

基于稳定大联盟的交互式多能源微网集群协同运行策略

徐爽^{1,2}, 严道波², 方仍存², 崔世常¹, 方家琨¹, 艾小猛¹, 文劲宇¹

(1. 强电磁技术全国重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074; 2. 国网湖北省电力有限公司
经济技术研究院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 多能源微网协同互联可提升系统灵活性与供能可靠性。针对多能源微网集群合作运行中的多能互补和效益分配问题, 提出一种基于稳定大联盟的交互式多能源微网集群协同运行策略。首先, 建立单个多能源微网的设备模型和基于效用成本的电-热需求响应模型。其次, 提出一种基于合作博弈的交互式多能源微网集群协同运行模型, 并证明了所提模型满足超可加性和平衡性, 该性质表明互联的多能源微网会形成一个稳定的大联盟以协调多能互补行为。然后, 采用了基于核仁的效益分配方案来事后分配合作产生的总效益。最后, 设计了一种嵌套式原对偶算法精确求解核仁, 相较于传统核仁精确求解算法, 所提算法将求解过程迭代次数从 2^N 降低到不超过多能源微网数量 N 。算例分析结果表明, 所提策略能有效促进微网间能源互补利用, 提升各微网效益水平, 基于核仁的效益分配方案公平合理, 嵌套式原对偶算法能有效降低核仁分配方案的计算复杂度。

关键词: 多能源微网; 多能互补; 合作博弈; 核仁; 稳定性

An interactive cooperative operation strategy for multi-energy microgrid clusters based on the stable grand coalition

XU Shuang^{1,2}, YAN Daobo², FANG Rengcun², CUI Shichang¹, FANG Jiakun¹, AI Xiaomeng¹, WEN Jinyu¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology (Huazhong University of Science and Technology),
Wuhan 430074, China; 2. Economic and Technological Research Institute of State
Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430072, China)

Abstract: Cooperative interconnection of multi-energy microgrids can enhance the flexibility and reliability of energy supply. Aiming at the problems of multi-energy complementarity and benefit distribution in the cooperative operation of multi-energy microgrid clusters, an interactive cooperative operation strategy based on a stable grand coalition is proposed. First, equipment models of an individual multi-energy microgrid and an electricity-heat demand response model based on utility cost are established. Next, an interactive cooperative operation model for multi-energy microgrid clusters based on cooperative game theory is formulated, and it is proven that the proposed model satisfies superadditivity and balancedness. These properties indicate that interconnected multi-energy microgrids will form a stable grand coalition to coordinate multi-energy complementary behavior. Then, a nucleolus-based benefit allocation scheme is adopted to distribute the total benefits generated by cooperation ex-post. Finally, a nested primal-dual algorithm is designed to accurately solve the nucleolus. Compared with conventional exact nucleolus solution algorithms, the proposed method reduce the number of iterations from 2^N to no more than the number of multi-energy microgrids N . Case study results show that the proposed strategy effectively promotes complementary energy utilization among microgrids and improves the benefit level of individual microgrids. The nucleolus-based allocation scheme is fair and reasonable, and the nested primal-dual algorithm significantly reduces the computation complexity of nucleolus-based allocation.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52207108).

Key words: multi-energy microgrid; multi-energy complementarity; cooperative game theory; nucleolus; stability

0 引言

多能源微网(multi-energy microgrid, MEM)能够利用异构能源载体间的灵活运行和协同互补效应,被认为是提高分布式新能源消纳能力和多能源利用效率的重要手段^[1-4]。然而,单个多能源微网因规模有限,难以整合区域内各类分布式资源,故可将多个地理位置相近的多能源微网互相连接,构成多能互济平衡的微网集群,以增强供电可靠性与系统稳定性,并降低各微网运行成本^[5-6]。

多能源微网提升能源效率的方式主要有两种。一种是单个多能源微网通过在需求侧实施综合需求响应^[7],改变不同能流的用能方式,进而充分利用能源间相互耦合与替代优势,以提高运行灵活性和能源利用效率。在实际运行中,微网实施需求响应的行为除源于经济激励外,还会受到用能效用等各种非经济因素的影响。另一种是在互联多能源微网框架下允许微网间交易能源,并以价值为参数调节系统全局供需动态平衡,从而提高分布式新能源消纳率,并降低系统运行成本。

在可交易能源运行模式下,由于多能微网属于不同的利益主体,需要配套的市场机制来平衡各微网利益^[8]。目前相关市场机制主要基于博弈论来设计,博弈论可分为非合作博弈与合作博弈两种类型^[9-10]。文献[11]考虑社区微网产消者组成的可交易能源市场,并用非合作博弈构建卖方产消者间的价格竞争模型,同时用演化博弈来模拟买方选择卖方的动态过程。此外,作为典型动态非合作博弈的Stackelberg博弈经常被用于解决可交易能源市场中的两阶段定价问题^[12-13],其中能源卖方为领导者,买方为跟随者^[12],或者多能源聚合商为领导者,微网为跟随者^[13]。

本质上为不完全信息非合作博弈的拍卖机制也常被用于协调参与者在可交易能源市场中的交易行为。文献[14]设计了基于单边拍卖机制的多微网可交易能源市场,并假设买方有固定的能源需求。文献[15]则采用允许买卖双方同时竞价的双边拍卖机制来协调多微网间的能源交易。基于以上各类型非合作博弈的可交易能源市场机制存在以下两个问题:1)上述模型通常假设参与者不行使市场力且参与者之间不会相互串谋,但实际交易中追求自身收益最大化的市场参与者一般不会遵循该假设;2)上述非合作博弈模型通常以Nash均衡作为模型的解,但均衡是一种稳定的策略组合,参与者在这种组合下不会主动改变自己的策略,但该策略组合并不一定能使系统达到最优状态。

非合作博弈是对利益冲突下理性参与者逐利行为进行建模的有效工具,合作博弈则旨在激励独立的参与者共同行动,以更低的系统总成本或更高的社会总福利实现资源高效分配^[16-17]。合作博弈常被用于研究共享储能的投资与运营^[18]、灵活性资源采购成本的分摊^[19]以及交互式能量管理^[20]。在合作博弈模型中,当所有参与者均选择合作时,便会形成一个联盟,如何将大联盟产生的总效益以一种合理、公平的方式分配给所有参与者是合作博弈的研究重点之一。

3种常见效益分配方案在现有文献中被广泛采用,分别为考虑参与者对大联盟边际贡献的Shapley值^[21-22]、考虑分配平等性的Nash谈判^[23-24]以及考虑大联盟稳定性的核^[25-26]。然而,Shapley值和Nash谈判通常难以保证大联盟的稳定性,也即参与者可以通过参加其他子联盟获得更高的效益,因而不愿意加入大联盟,进而导致联盟破裂,合作无法达成。另外,核分配方案虽然能保证联盟稳定性,但核中可能包含多种分配方案,具体选择哪种方案参与者之间通常难以达成共识。

为克服Shapley值和Nash谈判分配方案存在的多能源微网大联盟合作不稳定问题以及核分配方案存在的多重解问题,本文采用按字典序最小化全体子联盟不满意度的核仁来分配多能源微网合作产生的效益,可同时保证大联盟稳定性和分配唯一性。传统核仁计算方法由于需要按字典序最小化全体子联盟的不满意度,算法迭代次数会随着参与合作的多能源微网数量的增加而呈现指数级增长趋势^[27]。因此,在基于核仁效益分配方案的多能源微网合作博弈模型中,有必要设计新的核仁求解算法,以提高模型的延展性和适用性。

综上所述,现有多能源微网集群合作运行相关研究通常只考虑基于经济激励的需求响应而忽略了用能效用这类非经济因素,并且对于保证大联盟合作稳定性和分配唯一性的效益分配方法也有待完善。因此,本文考虑多能源微网实施效用成本型电-热需求响应,并采用基于合作博弈的可交易能源市场机制协调多能源微网的能源交易,最后在事后效益分配中采用核仁分配方案并设计了新的核仁精确求解算法,本文主要工作与贡献如下。

