

基于两阶段博弈的多微电网配电系统功率互济协调优化方法

王逸群¹, 彭寒梅¹, 谭 貌^{1, 2}, 苏永新^{1, 2}

(1. 湘潭大学自动化与电子信息学院, 湖南省湘潭市 411105;

2. 湘潭大学多能协同控制技术湖南省工程研究中心, 湖南省湘潭市 411105)

摘要: 多微电网配电(MMGD)系统能源协调与共享对提升区域电网经济效益具有重要意义。由于单一博弈调度策略难以兼顾多主体利益诉求,提出了一种基于两阶段博弈的能量协调优化方法,全面考虑了各主体间既相互竞争又协同合作的现实场景。第1阶段以最大化个体收益为目标,构建了配电网与余电微电网的非合作电价博弈模型,系统在不同策略组合下选择不同的运行模式;第2阶段建立MMGD点对点合作博弈模型,旨在最小化系统传输损耗,运用拉格朗日乘子法与KKT(Karush-Kuhn-Tucker)条件处理复杂约束,并应用Shapley值法实现合作利润分配。仿真结果表明,所提方法能兼顾个体理性和集体理性,并显著提升系统经济性。

关键词: 多微电网配电系统; 能量交易; 两阶段博弈; 协调优化

0 引言

随着“双碳”目标稳步推进,高比例可再生能源并网成为新型电力系统的显著特征^[1]。微电网(microgrid, MG)作为促进可再生能源消纳的关键手段而备受关注,但单个MG存在调控不足和抗干扰能力有限等问题^[2]。为此,有学者进一步提出了由多个并网型微电网构成的多微电网配电(multi-microgrid distribution, MMGD)系统^[3],使MG能与上级电网或其他MG进行能量交互,降低对上级电网的依赖,提高整体经济和能源利用效益。然而,MMGD系统中各主体可能由不同的运营主体管理,具有不同的物理结构和独立效益目标,甚至存在相互冲突^[4]。因此,有必要寻求一种有效协调各主体运行的能量管理策略。

博弈论是有效解决不同利益主体决策的方法,包括非合作博弈和合作博弈。非合作博弈关注个体追求自身利益^[5]。文献[6]构建了一个电力市场主从博弈模型,通过配电网(distribution network, DN)主导调整购售电策略以引导微电网群优化电源配置和出力计划,但忽略了MG产消者特征;文献[7]利用非合作纳什议价策略实现了MG间的能量交易,却未充分考虑市场价格对功率交易的影响。有学者

利用交替方向乘子法协同优化MG间交易功率与清算价格^[8]。合作博弈强调各主协调决策以实现整体利益最大化^[9]。文献[10-11]将能效等多目标问题映射到合作博弈中优化,但未将DN纳入合作主体考虑;文献[12]实现了整体利益的协调,却忽略了DN物理约束及损耗对交易模式的影响;文献[13]计及了网络损耗的影响,却未提供适用的计费标准;文献[14-15]提出了点对点(P2P)市场电力交易损耗收费机制,更加符合分布式交易场景。综上考虑,MMGD系统能量调度需综合MG与DN对等市场地位,并考虑网络损耗等因素的影响。同时,以上研究仅涉及单一博弈策略,以优化总体目标或协同优化子目标的方式来实现经济运行,难以满足既要考虑MG个体收益最大又要兼顾系统整体效能最优的双重需求。因此,有必要将非合作博弈与合作博弈相结合,以兼顾个体理性和集体理性。

在博弈模型求解中,由于各主体拥有独立目标函数,故可视为多元函数进行求解^[16]。多方参与、多目标、多变量的博弈情境中,最优化理论是有力的工具之一^[17]。常用线性规划^[18]、梯度下降法^[19]、动态规划^[20]等方法求解最优化问题,但在处理复杂模型时仍面临高维空间搜索效率降低、局部最优解等挑战^[21]。

基于以上背景,本文提出了一种两阶段博弈能量调度方法。首先,以个体收益最大化为目标构建了DN与余电微电网非合作博弈模型,系统在不同策略组合下选择不同的运行模式,并进一步验证其

收稿日期: 2024-02-07; 修回日期: 2024-05-30。

上网日期: 2024-07-20。

国家自然科学基金资助项目(61873222);湖南省教育厅科学研究重点项目(23A0142)。

纳什均衡解的存在性;然后,针对系统整体建立了P2P合作博弈模型,考虑线路潮流和功率交易量等约束,通过最小损耗费用实现了整体效能最优;在此基础上,采用Shapley值法实现合作利润的公平分配;最后,通过不同方法的仿真对比,验证了所提两阶段博弈模型的有效性,能够更好地应对各主体既要相互竞争又要协同合作的现实情境。

1 MMGD两阶段博弈模型

MMGD典型结构如图1所示,利益主体包括DN和MG。MG通过电气接口与本地DN连接,同时可通过实物输电线路完成能源交易。在MMGD系统中,任意微电网 MG_i 均存在两个交易对象:可与DN直接进行能量交易,称为独立运营模式;与其他MG进行能量交易,称为就近消纳模式。其中, $i=1,2,\dots,N,N$ 为系统中MG数量。

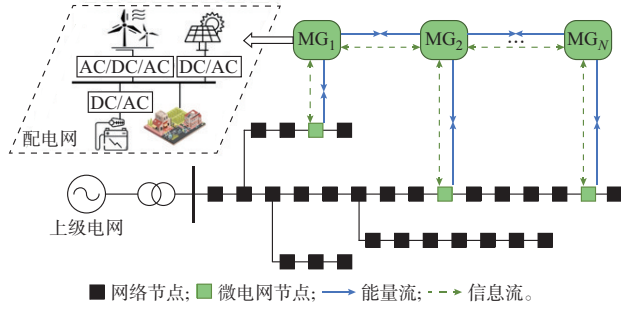


图1 MMGD系统经典结构
Fig. 1 Classical structure of MMGD system

设在任意时间段 ΔT , MG_i 总发电量为 G_i ,其自身负荷需求为 D_i ,则其不平衡功率 E_i^{req} 可表示为:

$$E_i^{\text{req}} = G_i - D_i \quad (1)$$

若 $E_i^{\text{req}} > 0$,则表示 MG_i 有能力向其他MG或DN出售剩余能源,称为余电微电网,数量为 N_s ;若 $E_i^{\text{req}} < 0$,则表示 MG_i 从其他MG或DN购买能源,称为缺电微电网,数量为 N_D ; $E_i^{\text{req}} = 0$ 表示 MG_i 自身供需平衡,称为功率平衡微电网,数量为 N_B 。

