

考虑碳排放责任的多微网配电系统 混合博弈低碳策略

吕超贤¹, 闫湘源¹, 张 阳¹, 张 恒², 邢润发^{1,3}, 梁 睿¹

(1. 中国矿业大学电气工程学院, 徐州 221116; 2. 国网山东省电力公司临沂供电公司, 临沂 276000;

3. 国网冀北电力有限公司智能配电网中心, 秦皇岛 066100)

摘 要: 针对多微网配电系统利益冲突下的低碳运行问题, 提出一种考虑碳排放责任的多微网配电系统混合博弈低碳策略。首先, 基于碳流理论下的碳核算机制, 将源侧碳排放归算至负荷侧, 明确各方碳排放承担责任, 同时考虑多主体间博弈关系, 构建多主体参与下包含主从博弈和合作博弈的多微网配电系统混合博弈低碳运行架构。其中, 主从博弈以配电网作为领导者、多微网为跟随者, 配电网以考虑碳排放的运行成本最小为目标, 优化电价以引导多微网需求响应及机组行为, 发挥碳流理论下多微网协同减碳潜力, 提升系统低碳运行水平; 此外, 根据主从博弈各微网间功率交互信息, 构建基于纳什谈判理论的合作博弈模型, 实现各微网间的利益均衡。最后, 采用二分法和目标级联法结合策略求解混合博弈模型。算例分析表明该文所构建的混合博弈模型在处理配电网与多微网利益冲突、提升低碳化运行水平方面具有有效性。

关键词: 博弈论; 电力负荷调度; 微网; 碳排放责任; 纳什谈判

中图分类号: TM73

文献标志码: A

0 引 言

随着“双碳”目标的提出, 构建绿色、清洁的低碳化电力系统已成为未来发展的必然趋势^[1-2]。在电力系统低碳转型过程中, 多个微网(microgrid, MG)通过集群形式构成多微网(multi-microgrids, MMG)系统, 多微网通过与配电网的协同运行, 能有效促进新能源的消纳并提升能源利用效率。基于此, 多微网配电系统(multi-microgrid distribution system, MMDS)作为一种新型的系统架构被提出, 以进一步促进电力系统低碳化发展^[3-4]。

碳排放流理论将碳排放问题的研究范畴从传统的发电经济成本分析扩展至电力系统各环节的碳排放评估, 构建了系统层面的碳排放量转移与分配机制^[5]。文献[6]采用基于比例共享原则的碳流理论, 对用户侧的碳排放进行了精确计量, 明确碳排放分摊责任; 文献[7]以碳视角提出一种激励用户主动参与降低系统碳排放的低碳需求响应机制。针对传统方法在碳流公平分摊方面的局限性, 文献[8]提出一种基于网络功率分解的实时碳流计算方法; 文献[9]利用节点碳势计算中的邻接特性, 提出电力系统碳排放流的递推算法, 量化碳排放责任。

MMDS 中个体通常隶属于不同的利益主体, 具有独立的

利益诉求, 需建立一种合理的交易模型来协调各主体之间的运行和利益分配; 文献[10]提出一种基于主从博弈的社区微网运行商电价优化方法。文献[11]为提高能源利用效率, 提出一种基于主从博弈的燃气-太阳能-地热能集成综合能源系统优化运行策略。但主从博弈的局限性在于缺乏明确的合作机制, 导致参与者各自追求自身利益最大化, 无法实现系统整体效益最优。基于此, 文献[12]提出一种计及电-碳交易与综合贡献率的多微网合作博弈模型。文献[13]考虑多主体利益交互带来的影响, 提出一种合作博弈的综合能源系统绿证-碳交易模型。

上述文献主要聚焦于单一博弈策略, 通过优化全局或联合优化子目标实现效益最优。但单一的博弈模型难以适应各主体之间复杂的关系, 受博弈均衡的局限, 难以找到最优解。为此, 学者提出将主从博弈与合作博弈相结合的混合博弈策略, 以平衡整体和个体的利益。针对园区综合能源系统中存在多利益主体且收益分配不均的实际情况, 文献[14]构建以各主体成本最小为目标的混合博弈模型。针对微网下大量产消者协同运行问题, 文献[15]提出微网与产消者混合博弈优化策略。在此基础上, 文献[16]着眼于系统中的能源吸收和主体利益冲突等问题, 运用混合博弈理论来促进能源的相互转换。文献[17]研究了同一配电网下的多个综合能

收稿日期: 2025-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(52307154); 江苏省基础研究计划(BK20231076)

通信作者: 吕超贤(1989—), 男, 博士、副教授, 主要从事智能配电网、综合能源运行与规划方面的研究。chaoxianlv@163.com

源系统的协同管理,协调了配电网运行商(distribution system operator, DSO)和综合能源微网联盟的优化运行。

综上,目前关于 MMDS 的研究主要聚焦于电力市场交易机制与能源协调优化^[18-19],部分文献已在调度模型中引入碳排放约束与碳交易机制^[20],但多集中于微网内部或微网与上级电网之间的碳排放管理,尚缺乏对多微网与配电网之间碳排放责任分摊机制的系统性建模,特别是在考虑碳排放流动的视角下,低碳化运行潜力仍未被充分挖掘。

此外,尽管国家能源局 136 号文件明确提出“新能源应全电量参与市场交易”的政策导向,推动由政府指导电价定价向市场化定价机制转型,但当前配电网与多微网及微网间普遍采用固定电价机制进行电能交互,制约了系统中分布式新能源的消纳能力与低碳协同运行水平。因此,本文在遵循国家市场化改革方向的前提下,提出一种考虑碳排放责任的多微网配电系统混合博弈低碳策略,为电力市场化政策在分布式场景中的实施提供支撑。主要贡献如下:

1) 基于碳排放流理论,通过节点碳势量化 MMDS 碳排放水平,结合碳排放流的分布,从而明确各方碳排放承担责任,充分挖掘 MMDS 的低碳化潜力。

2) 综合考虑各主体经济与低碳诉求,构建内嵌微网间合作博弈的配电网-多微网主从博弈模型,实现多主体在经济性与低碳性目标下的均衡求解,协调电能交易与碳排放责任划分关系。