1) 建立交互式多能源微网合作运行架构,并在单个多能源微网需求侧引入基于效用成本的电-热需求响应模型,提高多能源微网能源利用效率。

2) 提出多能源微网集群协同优化运行的合作博弈模型,证明该模型满足超可加性和平衡性,表明全体互联的多能源微网会选择合作并组成一个大

联盟,且存在保证大联盟稳定运行的效益分配方案。

3) 采用保证合作稳定性与分配唯一性的核仁分配方案将大联盟产生的总效益分配给全体多能源微网,并设计嵌套式原对偶算法实现核仁分配方案的精确求解,同时将求解过程的迭代次数控制到不超过微网的数量。

1 多能源微网集群合作架构及运行模型

本文研究的交互式多能源微网集群合作运行架构如图 1 所示。多能源微网通过电缆和热力管道相互连接,并连接到配电网。单个多能源微网包含光伏发电、热电联产(combined heat and power, CHP)机组、热泵(heat pump, HP)、电储能(electrical energy storage, EES)、热储能(thermal energy storage, TES)、柔性电负荷(flexible electrical load, FEL)、柔性热负荷(flexible thermal load, FTL)、智能电表等。信息控制中心(information control center, ICC)代表 MEM 集群与配网运营商交互,协助其进行电能交易。另外, MEM 配备的智能电表可实现 MEM 和 ICC 间的双向通信,ICC 收集到 MEM 设备信息之后,协调 MEM 间的电、热交易以及 MEM 与配网的电能交易,并将控制信号传递给 MEM 的智能电表, MEM 接收到该信号后对设备进行控制。

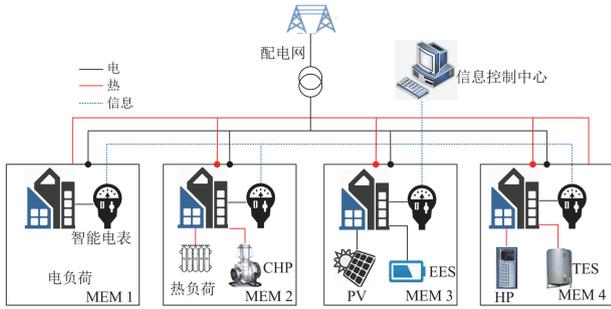


图 1 交互式多能源微网集群合作运行架构

Fig. 1 Cooperative operation architecture of interactive multi-energy microgrid cluster

1.1 多能源微网设备模型

1) CHP 模型

CHP 同时产生电能和热能,可有效提高系统效率,其运行成本和约束为

$$\begin{cases} C_{n,t}^{\text{CHP}}(P_{n,t}^{\text{CHP}}) = C_n^{\text{CHP},0} + C_n^{\text{CHP},1} P_{n,t}^{\text{CHP}} + \\ C_n^{\text{CHP},2} (P_{n,t}^{\text{CHP}})^2 + C_n^{\text{CHP},3} H_{n,t}^{\text{CHP}} + \\ C_n^{\text{CHP},4} (H_{n,t}^{\text{CHP}})^2 + C_n^{\text{CHP},5} P_{n,t}^{\text{CHP}} H_{n,t}^{\text{CHP}} \\ H_{n,t}^{\text{CHP}} = K_n^{\text{CHP}} P_{n,t}^{\text{CHP}} \\ -R_n^{\text{CHP}} \leq P_{n,t}^{\text{CHP}} - P_{n,t-1}^{\text{CHP}} \leq R_n^{\text{CHP}} \\ \underline{P}_n^{\text{CHP}} \leq P_{n,t}^{\text{CHP}} \leq \bar{P}_n^{\text{CHP}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{n,t}^{\text{CHP}}$ 、 $H_{n,t}^{\text{CHP}}$ 分别为 CHP 机组输出的电、热功率; n 和 t 分别为多能源微网和运行时段索引; $C_{n,t}^{\text{CHP}}(P_{n,t}^{\text{CHP}})$ 表示输出电功率为 $P_{n,t}^{\text{CHP}}$ 时 CHP 的运行成本; $C_n^{\text{CHP},0}$ 、 $C_n^{\text{CHP},1}$ 、 $C_n^{\text{CHP},2}$ 、 $C_n^{\text{CHP},3}$ 、 $C_n^{\text{CHP},4}$ 、 $C_n^{\text{CHP},5}$ 为 CHP 机组的成本系数; K_n^{CHP} 为热电比; R_n^{CHP} 为 CHP 的爬坡功率限值; $\underline{P}_n^{\text{CHP}}$ 和 \bar{P}_n^{CHP} 分别为 CHP 的最小和最大输出功率。

2) HP 模型

热泵可将电能转化为热能,通常比其他产热设备更高效,其运行成本和运行约束为

$$\begin{cases} C_{n,t}^{\text{HP}}(H_{n,t}^{\text{HP}}) = \lambda_{n,t} (H_{n,t}^{\text{HP}} / O_n^{\text{HP}}) \\ H_{n,t}^{\text{HP}} = O_n^{\text{HP}} P_{n,t}^{\text{HP}} \\ \underline{P}_n^{\text{HP}} \leq P_{n,t}^{\text{HP}} \leq \bar{P}_n^{\text{HP}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\lambda_{n,t}$ 为时段 t 的用电成本; $P_{n,t}^{\text{HP}}$ 和 $H_{n,t}^{\text{HP}}$ 分别为 HP 输入的电功率和输出的热功率; $C_{n,t}^{\text{HP}}(H_{n,t}^{\text{HP}})$ 表示输出热功率 $H_{n,t}^{\text{HP}}$ 时 HP 的运行成本; O_n^{HP} 为 HP 的性能系数,即消耗单位电能产生的热量; $\underline{P}_n^{\text{HP}}$ 和 \bar{P}_n^{HP} 分别为 HP 的最小和最大输入电功率。

3) 储能系统模型

储能系统可存储机组的过剩功率,并在机组出力不足时释放功率来平衡电热缺额,其运行约束为

$$\begin{cases} C_{n,t}^K(P_{n,t}^K) = \chi_n^K |P_{n,t}^K|, K \in \{E, H\} \\ S_{n,t+1}^K = S_{n,t}^K (1 - \xi_n^K) + \\ ([P_{n,t}^K]^+ \eta_n^{\text{ch},K} / E_n^K + [P_{n,t}^K]^- / (\eta_n^{\text{dc},K} E_n^K)) \Delta t \\ 0 \leq |P_{n,t}^K| \leq \bar{P}_n^K \\ \underline{S}_n^K \leq S_{n,t}^K \leq \bar{S}_n^K \\ S_{n,0}^K = S_{n,T}^K \end{cases} \quad (3)$$

式中: E、H 分别代表电、热; $P_{n,t}^K$ 为储能运行功率,取值为正表示充电,取值为负则表示放电; $C_{n,t}^K(P_{n,t}^K)$ 表示运行功率为 $P_{n,t}^K$ 时储能的运行成本; χ_n^K 为储能的单位运行成本; $S_{n,t}^K$ 为储能设备荷电状态; ξ_n^K 为损耗率; $\eta_n^{\text{ch},K}$ 和 $\eta_n^{\text{dc},K}$ 分别为充电和放电效率; E_n^K 为储能容量; Δt 为时段 t 的时长; \bar{P}_n^K 为最大充放电功率; \underline{S}_n^K 和 \bar{S}_n^K 分别为最低和最高的荷电状态; $S_{n,0}^K$ 和 $S_{n,T}^K$ 分别为一个运行周期开始和结束时的荷电状态; $[x]^+ = \max(x, 0)$ 且 $[x]^- = \min(x, 0)$ 。

1.2 基于效用成本的电-热需求响应模型

为提高多能源微网系统运行的可靠性和经济性,建立如下电-热需求响应模型。

1) 计及用能效用的可转移电负荷模型

多能源微网中的用户愿意消耗更多的电能, 并且逐渐达到饱和, 其用电效用 $U_{n,t}^E(E_{n,t}^F)$ 可建模为

$$U_{n,t}^E(E_{n,t}^F) = \begin{cases} \alpha_n E_{n,t}^F - \frac{1}{2} \beta_n (E_{n,t}^F)^2, & 0 \leq E_{n,t}^F \leq \frac{\alpha_n}{\beta_n} \\ \frac{(\alpha_n)^2}{2\beta_n}, & E_{n,t}^F > \frac{\alpha_n}{\beta_n} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $E_{n,t}^F$ 为时段 t 的用电量; α_n 和 β_n 为用电效用系数, 并满足 $\alpha_n \geq 0$ 且 $\beta_n > 0$ 。

