140-147.
- Zhang Juncheng, Li Min, Liu Zhiwen, et al. Hierarchical cluster control method for flexible load in distribution network based on improved alternating direction multiplier method [J]. Electric Power, 2024, 57(1): 140-147.
- [29] 吴锦领, 楼平, 管敏渊, 等. 基于非对称纳什谈判的多微网电能共享运行优化策略[J]. 电网技术, 2022, 46(7): 2711-2723.
- Wu Jinling, Lou Ping, Guan Minyuan, et al. Operation optimization strategy of multi-microgrids energy sharing based on asymmetric Nash bargaining[J]. Power System Technology, 2022, 46(7): 2711-2723.
- [30] Ma Y M, Wang H X, Hong F, et al. Modeling and optimization of combined heat and power with power-to-gas and carbon capture system in integrated energy system [J]. Energy, 2021, 236: 121392.
- [31] 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 low-carbon energy supply [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2534-2544.
- [32] 马恺, 袁至, 李骥. 考虑氢能多元化利用的综合能源系统低碳经济调度[J]. 发电技术, 2025, 46(2): 263-273.
- Ma Kai, Yuan Zhi, Li Ji. Low-carbon economic scheduling of integrated energy system considering diversified utilization of hydrogen energy[J]. Power Generation Technology, 2025, 46(2): 263-273.
- [33] Ma T Y, Wang Y L, Li T, et al. Optimizing multi-timescale scheduling of combined cooling, heating, and power systems under penalty-reward tiered carbon trading[J]. IEEE Access, 2024, 12: 113474-113489.
- [34] 赵佩尧, 李正烁, 高晗, 等. 电-气-热综合能源系统协同调度优化研究综述[J]. 山东电力技术, 2024, 51(4): 1-11.
- Zhao Peiyao, Li Zhengshuo, Gao Han, et al. Review on collaborative scheduling optimization of electricity-gas-heat integrated energy system[J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(4): 1-11.
- [35] 罗玉锦. 计及不确定性的多能微网-共享储能博弈优化研究

[D]. 福州: 福建理工大学, 2024.

Luo Yujin. Research on game optimization of multi-energy microgrid-shared energy storage taking into account uncertainty [D]. Fuzhou: Fujian University of Technology, 2024.

[36] Cui S C, Wang Y W, Shi Y, et al. Community energy cooperation with the presence of cheating behaviors[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 561-573.

[37] 高聪冲. 基于博弈论的区域综合能源型多微网优化运行研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2024.

Gao Congchong. Research on optimal operation of regional comprehensive energy-based multi-microgrid based on game theory [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2024.

[38] 樊晓伟, 王瑞妙, 杨海峰, 等. 计及源荷不确定的综合能源微电网集群优化运行[J]. 电力建设, 2024, 45(8): 128-139.

Fan Xiaowei, Wang Ruimiao, Yang Haifeng, et al. Optimization operation of integrated energy microgrid cluster considering source-load uncertainty [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(8): 128-139.

[39] Gao H J, Wang J Y, Liu Y B, et al. An improved ADMM-based distributed optimal operation model of AC/DC hybrid distribution

network considering wind power uncertainties [J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(2): 2201-2211.

收稿日期: 2025-11-07 修回日期: 2026-01-04

作者简介:



宋以宇

宋以宇(2001),男,硕士研究生,主要研究方向为微电网优化调度;

窦震海(1970),男,博士,副教授,通信作者,主要研究方向为电力系统负荷预测和电力系统优化调度,E-mail:douzhenhai@sdu.edu.cn;

李汝斌(2001),男,硕士研究生,主要研究方向为微电网优化调度;

徐浩(2000),男,硕士研究生,主要研究方向为微电网优化调度;

闫毅(2000),男,硕士研究生,主要研究方向为微电网优化调度;

陈佳佳(1987),男,博士,副教授,主要研究方向为电网弹性和灵活性、电力需求侧管理以及电价优化和控制。

(编辑 张小飞)