3) 提出适用于多层嵌套混合博弈结构的二分法与目标

级联法(analytical target cascading, ATC)结合求解策略,兼顾模型层级耦合与计算效率,实现主从响应与微网间合作优化的协调统一。

1 基于多主体混合博弈的 MMDS 优化架构

多微网配电系统中包含了配电网及多个微电网。多微网中包含光伏(photovoltaic, PV)、风力发电机(wind turbines, WT)、燃气轮机(gas turbine, GT)、储能系统(energy storage system, ESS)、碳捕集与封存设备(carbon capture and storage, CCS)及电转气设备(power to gas, P2G)。碳捕集设备可对燃气轮机运行过程中产生的 CO_2 进行捕获,并将其存储至储碳设备中,同时与电转气设备协同运行,以提高风光的本地消纳率、降低运行成本,实现系统低碳经济运行。

本文的混合博弈模型分为两个阶段。第一阶段为配电网-多微网间的主从博弈模型,多微网作为博弈跟随者,其调度策略会受到领导者配电网所制定电能价格的引导,而配电网在制定电能价格时,也需考虑多微网系统的整体响应。第二阶段为多微网中各微网间的合作博弈模型,通过第一阶段主从博弈得到各微网间的电能交易量,采用纳什谈判理论实现对合作收益的分配,得出微网间的电能交易价格。综上,本文构建了内嵌微网间合作博弈的配电网-多微网主从博弈模型,系统优化架构如图 1 所示。

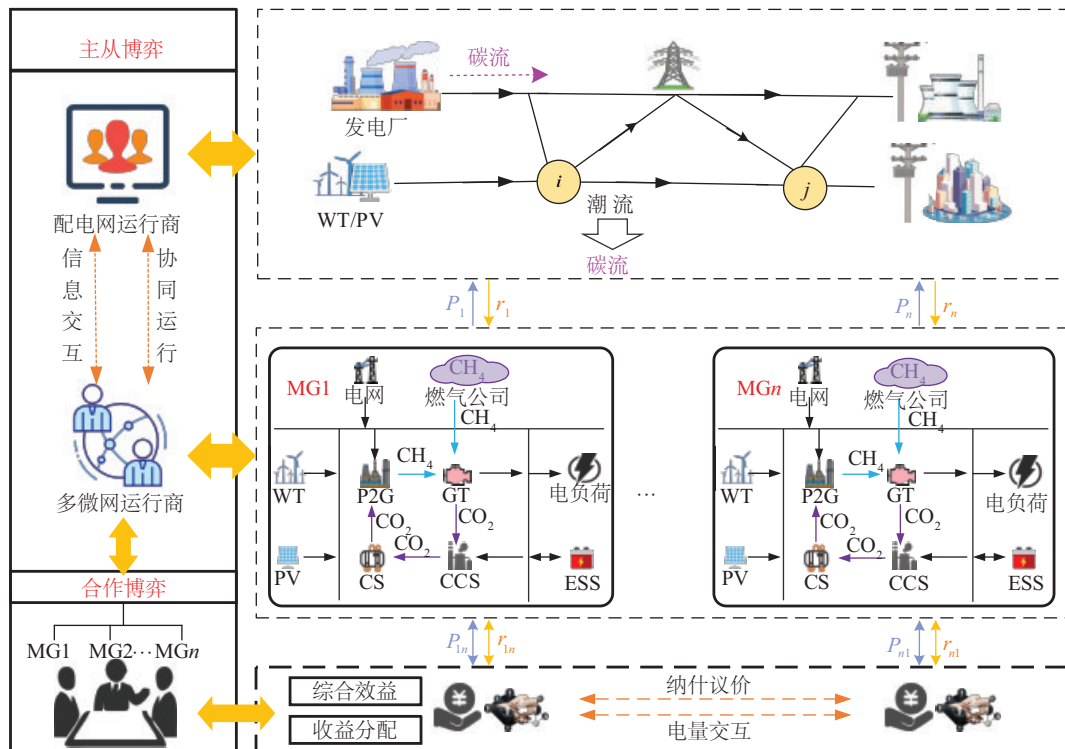


图1 MMDS整体框架

Fig. 1 Overall framework of MMDS

2 基于碳流理论的MMDS混合博弈双层优化模型

2.1 碳流理论下多主体碳排放核算方法

2.1.1 碳配额计算

配电网与微网以能耗水平分配碳排放额度。

$$E_{\text{DSO}}^{\text{free}} = E_{\text{MMDS}}^{\text{free_all}} \sum_{t=1}^T P_{\text{load},t}^{\text{DSO}} / \sum_{t=1}^T \left(P_{\text{load},t}^{\text{DSO}} + \sum_{i=1}^M P_{i,t}^{\text{L,MG}} \right) \quad (1)$$

$$E_i^{\text{free}} = E_{\text{MMDS}}^{\text{free_all}} \sum_{t=1}^T P_{i,t}^{\text{L,MG}} / \sum_{t=1}^T \left(P_{\text{load},t}^{\text{DSO}} + \sum_{i=1}^M P_{i,t}^{\text{L,MG}} \right) \quad (2)$$

式中: $E_{\text{DSO}}^{\text{free}}$ ——配电网分配碳配额, kg; E_i^{free} ——微网 i 分配碳配额, kg; $E_{\text{MMDS}}^{\text{free_all}}$ ——多微网配电系统总的碳配额, kg; $P_{\text{load},t}^{\text{DSO}}$ —— t 时刻配电网负荷, kW; $P_{i,t}^{\text{L,MG}}$ —— t 时刻微网 i 负荷, kW; T ——调度周期; M ——微网数量。

2.1.2 基于节点碳势的碳排放量核算

基于系统已知的潮流分布,碳排放流理论能有效确定各节点处的碳势^[21-22],精准划分各节点的碳排放责任,从而增强碳排放责任分摊的合理性。节点碳势的数学表达式为:

$$\rho_b = \left(\sum_{h \in \Omega_b^G} G_h \rho_h^G + \sum_{l \in \Omega_b^{L+}} P_l \rho_l^B \right) / \left(\sum_{h \in \Omega_b^G} G_h + \sum_{l \in \Omega_b^{L+}} P_l \right) \quad (3)$$