多能源微网可转移电负荷的运行约束为

$$\begin{cases} \sum_{t \in T} E_{n,t}^F = E_n^F \\ P_{n,t}^F \leq E_{n,t}^F / \Delta t \leq \bar{P}_{n,t}^F \\ -\bar{R}_n^F \leq (E_{n,t}^F - E_{n,t-1}^F) / \Delta t \leq \bar{R}_n^F \end{cases} \quad (5)$$

式中: E_n^F 为总用电量; $\bar{P}_{n,t}^F$ 和 $P_{n,t}^F$ 分别为最大和最小电负荷; \bar{R}_n^F 为电负荷爬坡限值; T 为时段集合。

2) 考虑温度舒适度的可调节热负荷模型

多能源微网中的用户倾向于将其室内温度保持在最舒适的水平, 但也允许室温与最适宜温度间有一定偏差。因此, 热效用 $U_{n,t}^H(T_{n,t}^{\text{in}})$ 可建模为

$$U_{n,t}^H(T_{n,t}^{\text{in}}) = \gamma_n - \delta_n (T_{n,t}^{\text{in}} - T_{n,t}^{\text{set}})^2 \quad (6)$$

式中: $T_{n,t}^{\text{in}}$ 和 $T_{n,t}^{\text{set}}$ 分别为时段 t 室内温度和微网用户设置的最适宜温度; γ_n 和 δ_n 为热效用系数, 且 δ_n 越大表明用户对温度变化越敏感。

多能源微网可调节热负荷的运行约束为

$$\begin{cases} T_{n,t+1}^{\text{in}} = T_{n,t}^{\text{in}} e^{-\Delta t / (ZC_{\text{air}})} + (ZH_{n,t}^{\text{in}} + T_{n,t}^{\text{out}})(1 - e^{-\Delta t / (ZC_{\text{air}})}) \\ \underline{T}_{n,t}^{\text{in}} \leq T_{n,t}^{\text{in}} \leq \bar{T}_{n,t}^{\text{in}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: Z 为热抗系数; C_{air} 为热容比; $H_{n,t}^{\text{in}}$ 为热能输入; $T_{n,t}^{\text{out}}$ 为室外的温度; $\bar{T}_{n,t}^{\text{in}}$ 和 $\underline{T}_{n,t}^{\text{in}}$ 分别为多能源微网用户可接受的最高温度和最低温度。

1.3 与配电网运营商交易成本

当多能源微网集群内部无法平衡电热供需时, 需要与配电网运营商交易, 交易成本为

$$C_{n,t}^D(G_{n,t}^D) = \lambda_t^{\text{B,E}} [G_{n,t}^D]^+ + \lambda_t^{\text{S,E}} [G_{n,t}^D]^- \quad (8)$$

式中: $G_{n,t}^D$ 为 MEM n 与配网运行商的交易电量; $C_{n,t}^D(G_{n,t}^D)$ 表示交易电量为 $G_{n,t}^D$ 时的购售电成本; $\lambda_t^{\text{B,E}}$ 和 $\lambda_t^{\text{S,E}}$ 分别为时段 t 的购电价格和上网电价。

2 多能源微网集群协同运行模型

2.1 多能源微网集群协同运行的合作博弈模型

多能源微网集群协同运行的合作博弈模型为

(\mathcal{N}, ν) , 其中 $\nu: \mathcal{F} \rightarrow \mathbf{R}$ 表示多能源微网子联盟 $\mathcal{S} \in \mathcal{F}$ 的联盟价值函数 $\nu(\mathcal{S})$, \mathcal{N} 为多能源微网集合, \mathcal{F} 为全体 MEM 子联盟构成的集合, \mathbf{R} 为实数集。本文将子联盟价值定义为联盟成员合作产生的效益, 即联盟成员总的用电效用减去设备运行成本和与配电网运营商的交易成本。基于此, 子联盟价值函数 $\nu(\mathcal{S})$ 的数学定义为

$$\begin{cases} \nu(\mathcal{S}) = \max \sum_{n \in \mathcal{S}} \sum_{t \in T} U_{n,t}^E(E_{n,t}^F) + U_{n,t}^H(T_{n,t}^{\text{in}}) - \\ C_{n,t}^{\text{CHP}}(P_{n,t}^{\text{CHP}}) - C_{n,t}^{\text{HP}}(H_{n,t}^{\text{HP}}) - C_{n,t}^{\text{E}}(P_{n,t}^{\text{E}}) - \\ C_{n,t}^{\text{H}}(P_{n,t}^{\text{H}}) - C_{n,t}^{\text{D}}(G_{n,t}^D) \\ \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{n \in \mathcal{S}} P_{n,t}^{\text{PV}} + P_{n,t}^{\text{CHP}} + G_{n,t}^{\text{D}} = \sum_{n \in \mathcal{S}} E_{n,t}^F / \Delta t + P_{n,t}^{\text{HP}} + P_{n,t}^{\text{E}} \\ \sum_{n \in \mathcal{S}} H_{n,t}^{\text{CHP}} + H_{n,t}^{\text{HP}} = \sum_{n \in \mathcal{S}} H_{n,t}^{\text{in}} + P_{n,t}^{\text{H}} \\ \text{式(1)一式(8)} \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P_{n,t}^{\text{PV}}$ 为 MEM n 在时段 t 的光伏发电量。

下面先说明本文所提多能源微网集群合作博弈模型满足超可加性, 即全体 MEM 有动机组成一个大联盟, 以集群效益最大化为目标协调能源行为。

定理 1(超可加性) 多能源微网集群协同运行合作博弈模型 (\mathcal{N}, ν) 满足超可加性, 即对任意 $\mathcal{S}, \mathcal{V} \subseteq \mathcal{F}$ 且 $\mathcal{S} \cap \mathcal{V} = \emptyset$, $\nu(\mathcal{S}) + \nu(\mathcal{V}) \leq \nu(\mathcal{S} \cup \mathcal{V})$ 成立。

证明: 假设 \mathcal{S} 和 \mathcal{V} 为两个不相交的非空子联盟, 记 $x^{\mathcal{S}*} = [E_{n,t}^{\text{F},*}, T_{n,t}^{\text{in},*}, P_{n,t}^{\text{CHP},*}, H_{n,t}^{\text{HP},*}, P_{n,t}^{\text{E},*}, P_{n,t}^{\text{H},*}, G_{n,t}^{\text{D},*}]_{n \in \mathcal{S}, t \in T}$ 和 $y^{\mathcal{V}*} = [E_{n,t}^{\text{F},*}, T_{n,t}^{\text{in},*}, P_{n,t}^{\text{CHP},*}, H_{n,t}^{\text{HP},*}, P_{n,t}^{\text{E},*}, P_{n,t}^{\text{H},*}, G_{n,t}^{\text{D},*}]_{n \in \mathcal{V}, t \in T}$ 分别为子联盟 \mathcal{S} 和 \mathcal{V} 下式(9)的最优解, 并记两策略之和满足 $x^{\mathcal{S}*} + y^{\mathcal{V}*} = [E_{n,t}^{\text{F},*}, T_{n,t}^{\text{in},*}, P_{n,t}^{\text{CHP},*}, H_{n,t}^{\text{HP},*}, P_{n,t}^{\text{E},*}, P_{n,t}^{\text{H},*}, G_{n,t}^{\text{D},*}]_{n \in \mathcal{S} \cup \mathcal{V}, t \in T}$ 。由式(9)中多能源微网单体运行约束式(1)一式(8)以及耦合功率平衡约束的性质可知 $x^{\mathcal{S}*} + y^{\mathcal{V}*}$ 为子联盟 $\mathcal{S} \cup \mathcal{V}$ 下式(9)的可行解。记 $z^{\mathcal{S} \cup \mathcal{V}}$ 为子联盟 $\mathcal{S} \cup \mathcal{V}$ 下式(9)的可行解, 另记可行解 $x^{\mathcal{S}}$ 下子联盟 \mathcal{S} 的效益为

$$\Phi(x^{\mathcal{S}}) = \sum_{n \in \mathcal{S}} \sum_{t \in T} U_{n,t}^E(E_{n,t}^F) + U_{n,t}^H(T_{n,t}^{\text{in}}) - C_{n,t}^{\text{CHP}}(P_{n,t}^{\text{CHP}}) - C_{n,t}^{\text{HP}}(H_{n,t}^{\text{HP}}) - C_{n,t}^{\text{E}}(P_{n,t}^{\text{E}}) - C_{n,t}^{\text{H}}(P_{n,t}^{\text{H}}) - C_{n,t}^{\text{D}}(G_{n,t}^D)$$

$$\text{所以, } \nu(\mathcal{S} \cup \mathcal{V}) = \max_{z^{\mathcal{S} \cup \mathcal{V}}} \Phi(z^{\mathcal{S} \cup \mathcal{V}}) \geq \Phi(x^{\mathcal{S}*} + y^{\mathcal{V}*}) =$$

$$\nu(\mathcal{S}) + \nu(\mathcal{V}).$$

超可加性表明两个独立的多能源微网子联盟合作组成一个更大的联盟时, 产生的总效益要高于两者单独运行时的效益之和, 在经济学中也被称为协同效应。多能源微网合作博弈满足超可加性的原因如下: 1) 联盟目标函数关于联盟成员满足可分离性质, 即联盟总效益为各联盟成员效益之和; 2) 多