1.1 第1阶段:非合作电价博弈

第1阶段构建了DN和余电微电网的非合作电价博弈模型,使系统内各主体能够选择利润更高的运行模式。

MMGD系统能量交互过程中,余电微电网和DN均为能源售卖者,两者存在明显的利益冲突,构建相应的非合作博弈模型 G 若下:

$$G = \langle \Gamma; S; I \rangle \quad (2)$$

式中: Γ 为博弈方,包括余电微电网和DN,其数量分别为 N_s 和1; S 为博弈策略,其中,余电微电网策略为售电价格 c_i ,DN策略为服务价格 s_d ; I 为博弈方收

益,包括余电微电网收益 I_{MGi} 和DN收益 I_{DN} 。

1) 余电微电网收益 I_{MGi} :

$$I_{MGi} = I_i^{\text{tra}} + I_i^{\text{ser}} + I_i^{\text{gen}} + I_i^{\text{sub}} \quad (3)$$

$$I_i^{\text{tra}} = \left(c_i \sum_{j=1}^{N_D} P_{i,j}^{\text{tra}} + d_b P_{i,0}^{\text{tra}} \right) \Delta T \quad (4)$$

$$I_i^{\text{ser}} = -s_d \sum_{j=1}^{N_D} P_{i,j}^{\text{tra}} \Delta T \quad (5)$$

$$I_i^{\text{gen}} = -g_i^{\text{gen}} E_i^{\text{req}} \Delta T \quad (6)$$

$$I_i^{\text{sub}} = g_i^{\text{sub}} E_i^{\text{req}} \Delta T \quad (7)$$

式中: I_i^{tra} 为出售富余能量所得交易收益; I_i^{ser} 为与缺电微电网交易时需缴纳的服务费; I_i^{gen} 为出售富余能量所对应的发电成本; I_i^{sub} 为出售富余能量所对应的新能源发电补偿; $P_{i,j}^{\text{tra}}$ 为微电网 MG_i 和 MG_j 之间的交易传输功率; $P_{i,0}^{\text{tra}}$ 为余电微电网向DN的售卖功率; d_b 为DN购电价格; g_i^{gen} 为风光平均发电单位成本; g_i^{sub} 为新能源单位发电政府补偿。

2) DN收益 I_{DN}

$$I_{DN} = I_{DN}^{\text{tra}} + I_{DN}^{\text{ser}} + I_{DN}^{\text{gen}} \quad (8)$$

$$I_{DN}^{\text{tra}} = \left(d_s \sum_{j=1}^{N_D} P_{0,j}^{\text{tra}} - d_b \sum_{i=1}^{N_s} P_{i,0}^{\text{tra}} \right) \Delta T \quad (9)$$

$$I_{DN}^{\text{ser}} = 2s_d \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_D} P_{i,j}^{\text{tra}} \Delta T \quad (10)$$

$$I_{DN}^{\text{gen}} = -g_d^{\text{gen}} \sum_{j=1}^{N_D} P_{0,j}^{\text{tra}} \Delta T \quad (11)$$

式中: I_{DN}^{tra} 为DN的购售电收益; I_{DN}^{ser} 为MG之间进行交易时向DN缴纳的服务费; I_{DN}^{gen} 为对外售电部分对应的发电成本; d_s 为DN售电单位价格; $P_{0,j}^{\text{tra}}$ 为DN向 MG_j 售电传输功率; g_d^{gen} 为DN平均发电成本。

当 $N_s = 0$ 时,缺电微电网只从DN购电;当 $N_D = 0$ 时,余电微电网只向DN售电。因此,非合作博弈存在的必要条件为 $N_s N_D \neq 0$,即系统中同时存在余电微电网和缺电微电网。在此前提下,按交易规则进行博弈:缺电微电网根据博弈策略选择不同博弈方进行交易,按缺额的大小先后购电,若缺额相同则按照序号大小进行购电;若多个余电微电网策略相同,则能量更富余者优先售电;若MG间交易后仍存在富余电量,则全部出售给DN。

1.2 第2阶段:P2P合作博弈模型

在第1阶段博弈中,各主体倾向于选择能够最大化个体收益的交易方式,实现个体理性决策以达到局部最优,使系统在不同策略组合下选择相应的运行模式。但存在系统在两种运行模式下的收益相等的情况,此时,余电微电网博弈策略 $c_i = (d_b + d_s)/2$,DN博弈策略 $s_d = (d_s - d_b)/2$ 。将该价格信

号 $M_0(c_i, s_d)$ 传递到第1阶段。

第1阶段构建了P2P市场合作博弈模型,参与者包括所有MG和DN。理性参与者可以选择与任何其他参与者出售/购买能源,在保持个体收益不变的前提下,通过合作博弈来最小化传输损耗费用,从而提升系统整体效能,达到集体利益最大化。决策过程充分考虑了网络约束和物理限制,以确保系统在博弈决策中达到全局性的最优经济效益。

设 S_T 表示整个MMGD系统,其中,能源销售方集合表示为 S_s ,能源购买方集合表示为 S_b ,则有

$$\begin{cases} S_s \cup S_b = S_T \\ S_s \neq \emptyset \\ S_b \neq \emptyset \end{cases} \quad (12)$$

此时,MMGD系统能量交易存在的功率损耗 $P_{\text{total}}^{\text{loss}}$ 可表示为:

$$P_{\text{total}}^{\text{loss}} = \sum_{i \in S_s} \sum_{j \in S_b} P_{i,j}^{\text{loss}} + \sum_{i \in S_s} P_{i,0}^{\text{loss}} + \sum_{j \in S_b} P_{0,j}^{\text{loss}} \quad (13)$$

式中: $P_{i,j}^{\text{loss}}$ 为 MG_i 和 MG_j 间能量交易的传输损耗,如式(14)所示; $P_{i,0}^{\text{loss}}$ 、 $P_{0,j}^{\text{loss}}$ 分别为MG向DN售电和DN向MG售电时的传输损耗,如式(15)和式(16)所示。

$$P_{i,j}^{\text{loss}} = \left(\frac{P_{i,j}^{\text{MM}}}{U_1} \right)^2 r_{i,j} d_{i,j} \quad (14)$$

$$P_{i,0}^{\text{loss}} = \left(\frac{P_{i,0}^{\text{MD}}}{U_0} \right)^2 R_{i,0} \quad (15)$$

$$P_{0,j}^{\text{loss}} = \left(\frac{P_{0,j}^{\text{DM}}}{U_0} \right)^2 R_{0,j} \quad (16)$$

