第 50 卷 第 4 期：1392-1405　　高电压技术　　Vol.50, No.4: 1392-1405
2024 年 4 月 30 日　　High Voltage Engineering　　April 30, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230814

基于混合博弈的多微网-共享储能双层能量交易策略

杨冬锋[1]，王轶琳[1]，杨士慧[2]，姜　超[1]，刘晓军[1]
（1. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学)，吉林 132012;
2. 国网智能电网研究院有限公司，北京 102209）

摘　要：为解决用户侧分布式储能运营方式单一、成本较高、利用率较低等问题，提出了兼具电能自营及储能共享模式的多微网-共享储能联合运行方式，从电力市场的角度出发，针对所提方式下的能量交易问题，考虑各微网间的利益冲突和信息不对称，提出了一种基于混合博弈的双层能量交易策略。首先，构建以上层共享储能运营商收益最大化、下层综合能源微网聚合体自身效益最大化为目标的主从博弈-双层能量交易模型；其次，引入综合能源微网聚合体中各成员间的合作博弈，使得综合能源微网聚合体中各成员间进行点对点交易，建立了共享储能运营商与综合能源微网聚合体混合博弈优化模型，并基于纳什谈判理论，将综合能源微网间合作博弈转化为聚合体效益最大化与合作收益分配 2 个子问题，使得合作收益能够在各成员中得到合理分配。然后，采用二分法与交互式乘子法相结合的方法对所构造的多目标优化问题进行求解。算例仿真结果表明，所提交易策略有效提升了综合能源微网聚合体的整体效益，并降低了对共享储能运营商的依赖，验证了所提策略的可行性与有效性。
关键词：共享储能；综合能源微网聚合体；混合博弈；点对点交易；纳什谈判

Multi-microgrid and Shared Energy Storage Two-layer Energy Trading Strategy Based on Hybrid Game

YANG Dongfeng[1], WANG Yilin[1], YANG Shihui[2], JIANG Chao[1], LIU Xiaojun[1]
(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;
2. State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract：This paper presents a solution to address the limitations of single mode of operation, high cost, and low utilization of user-side distributed energy storage. A joint operation mode, called multi-microgrid-shared energy storage, is proposed, which combines electric energy self-management and energy storage sharing modes. The energy trading problem under this approach is tackled using a two-tier energy trading strategy based on hybrid game theory. The strategy considers the conflicting interests and information asymmetry among the microgrids. A master-slave game-two-tier energy trading model is constructed to maximize the revenue of the upper-level shared energy storage operator and the benefits of the lower-level integrated energy micro-grid aggregator. Additionally, a cooperative game is introduced among the members of the integrated energy microgrid aggregator to facilitate peer-to-peer transactions. A hybrid game optimization model between the shared energy storage operator and the integrated energy microgrid aggregator is established. Based on the Nash bargaining theory, the cooperation game is transformed into two sub-problems, namely, maximizing the benefits of the aggregates and distributing the cooperation benefits. The constructed multi-objective optimization problem is solved using a combination of the dichotomous method and the interactive multiplier method. Simulation results demonstrate that the proposed trading strategy improves the overall efficiency of the integrated energy microgrid aggregate, reduces dependence on shared energy storage operators, and validates the feasibility and effectiveness of the strategy.
Key words：shared energy storage; integrated energy microgrid aggregate; hybrid game; peer-to-peer transactions; Nash negotiations

——————————
基金资助项目：国家重点研发计划(2019YFB1505405)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2019YFB1505405).

0 引言

“双碳”目标背景下，如何发展清洁有效的储能方式，实现可再生能源的低碳高效利用，是未来能源系统中的重要研究方向[1]。然而，目前分布式储能投入成本高、实际利用率低[2]，这对用户一侧的分布式发电和储能的发展不利[3]。若能适当地共享储能，使其资源得到最大程度的利用，将会促进未来可再生能源与储能的合作。同时，综合能源微网系统通过不同能源间的耦合可提升系统内的综合能效与风光等可再生能源的上网率[4]。随着研究的深入，综合能源微网(integrated energy microgrid，IEM)往往会在同一配电区域组成多微网系统[5-6]，通过各子成员间的点对点(peer-to-peer，P2P)交易，可以有效地提高用户侧资源的灵活性与可再生能源消纳率，并降低微网系统的运行成本[7-8]。

储能作为能源转型的重要技术之一，受到了广泛关注。但在多微网系统中，传统的储能系统无法实现多个主体间的电能互补，且投资成本较高[9-10]。伴随着经济共享理念的出现，提出了共享储能的新型储能模式[11]。根据有关共享储能和用户的从属关系，将其划分为用户投建型[12]、用户共享运营商投建型[13]、用户共享已有分布式型[14]等类型共享储能。前 2 型经营模式的研究多集中于集中式能量的增长投资，第 3 型经营模式以“云”的形式聚集并分享使用者现有的分布式能量，从而将使用者在分布式能量中的利用率最大化。目前，已有学者将共享储能引入多微网系统。文献[15]引入共享储能抑制了多微网系统的净负荷波动，运用交互式乘子法(alternating direction multiplier method，ADMM)求解模型，改善了多微网系统的运行效益。但多微网系统中各子成员间属于不同的利益主体[16]，需要建立合理有效的调度策略，以寻求二者间的有效合作方式，提升系统效益。

现有研究常引入博弈模型来处理能源交易中复杂的利益关系，文献[17]利用主从博弈理论构建了多微网系统为领导者，负荷聚合商为跟随者的优化模型；文献[18]建立了基于主从博弈的求解和共享储能的综合能源微网优化模型，制定了用户与共享储能的收益双赢调度策略；文献[19]构建了基于合作博弈的共享氢储系统容量配置与成本分摊模型，提高了共享氢储系统的经济性，并保障了多微网系统的低碳性。主从博弈模型常用 Karush-Kuhn-Tucker(KKT)条件或者启发式算法进行求解，KKT 条件无法处理下层中存在的 0-1 变量，启发式算法要大量调用下层博弈模型致使计算时间大幅度增加[17]。且主从博弈的参与者都只寻求自身利益最大化，未考虑多微网系统内各子成员间的 P2P 交易，无法获得系统的最优综合效益[20]。合作博弈因其全局性的优势，可以兼顾整体与个体的利益，且纳什谈判作为合作博弈的重要组成部分，常被用于处理多主体利益分配问题[21]。文献[22]提出了基于纳什议价模型的合作博弈运行策略，并利用 ADMM 进行求解。

上述文献虽研究了共享储能及微网间电能交易的多微网系统优化，但还有以下不足：一方面多微网系统与共享储能间无法进行有效的互动；另一方面上述文献内的多微网系统只以固定电价与电网或共享储能进行电能交互，会降低多微网系统内成员参与需求响应与电能交互的积极性。为应对上述问题，本文引入共享储能运营商(shared energy storage operators，ESO)作为 IEM 聚合体的协调者和运营者，通过制定电能价格引导子微网间积极的进行响应。该模型需要同时优化多微网系统向 ESO 的购售电价格和多微网系统中各成员间的电能交互价格。

综上，本文提出了一种基于混合博弈的双层能量交易策略。主要贡献如下：

1）建立了内嵌 IEM 聚合体中各成员合作博弈的 ESO 与多微网系统主从博弈的混合博弈模型，上层模型以共享储能运营商收益最大为目标，下层 IEM 聚合体作为跟随者以其自身效益的最大化为目标构建多微网-共享储能系统双层能量交易模型。

2）利用纳什谈判理论分配多微网系统合作收益，将其等效为系统效益最大化与合作收益分配两个子问题，使得合作收益能够在各成员中得到合理的分配。

3）为提高模型的求解效率，本文采用二分法与交互式乘子法相结合的方法对所构造的多目标优化问题进行高效求解。

1 电能自营、储能共享的 IEM 聚合体-共享储能模型

参与电能自营及储能共享的利益主体包括上级电网、ESO 和 IEM 聚合体，具体框架如图 1 所示。IEM 内部包含电、热、气等多种能源，耦合了多种

能源转换与储存设备，通过与上级电网的能量交互，充分满足了系统内部的负荷需求[23-24]。聚合体内的微网可以向共享储能进行购售电行为，在微网与共享储能的交易过程中，当聚合体内子微网的可再生能源过多时，可通过向共享储能售电，随后共享储能制定合理的电能价格将电能卖给其他子微网。利用不同子微网间的能源传输，促进了可再生能源的就地消纳，减少了对配电网的电能依赖。

微网聚合体中各子微网内的设备主要包含了新能源、电储能、燃气锅炉(gas boilers，GB)、带电转气(power-to-gas，P2G)和碳捕集装置(carbon capture and storage，CCS)的热电联产(combined heat and power，CHP)机组。各 IEM 成员根据自身目标与资源特征，优化能源价格、交易电量与系统内机组出力，以满足自身电、热负荷需求。燃气锅炉所需的天然气由 IEM 从天然气商购买。

ESO 作为 IEM 聚合体的协调者和运营者，可以制定 IEM 聚合体向 ESO 的购售电价格。本文能源交易框架模型如图 2 所示。

当 IEM 聚合体成员电能过剩时，可通过 IEM 间电能交易将多余的电能售卖给聚合体内电能不足的成员，剩余的电能以售电价格出售给 ESO；当 IEM 聚合体中各成员电能不足时，可通过 IEM 间电能交易购买聚合体内其他成员的电能，不足的电能以购电价格向 ESO 购买。ESO 根据 IEM 聚合体的购售电量，通过电网电价与上网电价与上级电网交易，赚取差价获利。

2 基于 ESO 与 IEM 聚合体混合博弈的双层优化模型

2.1 混合博弈双层优化框架

本文构建了基于 ESO 与 IEM 聚合体混合博弈的双层优化模型，以兼顾 ESO 与 IEM 聚合体成员各自的利益。混合博弈双层优化框架如图 3 所示。

模型分为 2 个阶段：阶段 1 为上层 ESO 与 IEM 聚合体的主从博弈，ESO 以自身效益最大化为目标，根据 IEM 聚合体反馈的购售电需求量调整能源价格，并将所制定的能源价格，发送给阶段 2；阶段 2 为下层 IEM 聚合体内各子微网间的合作博弈模型，以各子微网间的合作效益最大化为目标，根据阶段 1 输入的电能价格，计算出合适的 IEM 间电能交易电量与交易价，各子微网确保在合作效益最大化的基础上，彼此合作获利，并将购售电量需求发

