

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241465

计及 P2P 电力交易不确定性的微网群区间联盟形成博弈

王鲁浩¹, 张淑芳¹, 张凯¹, 张玉敏², 卜凡鹏³, 程新功¹

(1. 济南大学自动化与电气工程学院, 山东 济南 250024; 2. 山东科技大学电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590; 3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: P2P 电力交易是促进微网群互联互通、供需平衡的重要手段之一。然而交易过程中不确定性扰动降低了微网群协作的可行性和稳定性。为此, 提出了基于区间联盟形成博弈的微网群 P2P 电力交易方法, 揭示了不确定扰动下微网 P2P 交易匹配机理。首先, 建立了微网不确定交易量和交易价格的区间模型, 设计了基于多对一最高区间价格密封式拍卖的微网交易匹配方法, 采用区间 Shapley 值合理分配联盟效用。其次, 提出了群体两阶段多目标支配的微网群最优交易顺序筛选方法, 寻找联盟及微网个体最优效用。最后, 设计了基于区间 Pareto 排序的联盟合并和分裂算法, 证明了联盟结构的 \mathbb{D}_{hp} -稳定性。对比不同数量微网及确定性联盟形成博弈方法, 算例分析表明在不确定性扰动下所提方法获得了稳定且最优的微网联盟。

关键词: 微网群; P2P 交易; 区间联盟博弈; 群体多目标支配

Interval coalition formation game for microgrid clusters considering P2P power trading uncertainty

WANG Luhao¹, ZHANG Shufang¹, ZHANG Kai¹, ZHANG Yumin², BU Fanpeng³, CHENG Xingong¹

(1. School of Electrical Engineering, University of Jinan, Jinan 250024, China; 2. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Peer-to-peer (P2P) power trading is one of the important means to promote interconnection and mutual support among microgrid clusters and to maintain supply-demand balance. However, uncertainties in the trading process reduce the feasibility and stability of microgrid cooperation. To address this issue, a microgrid P2P power trading method based on the interval coalition formation game is proposed, which reveals the matching mechanism of microgrid P2P power trading under uncertainties. First, an interval model for uncertain transaction volumes and prices is established. According to the highest interval price, power trading matching method is designed based on a multi-to-one sealed-bid auction method, and the interval Shapley value is employed to fairly allocate the coalition utilities. Second, an optimal transaction sequence screening method is developed based on the two-stage multi-objective dominance method to identify the optimal sequence for the microgrid cluster, thereby obtaining both coalition-level and individual microgrid utilities. Finally, coalition merging and splitting algorithms based on interval Pareto sorting are presented, proving the \mathbb{D}_{hp} -stability of the resulting coalition structures. Case studies comparing different numbers of microgrids and deterministic coalition formation game methods show that the proposed method obtains stable and optimal microgrid coalitions under uncertain disturbances.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR2023MF056).

Key words: microgrid cluster; P2P trading; interval coalition games; group multi-objective dominance

0 引言

近年来, 不同类型且地域分散的微网通过电力

交易实现新能源就近消纳、促进区域电网电力平衡^[1-3]。由于微网分属于不同利益主体, 故交易过程中会出现合作和非合作模式, 导致买方与卖方匹配复杂。随机性新能源出力和负荷易造成微网交易需求不确定, 使得电力交易存在中断和失败等风险。因此, 如何在不确定扰动下协调不同微网交易关系, 如何确保电力交易的稳定性和最优性是亟待研究的关键问题。

电力交易博弈论^[4]是协调多方利益的有效方法

基金项目: 山东省自然科学基金项目资助 (ZR2023MF056); 国家自然科学基金面上基金项目资助 (62273163); 山东省科技型中小企业创新能力提升项目资助 (2022TSGC2031); 国家电网公司总部科技项目资助 (51008-202218280A-2-392-XG)

之一。非合作博弈和合作博弈^[5]在处理微网群交易问题上各有利弊，本文考虑微网群协商以消除交易波动性和促进区域供需电力平衡，因此更关注基于合作博弈的微网群电力交易模式。合作博弈可分为纳什议价^[6-9]和联盟博弈^[10-16]。文献[8]基于纳什议价构建产消者合作联盟模型以实现社会福利最大化，并依据产消者对社会福利贡献分配剩余价值，激励产消者参与合作的积极性。文献[9]构建了多微网议价交易的合作调控模型，通过求取合作博弈的 Pareto 解确定微网最优议价交易策略，实现多微网运行成本最小化。然而，文献[8-9]所提纳什议价方法均预先假设所有成员自愿参与合作，并未探讨合作的稳定性、最优性以及达成协商的可行性，容易导致微网效益受损，造成合作分化。相比之下，联盟博弈侧重于研究联盟形成机制及结构稳定性。联盟博弈通常可分为典型联盟博弈^[10-12]、联盟图博弈^[13]和联盟形成博弈^[14-16]。文献[10]根据产消者能源需求、地理位置和交易价格，提出了考虑产消者端对端(peer to peer, P2P)能源交易优先级的合作博弈论框架，旨在扩大联盟中产消者规模。与之类似，文献[11-12]分别在有限供应情况下协调 P2P 供给和需求，并在不违反配电网物理约束下扩大联盟规模。规模的变化需要考虑联盟稳定性和成员参与度，因此通过构建基于联盟图博弈的 P2P 能源交易框架，产消者可依据能源需求和投标价格组建联盟^[13]。文献[14-15]面向局部配电网提出了微网联盟博弈形成方法和交易策略，给出了不再执行合并和分裂过程即达到稳定状态的判定标准，仿真结果显示，微网能够自组织形成不相交联盟。在此判定标准的基础上，文献[16]进一步提出了基于破坏和重构过程的联盟形成算法，将联盟结构更新粒度进行细分，从而获得稳定更优的微网联盟结构。尽管文献[10-16]采用联盟博弈理论实现了微网间或产消者间电力的协调交易，但忽略了随机性新能源和负荷等不确定性对联盟形成和电力交易的影响。

交易过程中不可避免会遇到新能源、负荷、电价等不确定性因素，容易造成交易失败或中断等风险^[17]。考虑到可再生能源的预测误差，文献[18]建立了日前微网 P2P 电力交易分布式鲁棒优化模型，仿真显示不确定性水平影响联盟内部能源供需量。针对不确定性扰动下的交易定价问题，文献[19]采用鲁棒优化方法辅助独立运营商制定能源交易价格，引导微网群进行能源交易。文献[20]构建了互联微网自适应鲁棒 P2P 能源交易模型，仿真结果显示，P2P 能源交易方案对风电随机性波动具有良好的适应性，但交易价格未被讨论。尽管文献[19-20]采用随

机优化、鲁棒优化等方法处理了客观不确定性因素，显著降低了不确定性对交易量和交易价格的影响。但一些难以描述的主观不确定性(如交易意愿、偏好)仍可能造成交易波动，直接影响联盟规划和稳定性^[21-22]。为此，本文直接将交易量、交易价格视为不确定性因素，采用区间优化方式确保交易稳定性。