式中: ρ_b ——节点 b 的碳势, kg/(kW·h); Ω_b^G ——将注入节点 b 的发电机组集合; Ω_b^{L+} ——将注入节点 b 的支路集合; G_h ——发电机 h 输出功率, kW; ρ_h^G ——发电机 h 碳排放强度, kg/(kW·h); P_l ——支路 l 上的功率, kW; ρ_l^B ——支路 l 的碳排放强度, kg/(kW·h)。

基于碳排放流理论配电网将源侧碳排放责任转移到负荷侧,因此配电网碳排放量为:

$$E_{\text{DSO}}^{\text{CO}_2} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \rho_{i,t} P_{\text{load},t}^{\text{DSO}} \quad (4)$$

式中: $E_{\text{DSO}}^{\text{CO}_2}$ ——配电网负荷侧的碳排放总量, kg; N ——系统节点总数。

微网碳排放量为:

$$E_i^{\text{actual}} = \sum_{t=1}^T (m_{i,t}^{\text{CT}} + \rho_{i,t} P_{i,t}^{\text{buy}} - m_{i,t}^{\text{CCS}}) \quad (5)$$

式中: E_i^{actual} ——微网 i 的 CO_2 排放量, kg; $m_{i,t}^{\text{CT}}$ —— t 时刻微网 i 中燃气轮机排放的 CO_2 量, kg; $m_{i,t}^{\text{CCS}}$ —— t 时刻微网 i 中碳捕集设备捕获 CO_2 量, kg; $\rho_{i,t}$ ——微网 i 在 t 时刻的节点碳势, kg/(kW·h); $P_{i,t}^{\text{buy}}$ ——微网 i 在 t 时刻从配电网购电功率, kW。

2.2 DSO 与 MMG 主从博弈模型

DSO 作为领导者与跟随者 MMG 进行主从博弈, DSO 与 MMG 分别以自身运行成本最小为目标。经过博弈得出 DSO 的购售电量、MMG 的购售电量、购售电价及 MG 间电能交易量。

2.2.1 博弈领导者 DSO 模型

1) 目标函数

配电网运营商在保障电力供应的基础上以考虑系统低碳效益的综合运行成本最小为目标, 包括网损成本、购电成本、碳排放成本、机组运行成本, 以及多微网进行购售电的收益与成本:

$$\min C_{\text{DSO}} = C_{\text{loss}} + C_{\text{grid}} + C_{\text{CO}_2, \text{DSO}} + C_{\text{OM, DSO}} - C_{\text{deal}} \quad (6)$$

$$C_{\text{loss}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \Omega(i)} c_{\text{loss}} r_{ij} I_{ij,t}^2 \quad (7)$$

$$C_{\text{grid}} = \sum_{t=1}^T c_{\text{buy},t} P_{\text{in},t} \quad (8)$$

$$C_{\text{CO}_2, \text{DSO}} = c_{\text{CO}_2} (E_{\text{DSO}}^{\text{CO}_2} - E_{\text{DSO}}^{\text{free}}) \quad (9)$$

$$C_{\text{OM, DSO}} = \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^D (\sigma_{\text{WT}} P_{d,t}^{\text{WT, DSO}} + \sigma_{\text{PV}} P_{d,t}^{\text{PV, DSO}}) \quad (10)$$

$$C_{\text{deal}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M (r_t^{\text{buy}} P_{i,t}^{\text{buy}} - r_t^{\text{sell}} P_{i,t}^{\text{sell}}) \quad (11)$$

式中: C_{DSO} ——配电网运营商总成本, 元; C_{loss} ——网损成本, 元; $\Omega(i)$ ——以 i 为首节点的支路终端节点集合; c_{loss} ——网损成本系数, 元/(kW·h); r_{ij} ——支路 ij 电阻值, Ω ; $I_{ij,t}$ —— t 时刻支路 ij 电流值, kA; C_{grid} ——配电网向上级电网购电成本, 元; $c_{\text{buy},t}$ —— t 时刻上级电网购电电价, 元/(kW·h); $P_{\text{in},t}$ —— t 时刻配电网从上级电网购电功率, kW; $C_{\text{CO}_2, \text{DSO}}$ ——配电网碳排放成本, 元; c_{CO_2} ——碳交易的市场价格, 元/kg; $C_{\text{OM, DSO}}$ ——配电网机组的运行成本, 元; $[D]$ ——风电、光伏机组数量; σ_{WT} 、 σ_{PV} ——风电、光伏机组运行成本系数, 元/(kW·h); $P_{d,t}^{\text{WT, DSO}}$ 、 $P_{d,t}^{\text{PV, DSO}}$ —— t 时刻风电、光伏机组 d 的有功输出功率, kW; C_{deal} ——配电网与多微网进行购售电的收益与成本, 元; r_t^{buy} 、 r_t^{sell} —— t 时刻配电网面向多微网系统设定的购电与售电价格, 元/(kW·h); $P_{i,t}^{\text{sell}}$ ——微网 i 在 t 时刻向配电网售电功率, kW。

2) 约束条件

①潮流约束

$$P_{ij,t} - I_{ij,t}^2 r_{ij} - P_{j,t} = P_{jk,t} \quad (12)$$

$$Q_{ij,t} - I_{ij,t}^2 x_{ij} - Q_{j,t} = Q_{jk,t} \quad (13)$$

$$U_{i,t}^2 - 2(P_{ij,t} r_{ij} + Q_{ij,t} x_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij,t}^2 = U_{j,t}^2 \quad (14)$$

$$(P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2) / U_{i,t}^2 = I_{ij,t}^2 \quad (15)$$

式中: $P_{ij,t}$ 、 $Q_{ij,t}$ —— t 时刻支路 ij 的首端有功(kW)、无功功率(kvar); x_{ij} ——支路 ij 的电抗值, Ω ; $P_{j,t}$ 、 $Q_{j,t}$ —— t 时刻节点 j 的净注入有功(kW)和无功功率(kvar); $P_{jk,t}$ 、 $Q_{jk,t}$ —— t 时刻支路 jk 的首端有功(kW)、无功功率(kvar); $U_{i,t}$ 、 $U_{j,t}$ —— t 时刻节点 i 、 j 的电压幅值, kV。