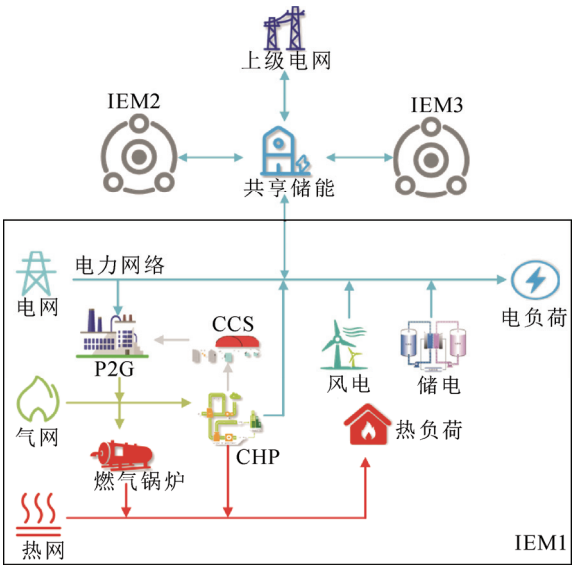


图 1 IEM 聚合体-共享储能联合优化模型

Fig.1 Joint optimization model of integrated energy microgrid aggregate and shared energy storage

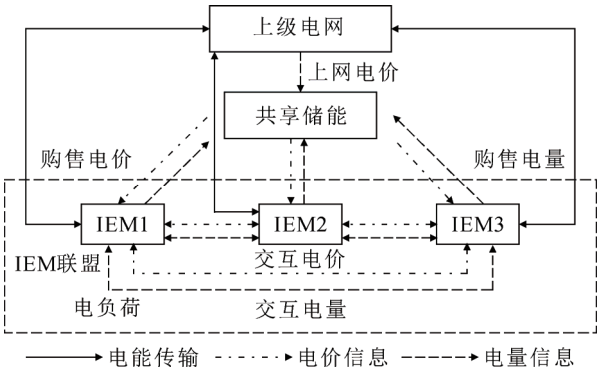


图 2 能源交易模型

Fig.2 Energy trading model

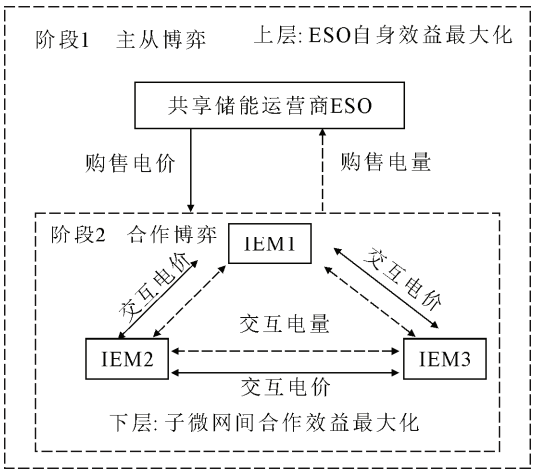


图 3 混合博弈双层优化框架

Fig.3 Dual-layer optimization framework of hybrid game

送回阶段 1。

双层混合博弈具体步骤如下：

上层：ESO 作为领导者与跟随者 IEM 聚合体进行主从博弈，ESO 以自身效益最大化为目标，IEM 聚合体以聚合体效益最大化为目标。经过博弈得出 ESO 的购电量、IEM 聚合体的购售电价、购售电量及 IEM 间电能交易量和机组出力。

下层：利用纳什谈判理论将 IEM 聚合体合作博弈问题分解为聚合体效益最大化(P1)与合作收益分配(P2) 2 个子问题。然后，根据 IEM 间具体的电能交易量，基于纳什谈判理论合理实现合作收益分配(P2)。最后，得出 IEM 间的电能交易价格。

2.2 基于 ESO 与 IEM 主从博弈的上层优化模型

2.2.1 博弈领导者 ESO 模型

1）目标函数

ESO 以自身效益最大化为目标，其包括与上级电网以及 IEM 聚合体进行购售电的成本与收益：

$$\max\left(U_{\mathrm{ESO}}(t)\right)=\sum_{t=1}^{24}\left(\begin{array}{l}\left(u_{\mathrm{ES}}(t)-u_{\mathrm{PS}}(t)\right)P_{\mathrm{S}}(t)-\\ \left(u_{\mathrm{EB}}(t)-u_{\mathrm{PB}}(t)\right)P_{\mathrm{B}}(t)\end{array}\right) \tag{1}$$

式中：$U_{\mathrm{ESO}}(t)$ 为 ESO 的综合效益；$u_{\mathrm{EB}}(t)$、$u_{\mathrm{ES}}(t)$ 分别为 t 时刻的电网电价和上网电价；$u_{\mathrm{PB}}(t)$、$u_{\mathrm{PS}}(t)$ 分别为 IEM 聚合体在 t 时刻从 ESO 购、售电的价格，其价格由 ESO 制定；$P_{\mathrm{B}}(t)$、$P_{\mathrm{S}}(t)$ 分别为 IEM 聚合体在 t 时刻向 ESO 的购、售电量。

IEM 聚合体的购售电量具体为：

$$P_{\mathrm{B}}(t)=\sum_{i=1}^{N}P_i^{\mathrm{BUY}}(t) \tag{2}$$

$$P_{\mathrm{S}}(t)=\sum_{i=1}^{N}P_i^{\mathrm{SELL}}(t) \tag{3}$$

式中：$P_i^{\mathrm{BUY}}(t)$、$P_i^{\mathrm{SELL}}(t)$ 分别为 IEM 在 t 时刻向 ESO 的购电量与售电量；N 为参与博弈的 IEM 总数。

2）约束条件

ESO 运行时应满足以下约束，即：

$$E_{\mathrm{ESO}}(t)=E_{\mathrm{ESO}}(t-1)+\left(\delta_{\mathrm{cha}}P_{\mathrm{ESO}}^{\mathrm{cha}}(t)-\frac{P_{\mathrm{ESO}}^{\mathrm{dis}}(t)}{\delta_{\mathrm{dis}}}\right) \tag{4}$$

$$E_{\mathrm{ESO}}(0)=E_{\mathrm{ESO}}(24) \tag{5}$$

$$0.1E_{\mathrm{ESO}}^{\max}\le E_{\mathrm{ESO}}(t)\le 0.9E_{\mathrm{ESO}}^{\max} \tag{6}$$

式中：$E_{\mathrm{ESO}}(t)$ 为 t 时刻共享储能的容量；$P_{\mathrm{ESO}}^{\mathrm{cha}}(t)$、$P_{\mathrm{ESO}}^{\mathrm{dis}}(t)$ 分别为 t 时刻共享储能的充、放电功率；δ_{cha}、δ_{dis} 分别为共享储能的充、放效率；$E_{\mathrm{ESO}}^{\max}$ 为共享储能的最大容量值。

ESO 所制定的购电价格与售电价格应满足以下约束，即：

$$u_{\mathrm{PB}}^{\min}\le u_{\mathrm{PB}}(t)\le u_{\mathrm{PB}}^{\max} \tag{7}$$

$$u_{\mathrm{PS}}^{\min}\le u_{\mathrm{PS}}(t)\le u_{\mathrm{PS}}^{\max} \tag{8}$$

式中：$u_{\mathrm{PB}}^{\max}$、$u_{\mathrm{PB}}^{\min}$ 分别为 IEM 聚合体购电价上、下限；$u_{\mathrm{PS}}^{\max}$、$u_{\mathrm{PS}}^{\min}$ 分别为 IEM 聚合体的售电价上、下限。

为了避免领导者 ESO 为了自身利益最大化而将 IEM 聚合体的购电价格 $u_{\mathrm{PB}}(t)$ 总是定为最高，将 IEM 聚合体的售电价格 $u_{\mathrm{PS}}(t)$ 定为最低的情况发生，需为 IEM 聚合体的购售电价格加以平均值约束，即：

$$\sum_{t=1}^{24}u_{\mathrm{PB}}(t)/24\le u_{\mathrm{PB}}^{\mathrm{ave}} \tag{9}$$

$$\sum_{t=1}^{24}u_{\mathrm{PS}}(t)/24\ge u_{\mathrm{PS}}^{\mathrm{ave}} \tag{10}$$

式中：$u_{\mathrm{PB}}^{\mathrm{ave}}$、$u_{\mathrm{PS}}^{\mathrm{ave}}$ 分别为 IEM 聚合体购售电价平均值约束。

2.2.2 博弈跟随者 IEM 聚合体模型

IEM 聚合体作为博弈的跟随者，通过 ESO 所制定的购、售电价，优化得到自身的购、售电量，自身机组出力以及 IEM 间电能交易的电量，并把购售电量反馈给 ESO。

1）目标函数

IEM 聚合体中各成员以自身的自身效益最大为目标，其中包括购售电收益、成员间的交互收益、需求响应成本、储能运维成本、燃气成本、CHP 总运行费用、弃风弃光惩罚成本以及各成员的碳交易成本：

$$\max\left(V_i(t)\right)=\sum_{i=1}^{24}\left(I_i^{\mathrm{ESO}}(t)+I_i^{\mathrm{TRADE}}(t)-C_i^{\mathrm{total}}(t)\right) \tag{11}$$

$$\begin{aligned}C_i^{\mathrm{total}}(t)=&C_i^{\mathrm{FUEL}}(t)+C_i^{\mathrm{DR}}(t)+C_i^{\mathrm{CAR}}(t)+\\&C_i^{\mathrm{CHP}}(t)+C_i^{\mathrm{ES}}(t)+C_i^{\mathrm{CUR}}(t)\end{aligned} \tag{12}$$