附录 A

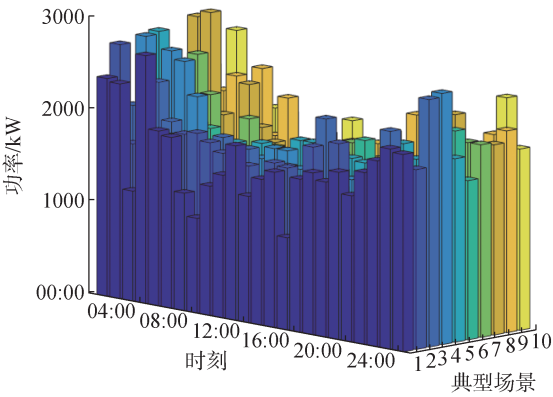


图 A1 IEM 1 典型能源出力场景
Fig. A1 IEM 1 typical energy output scenario

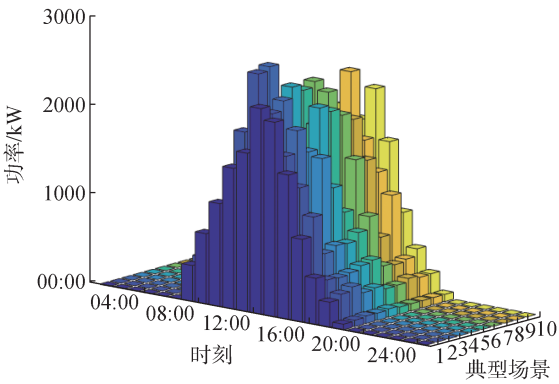


图 A2 IEM 2 典型能源出力场景
Fig. A2 IEM 2 typical energy output scenario

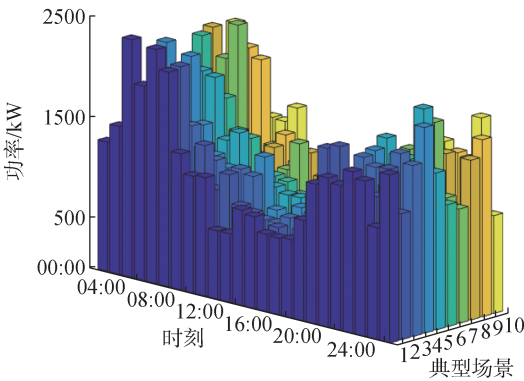


图 A3 IEM 3 典型能源出力场景
Fig. A3 IEM 3 typical energy output scenario

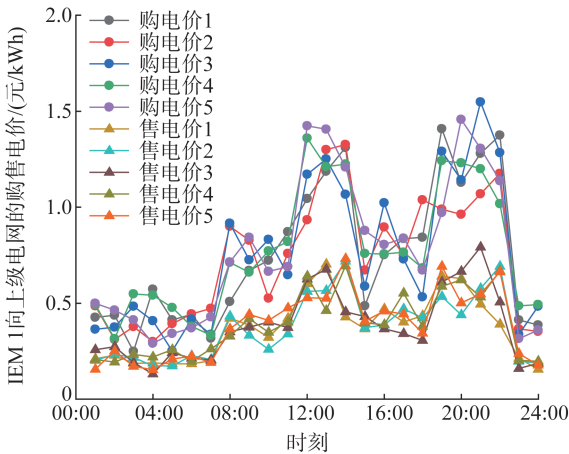


图 A4 IEM 1 向上级电网购售电价典型场景
Fig. A4 Typical scenario for electricity purchase and sale prices between IEM 1 and the higher-level grid

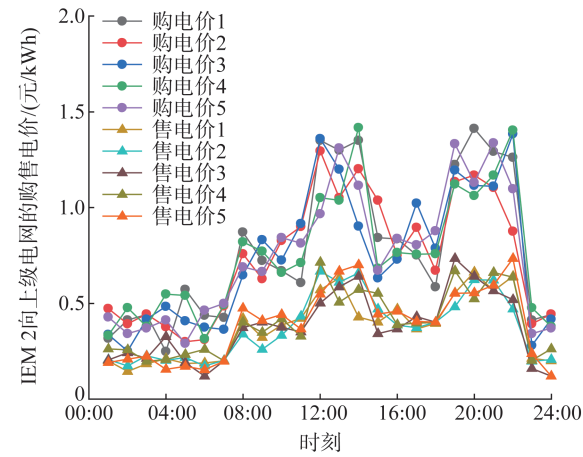


图 A5 IEM 2向上级电网购售电价典型场景

Fig. A5 Typical scenario for electricity purchase and sale prices between IEM 2 and the higher-level grid