本文针对不确定性扰动下微网群合作交易问题，提出了一种基于区间联盟形成博弈的微网群 P2P 电力交易方法。主要贡献如下：1) 构建了基于合作博弈的微网群区间 P2P 交易框架，提出微网密封拍卖区间电力匹配交易模式，采用区间交易量和交易价格描述不确定性对交易的影响，基于区间 Shapley 值合理分配联盟效用。2) 提出了基于群体多目标支配的联盟交易顺序筛选方法，优化了联盟内微网间匹配交易顺序，在联盟众多交易顺序中筛选能够产生最优联盟效用与个体微网效用的联盟交易顺序。3) 设计了基于区间 Pareto 排序的联盟合并和分裂算法，通过联盟结构迭代更新，实现了联盟效用的最大化，并证明了联盟结构的 D_{hp} - 稳定性。

1 问题描述

微网群拓扑如图 1(a)所示。微网群由多个微网

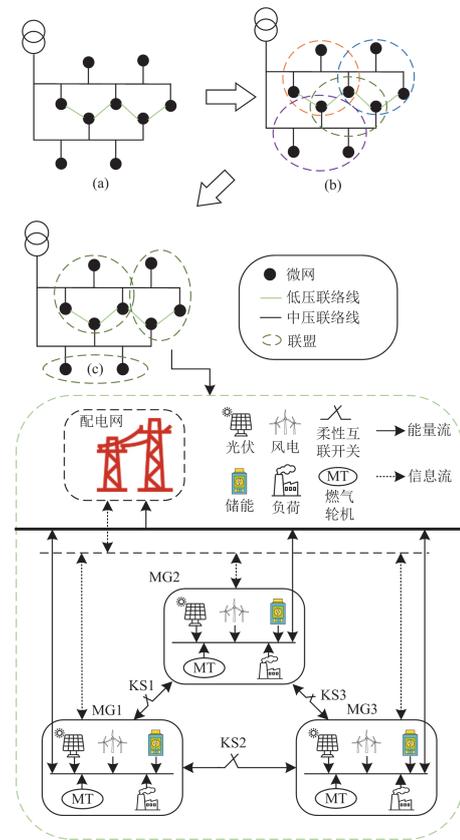


图 1 微网群拓扑示意图

Fig. 1 Schematic diagram of microgrid clusters topologies

组成。单一微网可通过公共连接点与配电网或通过柔性互联开关与其他微网进行电力交互, 促进区域电力互联互通。由于不同微网交易组合所能达到的供需平衡和线路降损效果不同, 且电力交易过程存在博弈行为, 因此微网群电力交易被视为一类多主体能源系统联盟博弈优化问题^[23]。

任意微网联盟至少包含一个购电微网和一个售电微网, 联盟内任意两微网间电气距离小于线路建设范围 α 。微网群存在多种微网联盟组合形态(图1(b)), 然而一些联盟效用较低, 容易导致交易组合分裂, 影响微网参与积极性, 故在博弈过程中需找出最优联盟分布(图1(c))。此外, 客观和主观等不确定因素容易造成电力交易量和交易价格波动, 影响联盟稳定性, 须确保交易稳定性并降低不确定性对联盟形成的影响。因此, 本文依次展开微网群区间交易匹配、联盟区间效用计算与分配、联盟最优交易顺序筛选、最优网络联盟分区划分等研究, 技术路线如图2所示。

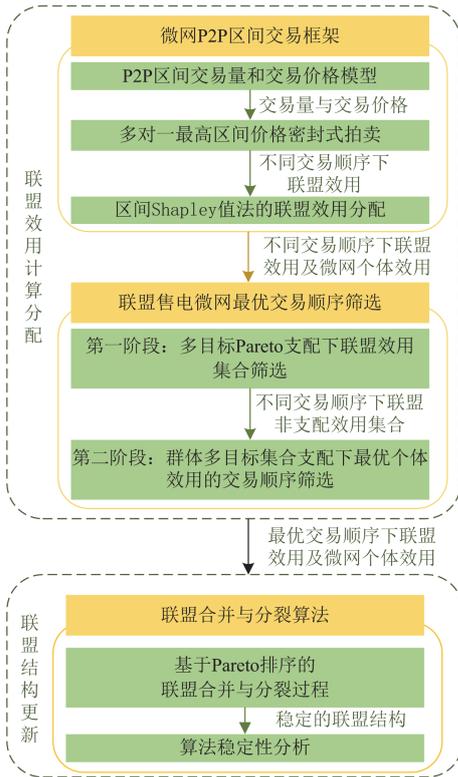


图2 技术路线

Fig. 2 Technical route

2 基于区间合作博弈的微网群交易框架

新能源出力和负荷的不确定性, 以及微网为谋取更高收益可能存在的不诚信交易行为, 导致交易需求不确定。随机优化、鲁棒优化、分布式鲁棒优

化等不确定性处理方式容易增加交易匹配的计算复杂性, 所建立的微网异构模型(不同的目标函数和耦合约束)难以直接获取联盟效用。故本文使用区间数描述单位时段内微网的电力交易需求。微网 k 在单位时段 t 内的电力交易需求记为 P_k , 其取值区间为 $[P_k^l, P_k^u]$, 其中 P_k^l 、 P_k^u 分别为其交易需求的下界和上界。定义 $P_k^l > 0$ 且 $P_k^u > 0$ 的电力盈余微网为售电微网, 可向配电网或其他微网售电; 定义 $P_k^l < 0$ 且 $P_k^u < 0$ 的电力短缺微网为购电微网, 可向配电网或其他微网购电。本文不考虑单位时段内既能购电又能售电的购售电微网。如无特殊说明, 所有交易功率均为区间值。

2.1 P2P 区间交易量模型

参照文献[24], 给定任意微网 k , 其与配电网交易电力的损耗 P_{kd}^l 如式(1)所示。

$$P_{kd}^l = \frac{P_{kd}^2 R_{kd}}{U_d^2} + \beta P_{kd} \quad (1)$$

式中: P_{kd} 为微网 k 与配电网的交易量; R_{kd} 为微网 k 与配电网间的联络线电阻; U_d 和 β 分别为配电网侧变压器的电压水平与电力损耗参数。

若 k 为售电微网, 交易量 P_{kd} 为售电交易需求 P_k 。若 k 为购电微网, 交易量 P_{kd} 为购电交易需求 P_k 与交易线损 P_{kd}^l 之和, 如式(2)所示。

$$P_{kd} = P_{kd}^l + P_k \quad (2)$$

购电微网 i 与售电微网 j 的电力交易模型为

$$P_{ij} = \frac{P_j^2 R_{ij}}{U_m^2} + P_i \quad (3)$$

$$P_{ij}^R = \min(P_{ij}, P_j) \quad (4)$$

$$P_{ij}^L = \frac{(P_{ij}^R)^2 R_{ij}}{U_m^2} \quad (5)$$

式中: P_{ij} 为 i 计划从 j 处购买的电量; R_{ij} 为 i 与 j 间的联络线电阻; U_m 为微网侧电压水平; P_i 、 P_j 分别为 i 购电、 j 售电的交易需求量; P_{ij}^R 为 j 向 i 实际出售的电量; P_{ij}^L 为 i 与 j 实际交易电量的损耗。

2.2 P2P 区间价格模型

电力交易需求波动将进一步导致微网交易价格的不确定。本文基于区间交易量建立电力交易区间价格模型。购电价格 H_i 如式(6)所示。

$$H_i = \frac{\omega_g \cdot P_{id}}{P_{ij}^S} \quad (6)$$

$$P_{ij}^S = P_{ij}^R - P_{ij}^L \quad (7)$$

式中： ω_g 为配电网购售电电价； P_{ij}^S 为*i*从*j*实际接收的电量； P_{id} 为*i*从配电网实际接收电量为 P_{ij}^S 时，其与配电网的交易量。