式中：$V_i(t)$ 为 IEMi 的综合收益；$I_i^{\mathrm{ESO}}(t)$、$I_i^{\mathrm{TRADE}}(t)$ 分别为 IEMi 的购售电收益和 IEM 间电能交互收益；$C_i^{\mathrm{total}}(t)$ 为 IEM 聚合体的总成本；$C_i^{\mathrm{FUEL}}(t)$、$C_i^{\mathrm{DR}}(t)$、$C_i^{\mathrm{CAR}}(t)$、$C_i^{\mathrm{CHP}}(t)$、$C_i^{\mathrm{ES}}(t)$、$C_i^{\mathrm{CUR}}(t)$ 分别为 IEMi 的燃气消耗成本、需求响应成本、碳交易成本、CHP 运行成本、储能运维成本、弃风弃光惩罚成本。具体成本见附录 A1 式(A1)—(A16)[25-26]。

2）约束条件

IEM 成员在 t 时刻的需求响应电负荷 $P_i^{\mathrm{L}}(t)$ 主要由预测负荷 $P_i^{\mathrm{PRE}}(t)$、可转移负荷 $P_i^{\mathrm{TRAN}}(t)$ 以及可削减负荷 $P_i^{\mathrm{CUT}}(t)$ 组成：

$$P_i^{\mathrm{L}}(t)=P_i^{\mathrm{PRE}}(t)+P_i^{\mathrm{TRAN}}(t)-P_i^{\mathrm{CUT}}(t) \tag{13}$$

可转移的电负荷需满足约束：

$$-P_{\max}^{\mathrm{TRAN}}(t)\le P_i^{\mathrm{TRAN}}(t)\le P_{\max}^{\mathrm{TRAN}}(t) \tag{14}$$

$$\sum_{t=1}^{T}P_i^{\mathrm{TRAN}}(t)=0 \tag{15}$$

式中：$P_{\max}^{\mathrm{TRAN}}(t)$ 为可转移负荷上限。

可削减电负荷需满足约束：

$$0\le P_i^{\mathrm{CUT}}(t)\le P_{\max}^{\mathrm{CUT}}(t) \tag{16}$$

式中：$P_{\max}^{\mathrm{CUT}}(t)$ 分别为最大的可削减电负荷。

相同的，IEM 各成员在 t 时刻需求响应热负荷 $Q_i^{\mathrm{L}}(t)$ 主要由预测热负荷 $Q_i^{\mathrm{PRE}}(t)$ 以及可削减负荷 $Q_i^{\mathrm{CUT}}(t)$ 组成：

$$Q_i^{\mathrm{L}}(t)=Q_i^{\mathrm{PRE}}(t)-Q_i^{\mathrm{CUT}}(t) \tag{17}$$

$$0\le Q_i^{\mathrm{CUT}}(t)\le Q_{\max}^{\mathrm{CUT}}(t) \tag{18}$$

式中：$Q_{\max}^{\mathrm{CUT}}(t)$ 为最大可削减热负荷。

(1) IEM 间 P2P 电能交易约束

P2P 的电能交易需要满足交易量在限制范围内的同时满足 IEM 各成员间的交易量相等，表示为：

$$-P_{\max}^{\mathrm{P2P}}(t)\le P_{i,j}^{\mathrm{P2P}}(t)\le P_{\max}^{\mathrm{P2P}}(t) \tag{19}$$

$$P_{i,j}^{\mathrm{P2P}}(t)=P_{j,i}^{\mathrm{P2P}}(t) \tag{20}$$

式中：$P_{i,j}^{\mathrm{P2P}}(t)$ 为 IEMi 在 t 时刻与 IEMj 的电能交易电量；$P_{\max}^{\mathrm{P2P}}(t)$ 为 t 时刻 IEM 成员间的最大交互量。

(2) IEM 电功率平衡约束

$$\begin{aligned}&P_i^{\mathrm{CHP}}(t)+P_i^{\mathrm{NEW}}(t)+P_i^{\mathrm{F}}(t)=\\&P_i^{\mathrm{SELL}}(t)+P_i^{\mathrm{L}}(t)+P_i^{\mathrm{C}}(t)+\sum_{j=1,j\ne i}^{N}P_i^{\mathrm{P2P}}(t)\end{aligned} \tag{21}$$

式中：$P_i^{\mathrm{CHP}}(t)$ 为 t 时刻 CHP 放电功率；$P_i^{\mathrm{NEW}}(t)$ 为 IEMi 在 t 时刻的新能源出力；$P_i^{\mathrm{C}}(t)$、$P_i^{\mathrm{F}}(t)$ 分别为电储能的充、放电功率。具体的电功率平衡约束见附录 A2。

(3) IEM 热功率平衡约束

$$Q_i^{\mathrm{GB}}(t)+Q_i^{\mathrm{CHP}}(t)=Q_i^{\mathrm{L}}(t)+\sum_{j=1,j\ne i}^{N}Q_i^{\mathrm{P2P}}(t) \tag{22}$$

式中：$Q_i^{\mathrm{GB}}(t)$、$Q_i^{\mathrm{CHP}}(t)$ 分别为 GB 与 CHP 输出的热功率；$Q_i^{\mathrm{P2P}}(t)$ 为 IEM 成员间交互的热功率。

2.3 新能源不确定性模型

新能源不确定性对 IEM 聚合体的优化运行有着不可忽视的影响。本文中新能源的发电功率为：

$$P_{\mathrm{NEW}}(t)+P_{\mathrm{NEW,cur}}(t)=P_{\mathrm{NEW}}^{\mathrm{f}}(t) \tag{23}$$

式中：$P_{\mathrm{NEW}}(t)$ 为新能源的发电功率；$P_{\mathrm{NEW,cur}}(t)$ 为弃风、弃光功率；$P_{\mathrm{NEW}}^{\mathrm{f}}(t)$ 为新能源的预测发电功率。

新能源出力存在不确定性，根据文献[27]可知，本文将新能源出力的实际值看成预测值与随机误差之和，且认为误差遵循方差为 σ_{NEW} 的标准正态分布，即：

$$P_{\mathrm{NEW}}(t)\sim P_{\mathrm{NEW}}^{\mathrm{f}}(t)+N(0,\sigma_{\mathrm{NEW}}) \tag{24}$$

利用机会约束将式(21)转换为新能源不确定性下的电功率平衡约束：

$$\begin{aligned}&\eta\le P_{\mathrm{r}}(P_i^{\mathrm{CHP}}(t)+P_i^{\mathrm{NEW}}(t)+P_i^{\mathrm{F}}(t)-P_i^{\mathrm{SELL}}(t)-\\&P_i^{\mathrm{L}}(t)-P_i^{\mathrm{C}}(t)-\sum_{j=1,j\ne i}^{N}P_i^{\mathrm{P2P}}(t)\ge 0)\end{aligned} \tag{25}$$

式中：η 为置信概率水平；$P_{\mathrm{r}}(\cdot)$ 为其中条件满足的概率。并把随机变量的概率累计分布函数视为 F，将式(25)转换为：

$$\begin{aligned}&F^{-1}(\eta)\le P_i^{\mathrm{CHP}}(t)+P_i^{\mathrm{NEW}}(t)+P_i^{\mathrm{F}}(t)-P_i^{\mathrm{SELL}}(t)-\\&P_i^{\mathrm{L}}(t)-P_i^{\mathrm{C}}(t)-\sum_{j=1,j\ne i}^{N}P_i^{\mathrm{P2P}}(t)\end{aligned} \tag{26}$$

遵循 F 的计算方法[28]，将式(26)转换为：

$$\begin{aligned}&\sqrt{\sigma_{\mathrm{NEW}}^2}P_i^{\mathrm{CHP}}(t)+P_i^{\mathrm{NEW}}(t)+P_i^{\mathrm{F}}(t)-P_i^{\mathrm{SELL}}(t)-\\&P_i^{\mathrm{L}}(t)-P_i^{\mathrm{C}}(t)-\sum_{j=1,j\ne i}^{N}P_i^{\mathrm{P2P}}(t)\ge\theta^{-1}(\eta)\sqrt{\sigma_{\mathrm{NEW}}^2}\end{aligned} \tag{27}$$

式中：$\theta^{-1}(\eta)$ 为标准正态分布的反函数。

2.4 基于纳什谈判理论的 IEM 聚合体下层优化模型

IEM 聚合体以聚合体效益最大化为目标，通过彼此合作来对 ESO 的决策进行响应。IEM 聚合体既彼此合作，又相互独立，各子微网在运行过程中要保证自身效益不会受损。为此，本文引入纳什谈判理论作为微网聚合体内合作博弈的一个分支，有效地实现 IEM 聚合体内各子微网间的合理互动，彼此收益。本文构建的 IEM 聚合体纳什谈判模型如式(28)所示，其乘积的解就是合作的 pareto 均衡解[28]。

$$\begin{cases}\max\left(\prod_{i=1}^{N}\left(U_i-U_i^0\right)\right)\\ \text{s.t.}\quad U_i\ge U_i^0\end{cases} \tag{28}$$

式中：U_i 为 IEMi 参与谈判获得的效益；U_i^0 为 IEMi 未参与谈判获得的效益，即谈判破裂点。

2.4.1 子问题(P1)聚合体效益最大化

$$\begin{cases}\max\left(U^{\mathrm{IEM}}\right)=\sum_{i=1}^{N}\left(I_i^{\mathrm{ESO}}-\left(\begin{matrix}C_i^{\mathrm{FULL}}+C_i^{\mathrm{DR}}+C_i^{\mathrm{CAR}}+\\C_i^{\mathrm{CHP}}+C_i^{\mathrm{CS}}\end{matrix}\right)\right)\\ \text{s.t. 式(13)、(A1)—(A22)}\end{cases} \tag{29}$$

式中：U^{IEM} 为聚合体合作效益；C_i^{CS} 为储能的使用成本。

2.4.2 子问题(P2)合作收益分配

$$\begin{cases}\max \sum_{i=1}^{N}\ln\left(\left(\sum_{t=1}^{24}\sum_{j=1,j\neq i}^{N}\left(u_{i-j,t}p_{i-j,t}^{\mathrm{P2P}^*}\right)+U_i^{\mathrm{IEM}*}\right)-U_i^0\right)\\ \text{s.t.}\begin{cases}\sum_{t=1}^{24}\sum_{j=1,j\neq i}^{N}\left(u_{i-j,t}p_{i-j,t}^{\mathrm{P2P}^*}\right)+U_i^{\mathrm{IEM}^*}\geq U_i^0\\ u_t^{\mathrm{PS}^*}\leq u_{i-j,t}\leq u_t^{\mathrm{PB}^*}\\ U_i^{\mathrm{IEM}^*}=I_i^{\mathrm{ESO}^*}-\left(C_i^{\mathrm{FULL}*}+C_i^{\mathrm{DR}*}+C_i^{\mathrm{CAR}*}+C_i^{\mathrm{CHP}^*}+C_i^{\mathrm{CS}^*}\right)\end{cases}\end{cases}\tag{30}$$