采用二阶锥松弛方法进行配电网潮流约束中非线性项的线性化, 具体方法参见文献[23]。

②电价约束

配电网应制定合理的电价政策, 其中包括电价的上下限

及平均值约束。

$$\begin{cases} r_{\min}^{\text{buy}} \leq r_t^{\text{buy}} \leq r_{\max}^{\text{buy}} \\ r_{\min}^{\text{sell}} \leq r_t^{\text{sell}} \leq r_{\max}^{\text{sell}} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $r_{\max}^{\text{buy}}, r_{\max}^{\text{sell}}$ ——配电网系统制定购、售电价格上限, 元/(kW·h); $r_{\min}^{\text{buy}}, r_{\min}^{\text{sell}}$ ——配电网系统制定购、售电价格下限, 元/(kW·h)。

在主从博弈模型中, DSO 作为领导者为最大化自身利益, 会出现将 MMG 购、售电价格 $r_t^{\text{buy}}, r_t^{\text{sell}}$ 推向各自边界的极端情况。为保证对 MMG 的有效激励, 构建价格平均值约束, 即:

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T r_t^{\text{buy}} / T \leq r_{\text{ave}}^{\text{buy}} \\ \sum_{t=1}^T r_t^{\text{sell}} / T \geq r_{\text{ave}}^{\text{sell}} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $r_{\text{ave}}^{\text{buy}}, r_{\text{ave}}^{\text{sell}}$ ——配电网系统制定购售电价平均值, 元/(kW·h)。

2.2.2 博弈跟随者 MMG 模型

博弈跟随者 MMG 根据配电网运行商所设定的购、售电价, 通过博弈得到购、售电量以及 MG 之间电能交易的电量。

1) 目标函数

MMG 具有一定的自主减排能力, 以考虑机组运行成本、储能系统运行成本、购气成本、需求响应成本、碳排放成本、储碳成本及配电网-多微网交互收益与成本之和最小为目标:

$$\min C_{\text{MMG}} = (C_{\text{OM,MMG}} + C_{\text{ess}} + C_{\text{gas}} + C_{\text{DR}} + C_{\text{CO}_2\text{,MMG}} + C_{\text{cs}} + C_{\text{deal}}) \quad (18)$$

$$C_{\text{OM,MMG}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M (\sigma_{\text{WT}} P_{i,t}^{\text{WT,MG}} + \sigma_{\text{PV}} P_{i,t}^{\text{PV,MG}} + \sigma_{\text{GT}} P_{i,t}^{\text{GT}} + \sigma_{\text{P2G}} P_{i,t}^{\text{P2G}} + \sigma_{\text{CCS}} P_{i,t}^{\text{CCS}}) \quad (19)$$

$$C_{\text{ess}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \sigma_{\text{ess}} (\eta_{\text{abs}} P_{i,t}^{\text{abs}} + \eta_{\text{dis}} P_{i,t}^{\text{dis}}) \quad (20)$$

$$C_{\text{gas}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M c_{\text{gas}} (V_{i,t}^{\text{GT}} - V_{i,t}^{\text{P2G}}) \quad (21)$$

$$C_{\text{DR}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M (c_{\text{cut}} \Delta P_{i,t}^{\text{cut}} + c_{\text{trans}} P_{i,t}^{\text{trans,in}} + c_{\text{il}} \Delta P_{i,t}^{\text{il}}) \quad (22)$$

$$C_{\text{CO}_2\text{,MMG}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M c_{\text{CO}_2} (E_i^{\text{actual}} - E_i^{\text{free}}) \quad (23)$$

$$C_{\text{cs}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M c_{\text{CS}} m_{i,t}^{\text{CS}} \quad (24)$$

式中: C_{MMG} ——微网运营商总成本, 元; $C_{\text{OM,MMG}}$ ——多微网设备运行成本, 元; σ_{GT} ——燃气轮机运行成本系数, 元/(kW·h); $\sigma_{\text{CCS}}, \sigma_{\text{P2G}}$ ——碳捕集设备和电转气设备运行成本系数, 元/(kW·h); $P_{i,t}^{\text{WT,MG}}, P_{i,t}^{\text{PV,MG}}$ ——微网 i 中 t 时刻风电、光伏机组输出功率, kW; $P_{i,t}^{\text{GT}}$ ——微网 i 中 t 时刻燃气轮机输出功率, kW; $P_{i,t}^{\text{CCS}}$ ——微网 i 中 t 时刻 CCS 总能耗, kW; $P_{i,t}^{\text{P2G}}$ ——微网 i 中 t 时刻电转气设备消耗的总功率, kW; C_{ess} ——微网储能系统充

放电成本, 元; σ_{ess} ——电储能系统运行成本系数, 元/(kW·h); $\eta_{\text{abs}}, \eta_{\text{dis}}$ ——电储能系统的充电、放电效率; $P_{i,t}^{\text{abs}}, P_{i,t}^{\text{dis}}$ ——微网 i 中 t 时刻电储能系统的充放电功率, kW; C_{gas} ——多微网系统购气成本, 元; c_{gas} ——天然气单位价格, 元/m³; $V_{i,t}^{\text{GT}}$ ——微网 i 中 t 时刻燃气轮机消耗的天然气量, m³; $V_{i,t}^{\text{P2G}}$ ——微网 i 中 t 时刻电转气设备合成的天然气量, m³; C_{DR} ——需求响应成本, 元; $c_{\text{cut}}, c_{\text{il}}$ 与 c_{trans} ——削减、中断及转移负荷成本系数, 元/(kW·h); $\Delta P_{i,t}^{\text{cut}}$ ——微网 i 中 t 时刻削减负荷, kW; $P_{i,t}^{\text{trans,in}}$ ——微网 i 中 t 时刻转移负荷, kW; $\Delta P_{i,t}^{\text{il}}$ ——微网 i 中 t 时刻中断负荷, kW; $C_{\text{CO}_2\text{,MMG}}$ ——多微网碳交易成本, 元; C_{cs} ——储碳成本, 元; c_{CS} ——单位储碳成本系数, 元/kg; $m_{i,t}^{\text{CS}}$ ——微网 i 中 t 时刻 CS 的储碳量, kg。