式中: $P_{i,j}^{\text{MM}}$ 为 MG_i 与 MG_j 间的传输功率; U_1 为 MG_i 与 MG_j 间的电压差; $d_{i,j}$ 、 $r_{i,j}$ 分别为 MG_i 与 MG_j 间线路距离和单位电阻; $P_{i,0}^{\text{MD}}$ 、 $P_{0,j}^{\text{DM}}$ 分别为MG对DN售、购电所传输的功率; $R_{i,0}$ 、 $R_{0,j}$ 分别为MG对DN售、购电的线路电阻。DN和MG均通过额定电压为 U_0 的中压线路连接。

综上,系统优化模型可被描述为:

$\min f =$

$$\begin{aligned} & \left(c_i \sum_{i \in S_s} \sum_{j \in S_b} P_{i,j}^{\text{loss}} + d_b \sum_{i \in S_s} P_{i,0}^{\text{loss}} + d_s \sum_{j \in S_b} P_{0,j}^{\text{loss}} \right) \Delta T = \\ & \left[\sum_{i \in S_s} \sum_{j \in S_b} k_{i,j} (P_{i,j}^{\text{MM}})^2 + \sum_{i \in S_s} k_{i,0} (P_{i,0}^{\text{MD}})^2 + \right. \\ & \left. \sum_{j \in S_b} k_{j,0} (P_{0,j}^{\text{DM}})^2 \right] \Delta T \end{aligned} \quad (17)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^N P_{i,j}^{\text{MM}} + P_{i,0}^{\text{MD}} + P_{0,j}^{\text{DM}} = E_i^{\text{req}} \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \quad (18)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,j}^{\text{MM}} \leq P_{\text{inter}}^{\text{max}} \\ 0 \leq P_{i,0}^{\text{MD}} \leq P_{\text{DN}}^{\text{max}} \\ 0 \leq P_{0,j}^{\text{DM}} \leq P_{\text{DN}}^{\text{max}} \end{cases} \quad (19)$$

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad (20)$$

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{k=1}^{N_{\text{bus}}} U_k (G_{ik} \cos \delta_{ik} + B_{ik} \sin \delta_{ik}) \\ Q_i = U_i \sum_{k=1}^{N_{\text{bus}}} U_k (G_{ik} \sin \delta_{ik} - B_{ik} \cos \delta_{ik}) \end{cases} \quad (21)$$

式中: $k_{i,j} = c_i r_{i,j} d_{i,j} (1/U_1)^2$; $k_{i,0} = d_b R_{i,0} (1/U_0)^2$; $k_{j,0} = d_s R_{0,j} (1/U_0)^2$; $P_{\text{inter}}^{\text{max}}$ 、 $P_{\text{DN}}^{\text{max}}$ 分别为微电网之间、微电网和DN之间可调配能源的传输上限; U_i 为节点 i 的电压幅值; $U_{\max}$ 、 $U_{\min}$ 分别为节点电压上、下限; P_i 、 Q_i 分别为DN节点 i 的注入有功和无功功率; U_k 为节点 k 的电压幅值; δ_{ik} 、 G_{ik} 、 B_{ik} 分别为节点 i 和 k 的相位差及其连接线路的电导、导纳,其中, $\delta_{ik} = \delta_i - \delta_k$; N_{bus} 为节点数。

式(17)为第2阶段系统优化目标函数;式(18)为各个 MG_i 自身功率平衡约束;式(19)为物理联络线容量约束;式(20)为电压约束;式(21)为系统潮流方程约束。

通过优化各主体之间交易量,使MMGD系统整体的电能传输损耗费用最小。同时,运用Shapley值法分配合作利润,确保合作不损害各主体效益。

通过考虑各参与者加入合作的顺序及其边际贡献进行利润分配。主体 i 边际贡献 $\Delta v(i, S)$ 可表示为:

$$\Delta v(i, S) = v(S) - v(S/i) \quad (22)$$

式中: S 表示包含主体 i 在内的合作联盟, $v(S)$ 代表该合作联盟的总利润; (S/i) 表示除去主体 i 的合作联盟, $v(S/i)$ 代表这一合作联盟的总利润。

主体 i 的Shapley值 $s_h(i)$ 可表示为:

$$s_h(i) = \frac{1}{W} \sum_{r=1}^W \frac{1}{a} \sum_{S \in S_r} \Delta v(i, S) \quad (23)$$

式中: W 为参与合作的主体数; a 为组合数,表示从 $W-1$ 个元素中选择 $r-1$ 个元素的组合数量,如式(24)所示; S_r 为所有包含主体 i 在内的合作联盟集合。

$$a = \binom{W-1}{r-1} \quad (24)$$

2 模型求解

2.1 第1阶段模型求解

在该非合作博弈模型中,博弈方收益函数的不连续性可能使解空间呈现非光滑特性,导致优化问题的梯度不连续,限制常规优化算法的有效性。因

此,采用遍历所有策略组合的方式搜索整个策略空间进行仿真求解,以找到潜在的最优解。

全面遍历策略空间时,须对策略进行离散处理。接下来,通过理论推导证明该博弈问题在连续策略集上存在纳什均衡点,并进一步证明将有限策略集离散化后同样存在纳什均衡点,以确保遍历可行性。

1) 连续非负策略集

根据纯策略纳什均衡定义^[22-23],结合该博弈模型可得:当全体博弈方策略集均为 $[0, +\infty)$ 时,点 $M_0(c_i, s_d)$ 是上述博弈问题的纯策略纳什均衡点。详细证明过程见附录B。

2) 连续有限策略集

实际电力市场中会规定报价上限^[24],若全体博弈方策略集为 $[0, c_{i, \max}]$ 和 $[0, s_{d, \max}]$,且 c_i 和 s_d 的上限 $c_{i, \max}$ 、 $s_{d, \max}$ 满足 $c_{i, \max} \geq (d_b + d_s)/2$ 、 $s_{d, \max} \geq (d_s - d_b)/2$,则点 $M_0(c_i, s_d)$ 仍是上述博弈问题的纯策略纳什均衡点。

3) 离散有限策略集

若全体博弈方策略集为 $[0, c_{i, \max}]$ 和 $[0, s_{d, \max}]$,设其离散间隔分别为 Δc_i 和 Δs_d ,根据式(25)进行离散处理。

$$\begin{cases} c_i = k_i \Delta c_i & k_i \in \mathbf{Z}^+ \\ s_d = k_d \Delta s_d & k_d \in \mathbf{Z}^+ \end{cases} \quad (25)$$