式中：上标为*的变量表示子问题(P1)中所求得的最优解；$U_i^{\mathrm{IEM}*}$ 表示在子问题(P1)中所求得的 IEMi 的效益。

3 混合博弈双层优化模型求解

本文构建的混合博弈双层优化模型共有上、下 2 层，上层为主从博弈，下层为合作博弈，需要分别对上、下 2 层模型进行求解。因此，本文分别采用二分法求解上层主从博弈(P1)模型，以及 ADMM 求解下层合作博弈(P2)模型。

3.1 二分法分布式优化算法求解上层主从博弈(P1)模型

上层的 ESO 与 IEM 聚合体的主从博弈模型自身也是一个双层优化模型，常使用 KKT 条件或者启发式算法求解。但由于本文下层模型存在 0-1 变量，无法通过 KKT 条件将下层变量转变为约束。同时，启发式算法在求解过程中，能源价格会在一定范围内不断波动，而这个波动缩小的非常缓慢，还可能会出现相邻的 2 次边界结果完全相同的情况，导致其求解双层优化耗时较长。对此，本文使用二分法分布式优化算法求解双层优化。

设第 k 次迭代中 t 时刻能源价格为 $x_{k,t}$，上下限分别为：

$$x_t^{\max}=\max\left(x_{k,t},x_{k-1,t}\right)\tag{31}$$

$$x_t^{\min}=\min\left(x_{k,t},x_{k-1,t}\right)\tag{32}$$

将 $\left[x_t^{\min},x_t^{\max}\right]$ 视为 $x_{k,t}$ 的初始运行区间，最优状态也在此区间内，并设置如下收敛条件：

$$\left|u_{t,k+1}^{\mathrm{PB}}-u_{t,k}^{\mathrm{PB}}\right|/u_{t,d}^{\mathrm{PB}}\leq\xi\tag{33}$$

$$\left|u_{t,k+1}^{\mathrm{PS}}-u_{t,k}^{\mathrm{PS}}\right|/u_{t,k}^{\mathrm{PS}}\leq\xi\tag{34}$$

式中：$u_{t,k}^{\mathrm{PB}}$、$u_{t,k}^{\mathrm{PS}}$ 分别为第 k 次迭代中 ESO 在 t 时刻给 IEM 聚合体制定的购售电价格。

具体步骤如下：

步骤 1：设置 $x_{k,t}=(x_t^{\max}+x_t^{\min})/2$，$k=k+1$，然后转到步骤 2。

步骤 2：将约束 $x_{k,t}=x_t^*$ 添加到上层 ESO 定价模型中，求解所提出的双层模型，并将当前运算区间一分为二，如果满足收敛条件，则终止互助，否则，将 k 增加 1，进入步骤 3。

步骤 3：将约束 $x_t^{\min}\leq x_{k,t}\leq x_t^{\max}$ 添加到下层 IEM 聚合体模型中，求解所提出的模型，获取包含最优状态的新区间。如果满足收敛条件，则终止迭代。否则，请转到步骤 4。

步骤 4：如果 $x_{k,t}=x_{k,t}^{\max}$，则最优状态在区间 $\left[x_t^*,x_t^{\max}\right]$ 内。通过 $x_t^{\min}=x_t^*$ 来更新下限。否则，通过 $x_t^{\max}=x_t^*$ 来更新上限。转到步骤 1，并重复这些步骤，直到满足停止条件。

在满足收敛条件之后，将阶段 1 计算得到的 ESO 制定的电能价格 u_t^{PB} 与 u_t^{PS}、IEM 间电能交易电量 $p_{i-j,t}^{\mathrm{P2P}}$ 作为阶段 2 计算的初始参数输入到阶段 2，计算 IEM 间电能交易价格。

3.2 ADMM 求解下层合作博弈(P2)

IEMi 和 IEMj 模型中的 P2P 电能交易价格 $u_{i-j,t}$ 相互耦合，需要对其进行解耦以保证各 IEM 间的交互价格相等，即：

$$u_{i-j,t}=u_{j-i,t}=z_{i-j,t}\tag{35}$$

式中：$z_{i-j,t}$ 为 IEMi 和 IEMj 间能源交互价格的共享变量。

由于共享变量的存在，模型难以直接求解。ADMM 可以将复杂问题分解成多个小问题，通过求解单个变量以简化计算。因此将该目标函数取相反数，运用 ADMM 对模型进行求解。

分解所得到的 IEMi 分布式优化模型为：

$$\begin{cases}\min L_i=-\ln\left(U_i^0-(u_{i-j,t}p_{i-j,t}^{\mathrm{P2P}^*})+U_i^*\right)+\\ \sum_{i=1}^{24}\sum_{j=1,j\neq i}^{N}\left(\omega_{i-j,t}(u_{i-j,t}^{\mathrm{P2P}}-z_{i-j,t})+\frac{\rho}{2}\left\|u_{i-j,t}^{\mathrm{P2P}}-z_{i-j,t}\right\|_2^2\right)\\ \text{s.t.}\begin{cases}\sum_{i=1}^{24}(u_{i-j,t}p_{i-j,t}^{\mathrm{P2P}^*})+U_i^*\geq U_i^0\\ U_t^{\mathrm{PS}*}\leq u_{i-j,t}\leq U_t^{\mathrm{PB}*}\end{cases}\end{cases}\tag{36}$$

式中：$\omega_{i-j,t}$ 表示 IEMi 向 IEMj 进行交互的对偶变量；ρ 表示问题的惩罚因子。

本文的混合博弈模型计算流程如图 4 所示，阶段 1 通过 yalmip 调用 cplex 求解每一层的目标函数，通过二分法进行循环迭代并得到 ESO 指定的售电价格、IEM 聚合体购售电量、IEM 聚合体机组优化结果和 IEM 间电能交易电量，并将购售电价格和

IEM 间电能交易电量输入阶段 2。阶段 2 通过 ADMM 求解 IEM 间电能交易价格。

4 算例

本章节通过算例仿真验证所提模型的合理性。模型所用到的参数列于附录 B 中，ESO 的购电价格与上网电价如图 5 所示，IEM 电热负荷和新能源出力如附图 C 所示。ESO 与 IEM 相关参数如附录 B 表 B1 所示，二分法收敛系数设为 0.01，ADMM 收敛系数设为 0.001。算例仿真通过 matlab 平台使用 yalmip 调用 cplex 求解器，利用二分法分布式优化算法结合 ADMM 求解模型。

4.1 方案对比

为了验证本文所提方法的可行性和有效性，将考虑合作博弈即本文所提方法(方案 1)与只考虑 ESO 和 IEM 主从博弈不考虑微网间合作博弈(方案 2)的方案进行对比，对比结果如表 1、表 2 所示。

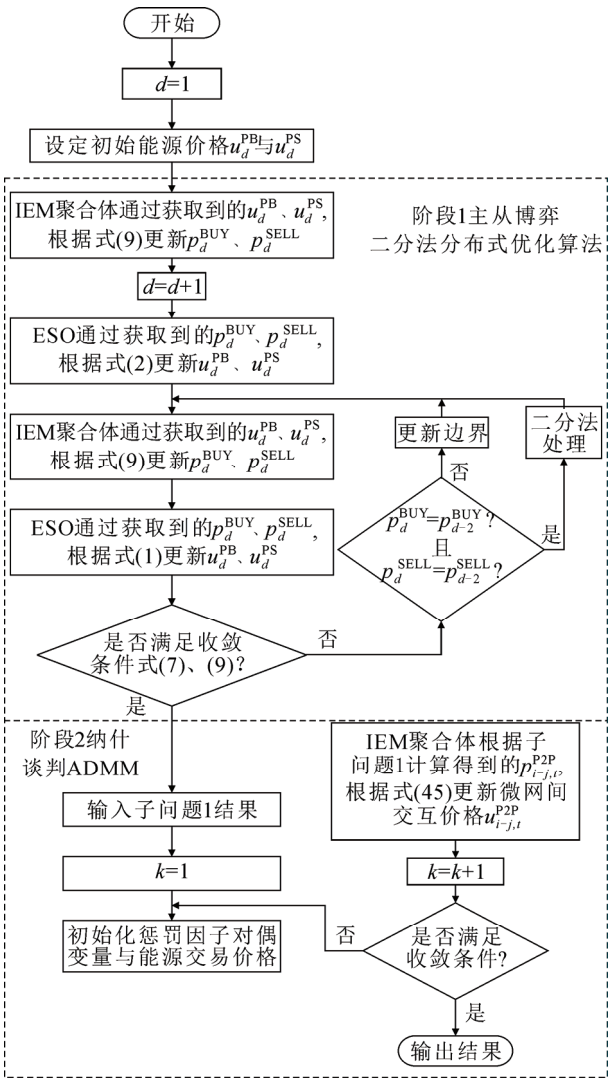


图 4 混合博弈模型计算流程图

Fig.4 Calculation flow chart of hybrid game model

通过对比可以看出本文所提方法即方案 1 较方案 2 的 IEM 聚合体总收益提升了 4299.20 元，这是因为当考虑混合博弈时，聚合体中各成员通过 P2P 电能交易实现多能互补使得聚合体总收益有所提升；而 ESO 的最终受益在本文所提方法中较方案 2 的收益降低 3257.12 元，这是因为在考虑混合博弈后 IEM 对 ESO 的依赖降低，进而使得 ESO 的收益降低；IEM1 效益提升了 1433 元，IEM2 效益提升了 1433.10 元，IEM3 效益提升了 1433.10 元，这是