能源微网合作时的耦合运行约束集关于并集保持不变, 即对任意不相交子联盟 \mathcal{S} 和 \mathcal{V} , 若 $x^{\mathcal{S}} \in \Omega^{\mathcal{S}}$, $y^{\mathcal{V}} \in \Omega^{\mathcal{V}}$, 则 $x^{\mathcal{S}} + y^{\mathcal{V}} = x^{\mathcal{S}} \cup y^{\mathcal{V}} \in \Omega^{\mathcal{S} \cup \mathcal{V}}$, 其中 $\Omega^{\mathcal{S}}$ 、 $\Omega^{\mathcal{V}}$ 、 $\Omega^{\mathcal{S} \cup \mathcal{V}}$ 分别为子联盟 \mathcal{S} 、 \mathcal{V} 、 $\mathcal{S} \cup \mathcal{V}$ 下多能源微网耦合运行约束集, 该性质表明不相交子联盟合作运行不会缩减可行域。

定理 1 说明全体多能源微网组成大联盟 \mathcal{N} 是整体效益最大化的最优决策。然而, 整体效益最大无法保证每个多能源微网都满意合作博弈的结果。于是如何将大联盟 \mathcal{N} 产生的总效益合理地分配给全体 MEM 以维持联盟稳定运行至关重要。

2.2 多能源微网集群合作稳定性分析

记多能源微网集群协同运行合作博弈模型 (\mathcal{N}, ν) 的事后效益分配方案为 $\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N)$, 其中 π_n 为分配给 MEM n 的效益, 则任意子联盟 \mathcal{S} 分配到的总效益 $\pi(\mathcal{S})$ 为

$$\pi(\mathcal{S}) = \sum_{n \in \mathcal{S}} \pi_n \quad (10)$$

核是满足有效性和联盟理性的分配方案, 有效性是指将大联盟产生的效益全部分配给 MEM; 联盟理性是指分配给任何子联盟的总效益不低于该联盟独立运行时所获得的效益。基于此, 合作博弈模型 (\mathcal{N}, ν) 的核 $\mathbf{C}(\mathcal{N}, \nu)$ 定义为

$$\mathbf{C}(\mathcal{N}, \nu) = \left\{ \begin{array}{l} \pi \in \mathbf{R}^N \mid \pi(\mathcal{N}) = \nu(\mathcal{N}), \\ \pi(\mathcal{S}) \geq \nu(\mathcal{S}), \forall \mathcal{S} \subseteq \mathcal{F} \end{array} \right\} \quad (11)$$

式中: \mathbf{R}^N 表示 N 维实数空间; $\nu(\mathcal{N})$ 表示子联盟 \mathcal{N} 的价值函数。

当事后效益分配方案属于核时, 大联盟是稳定的, 因为核分配方案可避免多能源微网子联盟因效益分配不够而脱离大联盟。因此, 核非空是大联盟存在稳定分配方案的必要条件。Bondareva-Shapley 定理^[16]表明合作博弈存在非空核, 当且仅当该博弈满足平衡性。

定义 1(平衡映射) 考虑映射 $\alpha: \mathcal{F} \rightarrow [0, 1]$, 若对任意 $n \in \mathcal{N}$, $\sum_{\mathcal{S} \subseteq \mathcal{F}} \alpha(\mathcal{S}) 1_n^{\mathcal{S}} = 1$ 成立, 则称 α 为平衡映射。

其中, $1_n^{\mathcal{S}} = 1, n \in \mathcal{S}$ 且 $1_n^{\mathcal{S}} = 0, n \notin \mathcal{S}$ 。

定理 2(平衡性) 多能源微网集群协同运行合作博弈模型 (\mathcal{N}, ν) 满足平衡性, 即对任意平衡映射 α , $\sum_{\mathcal{S} \subseteq \mathcal{F}} \alpha(\mathcal{S}) \nu(\mathcal{S}) \leq \nu(\mathcal{N})$ 成立。

证明: 首先给定子联盟 \mathcal{S} , 将联盟成员 MEM n 执行运行策略 $x_n^{\mathcal{S}}$ 时产生的效益记为 $f_n(x_n^{\mathcal{S}})$ 。然后, 考虑任意平衡映射 α 可得

$$\begin{aligned} \nu\left(\sum_{\mathcal{S} \subseteq \mathcal{F}} \alpha(\mathcal{S}) \mathcal{S}\right) &= \max_{x^{\mathcal{S}}} \Phi\left(\sum_{\mathcal{S} \subseteq \mathcal{F}} \alpha(\mathcal{S}) x^{\mathcal{S}}\right) = \\ &= \max_{x^{\mathcal{S}}} \Phi\left(\bigcup_{n \in \mathcal{N}} \left(\sum_{n \in \mathcal{S}, \mathcal{S} \subseteq \mathcal{F}} \alpha(\mathcal{S}) x_n^{\mathcal{S}}\right)\right) = \\ &= \max_{x^{\mathcal{S}}} \sum_{n \in \mathcal{N}} f_n\left(\sum_{n \in \mathcal{S}, \mathcal{S} \subseteq \mathcal{F}} \alpha(\mathcal{S}) x_n^{\mathcal{S}}\right) \geq \end{aligned} \quad (12)$$

$$\max_{x^{\mathcal{S}}} \sum_{n \in \mathcal{N}} \left(\sum_{n \in \mathcal{S}, \mathcal{S} \subseteq \mathcal{F}} \alpha(\mathcal{S}) f_n(x_n^{\mathcal{S}})\right) =$$

$$\max_{x^{\mathcal{S}}} \sum_{\mathcal{S} \subseteq \mathcal{F}} \alpha(\mathcal{S}) \left(\sum_{n \in \mathcal{S}} f_n(x_n^{\mathcal{S}})\right) =$$

$$\sum_{\mathcal{S} \subseteq \mathcal{F}} \alpha(\mathcal{S}) \max_{x^{\mathcal{S}}} \left(\sum_{n \in \mathcal{S}} f_n(x_n^{\mathcal{S}})\right) = \sum_{\mathcal{S} \subseteq \mathcal{F}} \alpha(\mathcal{S}) \nu(\mathcal{S})$$

再由子联盟的组合性质, 可得到式(13)。

$$\nu\left(\sum_{\mathcal{S} \subseteq \mathcal{F}} \alpha(\mathcal{S}) \mathcal{S}\right) = \nu\left(\sum_{\mathcal{S} \subseteq \mathcal{F}} \alpha(\mathcal{S}) \left(\bigcup_{n \in \mathcal{S}} \{n\}\right)\right) = \quad (13)$$

$$\nu\left(\bigcup_{n \in \mathcal{N}} \left(\sum_{\mathcal{S} \subseteq \mathcal{F}} \alpha(\mathcal{S}) 1_n^{\mathcal{S}} \{n\}\right)\right) = \nu\left(\bigcup_{n \in \mathcal{N}} \{n\}\right) = \nu(\mathcal{N})$$

结合式(12)和式(13)可得 $\sum_{\mathcal{S} \subseteq \mathcal{F}} \alpha(\mathcal{S}) \nu(\mathcal{S}) \leq$