由于策略上限值已确定,故离散后的策略组合是有限的,同时在该博弈问题中博弈方个数也是有限的。根据纳什均衡存在性定理^[22-23, 25-26],离散化后的博弈问题仍存在纳什均衡解,即当全体博弈方策略集为离散有限集合,且上限 $c_{i, \max}$ 、 $s_{d, \max}$ 满足 $c_{i, \max} \geq (d_b + d_s)/2$ 、 $s_{d, \max} \geq (d_s - d_b)/2$ 时,点 $M_0(c_i, s_d)$ 是原博弈问题的纯策略纳什均衡点。

采用遍历所有策略组合的方式搜索整个策略空间进行仿真求解是可行的。在离散情境下,通过迭代每个可能的策略组合,有效地穷尽潜在的解空间,确保所得结果是纳什均衡点,并且不会漏解。

基于MATLAB仿真求解的流程见附录A图A2。

2.2 第2阶段模型求解

第2阶段合作博弈提出最小化系统中的传输功率损耗费用,使整体效能最优,目标函数为式(17)。求解复杂性主要来自式(18)至式(21)多个约束条件,由于含有大量现实物理约束,导致高维空间搜索效率降低。因此,本文利用拉格朗日乘子法结合KKT(Karush-Kuhn-Tucker)条件分解约束条件,使含约束的原问题转化为无约束的优化问题。

针对本文所提出的第2阶段MMGD系统合作博弈模型,构造增广拉格朗日函数如下:

$$L(p, \lambda_i, \mu_j) = f(p) + \sum_{i=1}^{N'} \lambda_i h_i(p) + \sum_{j=1}^{n'} \mu_j g_j(p) \quad (26)$$

式中: λ_i 、 μ_j 分别为等式约束和不等式约束对应的拉格朗日乘子; $f(p)$ 为目标函数; $h_i(p)$ 为对应的等式约束; $g_j(p)$ 为对应的不等式约束; N' 为等式约束数量; n' 为不等式约束数量。

该模型极小值存在的必要条件为:拉格朗日函数式(26)对变量及乘子的一阶偏导数为零。

$$\nabla L(p, \lambda_i, \mu_j) = 0 \quad (27)$$

因此,得到一组满足最优性条件的方程,称为KKT条件。在最优解处,KKT条件是必要但不充分的,通过满足如下条件来验证是否找到最优解:

$$\begin{cases} h_{i'}(p) = 0 & i' = 1, 2, \dots, N' \\ g_{j'}(p) \leq 0 & j' = 1, 2, \dots, n' \\ \mu_{j'} \geq 0 & j' = 1, 2, \dots, n' \\ \mu_{j'} g_{j'}(p) = 0 & j' = 1, 2, \dots, n' \end{cases} \quad (28)$$

将式(28)进行线性化可得到修正方程组:

$$\begin{cases} -[\nabla_p^2 f(p) - \nabla_p^2 h(p) \lambda_i - \nabla_p^2 g(p) \mu_j] \Delta p + \sum_{i=1}^{N'} \nabla_p h_i(p) \Delta \lambda_i + \sum_{j=1}^{n'} \nabla_p g_j(p) \Delta \mu_j = L_p \\ \sum_{i=1}^{N'} \nabla_p h_i^T(p) \Delta p = -L_{\lambda_i} \\ \sum_{j=1}^{n'} \nabla_p g_j^T(p) \Delta p = -L_{\mu_j} \end{cases} \quad (29)$$

改写为矩阵形式可得:

$$\begin{bmatrix} H & \nabla_p h(p) & \nabla_p g(p) \\ \nabla_p^T h(p) & 0 & 0 \\ \nabla_p^T g(p) & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta p \\ \Delta \lambda_i \\ \Delta \mu_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_p \\ -L_{\lambda_i} \\ -L_{\mu_j} \end{bmatrix} \quad (30)$$

式中: $H = -[\nabla_p^2 f(p) - \nabla_p^2 h(p) \lambda - \nabla_p^2 g(p) \mu]$ 。

通过回代的方法求解式(30),则第 k 次迭代的最优解可近似由式(31)表示,求得的 $p^{(k+1)}$ 为满足式(18)至式(21)约束的决策组合。

$$\begin{cases} p^{(k+1)} = p^{(k)} + \alpha_m \Delta p \\ \lambda^{(k+1)} = \lambda^{(k)} + \alpha_n \Delta \lambda_i \\ \mu^{(k+1)} = \mu^{(k)} + \alpha_l \Delta \mu_j \end{cases} \quad (31)$$

式中: α_m 、 α_n 、 α_l 为步长。

函数 $L(p, \lambda_i, \mu_j)$ 的极值点与原目标函数 $f(p)$

的极值点相同,将求解得到的极值点与 $f(p)$ 对应函数值进行比较,选择最优点。 $f(p)$ 为凸函数,函数 $L(p, \lambda_i, \mu_j)$ 的极值点就是要找的最优点。

基于 MATLAB 仿真求解的流程见附录 A 图 A3。

3 实验分析

本章以改进 IEEE 33 节点系统为例进行仿真实验。该系统包括 32 条支路、5 条联络开关支路。其中,节点 1 与大电网连接, MG 分别通过公共连接点 (PCC) 与配电系统的节点 5、13、20、23、28 相连,所形成 MMGD 系统如图 2 所示。系统基准功率为 100 MV·A,额定电压为 12.66 kV,各节点电压允许波动范围为 0.95~1.05 p.u.,根节点电压恒为 1.05 p.u。MG 电压等级为 380 V,两个 MG 之间由架空线路连接。已知两个 MG 允许功率交互的最大距离为 10 km,其他 MG 的距离可由此得出^[27]。系统详细参数见表 1。

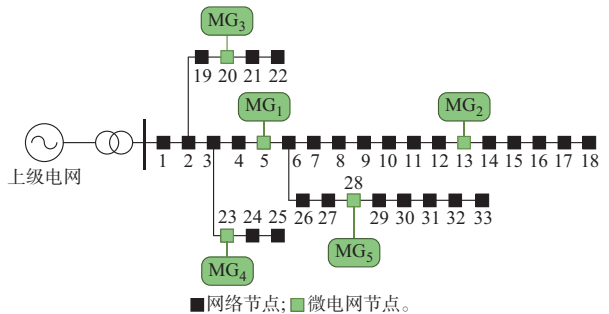


图2 MMGD 系统示意图
Fig. 2 Schematic diagram of MMGD System

表 1 系统参数设定 Table 1 Setting of system parameters			
参数	数值	参数	数值
d_b	0.40 元/(kW·h)	$c_{i,max}$	1.00 元/(kW·h)
d_s	0.82 元/(kW·h)	$s_{d,max}$	0.50 元/(kW·h)
g_i^{gen}	0.75 元/(kW·h)	U_1	0.40 kV
g_i^{sub}	0.335 元/(kW·h)	U_0	12.66 kV
g_d^{gen}	0.357 元/(kW·h)	r_{ij}	0.20 Ω/km