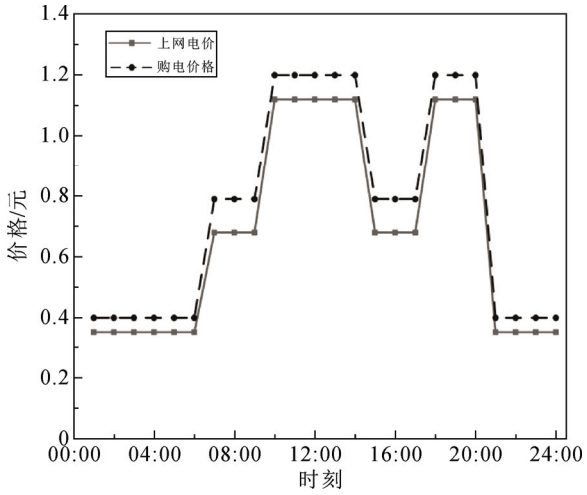


图 5 上级电网能源价格

Fig.5 Higher-level grid energy prices

表 1 2 种方案下的运行结果

Table 1 Operation results under two schemes

场景	微网	IEM 最终收益/元	IEM 交互收益/元	IEM 总收益/元	ESO 最终收益/元
1	1	−50 663.7	−3846	−132 221.3	15 093.2
	2	−37 369.2	5094		
	3	−44 188.3	−1246		
2	1	−52 096.7	0	−136 520.5	18 350.3
	2	−38 802.3	0		
	3	−45 621.4	0		

表 2 合作前后运行效益结果

Table 2 Results of operational benefits before and after cooperation

IEM	合作前收益/元	合作后收益/元	最终效益/元	提升效益/元
1	−52 096.72	−46 817.72	−50 663.72	1433.00
2	−38 802.34	−32 463.48	−37 369.24	1433.10
3	−45 621.42	−42 942.41	−44 188.32	1433.10

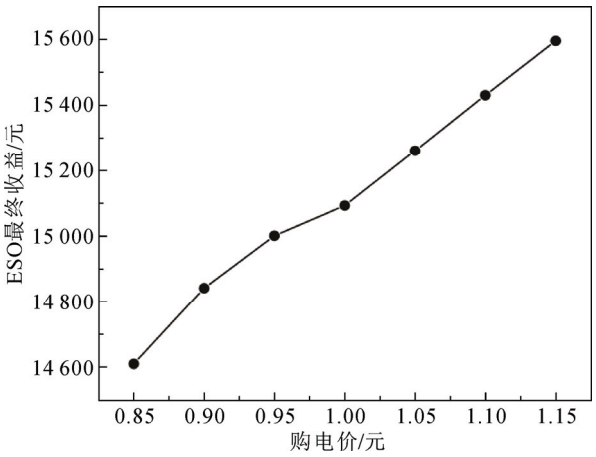


图 6 电价波动敏感性分析

Fig.6 Electricity price fluctuation sensitivity analysis

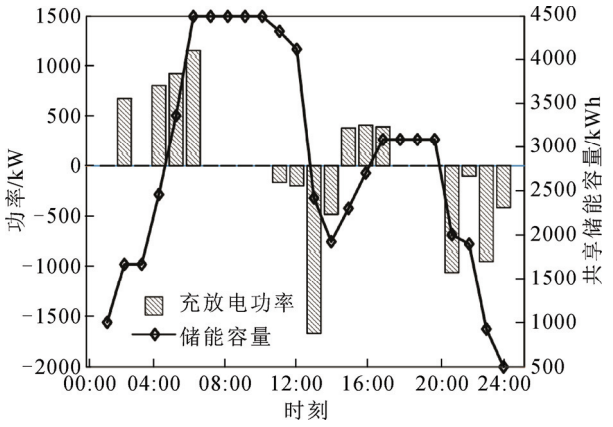


图 7 共享储能充放电功率与电量状态

Fig.7 State of charge-discharge power and electric quantity of shared energy storage

因为纳什谈判的引入使得聚合体总成本降低的同时、聚合体各成员的效益有所提升，进而使得合作收益公平分配。通过图 6 可知，ESO 的最终收益随着购电价的增加而增加。

4.2 混合博弈后结果分析

4.2.1 共享储能运行结果分析

共享储能与 IEM 聚合体间的交互功率如图 7 所示。共享储能的最大、最小容量分别为 4500 kWh 和 500 kWh，最大充放功率为 3000 kW。

由图 7 可知，共享储能在一天内的大多时段与 IEM 聚合体进行了电能交互，来维持整个互联系统的能量平衡。共享储能在 02:00、04:00、05:00、06:00 时达到了最大充电功率，并在 06:00 时达到最大储能容量；在 13:00、21:00、23:00 时达到了最大放电功率，并在 24:00 时处于最小储能容量。其余时段共享储能通过与 IEM 聚合体间的电量买入、卖出来维持电能平衡。一天内共享储能达到了 1 次满充和一次满放行为。共享储能给微网聚合体制定电价如图 8 所示。

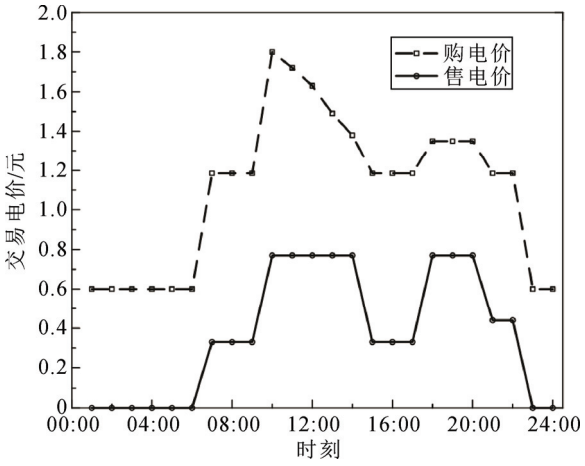


图 8 共享储能制定电价

Fig.8 Shared storage sets the price of electricity

4.2.2 交易结果分析

ESO 对 IEM 聚合体指定的交互电价图见附录 D 图 D1，由图 D1 可以看出：ESO 对 IEM 聚合体制定的购电价格在 07:00 时开始升高；在 10:00 时达到峰值电价，高峰电价持续时段为 10:00—14:00；在 15:00 时开始 ESO 制定的电价维持在较低水平；在 18:00—20:00 时段，随着负荷用能的增加，ESO 对于 IEM 聚合体指定的购电价格增高；在 23:00—24:00 与 01:00—06:00 低用能时段，ESO 制定的购电价格也达到最低水平。IEM 各成员交易的电价均小于 ESO 给 IEM 指定的购电价格，这样才能满足 IEM 成员通过 IEM 间电能交易选择合作。也正因为各 IEM 聚合体成员有自主定价能力，所以 IEM 聚合体在保障各成员利益的同时，也可以与 ESO 有更好的议价权利。

4.2.3 优化结果分析

IEM1 优化后的电功率平衡图见附录 D 图 D2、热功率平衡图见附录 D 图 D3。

由图 D2、图 D3 可知，在 01:00—06:00 与 23:00—24:00 时段，IEM1 电负荷最低，ESO 制定的购电能价格最低，IEM1 选择从价格较低 ESO 购买电能而不是自行产电，剩余的电量由储能设备储存；在 21:00—23:00 时段，由于电热负荷需求较低，ESO 指定的购电价格较低且各聚合体成员间交互的电价、热价较低，因此该时段在满足自身用能需

求后 IEM1 向其他成员售出剩余的电能及热能；在 07:00—09:00、15:00—17:00 时段，由于电、热负荷的需求较高，而 ESO 制定的购电价格也相对较高，因此该时段 IEM1 的电能主要由 CHP 提供，热负荷需求主要靠 CHP 满足；在 10:00—14:00 时段负荷需求达到最高，此时段内 ESO 指定的购电价格也达到峰值，因此在此时段内 IEM1 通过自身出力来满足用能需求，然而 CHP 的出力有限，因此为了满足自身电能需求储能设备开始放电。

4.2.4 IEM 间交互结果分析

图 9、图 10 分别为各聚合体成员在各时段交互的电功率、热功率。

由图 9 可知，在 10:00—14:00 时段电负荷最为紧张，此时 IEM1 向 IEM2 和 IEM3 购买电能；在 22:00—23:00 时段，电负荷需求较轻松，IEM1 向 IEM3 出售电能。由图 10 可知，在 08:00—10:00 时段热负荷需求较大，此时段 IEM1 向 IEM2 和 IEM3 购买热能；在 22:00—23:00 时段热负荷需求较少，此时段 IEM1 向 IEM2 和 IEM3 出售热能。

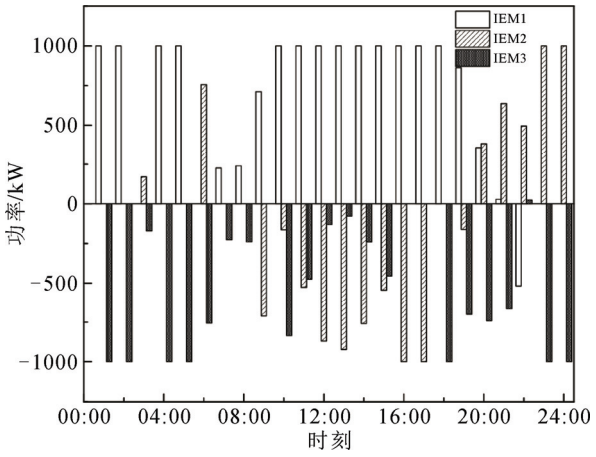


图 9 微网间交互电功率

Fig.9 Interactive power between microgrids

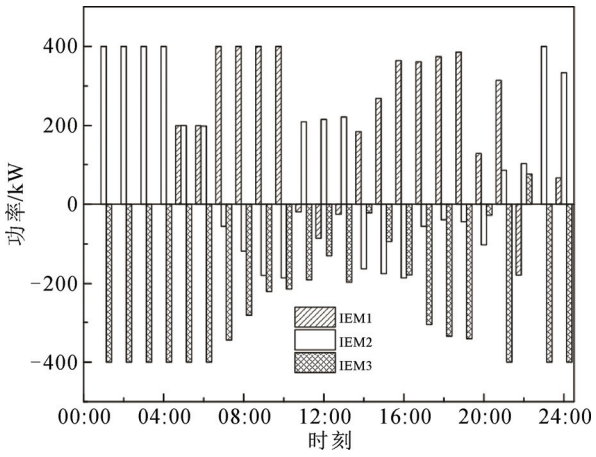


图 10 微网间交互热功率

Fig.10 Interactive thermal power between microgrids

仿真结果表明，本文所提的混合博弈模型有效处理了 IEM 聚合体的优化调度与利益分配，实现了 IEM 聚合体的合作运行，优化结果可用于 IEM 聚合体日运行调度。

4.3 算法对比

不同迭代算法的优化结果对比见表 3，由此可见，二分法在优化在 3 者中的优化效果最好。不同迭代算法的迭代次数与 ESO 收益对比如图 11 所示。

本文使用的二分法分布式优化算法有效地减少迭代次数与优化时间。由此可以看出在解决本文所提双层优化问题上，二分法分布优化算法充分展现了其优越性，但在其他启发式算法擅长的优化问题上二分法可能无法使用。