2) 约束条件

①微网间交互功率约束

$$0 \leq P_{i-j,t}^{\text{P2P}} \leq P_{\max}^{\text{P2P}} \quad (25)$$

式中: $P_{i-j,t}^{\text{P2P}}$ ——微网间电能交互功率, kW; $P_{\max}^{\text{P2P}}$ ——微网间电能交互功率上限, kW。

②功率平衡约束

$$P_{i,t}^{\text{PV,MG}} + P_{i,t}^{\text{WT,MG}} + P_{i,t}^{\text{GT}} + P_{i,t}^{\text{dis}} + P_{i,t}^{\text{buy}} + P_{i-j,t}^{\text{P2P}} = P_{i,t}^{\text{L,MG}} + P_{i,t}^{\text{trans,in}} + P_{i,t}^{\text{cut}} + P_{i,t}^{\text{il}} + P_{i,t}^{\text{P2G}} + P_{i,t}^{\text{CCS}} + P_{i,t}^{\text{abs}} + P_{i,t}^{\text{sell}} \quad (26)$$

③设备约束

微网内设备主要包括 GT、CCS-P2G、PV、WT、ESS 等, 各类设备运行及容量约束参见文献[24]。

④需求响应约束

本文中负荷需求响应分为可转移负荷、可削减负荷及可中断负荷, 不同需求响应模型参见文献[24]。

2.3 基于纳什谈判理论的 MMG 合作博弈模型

针对多个独立个体在合作过程中产生的利益分配问题, 纳什议价模型提供了一个满足各方利益的均衡解。纳什议价模型为:

$$\begin{cases} \max \prod_{i=1}^M (C_i^0 - C_i^{\text{MGO}}) \\ \text{s.t.} \quad C_i^{\text{MGO}} \leq C_i^0 \end{cases} \quad (27)$$

式中: C_i^0 ——微网 i 的独立运行成本, 元; C_i^{MGO} ——微网 i 运行成本, 元。

该模型具有非凸非线性的特征, 因此需将该问题进行解耦转化为: 子问题 P1: MMG 成本最小化子问题和子问题 P2: 收益分配子问题。

2.3.1 MMG 成本最小化子问题(P1)

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^M (C_i^{\text{MGO}} = C_{i,t}^{\text{OM,MMG}} + C_{i,t}^{\text{ess}} + C_{i,t}^{\text{gas}} + C_{i,t}^{\text{DR}} + C_{i,t}^{\text{CO}_2\text{,MMG}} + C_{i,t}^{\text{cs}} + C_{i,t}^{\text{deal}}) \\ \text{s.t. 式(18)~式(24)} \end{cases} \quad (28)$$

2.3.2 收益分配子问题(P2)

将子问题(P1)所输出的最优解, 在式(29)中作为已知参数, 从而计算 MG 间的交互电价及相应的交互成本。

$$\left\{ \begin{array}{l} \max \prod_{i=1}^M (C_i^0 - C_i^{\text{MG0}*} - C_i^{\text{P2P}}) \\ C_i^{\text{MG0}*} = C_i^{\text{OM,MMG}*} + C_i^{\text{ess}*} + C_i^{\text{gas}*} + \\ C_i^{\text{DR}*} + C_i^{\text{CO}_2, \text{MMG}*} + C_i^{\text{cs}*} + C_i^{\text{deal}*} \\ C_i^{\text{P2P}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1, j \neq i}^M r_{i-j,t}^{\text{P2P}} P_{i-j,t}^{\text{P2P}} \\ \text{s.t.} \begin{cases} C_i^0 \geq C_i^{\text{MG0}*} + C_i^{\text{P2P}} \\ r_{i,t}^{\text{buy}*} \leq r_{i-j,t}^{\text{P2P}} \leq r_{i,t}^{\text{sell}*} \end{cases} \end{array} \right. \quad (29)$$

式中:带*的变量均指 P1 优化求解所确定的最优值; C_i^{P2P} ——微网 i 与其他微网进行点对点电能交易的成本,元; $r_{i-j,t}^{\text{P2P}}$ —— t 时刻 MG 间进行电能交易的价格,元/(kW·h)。

3 基于二分法和 ATC 算法的 MMDS 混合博弈模型求解

3.1 二分法求解主从博弈

针对配电网-多微网主从博弈模型具有层级耦合关系,多微网响应配电网决策随电价变化具有非线性特征,本文引入二分法进行分布式求解,通过构建主问题可行区间并迭代收缩边界,兼顾求解效率与稳定性。尽管已有研究在电力交易场景中采用二分法策略^[17],但本文将该方法首次拓展应用于含碳排放责任分摊机制的电能博弈结构中,解决了电价-电量之间的非线性耦合关系,实现了多主体电能响应策略与碳排放协调运行的联合求解。具体步骤如下:

步骤 1: 设 $r_{d,t}$ 为 t 时刻第 d 次迭代的电能价格,设置其初始可行域为 $[r_{d,t}^{\min}, r_{d,t}^{\max}]$,设定初始电价为 $r_{d,t} = (r_{d,t}^{\min} + r_{d,t}^{\max})/2$ 。

步骤 2: 跟随者多微网将领导者配电网所制定的当前价格信号作为输入,依据式(18)进行低碳经济调度,以确定最优购售电量。

步骤 3: 领导者配电网接收到跟随者多微网的购售电需求后,依据式(6)对电价进行更新迭代,得到新一轮新的价格信号, $d = d + 1$ 。

步骤 4: 判断价格信号是否满足收敛条件。若收敛,则第一阶段迭代终止,并将优化后的电价及微网间交互功率作为已知参数输入第二阶段。否则,转至步骤 5。

收敛条件:

$$|r_{d+1,t}^{\text{buy}} - r_{d,t}^{\text{buy}}|/r_{d,t}^{\text{buy}} \leq \kappa \quad (30)$$

$$|r_{d+1,t}^{\text{sell}} - r_{d,t}^{\text{sell}}|/r_{d,t}^{\text{sell}} \leq \kappa \quad (31)$$

式中: $r_{d,t}^{\text{buy}}, r_{d,t}^{\text{sell}}$ —— t 时刻第 d 次迭代的购电、售电价格,元/(kW·h); κ ——收敛阈值,取值 10^{-4} 。