$\nu(\mathcal{N})$, 也即多能源微网合作博弈模型 (\mathcal{N}, ν) 满足平衡性。

所提合作博弈模型满足平衡性的物理含义解释如下: 将包含全体多能源微网的大联盟以一种“平衡的方式”分解为若干子联盟, 即每个多能源微网在分解中只被计算一次(若分配到多个子联盟, 则概率之和为 1)。平衡性是指无论如何用“平衡的方式”分解大联盟, 这些子联盟的“加权效益和”都不会超过大联盟的效益。

定理 2 表明本文所提多能源微网集群合作博弈的核非空。相较于文献[28]采用基于 Shapley 值的分配方法和文献[29]采用基于 Nash 谈判的分配方案, 核分配方案能确保大联盟稳定运行。然而, 非空的核中可能存在多种分配方案, 具体选择哪种特定方案 MEM 间通常难以达成共识, 本文采用核中最稳定且唯一的方案来事后分配大联盟产生的总效益。

3 基于核仁的效益分配方案

3.1 核仁分配方案

给定分配方案 π , 并考虑多能源微网子联盟 $\mathcal{S} \subseteq \mathcal{F}$, 先求解优化问题式(9)得到子联盟独立运行时的效益 $\nu(\mathcal{S})$, 再由式(10)计算子联盟分配到的效益 $\pi(\mathcal{S})$ 。于是, 子联盟 $\mathcal{S} \subseteq \mathcal{F}$ 对分配 π 的不满意度 $d(\mathcal{S}, \pi)$ 为

$$d(\mathcal{S}, \boldsymbol{\pi}) = v(\mathcal{S}) - \pi(\mathcal{S}) \quad (14)$$

将 $2^N - 1$ 个非空子联盟对分配方案 $\boldsymbol{\pi}$ 的不满意度由高到底排序后形成的向量记为

$$\boldsymbol{\Theta}(\boldsymbol{\pi}) = (\Theta_1(\boldsymbol{\pi}), \Theta_2(\boldsymbol{\pi}), \dots, \Theta_{2^N-1}(\boldsymbol{\pi})) \quad (15)$$

定义 2(字典序) 考虑 m 维向量 $\boldsymbol{a} = (a_1, a_2, \dots, a_m)$ 和 $\boldsymbol{b} = (b_1, b_2, \dots, b_m)$, 若存在 $k \leq m$ 使得当 $1 \leq i < k$ 时 $a_i = b_i$ 且 $a_k < b_k$, 则称向量 \boldsymbol{a} 按字典序小于向量 \boldsymbol{b} , 记为 $\boldsymbol{a} <_l \boldsymbol{b}$.

定义 3(核仁) 若有效分配 $\boldsymbol{\pi}$ 满足对任意有效分配 $\boldsymbol{\pi}' \neq \boldsymbol{\pi}$, 均有 $\boldsymbol{\Theta}(\boldsymbol{\pi}) <_l \boldsymbol{\Theta}(\boldsymbol{\pi}')$, 则称分配 $\boldsymbol{\pi}$ 为核仁。

当合作博弈的核非空时, 满足唯一性的核仁位于核中, 且此时核仁是核中最稳定的分配, 因为它按字典序最小化了所有多能源微网子联盟的不满意度。尽管核仁同时具有稳定性和唯一性的理想性质, 其精确计算涉及到 $2^N - 1$ 个子联盟不满意度的字典序最小化问题, 通常具有挑战性。

3.2 核仁精确求解算法

为计算合作博弈的核仁, 传统算法需要递归求解至多 $2^N - 1$ 个优化问题 P_m 。

$$\begin{cases} \min \varepsilon_m \\ \text{s.t.} \begin{cases} \varepsilon_m + \pi(\mathcal{S}) \geq v(\mathcal{S}), \forall \mathcal{S} \in \mathcal{F} \setminus \Sigma_{m-1} \\ \varepsilon_l^* + \pi(\mathcal{S}) = v(\mathcal{S}), \forall \mathcal{S} \in A_l, l = 1, 2, \dots, m-1 \\ \pi(\mathcal{N}) = v(\mathcal{N}) \\ \boldsymbol{\pi} \in \mathbf{R}^N, \varepsilon_m \in \mathbf{R} \end{cases} \end{cases} \quad (16)$$

式中: ε_m^* 为优化问题 P_m 的最优目标函数值; A_m 为约束 $\varepsilon_m + \pi(\mathcal{S}) \geq v(\mathcal{S})$ 中使得等式成立的非空 MEM 子联盟集合; $\Sigma_0 = \emptyset$ 且当 $m \geq 1$ 时, $\Sigma_m = \bigcup_{l \leq m} A_l$; $v(\mathcal{S})$ 为求解式(9)得到的子联盟独立运行产生的效益; $\pi(\mathcal{S})$ 为由式(10)计算出的子联盟在方案 $\boldsymbol{\pi}$ 下所分配的效益。

P_1 最小化所有多能源微网子联盟的最大不满意度, 优化后的最大不满意度为 ε_1^* , 不满意度取值为 ε_1^* 的子联盟集合为 A_1 。 P_2 最小化第二大不满意度, 同时设置集合 A_1 中子联盟的不满意度为 ε_1^* 。迭代执行此过程, 直到 P_m 存在对应核仁的唯一解。优化问题 P_m 具有如下性质: 1) 最优目标值 ε_m^* 存在且唯一, 但分配方案 $\boldsymbol{\pi}$ 可能存在多个解; 2) 不同的最优分配方案对应的约束集 A_m 不同; 3) 精确核仁解对应具有最小约束集的分配方案。由上述分析可知, 求解 P_m 时找到最小约束集是实现核仁精确计算的关键, 本文利用对偶原理寻找最小约束集合。 P_m 的

对偶问题为 D_m , 如式(17)所示。

$$\begin{cases} \max \sum_{\mathcal{S} \in \mathcal{F} \setminus \Sigma_{m-1}} v(\mathcal{S}) y_{\mathcal{S}} + \sum_{l=1}^{m-1} \sum_{\mathcal{S} \in A_l} (v(\mathcal{S}) - \varepsilon_l^*) y_{\mathcal{S}} \\ \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{\mathcal{S} \in \mathcal{F} \setminus \Sigma_{m-1}} y_{\mathcal{S}} = 1 \\ \sum_{\mathcal{S} \in \mathcal{F}, n \in \mathcal{S}} y_{\mathcal{S}} = 0, \forall n \in \mathcal{N} \\ y_{\mathcal{S}} \geq 0, \forall \mathcal{S} \in \mathcal{F} \setminus \Sigma_{m-1} \end{cases} \end{cases} \quad (17)$$

$v(\mathcal{S})$ 可通过求解式(9)得到。记 $\boldsymbol{y}_m^* = \{y_{\mathcal{S}}^*\}_{\mathcal{S} \in \mathcal{F}}$ 为最优解。由对偶原理可知 $y_{\mathcal{S}}^* > 0$ 表明原问题约束 $\varepsilon_m + \pi(\mathcal{S}) \geq v(\mathcal{S})$ 中的等式成立, $y_{\mathcal{S}}^* = 0$ 则表明该约束中松弛变量为正。所以 P_m 最小约束集 A_m^* 对应偶变量为正的 MEM 非空子联盟, 也即

$$A_m^* = \{\mathcal{S} \in \mathcal{F} \setminus \Sigma_{m-1} | y_{\mathcal{S}}^* > 0\} \quad (18)$$

记 $\boldsymbol{\pi}_m^*$ 为 P_m 最小约束集 A_m^* 对应的最优分配方案。另外, 记 $\Sigma_m^* = \bigcup_{l \leq m} A_l^*$ 。注意到, 最差情况下, 每次迭代仅能最小化一个 MEM 子联盟的不满意度, 共需要迭代 $2^N - 1$ 次求解 P_m 和 D_m 才能精确计算核仁。为解决核仁分配方案的计算难题, 本文通过建立 P_m 的等价形式来增加每次迭代中优化不满意度子联盟的个数, 进而降低核仁计算复杂度。