5 结论

1）本文所构建的混合博弈模型在保证 ESO 与 IEM 聚合体协调运行的同时，实现了 ESO 的综合效益最大化与 IEM 聚合体各成员间的收益最大化，分别为 15 093.2 元和−132 221.3 元。

表 3 不同算法优化结果对比

Table 3 Comparison of optimization results of different algorithms

优化算法	迭代次数	迭代时间/s	ESO 收益/元	IEM 聚合总效益/元
二分法	20	18.4	15 093.2	−132 221.3
灰狼算法	336	316.8	14 651.6	−136 427.2
蚁群算法	1544	1232.5	13 897.3	−141 429.3

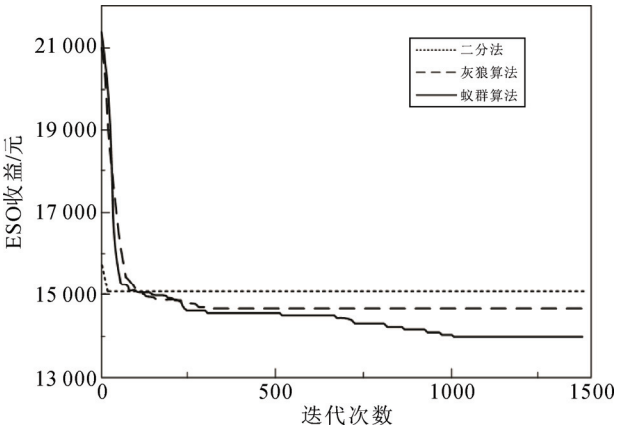


图 11 不同算法迭代效果对比

Fig.11 Different algorithm iteration effect comparison

2）在 IEM 聚合体系统中引入共享储能后，通过共享储能与 IEM 聚合体间的整体优化，加强了各微网间的功率交互，改善了 IEM 聚合体系统的运行成本。

3）IEM 间电能交易的引入可以在原本的交互基础上进一步引导 IEM 成员积极进行响应，减少 IEM 聚合体的运行成本，为 4299.20 元，降低 IEM 聚合体对电网的依赖。

4）利用二分法结合 ADMM 算法高效地求解了本文构建的混合博弈模型，其中二分法共迭代了 20 次，耗时 18.4 s，具有极好的收敛性，验证了所提模型的合理性和有效性。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 徐艳春，刘海权，孙思涵，等. 计及混合能源共享站的多微网系统双层混合整数规划[J]. 中国电机工程学报，2023，43(23)：9136-9149.
XU Yanchun, LIU Haiquan, SUN Sihan, et al. Bi-level mixed integer programming of multi-microgrid system considering the hybrid energy sharing station[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(23): 9136-9149.

[2] 戴 赛，李宇轩，孙志祥，等. 分布式储能线上共享优化匹配交易模式[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2515-2522.
DAI Sai, LI Yuxuan, SUN Zhixiang, et al. Online sharing optimization matching transaction mode for distributed energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2515-2522.

[3] 王守相，张善涛，王 凯，等. 计及分时电价下用户需求响应的分布式储能多目标优化运行[J]. 电力自动化设备，2020，40(1)：125-132.
WANG Shouxiang, ZHANG Shantao, WANG Kai, et al. Multi-objective optimal operation of distributed energy storage considering user demand response under time-of-use price[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 125-132.

[4] 葛磊蛟，范延赫，来金钢，等. 面向低碳经济的人工智能赋能微电网优化运行技术[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2219-2238.
GE Leijiao, FAN Yanhe, LAI Jingang, et al. Artificial intelligence enabled microgrid optimization technology for low carbon economy[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2219-2238.

[5] 乔学博，杨志祥，李 勇，等. 计及两级碳交易和需求响应的多微网合作运行优化策略[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2573-2583.
QIAO Xuebo, YANG Zhixiang, LI Yong, et al. Optimization strategy for cooperative operation of multi-microgrids considering two-level carbon trading and demand response[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2573-2583.

[6] 顾 欣，王 琦，胡云龙，等. 基于纳什议价的多微网综合能源系统分布式低碳优化运行策略[J]. 电网技术，2022，46(4)：1464-1475.
GU Xin, WANG Qi, HU Yunlong, et al. Distributed low-carbon optimal operation strategy of multi-microgrids integrated energy system based on Nash bargaining[J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1464-1475.

[7] 张 凡，高红均，吴子豪，等. 局域能源市场多产消者 P2P 交易框架设计[J]. 电力自动化设备，2022，42(12)：17-25.
ZHANG Fan, GAO Hongjun, WU Zihao, et al. Design of P2P trading framework for multiple prosumers in local energy market[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(12): 17-25.

[8] 陈修鹏，李庚银，周 明，等. 考虑新能源不确定性和点对点交易的配网产消者分布式优化调度[J]. 电网技术，2020，44(9)：3331-3338.
CHEN Xiupeng, LI Gengyin, ZHOU Ming, et al. Distributed optimal scheduling for prosumers in distribution network considering uncertainty of renewable sources and P2P trading[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3331-3338.

[9] 刘超凡，韩 恺，王永真，等. 计及共享储能分布式多能源系统的多目标优化[J/OL]. 电测与仪表 2022：1-11[2023-03-29]. http://kns.cnki. net/kcms/detail/23.1202. TH. 20220602.1621.004. html.
LIU Chaofan, HAN Kai, WANG Yongzhen, et al. Multi-objective optimization of distributed multi-energy system considering shared energy storage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022: 1-11[2023-03-29]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH. 20220602. 1621.004. html.

[10] 吴盛军，刘建坤，周 前，等. 考虑储能电站服务的冷热电多微网系统优化经济调度[J]. 电力系统自动化，2019，43(10)：10-18.
WU Shengjun, LIU Jiankun, ZHOU Qian, et al. Optimal economic scheduling for multi-microgrid system with combined cooling, heating and power considering service of energy storage station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10): 10-18.

[11] 谢雨龙，罗逸飚，李智威，等. 考虑微网新能源经济消纳的共享储能优化配置[J]. 高电压技术，2022，48(11)：4403-4413.
XIE Yulong, LUO Yiyang, LI Zhiwei, et al. Optimal allocation of shared energy storage considering the economic consumption of microgrid new energy[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4403-4413.

[12] CHAKRABORTY P, BAEYENS E, POOLLA K, et al. Sharing storage in a smart grid: a coalitional game approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4379-4390.

[13] XIAO J W, YANG Y B, CUI S, et al. A new energy storage sharing framework with regard to both storage capacity and power capacity[J]. Applied Energy, 2022, 307: 118171.

[14] LIU D, CAO J W, LIU M S. Joint optimization of energy storage sharing and demand response in microgrid considering multiple uncertainties[J]. Energies, 2022, 15(9): 3067.

[15] 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. Optimal configuration of shared energy storage for multi-microgrid and its cost allocation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 44-51.

[16] 董 雷，涂淑琴，李 烨，等. 基于元模型优化算法的主从博弈多虚拟电厂动态定价和能量管理[J]. 电网技术，2020，44(3)：973-983.
DONG Lei, TU Shuqin, LI Ye, et al. A stackelberg game model for dynamic pricing and energy management of multiple virtual power plants using metamodel-based optimization method[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 973-983.

[17] 潘瑞媛，唐 忠，史晨豪，等. 基于主从博弈的多主体投资多微网系统优化配置[J]. 中国电力，2022，55(6)：65-73，127.
PAN Ruiyuan, TANG Zhong, SHI Chenhao, et al. Optimal configuration of multi-microgrid system with multi-agent joint investment based on stackelberg game[J]. Electric Power, 2022, 55(6): 65-73, 127.

[18] 帅轩越，马志程，王秀丽，等. 基于主从博弈理论的共享储能与综合能源微网优化运行研究[J]. 电网技术，2023，47(2)：679-687.
SHUAI Xuanyu, MA Zhicheng, WANG Xiuli, et al. Optimal operation of shared energy storage and integrated energy microgrid based on leader-follower game theory[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 679-687.

[19] 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.

[20] CHIŞ A, KOIVUNEN V. Coalitional game-based cost optimization of energy portfolio in smart grid communities[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1960-1970.

[21] 马腾飞，裴 玮，肖 浩，等. 基于纳什谈判理论的风-光-氢多主体能源系统合作运行方法[J]. 中国电机工程学报，2021，41(1)：25-39.
MA Tengfei, PEI Wei, XIAO Hao, et al. Cooperative operation method for wind-solar-hydrogen multi-agent energy system based on Nash bargaining theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 25-39.

[22] 崔明勇，宣名阳，卢志刚，等. 基于合作博弈的多综合能源服务商运行优化策略[J]. 中国电机工程学报，2022，42(10)：3548-3563.
CUI Mingyong, XUAN Mingyang, LU Zhigang, et al. Operation optimization strategy of multi integrated energy service companies based on cooperative game theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(10): 3548-3563.

[23] 李 鹏，王加浩，黎灿兵，等. 计及源荷不确定性与设备变工况特性的园区综合能源系统协同优化运行方法[J]. 中国电机工程学报，2023，43(20)：7802-7812.
LI Peng, WANG Jiahao, LI Canbing, et al. Collaborative optimal scheduling of the community integrated energy system considering source-load uncertainty and equipment off-design performance[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(20): 7802-7812.

[24] XIONG J J, SUN Y H, WANG J X, et al. Multi-stage equipment optimal configuration of park-level integrated energy system considering flexible loads[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 140: 108050.