步骤 5: 判断价格信号是否满足边界处理条件,如果 $r_{d,t}^{\text{buy}} = r_{d-2,t}^{\text{buy}}, r_{d,t}^{\text{sell}} = r_{d-2,t}^{\text{sell}}, r_{d,t} = (r_{d,t}^{\min} + r_{d,t}^{\max})/2$ 。反之,则依据式(32)、式(33)对边界进行更新, $d = d + 1$,并返回步骤 2,开启新一轮迭代,直至满足收敛条件。

$$r_{d,t}^{\max} = \max \{ r_{d,t}, r_{d-1,t} \} \quad (32)$$

$$r_{d,t}^{\min} = \min \{ r_{d,t}, r_{d-1,t} \} \quad (33)$$

3.2 ATC 求解合作博弈

为求解多微网间的合作博弈问题,本文引入 ATC 算法,将系统全局目标分解为局部子目标,引导各微网在在保持自主决策的同时实现协调一致。针对微网间电能交易价格的耦合特性,ATC 通过引入局部副变量与惩罚项实现变量解耦,通过引导变量迭代更新收敛,从而实现多主体间的电价协调与系统整体在经济性与低碳性目标下的全局最优。

为保证利益的公平分配,需在各微网间达成统一的价格共识,对电价 $r_{i-j,t}^{\text{P2P}}$ 进行解耦来处理不同主体期望电价的耦合问题。

$$r_{i-j,t}^{\text{P2P}-i} = r_{i-j,t}^{\text{P2P}} = r_{i-j,t}^{\text{P2P}-j} \quad (34)$$

式中: $r_{i-j,t}^{\text{P2P}-i}, r_{i-j,t}^{\text{P2P}-j}$ —— t 时刻微网 i 、微网 j 所期望的交易电价,元/(kW·h)。

由于原目标函数式(29)的非凸非线性特征,难以直接求解。因此利用对数函数的单调性,对目标函数进行取负对数,将原问题重构为一个等效的线性规划模型:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min L_i = -\ln(C_i^0 - C_i^{\text{MG0}*} - C_i^{\text{P2P}}) + \\ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1, j \neq i}^M \left[\omega_{i-j,t}^{\text{P2P}} (r_{i-j,t}^{\text{P2P}-i} - r_{i-j,t}^{\text{P2P}-j}) + \right. \\ \left. \| \chi_{i-j,t}^{\text{P2P}} (r_{i-j,t}^{\text{P2P}-i} - r_{i-j,t}^{\text{P2P}-j}) \|^2 \right] \\ \text{s.t.} \begin{cases} C_i^0 \geq C_i^{\text{MG0}*} + C_i^{\text{P2P}}, r_{i,t}^{\text{buy}*} \leq r_{i-j,t}^{\text{P2P}} \leq r_{i,t}^{\text{sell}*} \end{cases} \end{array} \right. \quad (35)$$

式中: $\omega_{i-j,t}^{\text{P2P}}, \chi_{i-j,t}^{\text{P2P}}$ —— t 时刻微网 i 和微网 j 进行交互的惩罚因子。具体步骤如下:

步骤 1: 输入阶段一主从博弈输出的最优解,并对各类参数进行初始赋值,具体包括:各 MG 间交易电价,耦合变量及惩罚因子。惩罚因子一次项 χ 初值取 10^{-2} 。

步骤 2: 各 MG 基于式(35)进行分布式低碳调度,更新 MG 间交易价格,并进行信息交换以校正价格。

步骤 3: 判断交互价格是否满足式(36)收敛条件。若满足,则迭代结束,输出阶段二:MG 间电能交易价格。若不满足,则按照式(37)更新惩罚函数因子, $k = k + 1$,返回步骤 2,开启新一轮迭代,直至满足收敛条件。

收敛条件: 双方预期的交互价格差值应符合设定的收敛精度标准。

$$|r_{i-j,t}^{\text{P2P}-ik} - r_{i-j,t}^{\text{P2P}-jk-1}| \leq \varepsilon_1 \quad (36)$$

式中: ε_1 ——收敛精度,取值 10^{-3} 。

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_{i-j,t}^{\text{P2P},k} = \omega_{i-j,t}^{\text{P2P},k-1} + 2\chi_{i-j,t}^{\text{P2P},k-1} \chi_{i-j,t}^{\text{P2P},k-1} s_{i-j,t}^{k-1} \\ s_{i-j,t}^{k-1} = (r_{i-j,t}^{\text{P2P}-ik-1} - r_{i-j,t}^{\text{P2P}-jk-1}) \\ \chi_{i-j,t}^{\text{P2P},k} = \eta \chi_{i-j,t}^{\text{P2P},k-1} \end{array} \right. \quad (37)$$