售电微网*j*的售电价格 L_j 如式(8)。

$$L_j = \frac{P_{oj}^R \cdot \omega_g}{P_j} \quad (8)$$

式中： P_{oj}^R 为配电网从*j*实际接收的电量。

2.3 联盟效用计算与分配模型

任意联盟*C*中所有微网可分为售电微网集合*S*和购电微网集合*B*，且 $S \cup B = C$ 。考虑到拍卖为卖方市场，本文中多对一拍卖仅指多个购电微网对一个售电微网进行拍卖。给定售电微网交易顺序 $\zeta \in A_B$ ，其中 A_B 表示*B*中微网的全部购电交易顺序， ζ 表示其中一个购电交易顺序。则购售电力交易顺序与交易量将按照以下步骤确定。

步骤1：将 ζ 中首个微网记为*j*，计算*j*的售电价格及当前*B*中每个成员对于*j*的购电价格，并将*B*中出价最高的微网标记为*i*。

步骤2：若 $H_i \geq L_j$ ，*i*将与*j*交易，同时更新交易后*i*和*j*的电力交易需求。若*i*满足电力交易需求，则从*B*中删除*i*；若*j*满足交易需求，则在*S*中删除*j*。

步骤3：若 $H_i < L_j$ ，*j*将其盈余电力出售给配电网，同时删除*S*中的*j*。

步骤4：重复步骤1—步骤3，直到*S*或*B*为空集或微网间无法进一步交易时为止，剩余电量或未满足的电力需求由配电网满足。

在执行上述步骤后，可以获得 ζ 下联盟内微网电力交易顺序与交易量。定义联盟效用为各微网与配电网交易及微网彼此之间交易所节省的电力损耗。故联盟效用 v_ζ^C 的计算如式(9)所示。

$$v_\zeta^C = \omega_g \left[\sum_{k \in C} P_{kd}^L - \sum_{i \in B, j \in S} (P_{ij}^L + P_{id}^L + P_{jd}^L) \right] \quad (9)$$

由于交易量和交易价格均为区间值，所以联盟效用也为区间值。

在联盟效用已知的情况下，如何确保效用分配公平性是维持交易稳定的关键。本文根据微网对联盟效用的贡献，采用区间 Shapley 值法将联盟效用分配给各微网^[25]。针对联盟*C*的效用 v_ζ^C ，任意微网*k* ∈ *C*的个体效用 $\varphi_\zeta^v(k)$ 计算如式(10)所示。

$$\varphi_\zeta^v(k) = \sum_{C_b \in C \setminus k} \frac{|C_b|!(|C| - |C_b| - 1)!}{|C|!} \cdot (v(C_b \cup k) - v(C_b)) \quad (10)$$

式中： C_b 为联盟*C*中一个不包含微网*k*的子联盟； $C \setminus k$ 表示联盟*C*去除微网*k*； $|C_b|$ 为子联盟 C_b 中微网的数量； $|C|$ 为联盟*C*中微网的数量； $v(C_b \cup k)$ 为联盟 $C_b \cup k$ 的联盟效用； $v(C_b)$ 为子联盟 C_b 的联盟效用。

3 联盟售电微网最优交易顺序筛选

3.1 筛选方法

基于群体两阶段多目标支配的联盟售电微网最优交易顺序筛选方法如图3所示。由于效用区间上下边界对应不确定性区间最坏情况上下边界，且具有矛盾性，该方法设定效用区间上下界为两个目标。联盟效用越大，表示电力损耗越少，因此多目标优化为max-max问题。不同售电微网交易顺序下微网交易对象和交易量存在差异，可以生成多种联盟效用及微网个体效用分配结果。为筛选出售电微网最优交易顺序，第一阶段，基于多目标(联盟效用上界 v^u 与下界 v^l)Pareto支配确定多个互不支配的最优联盟效用集合，其对应多个售电微网交易顺序；第二阶段，基于群体多目标(个体效用上界 φ^u 与下界 φ^l)集合支配方法确定微网最优个体效用的交易顺序。其中 v_ζ^C 表示在交易顺序 ζ 下的效用集合； φ_ζ^v 表示在交易顺序 ζ 下微网个体效用集合。

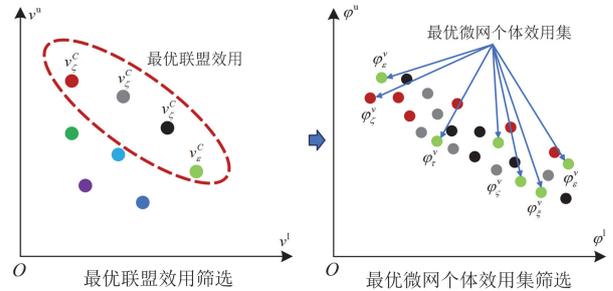


图3 联盟售电微网最优交易顺序筛选方法

Fig. 3 Optimal transaction sequence screening method for selling microgrids in coalition

3.2 基于 Pareto 支配的最优联盟效用集合筛选

联盟效用间的 Pareto 支配关系定义如式(11)所示。

$$\begin{cases} v_\zeta^C > v_g^C \\ \text{s.t. } \forall \tau \in \{l, u\}: (v_\zeta^C)^\tau \geq (v_g^C)^\tau \\ \exists \tau \in \{l, u\}: (v_\zeta^C)^\tau \geq (v_g^C)^\tau \end{cases} \quad (11)$$

式中： v_g^C 表示联盟*C*在交易顺序*g*下的联盟效用集合；*u*与*l*分别表示区间值的上、下界， $(v_\zeta^C)^u$ 表示联盟效用上界， $(v_\zeta^C)^l$ 表示联盟效用下界。

当且仅当满足式(11)时, 联盟效用 v_{ζ}^C 支配(\succ) 联盟效用 v_{ϑ}^C , 即 v_{ζ}^C 的下界与上界均不劣于 v_{ϑ}^C , 且至少有一个优于 v_{ϑ}^C 。根据支配关系, 联盟效用的 Pareto 最优集 P^* 可通过式(12)得到。

$$\begin{cases} P^* = \{v_{\zeta}^C \in \Theta\} \\ \text{s.t. for all } \zeta \neq \vartheta \\ \quad \neg \exists v_{\vartheta}^C \in \Theta : v_{\vartheta}^C \succ v_{\zeta}^C \end{cases} \quad (12)$$

式中: Θ 为一个集合, 它包含联盟 C 所有售电微网交易顺序下的联盟效用集合。若 P^* 中仅包含一个联盟效用集合, 则其对应的顺序即为售电微网最优交易顺序, 否则进入下一个环节。

3.3 基于群体多目标集合支配的微网最优个体效用的交易顺序筛选

筛选微网最优个体效用集合的步骤如下: 首先, 计算集合的 Pareto 非支配距离; 其次, 将最小 Pareto 非支配距离最大的集合视为最优集。集合的 Pareto 非支配距离 $I_{\delta^*}(S_{\zeta}, S_{\vartheta}) (\zeta, \vartheta \in \Lambda_B)$ 如式(13)所示。

$$I_{\delta^*}(S_{\zeta}, S_{\vartheta}) = \max_{1 \leq k \leq n} \{[\varphi_{\zeta}^v(k) - \varphi_{\vartheta}^v(k)]^l, [\varphi_{\zeta}^v(k) - \varphi_{\vartheta}^v(k)]^u\} \quad (13)$$