[25] 陈锦鹏，胡志坚，陈嘉滨，等. 考虑阶梯式碳交易与供需灵活双响应的综合能源系统优化调度[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3094-3104.
CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Jiabin, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering ladder-type carbon trading and flexible double response of supply and demand[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3094-3104.

[26] 陈 志，胡志坚，翁昌宏，等. 基于阶梯碳交易机制的园区综合能源系统多阶段规划[J]. 电力自动化设备，2021，41(9)：148-155.
CHEN Zhi, HU Zhijian, WENG Changhong, et al. Park integrated energy system based on ladder carbon trading mechanism multi-stage planning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 148-155.

[27] 吕 凯，唐 昊，王 珂，等. 计及源荷双侧不确定性的跨区互联电网源网荷协同调度[J]. 电力系统自动化，2019，43(22)：38-45，150.
LÜ Kai, TANG Hao, WANG Ke, et al. Coordinated dispatching of source-grid-load for inter-regional power grid considering uncertainties of both source and load sides[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(22): 38-45, 150.

[28] 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)：2711-2721.
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): 2711-2721.



杨冬锋
1976—，男，博士，教授
主要研究方向为大规模新能源接入电力系统的优化调度与控制、直流电网保护技术等
E-mail: ydfnedu@126.com

YANG Dongfeng
Ph.D., Professor



王轶琳(通信作者)
1998—，女，硕士生
主要研究方向为综合能源系统、优化运行等
E-mail: wangyilin19980502@163.com

WANG Yilin
Corresponding author



杨士慧
1987—，女，硕士，高工
主要研究方向为能源转化与新型储能领域、交直流配电网、装备开发及工程应用
E-mail: ysh870119@163.com

YANG Shihui
Senior engineer

收稿日期 2023-05-10 修回日期 2023-12-10 编辑 程子丰

附录 A1

购售电收益为：

$$I_i^{\mathrm{ESO}}(t)=\sum_{i=1}^{24}\left(u_{\mathrm{PS}}(t)P_i^{\mathrm{SELL}}(t)-u_{\mathrm{PB}}(t)P_i^{\mathrm{BUY}}(t)\right) \tag{A1}$$

IEM 间电能交互收益为 IEMi 与其他 IEM 成员电能交互收益之和：

$$I_i^{\mathrm{TRADE}}(t)=\sum_{t=1}^{24}\sum_{j=1,j\neq i}^{N}u_{ij}(t)P_{ij}^{\mathrm{P2P}}(t) \tag{A2}$$

$$u_{\mathrm{PS}}(t)\le u_{ij}(t)\le u_{\mathrm{PB}}(t) \tag{A3}$$

式中：$u_{ij}(t)$ 为 IEMi 在 t 时刻与 IEMj 的电能交易价格；$P_{ij}^{\mathrm{P2P}}(t)$ 为 IEMi 在 t 时刻与 IEMj 的电能交易电量。

燃气成本为：

$$C_i^{\mathrm{FUEL}}(t)=\sum_{i=1}^{24}\alpha\left(V_i^{\mathrm{CHP}}(t)+V_i^{\mathrm{GB}}(t)+V_i^{\mathrm{P2G}}(t)\right) \tag{A4}$$

式中：$V_i^{\mathrm{CHP}}(t)$、$V_i^{\mathrm{GB}}(t)$ 分别为 IEMi 在 t 时刻内 CHP 机组、燃气锅炉每小时消耗燃气的速率；$V_i^{\mathrm{P2G}}(t)$ 为 IEMi 中 P2G 设备每小时产生燃气的速率；α 为单位燃气的购气成本。

由于本文计及激励型的电热需求响应，因此需求响应成本主要受可转移、可削减负荷影响。

$$C_i^{\mathrm{DR}}(t)=\sum_{i=1}^{24}\lambda_{\mathrm{e}}^{\mathrm{TRAN}}\left|P_i^{\mathrm{TRAN}}(t)\right|+\lambda_{\mathrm{e}}^{\mathrm{CUT}}P_i^{\mathrm{CUT}}(t)+\lambda_{\mathrm{h}}^{\mathrm{CUT}}Q_i^{\mathrm{CUT}}(t) \tag{A5}$$

式中：$P_i^{\mathrm{TRAN}}(t)$ 为 IEMi 在 t 时刻转移的电负荷；$P_i^{\mathrm{CUT}}(t)$ 为 IEMi 在 t 时刻的削减电负荷；$Q_i^{\mathrm{CUT}}(t)$ 为 IEMi 在 t 时刻削减的热负荷；$\lambda_{\mathrm{e}}^{\mathrm{TRAN}}$、$\lambda_{\mathrm{e}}^{\mathrm{CUT}}$ 分别为电负荷转移、削成本；$\lambda_{\mathrm{h}}^{\mathrm{CUT}}$ 为热负荷削减成本。

目前国内的碳配额分配方式主要采用无偿分配[25]，本文认为碳排放的主要来源为热电联产机组以及燃气锅炉，因此 IEMi 的实际碳排放配额为：

$$E_i^{*}(t)=\sum_{i=1}^{24}E_{\mathrm{CHP}}^{*}(t)+E_{\mathrm{GB}}^{*}(t) \tag{A6}$$

$$E_{\mathrm{CHP}}^{*}(t)=\sum_{t=1}^{24}\beta_{\mathrm{h}}^{*}H_{\mathrm{CHP}}(t)\Delta t+\varphi_{\mathrm{e,h}}P_{\mathrm{CHP}}(t)\Delta t \tag{A7}$$

$$E_{\mathrm{GB}}^{*}(t)=\beta_{\mathrm{h}}^{*}\sum_{t=1}^{24}H_{\mathrm{GB}}(t)\Delta t \tag{A8}$$

式中：$E_i^{*}(t)$、$E_{\mathrm{CHP}}^{*}(t)$ 以及 $E_{\mathrm{GB}}^{*}(t)$ 分别为 IEMi 系统、热电联产系统以及燃气锅炉的无偿碳排放配额；β_{h}^{*} 为单位热量的无偿碳排放额；$H_{\mathrm{CHP}}(t)$ 与 $P_{\mathrm{CHP}}(t)$ 分别为在 t 时段内热电联产系统的热、电输出功率；$\varphi_{\mathrm{e,h}}$ 为热电联产设备发热量的折算系数；$H_{\mathrm{GB}}(t)$ 在 t 时段燃气锅炉的发热功率。

本文由于考虑 CCS 对 CO_2 的捕获能力，因此 IEMi 的实际碳排放量为：

$$E_i(t)=\sum_{i=1}^{24}E_{\mathrm{CHP}}(t)+E_{\mathrm{GB}}(t)-E_{\mathrm{CCS}}(t) \tag{A9}$$

式中：$E_i(t)$、$E_{\mathrm{CHP}}(t)$、$E_{\mathrm{GB}}(t)$ 分别为 IEMi、热电联产机组、燃气锅炉实际的碳排放量；$E_{\mathrm{CCS}}(t)$ 为 CCS 捕获的 CO_2 量。

整体的碳交易成本 $C_i^{\mathrm{CAR}}(t)$ 参考文献[26]，具体为：

$$C_i^{\mathrm{CAR}}(t)=\begin{cases}-cl-c(1+\alpha)\left(E_i^{*}(t)-E_i(t)-l\right), & E_i(t)-E_i^{*}(t)<-l\\ -c\left(E_i^{*}(t)-E_i(t)\right), & -l<E_i(t)-E_i^{*}(t)<0\\ cl+c(1+\alpha)\left(E_i(t)-E_i^{*}(t)-l\right), & l<E_i(t)-E_i^{*}(t)<2l\\ \vdots & \vdots\end{cases} \tag{A10}$$

式中：α、l 分别为碳交易价格的增长系数以及碳交易价格区间长度。

本文所提的带 P2G 和 CCS 的 CHP 系统的运行成本包括 CHP 运行成本、P2G 运行成本以及 CCS 运行成本，即：

$$C_i^{\mathrm{CHP}}(t)=\sum_{i=1}^{24}\omega_i^1P_i^{\mathrm{CHP}}(t)+\omega_i^2P_i^{\mathrm{P2G}}(t)+\omega_i^3P_i^{\mathrm{CCS}}(t) \tag{A11}$$

$$0\le P_i^{\mathrm{CHP}}(t)\le P_{\mathrm{MAX}}^{\mathrm{CHP}} \tag{A12}$$

$$0\le P_i^{\mathrm{P2G}}(t)\le P_{\mathrm{MAX}}^{\mathrm{P2G}} \tag{A13}$$

$$0\le P_i^{\mathrm{CCS}}(t)\le P_{\mathrm{MAX}}^{\mathrm{CCS}} \tag{A14}$$

式中：ω_i^1、ω_i^2、ω_i^3 分别为 CHP、P2G、CCS 的运维成本；$P_i^{\mathrm{CHP}}(t)$、$P_i^{\mathrm{P2G}}(t)$、$P_i^{\mathrm{CCS}}(t)$ 分别为在 t 时刻 CHP、P2G 以及 CCS 的放电功率。

储能的使用成本由电储能装置的充、放功率决定：

$$C_i^{\mathrm{CS}}(t)=\delta^{\mathrm{P}}\sum_{i=1}^{24}\left(P_i^{\mathrm{C}}(t)+P_i^{\mathrm{F}}(t)\right) \tag{A15}$$

式中：$P_i^{\mathrm{C}}(t)$、$P_i^{\mathrm{F}}(t)$ 分别为电储能的充、放电功率；δ^{P} 为电储能运维成本。

弃风弃光惩罚成本为：

$$C_i^{\mathrm{CUR}}(t)=\sum_{t=1}^{24}\lambda_{\mathrm{cur}}P_{\mathrm{NEW,cur}}(t) \tag{A16}$$