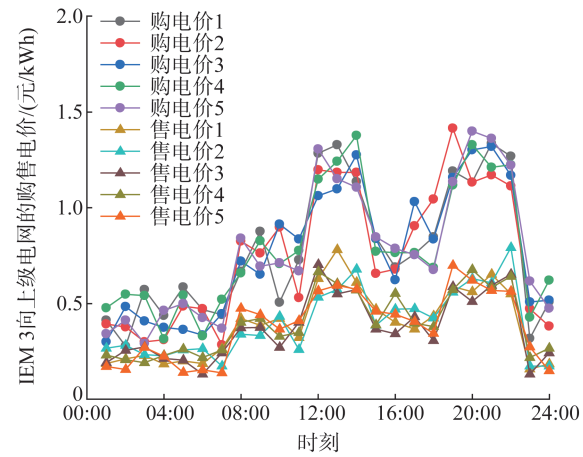


图 A6 IEM 3向上级电网购售电价典型场景

Fig. A6 Typical scenario for electricity purchase and sale prices between IEM 3 and the higher-level grid

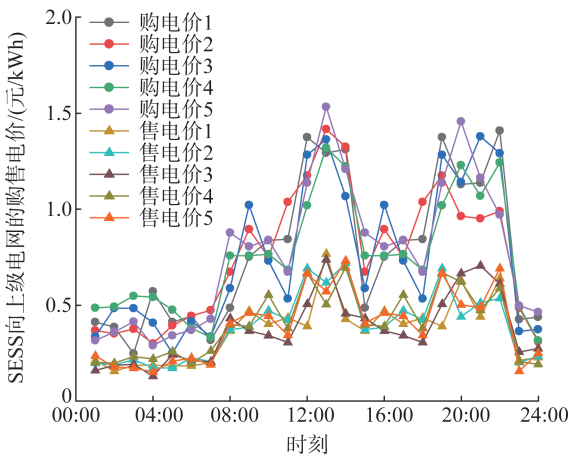


图 A7 SESS 电站向上级电网购售电价典型场景

Fig. A7 Typical scenario for electricity purchase and sale prices between SESS power station and the higher-level grid

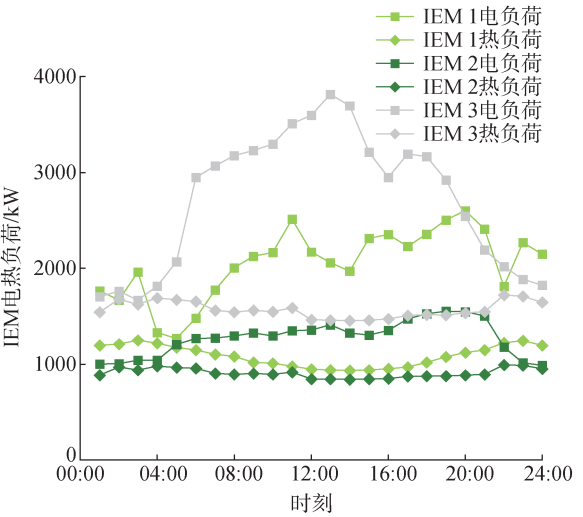


图 A8 IEM 电热负荷

Fig. A8 IEM electric heating load

附录 B

表 B1 系统参数

Table B1 System parameters

参数	数值	参数	数值
GT发电效率	0.35	储氢罐的容量/kg	600
天然气低热值/(kWh/m ³)	9.7	向上级电网购售电功率上限/kW	2000
GB产热效率	0.9	IEM与SESS交互功率上限/kW	1500
可削减电、热负荷比例	0.15、0.10	天然气单价/(元/m ³)	3.5
可转移电负荷比例	0.15	可削减电、热负荷调度成本系数/(元/kWh)	0.13、0.16
GT最大功率/kW	2000	可转移电负荷调度成本系数/(元/kWh)	0.01
GB最大功率/kW	500	SESS电站容量/kWh	4000
氢气高热值/(kJ/mol)	282	SESS电站最大充放电功率/kW	1500
EC、FC的工作效率	0.6、0.6	EC、FC的最大功率/kW	800、650