式中: S_{ζ} 表示售电微网交易顺序 ζ 的集合; S_{ϑ} 表示售电微网交易顺序 ϑ 的集合; $\varphi_{\zeta}^v(k)$ 表示微网 k 在交易顺序 ζ 下的个体效用; $\varphi_{\vartheta}^v(k)$ 表示微网 k 在交易顺序 ϑ 下的个体效用。

通过移动 Pareto 非支配距离 $I_{\delta^*}(S_{\zeta}, S_{\vartheta})$, S_{ϑ} 内各微网个体效用能够严格支配 S_{ζ} 内各微网个体效用。任意微网个体效用集合 S_{ζ} 的最小 Pareto 非支配距离 $F_{\delta}(S_{\zeta})$ 如式(14)所示。

$$F_{\delta}(S_{\zeta}) = \min_{S_{\vartheta} \in \mathcal{R}_{\zeta}} [I_{\delta^*}(S_{\zeta}, S_{\vartheta})] \quad (14)$$

式中: \mathcal{R} 为一个集合, 其中包含 P^* 中所有最优联盟效用下微网个体效用集合。最小 Pareto 非支配距离最大的微网个体效用集合如式(15)所示。

$$\max_{S_{\zeta} \in \mathcal{R}} [F_{\delta}(S_{\zeta})] \quad (15)$$

最小 Pareto 非支配距离最大的微网个体效用集合更难以受其竞争集的支配, 因此将被确定为最优集。最优集对应的交易顺序将作为联盟的售电微网最优交易顺序。

4 联盟合并和分裂算法

4.1 算法设计

微网群联盟形成是讨论在无法形成大联盟的情

况下博弈中的联盟结构组成, 即如何以不相交集的形式对微网群进行划分。本节设计基于区间 Pareto 排序的联盟合并和分裂算法, 以获得稳定微网群联盟结构。联盟结构 $D = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 为微网群的一种划分形态, 即: $x \neq y$, $C_x \cap C_y = \emptyset$ 且 $\bigcup_{C_i \in D} C_i \leq C$ 。给定由相同微网构成的不同联盟结构 $D^A = \{C_1^A, C_2^A, \dots, C_m^A\}$ 和 $D^B = \{C_1^B, C_2^B, \dots, C_n^B\}$, 当且仅当满足式(16)时, D^A 支配 D^B 。

$$\begin{cases} D^A \succ D^B \\ \text{s.t. } \forall k \in D^A, D^B : \varphi_{D^A}^v(k) \geq \varphi_{D^B}^v(k) \\ \quad \exists k \in D^A, D^B : \varphi_{D^A}^v(k) > \varphi_{D^B}^v(k) \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\varphi_{D^A}^v(k)$ 表示微网 k 在联盟结构 D^A 中的个体效用; $\varphi_{D^B}^v(k)$ 表示微网 k 在联盟结构 D^B 中的个体效用。

根据区间 Pareto 顺序, 制定以下联盟合并规则和分裂规则。

合并规则: 若 $\{\bigcup_{j=1}^k C_j\} \succ \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$, 则表明可以合并联盟 $\{C_1, C_2, \dots, C_k\}$ 的任意集合。

分裂规则: 若 $\{C_1, C_2, \dots, C_k\} \succ \{\bigcup_{j=1}^k C_j\}$, 则表明可以分裂任意联盟 $C^* = \{\bigcup_{j=1}^k C_j\}$ 。

当且仅当至少一个微网在不降低其他微网个体效用的前提下通过合并规则提高其个体效用时, 联盟才会发生合并。同样, 当且仅当至少一个子联盟能提高其成员的个体效用时, 联盟才会发生分裂。联盟合并和分裂算法如表 1 所示。步骤 2—步骤 8 代表合并联盟结构中的任意两个联盟, 同时更新联盟结构, 直至没有联盟可以继续合并; 步骤 9—步骤 17 代表分裂联盟结构中的任意联盟, 同时更新联盟结构, 直至没有联盟可以继续分裂; 步骤 18 表明联盟结构无法继续进行合并或分裂, 迭代终止; 最后输出形成的最终联盟结构。图 4 为基于群体两阶段多目标支配的联盟售电微网最优交易顺序筛选与基于区间 Pareto 排序的联盟合并和分裂算法的总体流程图。

4.2 算法稳定性分析

\mathbb{D}_{hp} - 稳定为微网群联盟结构的一种稳定性状态, 是指微网群联盟结构无法继续通过合并和分裂算法提高任意微网的个体效用^[26-27]。本节通过证明两个定理验证所提基于区间 Pareto 排序的联盟合并和分裂算法能够收敛至 \mathbb{D}_{hp} - 稳定。

定理 1: 基于区间 Pareto 排序的联盟合并和分

裂算法在有限次数内收敛。

表 1 基于区间 Pareto 排序的联盟合并和分裂算法
Table 1 Coalition merging and splitting algorithm based on interval Pareto order

基于区间 Pareto 排序的联盟合并和分裂算法	
Input:	联盟结构 D
Output:	联盟结构 D
1:	repeat
2:	// 执行合并过程
3:	for each $C_i \in D$ do
4:	联盟 C_i 尝试与联盟 C_j 合并
5:	if $C_x \cup C_y \succ \{C_i, C_j\}$ then
6:	$C_i \leftarrow C_i \cup C_j, D \leftarrow D \setminus C_j$
7:	end if
8:	end for
9:	// 执行分裂过程
10:	for each $C_i \in D$ do
11:	for all $\{C_p \cup C_q\} = C_i$ do
12:	联盟 C_i 尝试分裂为 C_p 与 C_q
13:	if $C_p \cup C_q \succ C_i$ then
14:	$C_i \leftarrow C_p, D \leftarrow D \cup C_q$
15:	end if
16:	end for
17:	end for
18:	until 联盟结构 D 无法再进行合并或分裂

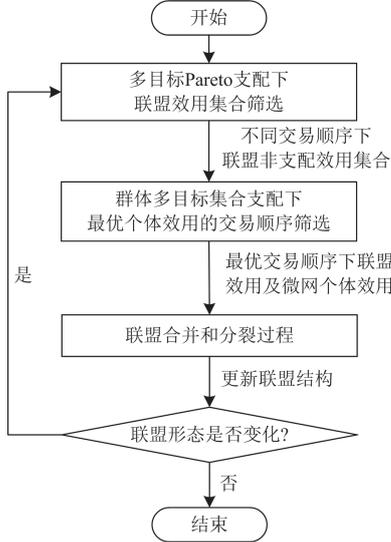


图 4 交易顺序筛选及合并与分裂算法流程图

Fig. 4 Flow chart of transaction sequence screening and merging and splitting algorithm

证明: 给定微网群任意联盟结构 $D = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 。根据算法过程, D 中所有联盟尝试合并的总次数不超过 $\sum_{i=1}^n i(i-1)/2$ 。任意联盟 C_g 尝试分裂的次数不超过 $I_g = \sum_{i=1}^l C_i^k, 1 \leq k \leq l$ (l 为联盟 C_g 中微