式中: η ——惩罚因子二次项更新系数,取值 2.9。

MMDS 混合博弈模型求解流程图如图 2 所示。

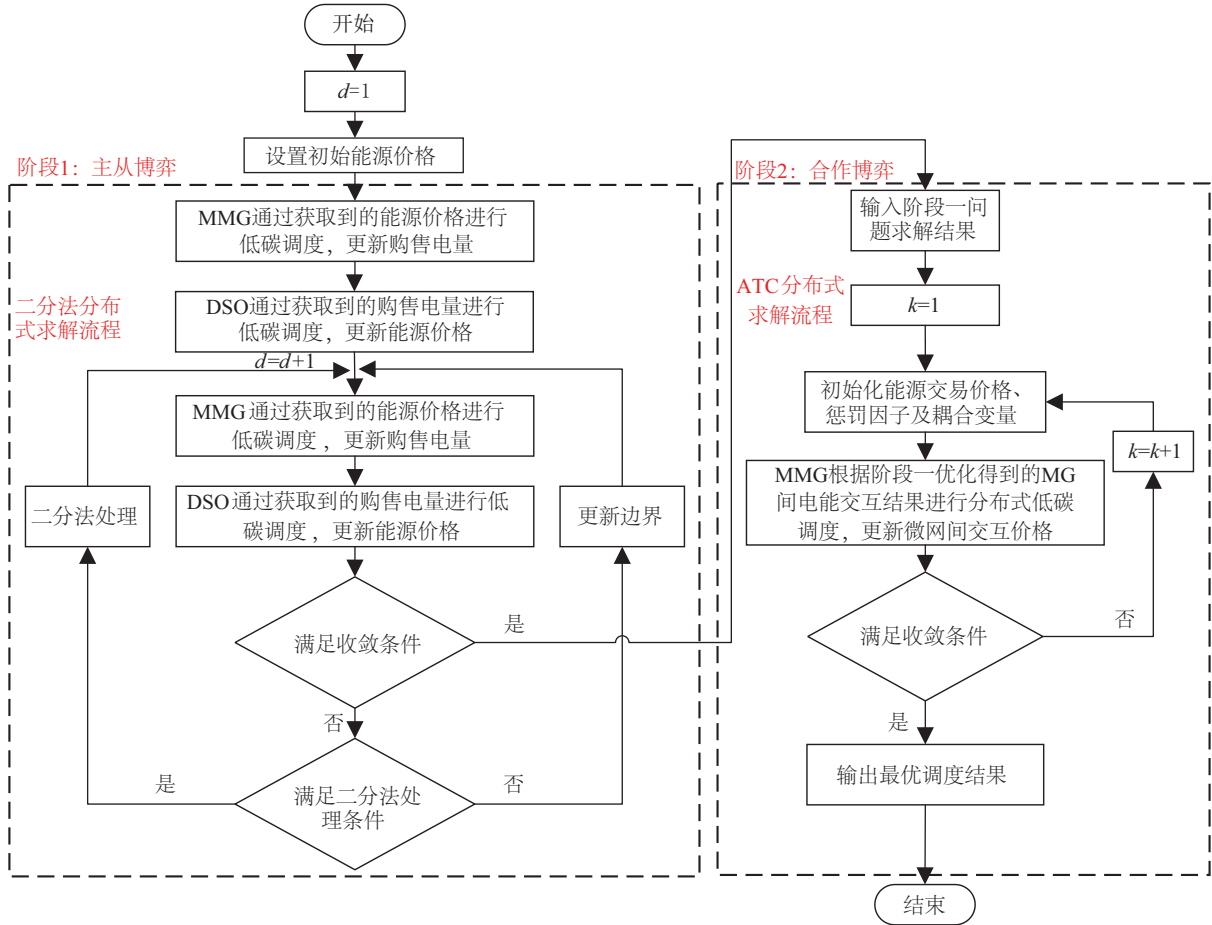


图2 MMDS混合博弈模型求解流程

Fig. 2 Solution flowchart of MMDS hybrid game model

4 算例分析

本文基于含3个微网的IEEE 33节点配电网系统进行仿真验证,仿真周期设置为24 h,步长1 h。由于模型中包含两种不同性质的优化问题,采用特定的求解器配置:主从博弈模型采用Gurobi 10.0.2进行求解;对于合作博弈模型采用Mosek 10.1进行求解。

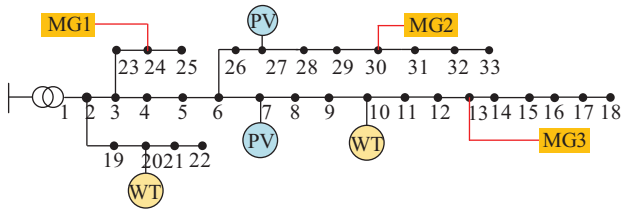


图3 MMDS系统整体结构

Fig. 3 System structure of MMDS system

4.1 场景对比分析

为对本文所提出的考虑碳排放责任的多微网配电系统混合博弈低碳策略的可行性进行全面评估,设计4种场景对比分析,详见表1。

表1 不同运行场景设置

Table 1 Different operation scenario settings

场景	DSO-MMG 是否功率交互	DSO-MMG 是否主从博弈	MG是否 功率交互	MG是否 合作博弈
1	√	×	×	×
2	√	√	×	×
3	√	√	√	×
4	√	√	√	√

结合表2与表3,对比场景1和场景2可知,DSO作为主从博弈的领导者,DSO的运行优化策略使其运行收益显著提升4271元,成本大幅消减25.22%。然而,这种经济优势是以牺牲跟随者MMG利益为代价的,表现为各MG的运行成本普遍上升,这是由于DSO为最大化自身收益而设定更有利于自身的电价。从环境效益上来看,碳排放责任在不同主体间从新分配,因DSO承担了更多电能交互的责任,使其碳排放量增加4.85%,但主从博弈策略极大地激励了MMG的内部减排,使其碳排放量下降27.26%。综合评估,MMDS总运行

成本小幅度下降,而总的碳排放量显著下降 12.22%。这表明,主从博弈框架虽引发了局部成本的转移,但从全局视角来看,提升了系统的低碳经济运行水平。

表 2 不同场景下系统碳排放量对比

Table 2 Comparison of system carbon emissions in different scenarios

场景	碳排放量/t					
	DSO	MG1	MG2	MG3	MMG	MMDS
1	20.60	7.91	4.50	11.03	23.44	44.04
2	21.61	3.55	4.04	9.47	17.05	38.66
3	17.03	2.57	1.86	9.42	13.69	30.73
4	17.03	2.57	1.86	9.42	13.69	30.73

表 3 不同场景下系统运行成本对比

Table 3 Comparison of system operating costs in different scenarios

场景	运行成本/万元					
	DSO	MG1	MG2	MG3	MMG	MMDS
1	1.6936	2.0076	1.5404	0.6366	4.1847	5.8783
2	1.2665	2.1775	1.6391	0.7833	4.5999	5.8664
3	1.7373	1.6616	1.2812	1.0307	4.0006	5.7378
4	1.7373	1.9420	1.5027	0.5285	4.0006	5.7378

与场景 2 对比,场景 3 实施 MG 之间功率交互机制后,MMG 能够通过内部功率的交互来满足部分能源需求,从而显著降低了对 DSO 的依赖,提升了能源自洽能力。由于 DSO 与 MMG 减少了电能交互,使得 DSO 的碳排放量下降 21.19%,但其运行成本也相应上升 37.13%,MMG 则因 MG 间展开电能交互使其运行成本与碳排放分别降低 13.03% 和 19.71%。尽管 DSO 的经济性有所牺牲,但从 MMDS 的整体性能来看,系统总运行成本与碳排放分别降低 2.2% 和 20.41%,实现了系统整体经济效益与低碳效益的协同提升。