首先, 将考虑多能源微网子联盟 $\mathcal{S} \subseteq \mathcal{F}$ 的特征向量记为 $\boldsymbol{e}(\mathcal{S}) = (1_1^{\mathcal{S}}, 1_2^{\mathcal{S}}, \dots, 1_N^{\mathcal{S}})$, 于是分配方案 $\boldsymbol{\pi}$ 下子联盟 \mathcal{S} 分配到的社会总福利为 $\pi(\mathcal{S}) = \boldsymbol{e}(\mathcal{S}) \boldsymbol{\pi}^T$ 。然后, 对给定子联盟集合和子联盟 $\mathcal{S} \subseteq \mathcal{F}$, 若特征向量 $\boldsymbol{e}(\mathcal{S})$ 位于向量集合 $\{\boldsymbol{e}(\mathcal{V}) : \mathcal{V} \subseteq \mathcal{F}'\}$ 的线性生成空间, 则称联盟 \mathcal{S} 由集合 \mathcal{F}' 线性生成, 记为 $\mathcal{S} \subseteq \text{span}(\mathcal{F}')$ 。最后, 将子联盟集合 \mathcal{F}' 的秩定义为向量集合 $\{\boldsymbol{e}(\mathcal{V}) : \mathcal{V} \subseteq \mathcal{F}'\}$ 的秩, 记为 $\text{rank}(\mathcal{F}') = \text{rank}(\{\boldsymbol{e}(\mathcal{V}) : \mathcal{V} \subseteq \mathcal{F}'\})$ 。

定理 3(等价构造) 对任意 $m \geq 1$, 优化问题 P_m 与 P'_m 等价, 其中优化问题 P'_m 构造如式(19)所示。

$$\begin{cases} \min \varepsilon_m \\ \text{s.t.} \begin{cases} \varepsilon_m + \pi(\mathcal{S}) \geq v(\mathcal{S}), \forall \mathcal{S} \subseteq \mathcal{F} \setminus \text{span}(\Sigma_{m-1}^*) \\ \pi(\mathcal{S}) = \pi_{m-1}^*(\mathcal{S}), \forall \mathcal{S} \subseteq \Sigma_{m-1}^* \\ \pi(\mathcal{N}) = v(\mathcal{N}) \\ \boldsymbol{\pi} \in \mathbf{R}^N, \varepsilon_m \in \mathbf{R} \end{cases} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $\pi(\mathcal{S})$ 和 $\pi_{m-1}^*(\mathcal{S})$ 分别为子联盟 \mathcal{S} 在分配方案 $\boldsymbol{\pi}$ 和 $\boldsymbol{\pi}_{m-1}^*$ 下获得的效益, 可通过式(10)计算得到。

证明: 当 $m=1$ 时, 显然有 P_1 和 P'_1 相同。当 $m > 1$ 时, 假设 $\boldsymbol{\pi}_m$ 为 P_m 的可行解, 则有

$$\varepsilon_l^* + \pi_m^*(S) = v(S), \forall S \in A_l^*, l=1,2,\dots,m-1 \quad (20)$$

又因为 $(\varepsilon_{m-1}^*, \pi_{m-1}^*)$ 为 P_{m-1} 中对应最小约束集 A_{m-1}^* 的最优解, 于是式(21)成立。

$$\varepsilon_l^* + \pi_{m-1}^*(S) = v(S), \forall S \subseteq A_l^*, l=1,2,\dots,m-1 \quad (21)$$

结合式(20)和式(21)可得 P_m 中的等式约束 $\varepsilon_l^* + \pi(S) = v(S)$ 等价于 $\pi_m(S) = \pi_{m-1}^*(S)$ 。另外, 对任意子联盟 $S \subseteq \text{span}(\Sigma_{m-1}^*)$, 其不满意度 $v(S) - \pi_m(S) = v(S) - \pi_{m-1}^*(S)$ 已经确定, 无需继续最小化。因此, P_m 中的不等式约束等价于 $\varepsilon_m^* + \pi(S) \geq v(S), \forall S \subseteq \mathcal{F} \setminus \text{span}(\Sigma_{m-1}^*)$ 。综上, P_m 和 P_m' 有相同的目标和约束, 等价性成立。

类似地, 可建立优化问题 P_m' 的对偶形式 D_m' , 由 P_m 与 P_m' 等价可知 D_m 与 D_m' 也等价。下面给出嵌套式原对偶算法求解基于核仁的多能源微电网集群事后合作效益分配方案的流程。

嵌套式原对偶算法实现核仁精确求解

- 1: 通过式(9)计算全体多能源微网子联盟的价值
- 2: 初始化 $\Sigma_0^* = A_0 = \emptyset$
- 3: for $m=1,2,\dots$, do
- 4: 求解 P_m' 得到最优目标值 ε_m^*
- 5: 求解 D_m' 找到最小约束集 A_m^* 并更新 $\Sigma_m^* = \Sigma_{m-1}^* \cup A_m^*$
- 6: 搜索 P_m' 中同时满足 ε_m^* 和约束集 A_m^* 的最优解 π_{m-1}^*
- 7: if $\text{rank}(\Sigma_m^*) = N$ then
- 8: 求解方程组 $\pi(S) = \pi_m^*(S), \forall S \subseteq \Sigma_m^*$, 方程组的唯一解为核仁
且算法停止
- 9: end if
- 10: end for

定理 4(算法复杂度) 实现核仁精确计算的嵌套式原对偶算法的迭代次数不超过多能源微网数量 N 。

证明: 由 P_m' 中不等式约束的性质可知

$$A_m^* \cap \text{span}(\Sigma_{m-1}^*) = \emptyset, \forall m \geq 1 \quad (22)$$

由式(22)可得, 当 $\text{rank}(\Sigma_m^*) \leq N$ 时, 有

$$\begin{aligned} \text{rank}(\Sigma_m^*) &= \text{rank}(\text{span}(\Sigma_m^*)) = \\ &= \text{rank}(\text{span}(\Sigma_{m-1}^*)) + \text{rank}(\text{span}(A_m^*)) > \\ &= \text{rank}(\text{span}(\Sigma_{m-1}^*)) = \text{rank}(\Sigma_{m-1}^*) \end{aligned} \quad (23)$$

于是, $N \geq \text{rank}(\Sigma_m^*) \geq \text{rank}(\Sigma_{m-1}^*) + 1 \geq \text{rank}(\Sigma_0^*) + m = m$, 表明算法的迭代次数控制在 $m \leq N$ 。当 $\text{rank}(\Sigma_m^*) = N$ 时, 方程组 $\pi(S) = \pi_m^*(S), \forall S \subseteq \Sigma_m^*$ 存在唯一解, 该解为核仁。

4 算例分析

本文以 4 个多能源微网组成的微电网集群为例,

分析所提协同运行策略和效益分配方案的优势。每个 MEM 的设备配置如表 1 所示, 分时段购电价格如表 2 所示, 上网电价为该时段购电价格的 50%^[30]。日前典型光伏出力、电负荷以及热负荷预测数据如图 2 所示, 室外温度、最适宜温度、最低温度和最高温度如图 3 所示, 其中热负荷是将室内温度维持在舒适水平所需的热能。

表 1 多能源微网设备配置

Table 1 Equipment configuration of MEMs

	MEM1	MEM2	MEM3	MEM4
PV	×	✓	✓	✓
CHP	✓	×	✓	✓
HP	✓	✓	×	✓
EES	×	×	✓	✓
TES	×	✓	×	✓

表 2 多能源微网分时段购电价格

Table 2 Time-of-use price of MEMs

时段	价格/(美元/kWh)
谷段(20:00—07:00)	0.082
平段(07:00—11:00, 18:00—20:00)	0.113
峰段(11:00—18:00)	0.17

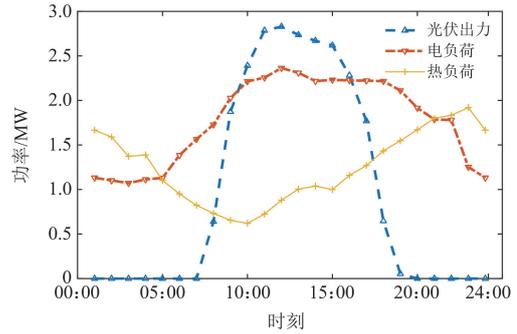


图 2 MEMs 典型光伏出力、电负荷以及热负荷曲线
Fig. 2 Typical curves of PV output, electricity load, and heat load of MEMs