网的数量), D 中所有联盟尝试分裂的总次数不超过 $\sum_{g=1}^n I_g$ 。整个算法执行过程中合并和分裂的次数有限, 因此, 算法在有限次数内收敛。

定理 2: 基于区间 Pareto 排序的联盟合并和分裂算法收敛得到 \mathbb{D}_{hp} - 稳定的联盟结构。

证明: 当且仅当以下两个条件成立时, 联盟结构 $D = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 为 \mathbb{D}_{hp} - 稳定。

1) 对于每个 $T \subseteq \{1, 2, \dots, n\}$, 有

$$\sum_{i \in T} v(C_i) \geq v\left(\bigcup_{i \in T} C_i\right) \quad (17)$$

2) 对于联盟 $C_i, i \in \{1, 2, \dots, n\}$ 的联盟结构 $\{c_1, c_2, \dots, c_l\}$, 有

$$v(C_i) \geq \sum_{j=1}^l v(c_j) \quad (18)$$

式中: c_j 代表联盟内的子联盟。算法终止表示当前联盟结构中不存在通过合并途径以提高微网个体效用的联盟, 即对于每个 $T \subseteq \{1, 2, \dots, n\}$, 满足 $\{C_1, C_2, \dots, C_n\} \succ \bigcup_{i \in T} C_i$ 。由 Pareto 性质可以得出 $\sum_{i \in T} v(C_i) \geq v(\bigcup_{i \in T} C_i)$, 式(17)得证。算法终止同时表示当前联盟结构中不存在通过分裂途径以提高微网个体效用的子联盟。即 $\{C_1, C_2, \dots, C_n\} \succ \{C_1, \dots, C_{i-1}, c_1, \dots, c_j, \dots, c_l, \dots, C_n\}, i \in \{1, 2, \dots, n\}$ 且 $C_i = \bigcup_{j=1}^l c_j$ 。同样, 由 Pareto 性质可知 $v(C_i) \geq \sum_{j=1}^l v(c_j)$, 式(18)得证。

5 仿真算例

本文算例设计中, 微网随机散布在 $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$ 的配电网内。在任何时间段 t 内, 设定交易需求波动范围 η , 以对微网交易需求进行区间表征。例如, 单位时间内微网交易需求期望值为 5 MW , 交易需求波动范围 $\eta = \pm 5\%$, 则此微网区间交易需求为 $[4.75, 5.25] \text{ MW}$ 。考虑到配电网传输效率和线损, 设定 $\alpha = 15 \text{ km}$; 配电网侧及微网侧电压水平分别为 $U_d = 30 \text{ kV}$ 、 $U_m = 10 \text{ kV}$; 联络线电阻 $R = 0.2 \Omega/\text{km}$; 配电网侧变压器电力损耗参数 $\beta = 0.02$; 配电网购售电电价 $\omega_g = 375 \text{ 元/MWh}$ 。

5.1 含 24 个微网的微网群交易结果

包含 11 个购电微网和 13 个售电微网的微网群稳定联盟结构如图 5 所示。其中, 实线代表微网间联络线, 所有微网均与电网相连。微网名称下方是位置坐标和交易需求期望值。设 η 为 $\pm 3\%$ 。微网群形成了由 6 个联盟组成的稳定联盟结构(由虚线包围)。

联盟效用及微网个体效用结果如表 2 所示(效用无量纲)。以联盟 I 为例, 其包含 2 个售电微网和 3 个购电微网, 微网 7 首先满足微网 9 的购电需求, 并

将盈余电力全部出售给微网 5; 微网 19 先后满足微网 5、微网 20 的购电需求, 剩余未满足的交易需求与配电网进行交易。在此交易顺序中, 相比于微网 5、微网 20, 微网 9 优先与微网 7 交易, 这是因为微网 9 与配电网交易的电力损耗更高, 微网 9 更愿意以更高的出价与微网 7 达成交易。微网 12 在联盟 II 的 4 个微网中所分配的个体效用最高, 这是因为微网 12 是联盟 II 中唯一的售电微网, 是此联盟构成的核心, 根据 Shapley 值法, 微网 12 理应分得更高的个体效用。最后, 相比于与配电网交易, 微网 22 与其他微网合作交易的电力损耗更高, 因此其直接与配电网进行交易, 而未参与联盟交易。

在微网群中, 共有 23 个微网参与了联盟交易。其中, 17 个微网通过微网间的电力交易满足了交易需求。微网群中所有微网共同创造了 [4035.3, 4611.5] 的总联盟效用。可知, 应用本文所提基于区间 Pareto 排序的联盟合并和分裂算法能够获得稳定的微网群联盟结构, 实现微网群在不确定性扰动下的协调交易, 并有效提升了微网个体效用。

基于历史数据和实际电力市场行为, 同时确保不会对市场操作造成不必要的干扰并考虑计算分析的简洁性^[28-31], 设定 η 分别为 $\pm 3\%$ 、 $\pm 5\%$ 、 $\pm 7\%$ 、 $\pm 9\%$, 包含微网 5、7、9、19、20 的子微网群均形成了稳定大联盟结构。不同 η 下的联盟 I 效用及微网个体效用如表 3 所示。

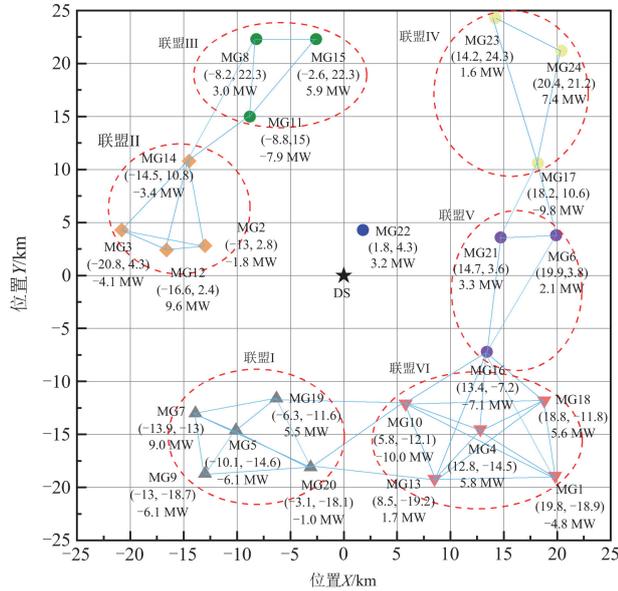


图 5 微网群稳定联盟结构

Fig. 5 Stable coalition structure of microgrid groups

表 2 联盟效用及微网个体效用

Table 2 Coalition utility and individual microgrid utility

联盟	联盟效用	微网	微网个体效用
联盟 I	[969.0, 1077.9]	MG5	[231.4, 252.4]
		MG7	[386.6, 423.0]
		MG9	[211.5, 244.9]
		MG19	[112.9, 117.8]
		MG20	[26.6, 39.8]
联盟 II	[602.8, 674.5]	MG2	[48.0, 54.4]
		MG3	[142.1, 146.3]
		MG12	[345.6, 396.9]
		MG14	[67.1, 76.9]
联盟 III	[446.6, 497.3]	MG8	[92.2, 93.4]
		MG11	[255.8, 296.3]
联盟 IV	[897.1, 1040.2]	MG15	[98.6, 107.6]
		MG17	[483.4, 584.6]
		MG23	[90.4, 112.5]
		MG24	[323.3, 343.1]
联盟 V	[241.5, 288.1]	MG6	[48.0, 54.8]
		MG16	[132.4, 162.4]
		MG21	[61.1, 70.9]
联盟 VI	[878.3, 1033.5]	MG1	[162.8, 186.8]
		MG4	[109.5, 127.4]
		MG10	[417.0, 491.2]
		MG13	[67.9, 83.6]
		MG18	[121.1, 145.5]