算例定义 1 d 为一个调度周期,时间间隔 ΔT 为 15 min。各 MG 不平衡功率由比利时 Elia 数据集中发电数据和负荷数据得出^[28],MG 数据参数见表 2。其中, MG₁ 和 MG₃ 为余电微电网, MG₂、MG₄ 和 MG₅ 为缺电微电网,详见附录 A 图 A4。

博弈方收益函数与博弈策略关系如图 3 所示。余电微电网和 DN 的收益函数均由两个不连续平面组成,这两个平面的拼接线 L_1 和 L_2 在底面投影均为

表 2 MG 参数
Table 2 MG parameters

MG 编号	总发电量/MW	总负荷需求/MW	不平衡功率/kW
1	12.15	11.31	835.97
2	12.46	13.27	−808.54
3	13.86	12.65	1 208.49
4	13.22	14.02	−798.93
5	15.23	16.50	−1 266.97

$L_3:s_d+c_i=d_s$,表示缺电微电网从余电微电网购买单位电量花费 s_d+c_i ,从 DN 购买单位电量花费 d_s ,即在该直线上,缺电微电网与余电微电网交易和与 DN 交易所花费的成本相同。换言之,在 L_3 处的策略组合下,缺电微电网运行在独立运营和就近消纳两种模式下的成本是相同的,故 L_3 为缺电微电网两种运行模式的分界线。

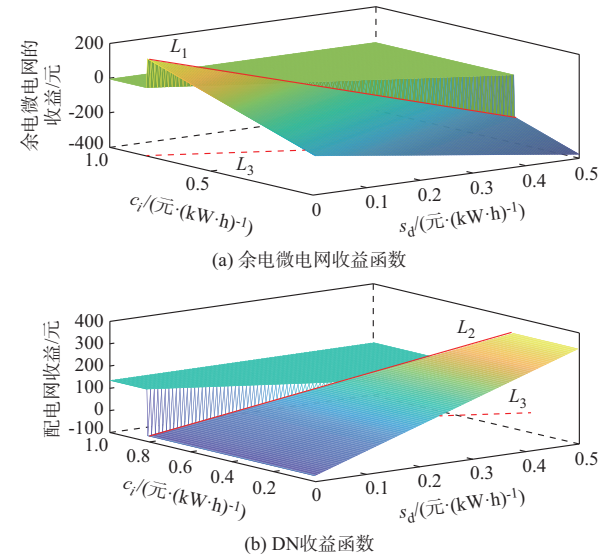


图3 收益函数与博弈策略关系的示意图
Fig. 3 Schematic diagram of relationship between payoff function and game strategy

将各博弈方收益函数的两个不连续平面在三维空间进行延伸,得到两平面交线 L_4 和 L_6 ,如图 4 所示。交线 L_4 在底面投影为 $L_5:c_i-s_d=d_b$,该等式左边表示余电微电网出售单位电量给缺电微电网的收益,右边表示出售单位电量给 DN 的收益 d_b ,两者相等,表明在 L_5 所代表的策略组合中余电微电网运行在两种模式下的收益相等,即 L_5 为余电微电网两种运行模式分界线。交线 L_6 在底面投影为 $L_7:2s_d=d_s-d_b$,该等式左边表示 MG 间交易单位电量向 DN 缴纳的服务费 $2s_d$,右边表示 DN 与 MG 进行交易获得的收益 d_s-d_b ,两者相等,表明在 L_7 所代表的策略组合中 DN 在两种模式下收益相等,即 L_7 为 DN 两种运行模式分界线。

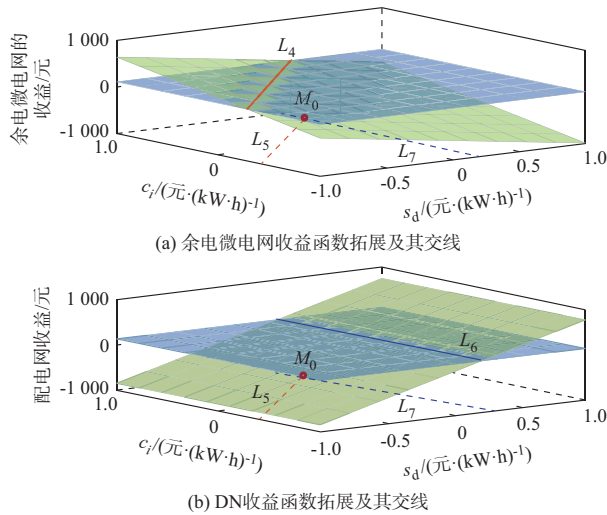


图4 收益函数拓展及其交线与博弈策略关系示意图
Fig. 4 Schematic diagram of relationship between payoff function extension and its intersection and game strategy

综上, L_3 、 L_5 、 L_7 分别为缺电微电网、余电微电网、DN两种运行模式的分界线。联立3条直线的方程,求得交点坐标为 $((d_b + d_s)/2, (d_s - d_b)/2)$ 。鉴于上文已知纳什均衡点 M_0 的坐标为 $((d_b + d_s)/2, (d_s - d_b)/2)$,故 L_3 、 L_5 、 L_7 的交点即为纳什均衡点 M_0 。

进一步,结合 L_3 、 L_5 、 L_7 物理意义可知,在 M_0 点处,系统中所有的MG只与DN交易,或所有MG只与其他MG进行交易,各主体各自所获收益是相同的,故 $M_0((d_b + d_s)/2, (d_s - d_b)/2)$ 是MMGD系统两种运行模式的分界点,换言之,系统中同时存在运行于两种不同模式的MG。此时,余电微电网博弈策略 $c_i = (d_b + d_s)/2$, DN 博弈策略 $s_d = (d_s - d_b)/2$,将 M_0 包含的价格信号和收益传递至第2阶段。