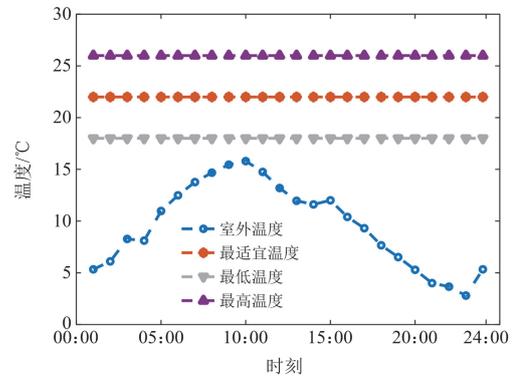


图 3 室外温度、最适宜温度、最低温度和最高温度曲线
Fig. 3 Curves of outdoor, preference, lowest, and highest temperatures

4.1 协同运行结果对比分析

通过对比以下 3 种情形评价本文所提方法的经济性和与合理性。情形 1: MEM 独立运行且不执行需求响应。情形 2: MEM 独立运行并执行需求响应。情形 3: MEM 合作运行并实施需求响应。3 种情形下 MEM 集群与配网运营商间日前交易的总电量如图 4 所示。由图 4 可以看出: 1) 11:00—17:00 时段内的交易电量为负意味着光伏大发、余电上网, 此时与情形 1 和情形 2 相比, 情形 3 时余电上网电量明显降低; 2) 在 07:00—10:00 和 15:00—19:00 时段, 情形 3 下的电量交易接近于零, 表明 MEM 集群通过能源交易在集群内部实现了供需平衡; 3) 电-热需求响应的实施降低了全体 MEM 与配电网日前交易的总电量, 且该总电量随着多能源微网之间协同合作开展可交易能源而进一步降低。综上, 图 4 表明本文所提方法可通过允许 MEM 间的负荷转移和能量交易来显著降低微网集群对配电网的依赖。

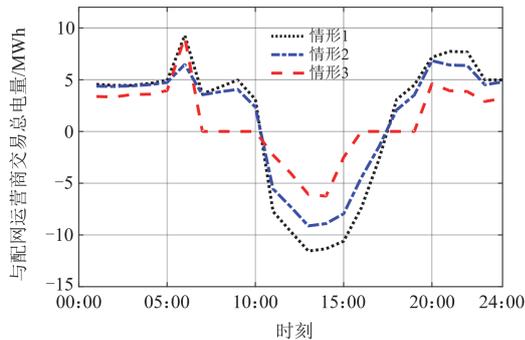


图 4 全体多能源微网与配电网日前交易总电量

Fig. 4 Day-ahead total amount of electricity traded of the MEM cluster with the distribution system operator

表 3 给出了 3 种情形下各 MEM 的日前效益。从表 3 可以看出: 1) 与情形 1 和情形 2 下的非合作模式相比, 在情形 3 基于可交易能源的合作模式下, 每个多能源微网均提升了自身效益; 2) MEM1 和 MEM2 由于供电方式不同, 其效益差异较大, 通过合作, MEM2 可以向其他 MEMs 共享其过剩的光伏发电, 同时 MEM1 可以消纳其他 MEMs 的过剩光伏, 最终 MEM1 和 MEM2 的效益都有所增加;

表 3 3 种情形下各 MEM 的日前效益

Table 3 Day-ahead welfare of each MEM under three cases

	效益/美元		
	情形 1	情形 2	情形 3
MEM1	-5916.12	-5510.71	-4287.2
MEM2	254.19	401.2	654.04
MEM3	-2113.77	-1874.01	-1430.06
MEM4	-1151.23	-992.29	-876.13
总效益	-8926.93	-7975.81	-5939.35

3) MEM3 相比, MEM4 的 CHP 机组能满足部分热负荷, 而且其配置的 EES 增加了光伏消纳率, 因此 MEM4 的效益比 MEM3 高, 且通过协调能源交互, MEM3 和 MEM4 都提升了自身效益。

4.2 效益分配方案对比分析

本节通过与现有文献常采用的合作博弈效益分配方案进行对比, 来展示本文提出的基于核仁分配方案的优势。表 4 给出了基于 Shapley 值、Nash 谈判、核以及核仁的效益分配方案。从表 4 可以看出: 1) 核中至少存在表 4 给出的两种保持联盟稳定性的分配方案, 其中左侧的方案对 MEM1、MEM2 和 MEM4 更有利, 而右侧的方案则对 MEM3 更有利, MEMs 间对具体选择哪种方案难以形成一致意见。2) 基于 Shapley 值和 Nash 谈判的联盟最大不满意度大于 0, 这意味着存在对分配结果不满意的子联盟, 合作难以稳定进行。具体地, 在 Shapley 值分配方案中, 由 MEM2、MEM3 和 MEM4 组成的小联盟对分配结果不满意, 其更愿意组成子联盟以提高整体效益 59.13 美元。在 Nash 谈判分配方案中, MEM1 和 MEM2 对分配结果不满意, 会选择退出大联盟重新形成子联盟以提高整体效益 298.3 美元。3) 本文采用的基于核仁的分配方案是唯一的, 且能保证全体多能源微网合作的稳定进行。

表 4 基于 Shapley 值、Nash 谈判、核及核仁的效益分配结果

Table 4 Benefit allocation outcomes based on Shapley value,

Nash bargaining, core and nucleolus

	Shapley值	Nash谈判	核仁	核	
MEM1	-4543.68	-5001.6	-4287.2	-4209.65	-4248.42
MEM2	759.76	910.31	654.04	731.6	692.82
MEM3	-1415.99	-1364.9	-1430.06	-1609.2	-1519.63
MEM4	-739.44	-483.17	-876.13	-852.1	864.12
总效益	-5939.35	-5939.35	-5939.35	-5939.35	-5939.35
最大不满意度	59.13	298.3	0	0	0
子联盟	{2,3,4}	{1,2}	{1,2,3,4}	{1,2,3,4}	{1,2,3,4}

4.3 核仁求解算法对比分析

为验证本文所提嵌套式原对偶算法在计算核仁分配方案时的有效性, 将 MEM 数量从 4 个增加到 10 个, 仿真环境为 MATLAB2017a, 计算结果如表 5 所示。从表 5 可以看出: MEM 全体子联盟最优运行策略的平均优化时间随着联盟规模的扩大而增加, 当 MEMs 的数量增加到 8 和 10 时, 优化时间达到分钟级别, 这主要是因为决策维度和约束量的增加, 以及非线性的目标和约束条件。另外, 传统核仁计算方法的迭代次数关于 MEM 的数量呈指数级增长, 而所提的嵌套原对偶算法将迭代次数限制

到不超过多能源微网的数量。表 5 的结果表明，本文所提嵌套式原对偶方法较传统核仁计算方法在求解基于核仁的效益分配方案时计算速度和效率得到显著提高，具有较强的可延展性和实用性。

表 5 不同 MEM 集群规模下的计算性能比较

Table 5 Calculation performance with different sizes of MEMs

MEM数量		4	6	8	10
子联盟个数		15	63	255	1023
平均优化时间/s		15.70	42.10	97.10	178.48
传统核仁求解算法	迭代次数	11	57	247	1013
	时间/s	2.50	0.67	4.89	19.10
嵌套式原对偶算法	迭代次数	2	4	3	3
	时间/s	0.27	0.17	0.23	0.34

5 结论

针对多能源微网集群的协同运行优化问题，本文基于合作博弈理论，提出了一种基于稳定大联盟的交互式多能源微网集群协同运行策略，建立了考虑可交易能源的多能源微网集群合作博弈模型，证明该模型满足超可加性和平衡性，采用基于核仁的事后效益分配方案，设计了嵌套式原对偶算法实现核仁分配方案的精确有效求解。通过算例分析，得出以下结论。