表 3 不同 η 下的联盟 I 效用及微网个体效用

Table 3 Coalition utility I and microgrid individual utility under different η

	$\eta = \pm 3\%$	$\eta = \pm 5\%$	$\eta = \pm 7\%$	$\eta = \pm 9\%$
联盟 I	[1001.4, 1042.2]	[967.5, 1077.8]	[940.9, 1117.5]	[905.6, 1152.0]
MG5	[238.1, 246.8]	[231.4, 252.4]	[223.5, 262.9]	[215.6, 269.2]
MG7	[396.8, 406.5]	[386.6, 423.0]	[373.5, 438.8]	[360.4, 452.6]
MG9	[222.8, 235.5]	[21.1, 24.5]	[20.8, 25.5]	[19.9, 26.5]
MG19	[114.4, 116.3]	[113.6, 117.8]	[111.0, 119.6]	[109.1, 121.9]
MG20	[29.3, 37.1]	[26.6, 39.8]	[24.4, 41.6]	[21.8, 43.5]

联盟效用下界降低是因为微网交易需求波动范围增大导致微网交易需求下界降低, 微网可供联盟内 P2P 交易的电力数额减少, 导致联盟效用下界整体降低, 因此各微网所分配个体效用的下界也相应降低。与之相反, 联盟效用上限和个体微网效用上限随着微网交易需求波动范围的增加而升高, 这主要是因为微网交易需求上界升高, 提升了联盟内微网间电力交易量。可知, 随着波动范围 η 的增大, 微网个体效用波动范围变大, 此时虽提高了微网最大效用, 但也存在低效用的风险。

图 5 联盟 VI 中售电微网数量最多, 售电微网

交易顺序更加多样。因此,选择联盟 VI 验证本文所提基于两阶段多目标支配的售电微网最优交易顺序筛选方法的有效性。联盟 VI 中 3 个售电微网存在 6 种不同的售电微网交易顺序,各顺序对应不同的联盟效用。第一阶段基于 Pareto 支配的最优联盟效用筛选结果如图 6(a)所示。由于不存在其他联盟效用支配 Pareto 前沿中星形、三角形、圆形代表的联盟效用,故筛选此 3 个最优联盟效用,并获得对应交易顺序。第二阶段基于群体多目标集合支配的微网最优个体效用集筛选结果如图 6(b)所示。在此阶段,红色三角形所代表的微网最优个体效用集最小, Pareto 支配距离最高,被筛选为微网最优个体效用集。因此,联盟 VI 的售电微网最优交易顺序为{MG4, MG13, MG18}。

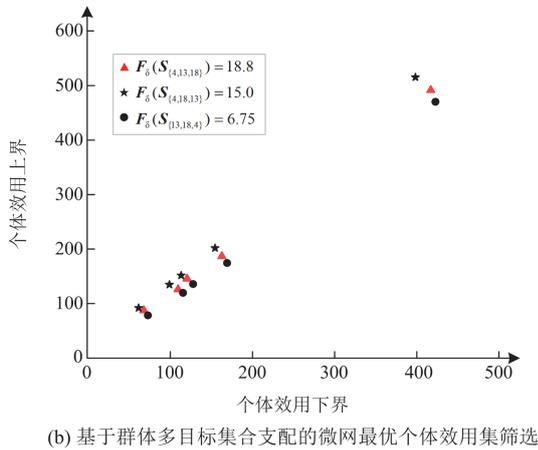
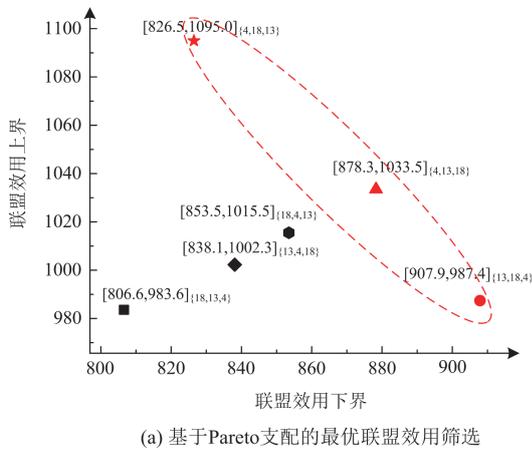


图 6 基于两阶段多目标支配的联盟售电微网最优交易顺序筛选

Fig. 6 Optimal transaction sequence selection for selling microgrids based on two-stage multi-objective dominance

在微网群 P2P 电力交易研究领域,文献[19]提出了一种经典的确定性交易方法,即微网电力交易量为实数值的联盟合并和分裂算法。本文所提区间

交易方法下的微网群交易结果将与确定性交易方法下的微网群交易结果进行对比。同样,针对上文含 24 个微网的微网群应用确定性交易方法,采用微网交易需求期望值进行交易。确定性电力交易方法下微网群的稳定联盟结构如图 7 所示。确定性电力交易方法下微网群的联盟效用及微网个体效用如表 4 所示。确定性交易方法下微网群稳定联盟结构与本文所提区间交易方法下稳定联盟结构相类似,只是本文所提区间交易方法下由微网 1、4、10、13、18 所组成的联盟 VI(图 5)在确定性交易方法下分裂为由微网 1、4、13 组成的联盟 VII(图 7)和微网 10、18 组成的联盟 VI(图 7)。相比本文所提区间交易方法,确定性交易方法下微网 1、4、10、13、18 中除微网 1、18 个体效用提高外,其余微网个体效用均降低,且总联盟效用降低。此外,微网群中除微网 1、4、10、13、18 外,确定性交易方法下微网个体效用均分别处于本文所提区间交易方法下联盟效用区间、微网个体效用区间内。与确定性交易方法相比,本文所提区间交易方法有效降低了交易量和交易价格等不确定性的影响,确保微网群交易鲁棒性。

表 5 展示了联盟 I 中微网在最短距离优先匹配(卖方基于买方的随机序列进行距离的排序,距离最短的买卖双方优先交易)和多对一最高区间价格密封拍卖机制下的交易顺序、交易对、联盟效用及微网个体效用。相比最短距离优先匹配机制,多对一最高区间价格密封拍卖机制下的联盟效用和微网个

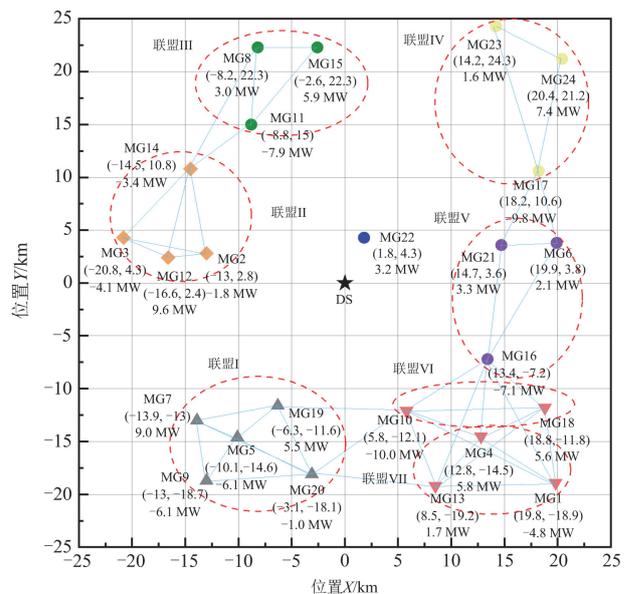


图 7 基于确定性电力交易的微网群稳定联盟结构

Fig. 7 Stable coalition structure of microgrid groups based on deterministic electricity trading