式中：λ_{cur} 为弃风弃光惩罚成本系数。

附录 A2

(1)燃气锅炉约束

燃气锅炉的功率转换约束为：

$$Q_{\mathrm{GB}}(t)=\eta_{\mathrm{GB}}G_{\mathrm{GB}}(t) \tag{A17}$$

式中：η_{GB} 为燃气锅炉能量转换效率。

燃气锅炉出力约束为：

$$0 \le Q_{\mathrm{GB}}(t) \le Q_{\mathrm{GB}}^{\max} \tag{A18}$$

式中：$Q_{\mathrm{GB}}^{\max}(t)$ 为燃气锅炉最大功率。

(2)储能约束

电储能容量约束为：

$$E_i^{\mathrm{ES}}(t) = (1-\eta_{\mathrm{ls}})E_i^{\mathrm{ES}}(t-1) + P_{\mathrm{ES},i}^{\mathrm{cha}}(t)\eta_i^{\mathrm{cha}} - P_{\mathrm{ES},i}^{\mathrm{dis}}(t)/\eta_i^{\mathrm{dis}} \tag{A19}$$

$$E_{\mathrm{ES}}(1) = E_{\mathrm{ES}}(24) \tag{A20}$$

$$E_{\mathrm{ES},i}^{\min} \le E_i^{\mathrm{ES}}(t) \le E_{\mathrm{ES},i}^{\max} \tag{A21}$$

式中：$E_i^{\mathrm{ES}}(t)$ 为 IEM 聚合体 i 在 t 时刻的电储能容量；η_{ls} 为自损耗系数；η_i^{cha}、η_i^{dis} 分别为充、放电效率；$E_{\mathrm{ES},i}^{\max}$、$E_{\mathrm{ES},i}^{\min}$ 分别为储能容量上、下限。

电储能出力约束为：

$$0 \le P_i^{\mathrm{C}}(t) \le P_{i,\max}^{\mathrm{cha}} u_i^{\mathrm{cha}}(t) \tag{A22}$$

$$0 \le P_i^{\mathrm{F}}(t) \le P_{i,\max}^{\mathrm{dis}} \left(1 - u_i^{\mathrm{cha}}(t)\right) \tag{A23}$$

式中：$P_{i,\max}^{\mathrm{cha}}$、$P_{i,\max}^{\mathrm{dis}}$ 分别为最大充、放电约束；$P_{i,\max}^{\mathrm{dis}}$ 为充电状态的 0-1 变量。

附录 B

表 B1　相关参数设置

Table B1　Parameter settings

相关参数	取值
δ^{P}	0.01
ω_1	0.013
ω_2	0.022
ω_3	0.022
$P_{\mathrm{MAX}}^{\mathrm{CHP}}$ /kW	1600
$P_{\mathrm{MAX}}^{\mathrm{P2G}}$ /kW	300
$P_{\mathrm{MAX}}^{\mathrm{CCS}}$ /kW	600
η_{GB}	0.9
$Q_{\mathrm{GB}}^{\max}$ /kW	1000
η	0.8
η_i^{cha}	0.95
η_i^{dis}	0.96
η_{ls}	0.05
$u_{\mathrm{PB}}^{\min}$	$1.5\,u_{\mathrm{EB}}$
$u_{\mathrm{PB}}^{\max}$	u_{EB}
$u_{\mathrm{PS}}^{\min}$	u_{ES}
$u_{\mathrm{PS}}^{\max}$	$0.65\,u_{\mathrm{ES}}$
$u_{\mathrm{PB}}^{\mathrm{ave}}$ /元	0.85
$u_{\mathrm{PS}}^{\mathrm{ave}}$ /元	1.20

附录 C

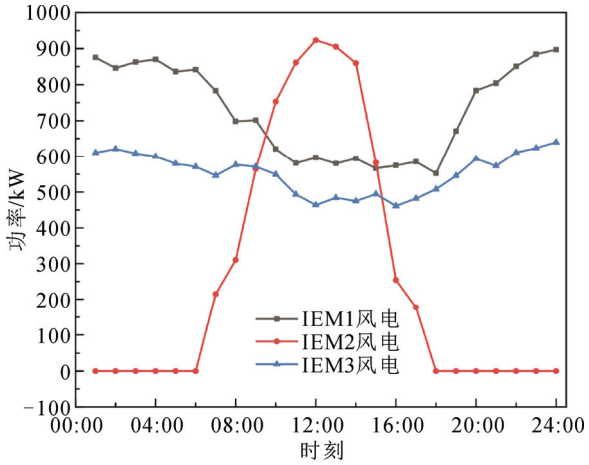


图 C1　IEM 新能源出力预测图

Fig.C1　IEM new energy output forecast diagram

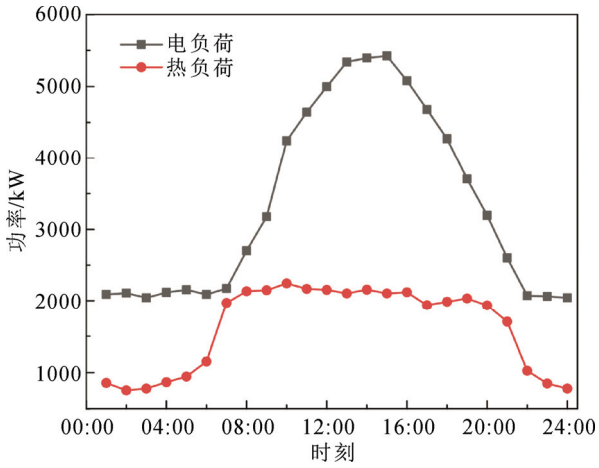


图 C2　IEM1 电热负荷预测图

Fig.C2　IEM1 electric heating load forecast

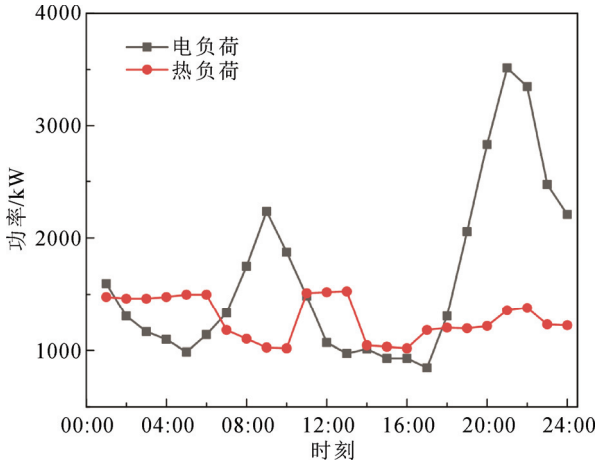


图 C3　IEM2 电热负荷预测图

Fig.C3　IEM2 electric heating load forecast

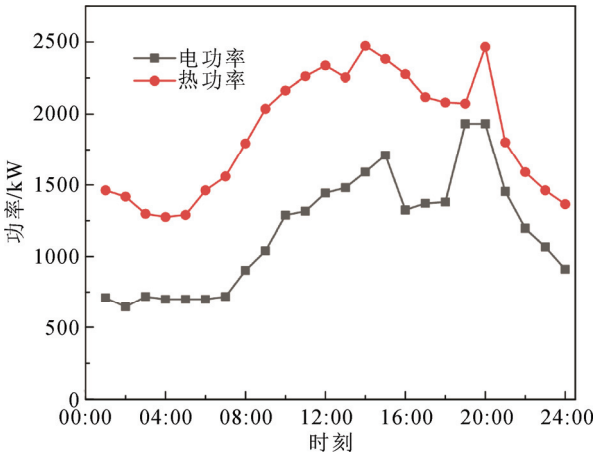


图 C4　IEM3 电热负荷预测图

Fig.C4　IEM3 electric heating load forecast chart

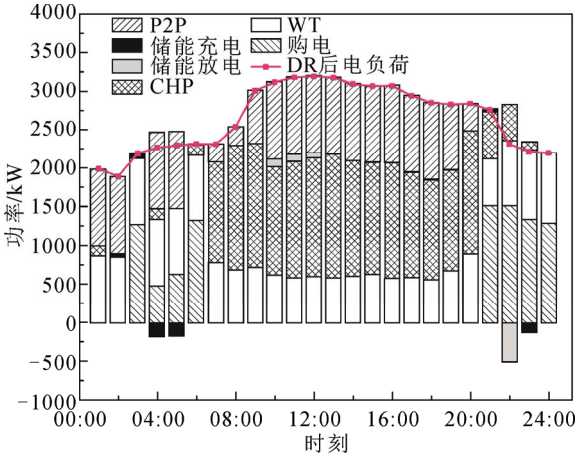


图 D2　电功率平衡图

Fig.D2　Electric power balance diagram

附录 D

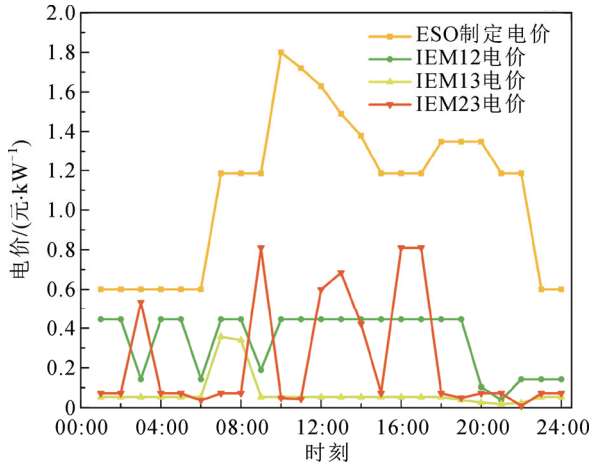


图 D1　博弈交互电价

Fig.D1　Game interaction price

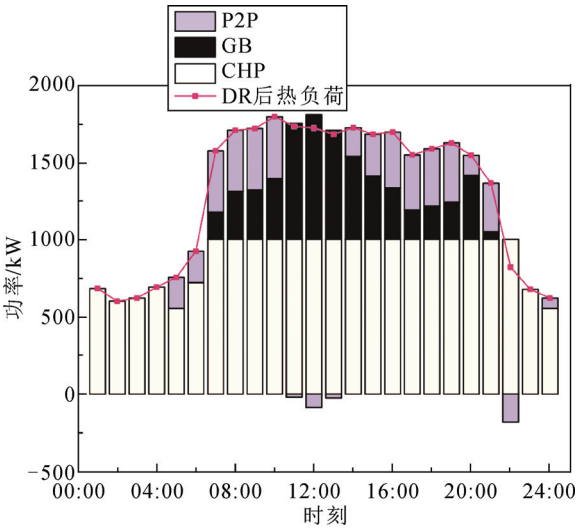


图 D3　热功率平衡图

Fig.D3　Thermal power balance diagram