为验证本文第2阶段所提方法在能源利用效率和经济性方面的优势,设置以下4种调度方法进行对比,如表3所示。

表3 4种调度方法的对比
Table 3 Comparison of four scheduling methods

方法	MG与DN之间		MG之间
	DN向MG	MG向DN	
方法1	✓		
方法2	✓	✓	
方法3			✓
本文方法	✓	✓	✓

注:表中“✓”表示存在对应的主体间能量交易。

方法1:MG只能购电不能售电。若MG存在能量缺额,则从DN购入能量,若为正则废弃。

方法2:各MG根据自身不平衡功率与DN进行能量交易。

方法3:MG间进行能量交易,以最小化整体传输损耗最小为目标进行能量协调优化。

本文方法:采用本文第2阶段协调优化方法,在MMGD系统中各主体间存在合作博弈关系,考虑用户的负荷转移行为和传输功率损耗,在DN和MG之间自主协调交易。

对比不同优化方法在求解时间上的表现,如表4所示,本文方法的求解时间为8.37 s。具体地,第1阶段求解时间为4.00 s,第2阶段4种方法的求解时间在3.71~4.37 s之间,考虑到单个调度片段为15 min,其计算时间消耗对调度执行的影响很小,故可以认为在实际交易调度中可行。在方法间的对比分析中,方法1与方法2相比,MG富裕能量无法被有效消纳,导致大量能源废弃,进而影响了求解效率,使得求解时间相对较长;而本文方法相较于方法2,增加了MG之间的能量交互,求解时间略有增加;同样地,本文方法相较于方法3,增加了MG与DN之间的能量交易,在一定程度上增加了求解的复杂性,但求解时间的增长并不显著。整体来看,这4种方法在求解时间上的差异并不显著,相对于调度片段的总时长而言,其求解效率是完全可以接受的。

表4 优化调度方法求解时间对比
Table 4 Comparison of solution time for optimal scheduling methods

方法	求解时间/s		
	第1阶段	第2阶段	总时长
方法1	4.00	4.07	8.07
方法2	4.00	3.71	7.71
方法3	4.00	4.35	8.35
本文方法	4.00	4.37	8.37

当时间点 $t=40$ 时,4种方法各自能量交易结果如表5至表8所示,不同优化方法下MMGD系统中各主体损耗费用如表9所示。

表5 方法1能量交易结果
Table 5 Energy trading results of method 1

MG	交易能量/kW
MG ₁	0
MG ₂	-808.54
MG ₃	0
MG ₄	-798.93
MG ₅	-1 266.97

注:负值代表从DN购入能量;0代表与DN没有能量交易行为。

表 6 方法 2 能量交易结果	
Table 6 Energy trading results of method 2	
MG	交易能量/kW
MG ₁	835.97
MG ₂	-808.54
MG ₃	1 208.49
MG ₄	-798.93
MG ₅	-1 266.97

注:正值代表MG向DN出售能量;负值代表从DN购入能量。

表 7 方法 3 能量交易结果					
Table 7 Energy trading results of method 3					
购入能 量主体	交易能量/kW				
	MG ₁ ⁺	MG ₂ ⁺	MG ₃ ⁺	MG ₄ ⁺	MG ₅ ⁺
MG ₁ ⁻	0	219.64	426.03	222.40	187.18
MG ₂ ⁻	578.74	0	605.70	404.87	340.09
MG ₃ ⁻	349.82	219.52	0	195.82	140.29
MG ₄ ⁻	545.02	389.71	593.42	0	354.44
MG ₅ ⁻	566.15	443.61	644.13	448.37	0

注:MG_i⁺代表微电网*i*售出能量;MG_i⁻代表购入能量。

表 8 本文方法能量交易结果						
Table 8 Energy trading results of proposed method						
购入能 量主体	交易能量/kW					
	MG ₁ ⁺	MG ₂ ⁺	MG ₃ ⁺	MG ₄ ⁺	MG ₅ ⁺	DN ⁺
MG ₁ ⁻	0	174.32	576.95	243.46	152.25	669.91
MG ₂ ⁻	436.69	0	251.11	365.69	359.55	749.99
MG ₃ ⁻	401.11	27.23	0	92.78	0	570.46
MG ₄ ⁻	535.27	374.55	403.06	0	396.24	601.71
MG ₅ ⁻	749.99	539.73	447.12	574.23	0	0
DN ⁻	529.79	238.66	621.84	235.73	136.08	0

注:DN⁺代表DN售出能量;DN⁻代表购入能量。

表 9 不同方法下的损耗费用							
Table 9 Loss cost with different methods							
方法	传输功率损耗费用/元						总计损耗费用/元
	MG ₁	MG ₂	MG ₃	MG ₄	MG ₅	DN	
方法 1		7.18		0.61	7.87	15.66	414.66
方法 2	0.13	7.18	10.83	0.61	7.87	26.56	53.19
方法 3	2.80	5.27	5.16	3.59	3.42		20.23
本文方法	2.98	3.24	2.47	3.09	3.57	0.07	15.42

为保障合作博弈中不损害各主体的效益,采用 Shapley 值法对合作利润进行公平且合理的二次分配。在初始利润计算环节,MG₁和MG₃作为余电微电网,通过对外售电分别获得收益 149.28 元和 145.98 元。在扣除线路传输损耗费用后,各自的初始利润分别为 146.30 元和 213.96 元。其他主体的初始利润亦按照类似方式计算得出。MMGD 系统各主体合作初始利润与二次利润分配的对比结果如表 10 所示。

1)方法 1 和方法 2 的对比结果分析

由表 9 可知,方法 1 中 MG 只能购电不能售电,造成大量能源废弃,导致方案 1 成本高,风光废弃损失高达 383.34 元。方案 2 与方法 1 相比,充分利用了 2 044.46 kW 可再生能源,节省了 61.57 元成本和 361.47 元经济总成本。由于方法 2 赋予 MG 将富余可再生能源注入电网的能力,实现了余电上网,提高了清洁能源的整体利用效率。

2)方法 2 和本文方法的对比结果分析

本文方法中系统整体损失费用相对方法 2 减少了 37.77 元。方法 2 中 MG 与 DN 间进行双向电力交易,但 MG 间相对独立无法直接传递能源。本文方法在方法 2 基础上引入了 MG 之间的能量交易机制,为实现就近消纳提供了可能性,有效降低了因长距离输电线路引起的电能损耗。尽管对于个体微电网 MG₄来说,传输损耗费用增加了 2.48 元,但相较于 MMGD 系统整体经济效益的明显提升,这是可以接受的。

3)方法 3 和本文方法的对比结果分析

本文方法中,MMGD 系统整体损失费用相对于方法 3 减少了 2.81 元,经济损失降低了 23.7%。方法 3 局限于微电网集群内部进行能量交易,未考虑 DN 作为交易主体参与合作。本文方法允许 MG 将多余电力以余电上网的形式纳入电网,最大限度地利用了可再生能源,从而提高能源利用效率。本文方法的 MG₁和MG₅传输损耗费用增加了 0.33 元,但相对整体提升可以忽略。