表 4 确定性电力交易方法下联盟效用及微网个体效用
Table 4 Coalition utility and microgrid individual utility under deterministic power trading

联盟	联盟效用	微网	微网个体效用
联盟 I	1030.1	MG5	245.3
		MG7	406.1
		MG9	227.6
		MG19	116.2
		MG20	34.9
联盟 II	638.6	MG2	50.6
		MG3	144.0
		MG12	370.9
		MG14	73.1
联盟 III	475.1	MG8	92.6
		MG11	278.6
		MG15	103.9
联盟 IV	962.6	MG17	520.9
		MG23	104.2
		MG24	337.5
		MG6	51.4
联盟 V	266.3	MG16	149.3
		MG21	65.6
		MG10	152.3
联盟 VI	304.6	MG18	152.3
		MG1	192.4
联盟 VII	327.4	MG4	97.7
		MG13	37.3

表 5 不同匹配机制联盟交易结果

Table 5 Results of coalition transactions with different matching mechanisms

拍卖方式	交易顺序及交易对	联盟效用	微网个体效用
最短距离 优先匹配	1:MG7&MG5	[925.6,1006.5]	MG5:[217.1,239.1]
	2:MG7&MG9		MG7:[377.7,396.8]
	3:MG19&MG9		MG9:[199.7,223.2]
	4:MG19&MG20		MG19:[105.6,111.0]
多对一最高 区间价格密 封式拍卖	1:MG7&MG9	[969.0,1077.9]	MG5:[231.4,252.4]
	2:MG7&MG5		MG7:[386.6,423.0]
	3:MG19&MG5		MG9:[211.5,244.9]
	4:MG19&MG20		MG19:[112.9,117.8]
			MG20:[26.6,39.8]

体效用更佳, 原因在于距离最近的微网 7 和微网 5 优先匹配, 则剩余的微网 19 只能与地理位置更远的微网 9 交易; 而拍卖机制下, 微网 19 首先与微网 5 交易, 从而减少损耗。此外, 拍卖机制还为距离较远的微网提供了更公平的合作机会。

5.2 不同数量微网的微网群交易结果分析

在随机生成包含 3—30 个微网的微网群中应用

基于区间 Pareto 排序的联盟合并和分裂算法。设定微网交易需求波动范围 $\eta = \pm 3\%$ 。为避免偶然因素以及减小误差, 微网群的交易结果均是 1000 次算法运行结果的平均值。

图 8(a)展示了包含不同数量微网的微网群参与联盟交易的微网比例与联盟平均个数。具体而言, 当微网群包含 30 个微网时, 约有 75% 的微网参与联盟交易, 微网群中平均存在 6.94 个联盟。随着微网数量增加, 参与联盟交易的微网比例逐渐升高, 微网倾向于与微网而不是与配电网交易, 这主要是因为随着配电网中微网密度增大, 微网交易需求互补的可交易对象增多。此外, 微网群中联盟的平均个数随着微网数量的增加快速增多, 后增速逐渐趋于平缓。这是因为微网密度增大, 微网有更多机会组成联盟, 但当微网群中微网密度较大时, 微网可以更加充分地进行合作, 组成包含更多微网的较大联盟。

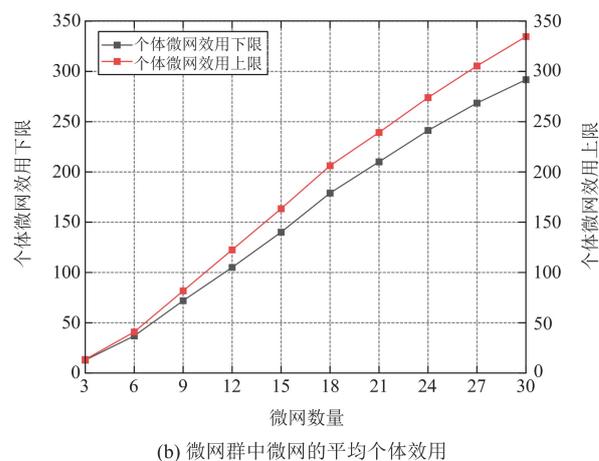
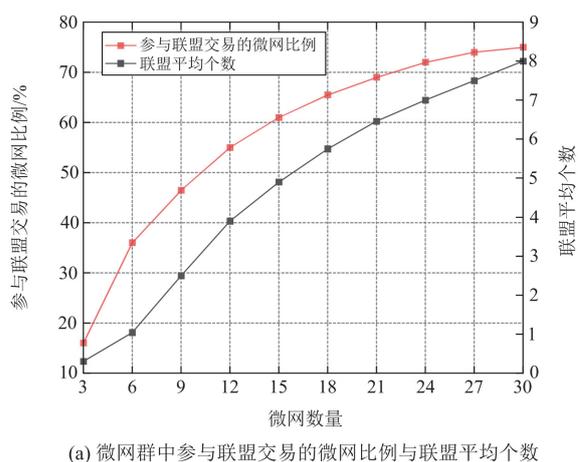


图 8 含有不同数量微网的微网群交易结果

Fig. 8 Transaction results of microgrid cluster with different numbers of microgrids

图 8(b)展示了包含不同数量微网的微网群中微网的平均个体效用。微网平均个体效用随着微网群中微网个数的增加而提高, 具体而言, 当微网群包含 30 个微网时, 微网平均个体效用达到[287.5, 341.2]。这主要是因为随着微网数量增加, 微网与配电网的交易量减少, 更多电力在微网间交易降低了电力损耗。此外, 微网平均个体效用区间范围随着微网群中微网数量增多而逐渐增大, 这是因为考虑到各微网交易需求波动, 更多电力交易量在微网间达成时, 微网间交易量上界和下界间的差值也在逐渐增大。

6 结语

本文研究了不确定扰动下微网群的P2P电力区间交易与微网群的稳定最优联盟形成问题, 并具体分析了包含 24 个微网的微网群稳定联盟结构及微网电力需求波动范围、不同微网数量对微网群电力交易结果的影响, 验证了微网区间电力交易行为下微网群参与交易运行的经济性与鲁棒性。主要结论如下: 1) 设计了基于合作博弈的微网群区间P2P交易框架。在包含 24 个微网的微网群, 先后形成了由 6 个联盟组成的稳定联盟结构, 所有微网共同创造了[4035.3,4611.5]的总联盟效用。2) 提出了基于群体多目标支配的联盟交易顺序选择方法。基于Pareto支配找出了每个联盟内售电微网多个交易顺序, 可获得最优联盟效用; 基于群体多目标集合支配确定了售电微网最优的交易顺序, 可获得微网最优个体效用集合。3) 设计了基于区间Pareto排序的联盟合并和分裂算法。与确定性交易方法下的联盟形成结果相比, 提升了不确定性扰动下微网交易的鲁棒性。通过对比不同数量下微网交易结果可知, 微网平均个体效用区间范围随着微网数量增多而逐渐增大, 更趋向于形成更大的联盟。