1) 与各多能微网独立运行相比，微网间通过合作执行电-热需求响应和能源协同交互，降低了对配电网的依赖，有效提升了各微网的效益水平。

2) 相较于基于Shapley值、Nash谈判和核的事后效益分配方案，基于核仁的效益分配方案能保证微网间达成一致协议并维持联盟稳定运行。

3) 所提嵌套式原对偶算法在计算核仁分配方案时较传统核仁计算方法能显著降低迭代次数、提高模型的可延展性和实用性。

参考文献

- [1] DUAN Y, LI P, XIA J. Prediction and scheduling of multi-energy microgrid based on BiGRU self-attention mechanism and LQPSO[J]. *Global Energy Interconnection*, 2024, 7(3): 347-361.
- [2] 陈飞雄, 郭奕鑫, 邵振国, 等. 计及新能源出力相关性的多能源微网仿射实时优化调度[J]. *电网技术*, 2024, 48(8): 3248-3257.
CHEN Feixiong, GUO Yixin, SHAO Zhenguo, et al. Affine real-time optimal dispatching for multi-energy microgrid with renewable energy output correlation[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(8): 3248-3257.
- [3] ZHANG M, YHAN Y, LIU Y, et al. Multi-timescale modeling and dynamic stability analysis for sustainable microgrids: state-of-the-art and perspectives[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2024, 9(3): 1-35.
- [4] 徐雨舟, 唐忠. 含 CSPP 的区域多能源微网优化调度模型[J]. *智慧电力*, 2024, 52(10): 24-31.
XU Yuzhou, TANG Zhong. Optimal scheduling model of regional multi-energy microgrid containing concentrating solar power plant[J]. *Smart Power*, 2024, 52(10): 24-31.
- [5] 时珊珊, 张智泉, 方陈, 等. 基于合作博弈和高斯混合聚类的多主体综合能源微网群联盟能量管理策略[J]. *南方电网技术*, 2025, 19(4): 63-77.
SHI Shanshan, ZHANG Zhiquan, FANG Chen, et al. Coalition energy management strategy for multi-agent integrated energy microgrid cluster based on cooperative game and Gaussian mixture clustering[J]. *Southern Power System Technology*, 2025, 19(4): 63-77.
- [6] 张栋梁, 魏奇, 赵阳, 等. 基于动态运行包络的多微网合作运行方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(6): 51-62.
ZHANG Dongliang, WEI Qi, ZHAO Yang, et al. Multi-microgrids cooperative operation method based on dynamic operating envelopes[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(6): 51-62.
- [7] 俞保记, 张恩硕, 张国, 等. 考虑综合需求响应与“双碳”机制的综合能源系统优化运行[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(22): 11-19.
YUN Baoji, ZHANG Enshuo, ZHANG Guo, et al. Optimal operation of an integrated energy system considering integrated demand response and a “dual carbon” mechanism[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(22): 11-19.
- [8] 晏鸣宇, 王玲玲, 滕飞, 等. 面向分布式能源的可交易能源市场研究综述与展望[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(18): 33-48.
YAN Mingyu, WANG Lingling, TENG Fei, et al. Review and prospect of transactive energy market for distributed energy resources[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(18): 33-48.
- [9] TUSHAR W, SAHA T K, YUEN C, et al. A motivational game-theoretic approach for peer-to-peer energy trading in the smart grid[J]. *Applied Energy*, 2019, 243: 10-20.
- [10] 胡健, 于娣, 张晓杰. 电力 P2P 交易中计及社会福利的产消者合作联盟[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(3): 960-970.
HU Jian, YU Di, ZHANG Xiaojie. Prosumer alliance in P2P transaction of electricity considering social welfare[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(3): 960-970.
- [11] PAUDEL A, CHAUDHARI K, LONG C, et al. Peer-to-peer energy trading in a prosumer-based community microgrid: a game-theoretic model[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(8): 6087-6097.
- [12] LI Z, MA T. Peer-to-peer electricity trading in grid-connected residential communities with household distributed photovoltaic[J]. *Applied Energy*, 2020, 278.

- [13] YAZDANI-DAMAVANDI M, NEYESTANI N, SHAFIE-KHAH M, et al. Strategic behavior of multi-energy players in electricity markets as aggregators of demand side resources using a bi-level approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 397-411.
- [14] SHAMSI P, XIE H Q, LONGE A, et al. Economic dispatch for an agent-based community microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(5): 2317-2324.
- [15] NUNNA H S V S K, SRINIVASAN D. Multiagent-based transactive energy framework for distribution systems with smart microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(5): 2241-2250.
- [16] 施锡铨. 合作博弈引论[M]. 北京: 北京大学出版社, 2012.
- [17] MASCHLER M, ZAMIR S, SOLAN E. Game theory[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2020.
- [18] CHAKRABORTY P, BAEYENS E, POOLLA K, et al. Sharing storage in a smart grid: a coalitional game approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 10(4): 4379-4390.
- [19] SANJAB A, LE CADRE H, MOU Y. TSO-DSOs stable cost allocation for the joint procurement of flexibility: a cooperative game approach. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(6): 4449-4464.
- [20] 张智泉, 陈晓杰, 符杨, 等. 基于核仁聚类估计和数据驱动分布鲁棒优化的海量异构产消者联盟能量管理策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(7): 98-114.
ZHANG Zhiquan, CHEN Xiaojie, FU Yang, et al. Energy management strategy for massive heterogeneous prosumers alliance based on nucleolar clustering estimation and data-driven distributionally robust optimization[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(7): 98-114.
- [21] 姚文亮, 王成福, 赵雨菲, 等. 不确定性环境下基于合作博弈的综合能源系统分布式优化[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(20): 43-53.
YAO Wenliang, WANG Chengfu, ZHAO Yufei, et al. Distributed optimization of integrated energy system based on cooperative game in uncertain environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(20): 43-53.
- [22] CHI A, KOIVUNEN V. Coalitional game-based cost optimization of energy portfolio in smart grid communities[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 10(2): 1960-1970.
- [23] 田海东, 何山, 艾纯玉, 等. 计及能源交易下基于纳什议价模型的多微网合作博弈运行优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6): 29-41.
TIAN Haidong, HE Shan, AI Chunyu, et al. Optimization strategy for cooperative game operation of multi-microgrids based on the Nash bargaining model considering energy trading[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 29-41.
- [24] 易宇琴, 许加柱, 张伟明, 等. 考虑两阶段鲁棒优化配置的多微网合作博弈[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(22): 149-156.
YI Yuqin, XU Jiazhu, ZHANG Weiming, et al. Multi-microgrid cooperative game considering two-stage robust optimal configuration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(22): 149-156.
- [25] MA L, LIU N, ZHANG J, et al. Real-time rolling horizon energy management for the energy-hub-coordinated prosumer community from a cooperative perspective[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 34(2): 1227-1242.
- [26] 谢俊, 段佳南. 基于合作博弈的风-光-水互补发电系统保证容量分配策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(21): 79-88.
XIE Jun, DUAN Jianan. Firm generation capacity allocation strategy of wind-solar-hydro complementary generation system based on cooperative game[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(21): 79-88.
- [27] BENEDEK M, FLIEGE J, NGUYEN T D. Finding and verifying the nucleolus of cooperative games[J]. Mathematical Programming, 2021, 190(1): 135-170.
- [28] 霍巍, 张耀, 赵寒亭, 等. 基于联盟合作博弈的风电数据定价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(19): 97-107.
HUO Wei, ZHANG Yao, ZHAO Hanting, et al. Wind power data pricing method based on an alliance cooperation game[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(19): 97-107.
- [29] 张忠会, 熊骁跃, 万昶, 等. 计及电-碳交易与综合贡献率的多微网合作运行优化策略[J]. 电网技术, 2024, 48(8): 3258-3268.
ZHANG Zhonghui, XIONG Xiaoyue, WAN Chang, et al. Multi-microgrids cooperative operation optimization strategy considering electricity-carbon trading and comprehensive contribution rate[J]. Power System Technology, 2024, 48(8): 3258-3268.
- [30] ALSKAIF T, CRESPO-VAZQUEZ J L, SEKULOSKI M, et al. Blockchain-based fully peer-to-peer energy trading strategies for residential energy systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 18(1): 231-241.

收稿日期: 2025-08-03; 修回日期: 2025-10-20

作者简介:

徐爽(1994—), 女, 工程师, 研究方向为博弈论、电力市场与虚拟电厂; E-mail: 775103442@qq.com

崔世常(1994—), 男, 通信作者, 助理研究员, 研究方向为电力系统规划、分布式智能电网优化与需求响应。E-mail: shichang_cui@hust.edu.cn

(编辑 周金梅)