附录 C

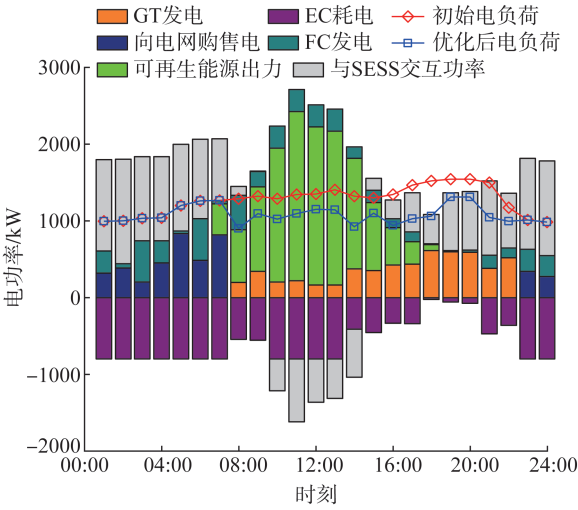


图 C1 IEM 2 电能优化结果
Fig. C1 IEM 2 energy optimization results

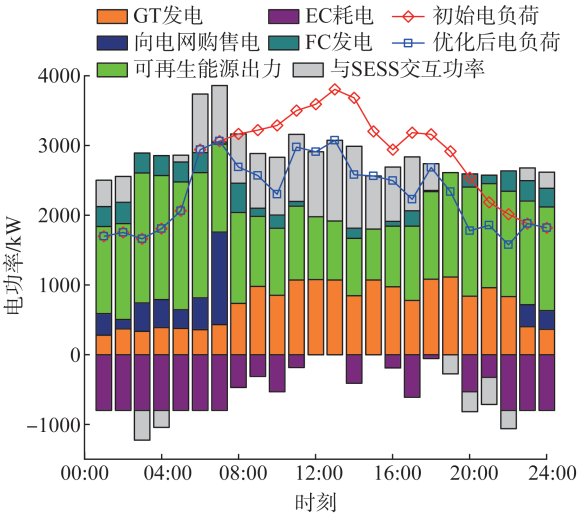


图 C3 IEM 3 电能优化结果
Fig. C3 IEM 3 energy optimization results

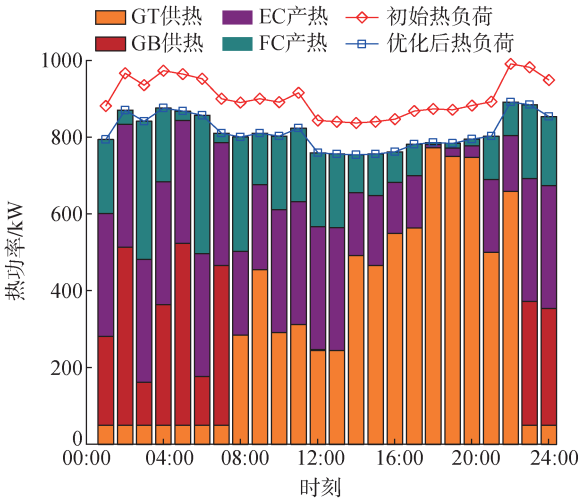


图 C2 IEM 2 热能优化结果
Fig. C2 IEM 2 thermal energy optimization results

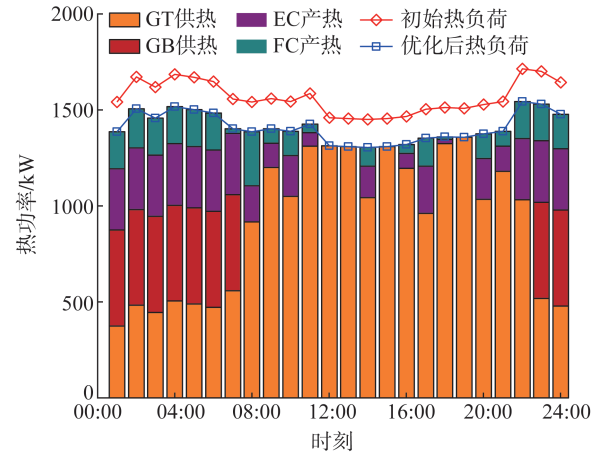


图 C4 IEM 3 热能优化结果
Fig. C4 IEM 3 thermal energy optimization results