参考文献

- [1] HE Yingdong, ZHOU Yuekan, LIU Jia, et al. An intercity energy migration framework for regional energy balance through daily commuting fuel-cell vehicles[J]. *Applied Energy*, 2022, 324.
- [2] YU Shiwei, ZHOU Shuangshuang, QIN Junpeng. Layout optimization of China's power transmission lines for renewable power integration considering flexible resources and grid stability[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 135.
- [3] 任景, 高敏, 程松, 等. 面向新能源不确定性的西北电力电量平衡机制[J]. *中国电力*, 2023, 56(9): 66-78.
REN Jing, GAO Min, CHENG Song, et al. A balance method for power supply-demand adapting to high uncertainties of renewable energy in northwest power grid[J]. *Electric Power*, 2023, 56(9): 66-78.
- [4] 于娣, 胡健, 张晓杰, 等. 电力P2P交易中的双轮竞价博弈模型[J]. *电力建设*, 2023, 44(7): 21-32.
YU Di, HU Jian, ZHANG Xiaojie, et al. Double-round bidding game model for P2P electricity transactions[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(7): 21-32.
- [5] 陈志永, 胡平, 别朝红, 等. 基于合作博弈的虚拟电厂联盟策略与收益分配机制研究[J]. *智慧电力*, 2024, 52(1): 39-46, 64.
CHEN Zhiyong, HU Ping, BIE Zhaohong, et al. Alliance strategy and revenue allocation mechanism for clustered virtual power plants based on cooperative game[J]. *Smart Power*, 2024, 52(1): 39-46, 64.
- [6] 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): 960-971.
HU Jian, YU Di, ZHANG Xiaojie. Prosumer alliance in P2P transaction of electricity considering social welfare[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(3): 960-971.
- [7] 余岳, 文怀超, 刘郁, 等. 基于广义纳什议价价的V2V能量交易研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(15): 144-154.
YU Yue, WEN Huaichao, LIU Yu, et al. V2V energy trading based on generalized Nash bargaining[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(15): 144-154.
- [8] 芮涛, 李国丽, 王群京, 等. 配电侧多微电网日前电能交易纳什议价价方法[J]. *电网技术*, 2019, 43(7): 2576-2585.
RUI Tao, LI Guoli, WANG Qunjing, et al. Nash bargaining method for multi-microgrid energy trading in distribution network[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(7): 2576-2585.
- [9] 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.
- [10] MALIK S, DUFFY M, THAKUR S, et al. A priority-based approach for peer-to-peer energy trading using cooperative game theory in local energy community[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 137.
- [11] AZIM M I, TUSHAR W, SAHA T K. Cooperative negawatt P2P energy trading for low-voltage distribution networks[J]. *Applied energy*, 2021, 299.
- [12] AZIM M I, ALAM M R, TUSHAR W, et al. A

- cooperative P2P trading framework: developed and validated through hardware-in-loop[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 14(4): 2999-3015.
- [13] AZIM M I, TUSHAR W, SAHA T K. Coalition graph game-based P2P energy trading with local voltage management[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(5): 4389-4402.
- [14] SAAD W, HAN Z, POOR H V. Coalitional game theory for cooperative micro-grid distribution networks[C] // *IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, June 5-9, 2011, Kyoto, Japan: 1-5.
- [15] MEI Jie, CHEN Chen, WANG Jianhui, et al. Coalitional game theory based local power exchange algorithm for networked microgrids[J]. *Applied Energy*, 2019, 239: 133-141.
- [16] SUN Rui, WANG Luhao, SONG Wen, et al. A coalitional game theoretic energy transaction algorithm for networked microgrids[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, 144.
- [17] FANG Debin, ZHAO Chaoyang, YU Qian. Government regulation of renewable energy generation and transmission in China's electricity market[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 93: 775-793.
- [18] WEI Chun, SHEN Zhuzheng, XIAO Dongliang, et al. An optimal scheduling strategy for peer-to-peer trading in interconnected microgrids based on RO and Nash bargaining[J]. *Applied Energy*, 2021, 295.
- [19] ZHAO Huiru, WANG Xuejie, WANG Yuwei, et al. A dynamic decision-making method for energy transaction price of CCHP microgrids considering multiple uncertainties[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 127.
- [20] LI Jiayong, KHODAYAR M E, WANG Jianhui, et al. Data-driven distributionally robust co-optimization of P2P energy trading and network operation for interconnected microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(6): 5172-5184.
- [21] GEORGARAKIS E, BAUWENS T, PRONK A M, et al. Keep it green, simple and socially fair: a choice experiment on prosumers' preferences for peer-to-peer electricity trading in the Netherlands[J]. *Energy Policy*, 2021, 159.
- [22] HACKBARTH A, LÖBBE S. Attitudes, preferences, and intentions of German households concerning participation in peer-to-peer electricity trading[J]. *Energy Policy*, 2020, 138.
- [23] CHEN Weidong, WANG Junnan, YU Guanyi, et al. Research on day-ahead transactions between multi-microgrid based on cooperative game model[J]. *Applied Energy*, 2022, 316.
- [24] QUEIROZ L M O, ROSELLI M A, CAVRILLUCCI C, et al. Energy losses estimation in power distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(4): 1879-1887.
- [25] BANEZ-CHICHARRO F, OLMOS L, RAMOS A, et al. Beneficiaries of transmission expansion projects of an expansion plan: an Aumann-Shapley approach[J]. *Applied Energy*, 2017, 195: 382-401.
- [26] BANDEIRAS F, PINHEIRO E, GOMES M, et al. Review of the cooperation and operation of microgrid clusters[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 133.
- [27] MASHAYEKHY L, GROSU D. A merge-and-split mechanism for dynamic virtual organization formation in grids[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2013, 25(3): 540-549.
- [28] XIONG Tao, BAO Yukun, HU Zhongyi. Interval forecasting of electricity demand: a novel bivariate EMD-based support vector regression modeling framework[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, 63: 353-362.
- [29] SINGH P, KUMAR U, CHOUDHARY N K, et al. Advancements in protection coordination of microgrids: a comprehensive review of protection challenges and mitigation schemes for grid stability[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2024, 9(6): 1-28.
- [30] ZUNIGA-GARCIA M A, SANTAMARIA-BONFIL G, ARROYO-FIGUEROA G, et al. Prediction interval adjustment for load-forecasting using machine learning[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(24).
- [31] 成龙, 李国庆, 王翀, 等. 考虑预测误差不确定性和功率互济的配电网直流合环重构[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(24): 97-108.
- CHENG Long, LI Guoqing, WANG Chong, et al. DC loop-closed reconfiguration for distribution networks considering prediction error uncertainty and power complementarity[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(24): 97-108.

收稿日期: 2024-10-31; 修回日期: 2025-02-06

作者简介:

王鲁浩(1987—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为复杂能源系统建模与优化、微电网; E-mail: cse_wanglh@ujn.edu.cn

张淑芳(2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为微电网交易运营优化; E-mail: 13589079652@163.com

张凯(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网交易运营优化。E-mail: KaiZhang0302@163.com

(编辑 周金梅)