表 10 合作初始利润与二次利润分配对比							
Table 10 Comparison of initial profit and secondary profit distribution in cooperation							
分配方式	利润/元						总利润
	MG ₁	MG ₂	MG ₃	MG ₄	MG ₅	DN	
合作初始利润	146.30	-38.31	211.49	-37.44	-58.78	27.94	251.19
二次利润分配	39.22	9.71	39.19	10.08	126.58	26.41	251.19

通过合作初始利润与二次利润分配对比结果可知,尽管利润重新分配,但总利润保持不变,意味着在重新分配利润的同时整体利益得到了保障。其次,在二次利润分配的策略下,部分主体的利润有所增加,而部分主体的利润则有所减少。这种变化不仅反映了各主体在合作中的实际贡献,也体现了分配机制的公平性。

根据 Shapley 值法计算结果, MG_1 在合作联盟中的贡献大于 MG_3 ,但其初始收益分配却低于两者。这种收益与贡献不匹配的现象若长期存在,可能会对 MG_1 参与优化协调优化的积极性产生负面影响。因此,基于各主体实际贡献进行收益分配显得尤为必要。经过二次分配后, MG_5 因其贡献最大而获得了最高的利润分配。 MG_2 、 MG_4 、 MG_5 在合作初始收益时作为缺电微电网产生购电行为,使收益

为负,但在二次收益分配后都实现了盈利。同时,尽管 MG_2 在优化协调调度中的贡献相对较小,但通过二次利润分配,其利润也得到了显著提升。这证明了二次分配策略的合理性和有效性。

为验证本文所提方法在实现集体理性和提升系统经济性方面的优势,设置以下调度方法进行对比:

对比方法:优先在 MG 之间进行能量交易,再与 DN 进行购售电。

本文方法:MMGD 系统各主体处于对等地位,能量交易无先后之分。

当 $t=65$ 时, MG 不平衡功率分别为 6 788.37、-2 270.79、2 254.60、-4 117.77、4 000.59 kW,在两种不同方法下进行优化调度后,优化收益、损耗情况、求解时间对比如表 11 所示。

表 11 两种方法在 $t=65$ 时收益、损耗费用和求解时间对比
Table 11 Comparison of profit, loss and solution time of two methods at $t=65$

方法	交易收益/元							传输功率损耗费用/元							求解时间/s
	MG_1	MG_2	MG_3	MG_4	MG_5	DN	总计	MG_1	MG_2	MG_3	MG_4	MG_5	DN	总计	
对比方法	806.12	-465.52	267.73	-844.14	475.07	-427.07	243.15	9.77	5.42	0.16	9.76	5.45	0.19	30.47	6.86
本文方法	408.32	-192.72	135.61	-434.34	240.63	122.99	280.49	2.75	5.19	4.90	3.71	3.51	0.02	20.09	5.26

对比方法中 MMGD 系统的整体收益为 243.15 元。在 MG 之间进行能量交易,完成集群内部交易后,仍有 6 655 kW 可再生能源富余,随后, DN 购电并产生了 427.07 元的购电费用。值得注意的是,在该对比方法中, MG 间的能量交易并未经过协调优化,而是基于其不平衡功率直接进行的,这导致了较大的传输损耗,占整体收益的 12.53%。而当采用本文所提方法时,各主体协调能量交易,系统整体收益为 280.49 元,相较对比方法增加了 37.34 元。尽管 MG_1 、 MG_3 、 MG_5 的收益相较对比方法减少了 764.36 元,但 MG_2 、 MG_4 、DN 的购电费用相较对比方法减少了 1 232.66 元,收益提升了 37.99%,对系统而言实现了集体理性。在传输功率损耗费用方面,本文方法相较对比方法减少了 10.38 元,虽然个体 MG_5 的传输损耗费用增加了 4.74 元,但相对整体来说该提升可以接受。

此外,这两种方法的求解时间分别为 6.86 s 和 5.26 s,效率相对于调度片段而言可行。

4 结语

本文提出了一个面向 MMGD 系统的两阶段博弈能量调度方法,实现了多利益主体的平衡决策,通

过理论分析和仿真实验,得出了以下结论:

1) 所提出的非合作博弈策略在第 1 阶段的电价博弈优化中实现了各微电网的最优调度,竞价过程凸显了博弈方的自利倾向,提高了交易的主动性。

2) 所提合作博弈策略达到了整体损耗费用最低的目标,实现了集体理性,同时考虑利润分配,实现了公平交易。仿真结果验证了所提模型在提升能源利用效率和经济效益方面更具优势。

3) 综合考虑了市场电价和交易损失对 MMGD 系统的影响,分为两阶段以实现系统能量调度,减小了策略空间的维数。

后续将进一步考虑各类负荷特性与分时发电成本等因素对能源协调优化的影响,使本文研究更具应用意义。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>), 扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 国家能源局发布 1~9 月全国电力工业统计数据[J]. 电力与能源, 2018, 39(6): 751.
The National Energy Administration released the statistical data

- of the national electric power industry from January to September [J]. *Power & Energy*, 2018, 39(6): 751.
- [2] XU D, ZHOU B, LIU N, et al. Peer-to-peer multienergy and communication resource trading for interconnected microgrids [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(4): 2522-2533.
- [3] 谢元皓, 林声宏, 朱建全. 基于广义纳什议价的多微电网配电系统多主体协同能量管理策略[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(5): 199-207.
- XIE Yuanhao, LIN Shenghong, ZHU Jianquan. Multi-stakeholder collaborative energy management strategy for multi-microgrid distribution system based on generalized Nash bargaining[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(5): 199-207.
- [4] 陈池瑶, 苗世洪, 姚福星, 等. 基于多智能体算法的多微电网-配电网分层协同调度策略[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(10): 57-65.
- CHEN Chiyao, MIAO Shihong, YAO Fuxing, et al. Hierarchical cooperative dispatching strategy of multi-microgrid and distribution networks based on multi-agent algorithm [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(10): 57-65.
- [5] JANI A, JADID S. Two-stage energy scheduling framework for multi-microgrid system in market environment [J]. *Applied Energy*, 2023, 336: 120683.
- [6] 符杨, 邢馨月, 李振坤, 等. 基于主从博弈的微电网群多阶段鲁棒优化规划[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(4): 1-8.
- FU Yang, XING Xinyue, LI Zhenkun, et al. Multi-stage robust optimization planning of microgrid clusters based on master-slave game[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(4): 1-8.
- [7] 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.
- [8] 赵波, 张后谊, 陈民铤, 等. 体系动态架构下的多微电网系统能量管理模型与动态链接行为分析方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(20): 6468-6482.
- ZHAO Bo, ZHANG Houyi, CHEN Minyou, et al. Energy management model and dynamic link behavior analysis method for multi-microgrid systems under dynamic system of systems architecture[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(20): 6468-6482.
- [9] 刘念, 赵璟, 王杰, 等. 基于合作博弈论的光伏微电网群交易模型[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(8): 1903-1910.
- LIU Nian, ZHAO Jing, WANG Jie, et al. A trading model of PV microgrid cluster based on cooperative game theory [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(8): 1903-1910.
- [10] 钟永洁, 李玉平, 胡兵, 等. 基于合作博弈的能源互联网经济能效分层协同优化调度[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(1): 55-64.
- ZHONG Yongjie, LI Yuping, HU Bing, et al. Hierarchical collaborative optimal scheduling of economy energy efficiency in energy Internet based on cooperative game[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(1): 55-64.
- [11] WANG L, ZHOU Q, XIONG Z, et al. Security constrained decentralized peer-to-peer transactive energy trading in distribution system [J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2021, 8(1): 188-197.
- [12] 李得民, 吴在军, 赵波. 多微电网系统的合作博弈模型及其优化调度策略[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(14): 5140-5154.
- LI Demin, WU Zaijun, ZHAO Bo. Cooperative game model and optimal dispatch strategy of multi-microgrid system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(14): 5140-5154.
- [13] LIU T, TAN X Q, SUN B, et al. Energy management of cooperative microgrids: a distributed optimization approach[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, 96: 335-346.
- [14] ZHANG K, TROITZSCH S, HANIF S, et al. Coordinated market design for peer-to-peer energy trade and ancillary services in distribution grids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(4): 2929-2941.
- [15] ULLAH M H, PARK J D. Peer-to-peer energy trading in transactive markets considering physical network constraints[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(4): 3390-3403.
- [16] 刘天奇, 韩冬, 汪延德, 等. 基于内嵌增广拉格朗日函数Q-learning方法的虚拟电厂市场博弈策略[J]. *电网技术*, 2021, 45(10): 4000-4008.
- LIU Tianqi, HAN Dong, WANG Yande, et al. Strategies of market game behavior of virtual power plants based on Q-learning with augmented Lagrange function [J]. *Power System Technology*, 2021, 45(10): 4000-4008.
- [17] LIN Y, DONG P, SUN X L, et al. Two-level game algorithm for multi-microgrid in electricity market [J]. *IET Renewable Power Generation*, 2017, 11(14): 1733-1740.
- [18] 陆湛文, 程新功, 张永峰. 基于共识粒子群的全局优化求解方法[J]. *系统仿真学报*, 2020, 32(10): 1936-1942.
- LU Zhanwen, CHENG Xingong, ZHANG Yongfeng. Global optimization method based on consensus particle swarm optimization [J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(10): 1936-1942.
- [19] HAO W R. A gradient descent method for solving a system of nonlinear equations [J]. *Applied Mathematics Letters*, 2021, 112: 106739.
- [20] 何晏清. 动态规划算法在工程中的应用[J]. *电子技术与软件工程*, 2020(12): 121-122.
- HE Yanqing. Application of dynamic programming algorithm in engineering [J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2020(12): 121-122.
- [21] 何雨. 超启发式算法综述[J]. *数字技术与应用*, 2020, 38(9): 94-95.
- HE Yu. Overview of super-heuristic algorithms [J]. *Digital Technology & Application*, 2020, 38(9): 94-95.
- [22] 罗云峰. 博弈论教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- LUO Yunfeng. *Game theory tutorial* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [23] GIBBONS R. *Game theory for applied economists* [M]. Princeton, USA: Princeton University Press, 1992.
- [24] 赵敏, 沈沉, 刘锋, 等. 基于博弈论的多微电网系统交易模式研究[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(4): 848-857.

- ZHAO Min, SHEN Chen, LIU Feng, et al. A game-theoretic approach to analyzing power trading possibilities in multi-microgrids [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35 (4) : 848-857.
- [25] DU Y, LI F X. A hierarchical real-time balancing market considering multi-microgrids with distributed sustainable resources [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(1): 72-83.
- [26] KARIMI H, BAHMANI R, JADID S, et al. Dynamic transactive energy in multi-microgrid systems considering independence performance index: a multi-objective optimization framework [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2021, 126: 106563.
- [27] 林赞. 电力市场环境多微电网博弈调度研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- LIN Yun. A study of dispatch for multi-microgrid based on game theory in electricity market [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [28] Elia Transmission Belgium operates the electricity transmission network in Belgium [EB/OL]. [2023-09-05]. <https://www.elia.be/en/grid-data/power-generation/wind-power-generation>.
- 王逸群(1997—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 智能优化与能源调度。E-mail: wyq27119@163.com
- 彭寒梅(1979—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向: 综合能源系统多能流计算与安全性分析。E-mail: penghanmei8@163.com
- 谭 貌(1981—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 能源互联网、智能优化和机器学习算法。E-mail: mr.tanmao@gmail.com
- (编辑 王梦岩)

Coordinated Optimization Method for Power Sharing in Multi-microgrid Distribution Systems Based on Two-stage Game

WANG Yiqun¹, PENG Hanmei¹, TAN Mao^{1,2}, SU Yongxin^{1,2}

(1. School of Automation and Electronic Information, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China; 2. Hunan Engineering Research Center for Multi-energy Cooperative Control Technology, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: The energy coordination and sharing in multi-microgrid distribution (MMGD) systems are of significant importance for enhancing the economic efficiency of regional grids. Because a single game scheduling strategy is difficult to take into account the interests of various stakeholders, an energy coordinated optimization method based on two-stage game is proposed, which fully considers the realistic scenario of both competition and coordination among stakeholders. In the first stage, a non-cooperative electricity price game model between the distribution networks and surplus microgrids is constructed with the objective of maximizing individual profits, where the system selects different operation modes under various strategy combinations. In the second stage, the MMGD peer-to-peer cooperative game model is established, aiming at minimizing the system transmission loss, applying the Lagrange multiplier method and KKT (Karush-Kuhn-Tucker) condition to deal with the complex constraints, and applying the Shapley value method to ensure the cooperative profit distribution. The simulation results show that the proposed method can balance the individual rationality and collective rationality, and significantly improve the system economy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61873222) and Key Scientific Research Project of Hunan Provincial Education Department (No. 23A0142).

Key words: multi-microgrid distribution system; energy trading; two-stage game; coordinated optimization