场景 3 虽实施了 MG 之间的功率交互,但缺乏一个明确的利益分配机制,场景 4 基于纳什议价理论引入了合作博弈模型,为 MG 间的能量共享行为进行定价结算,为其内部的交互功率赋予了明确的经济价值,避免了传统共享模式下权责不清的问题。在这种合作博弈框架下,MG3 作为电能提供方,获得 5022 元的收益,而 MG1 与 MG2 为获取所需电能,分别支付了 2804 元和 2215 元的交互成本。可见纳什议价理论可以确保分配的公平性来激励各主体参与合作,是提升多主体协同系统低碳经济运行水平的关键。

场景 4 与场景 1 的对比结果,体现了本文所提混合博弈策略在低碳-经济优化运行方面的有效性。场景 4 对比于场

景 1 引入了混合博弈策略,成功激励了所有参与主体向低碳经济运行模式方向的转变。在微网层面,通过内部合作与外部博弈,实现了运行成本及碳排放量分别下降 4.39%、41.59%;在配电网层面,也以极小的经济代价,换取了 17.33% 的碳排放量下降。综合评估,MMDS 的运行成本降低 2.39%,碳排放总量则大幅消减了 30.22%,充分验证了本文所提混合博弈模型的优越性,在保障个体利益的同时,有效推动系统经济与环境效益的同步提升。

4.2 混合博弈模型下的能源交易结果分析

为促进电能交互过程中各利益主体的效益最优,本文设计的混合博弈模型采用两阶段求解流程,其中第一阶段旨在 DSO 向 MMG 制定最优的定价策略。阶段一的优化结果如图 4 所示,在主从博弈框架下,DSO 作为领导者,其定价策略清晰地反应了其追求自身利益最大化的目标,具体来看:其向 MMG 制定的购电价格低于向上级电网购电价格,而售电价格则高于向上级电网售电价格,有效的构建了对自身有利的盈利模式。这种以 DSO 为主导的价格制定策略,验证了所构建主从博弈模型的有效性。

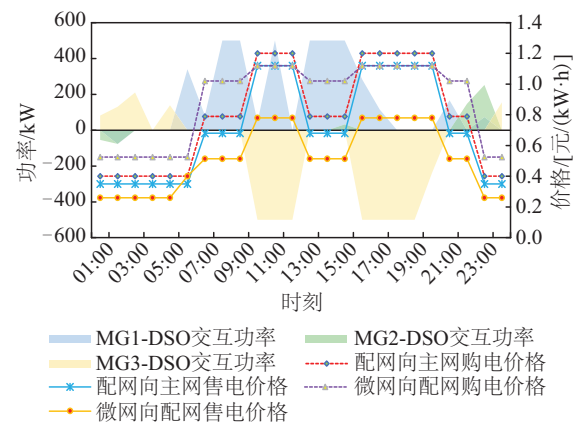


图 4 DSO-MG 电能交互价格及功率

Fig. 4 DSO-MG interactive tariff and power

图 4 展示了主从博弈定价机制下 DSO-MMG 的功率交互情况,正值代表 DSO 向 MG 售电,负值则相反。MG1 自身缺乏光伏配置,故在 06:00—11:00、13:00—17:00 等购电价格高的时段大量购买电能,来弥补内部的发电缺口;而 MG2 和 MG3 仅在夜间当内部资源不足时,才少量购电,从而有效控制运行成本。而在各自发电富裕时段,MG 均向 DSO 出售多余的电力,为自身创造额外的经济效益。

阶段二旨在 MG 间制定最优的交互电价。如图 5 所示 DSO 设定的购售电差价为 MMG 创造了一个合作共赢的运行区间,从而驱动各 MG 放弃与 DSO 交易,转而寻求内部合作。而基于纳什议价理论,则确保了合作产生的收益能公平合理地分配,充分保证了个体的独立性,并显著提升了各 MG 的经济运行效益。

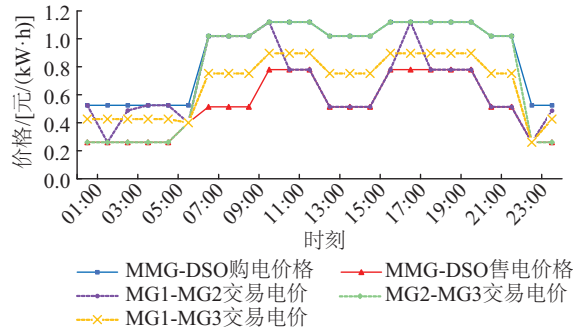


图5 MG间交互电价

Fig. 5 Interactive tariff among multi-microgrids

图6展示了合作博弈框架下MG间功率交互情况,以MG1-MG2为例。01:00及07:00—08:00时段MG1出现内部供需缺口时,它会优先从MG2购入电能以满足供需平衡,而非成本更高的DSO。反之15:00及22:00等电力富余时段,将电能出售给MG2以获取收益。基于MG间功率交互,增强了微网自身源荷平衡能力,同时在合作博弈框架下能够促进参与者公平互惠,全面提升MMG经济效益。

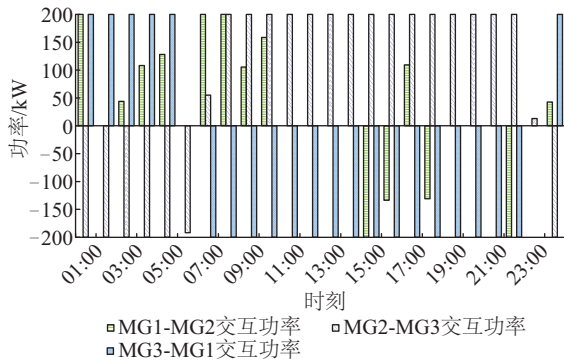


图6 MG间交互功率

Fig. 6 Interactive power among multi-microgrids

4.3 分布式算法收敛性分析

图7展示了本文所提混合博弈模型寻求均衡解的过程,该过程分为主从均衡和纳什均衡两个连续的收敛阶段。在第一阶段主从博弈框架下,MMG通过调整自身策略以响应DSO的报价,经过10次迭代,价格信号便稳定在均衡状态,体现了二分法高效的收敛速度。

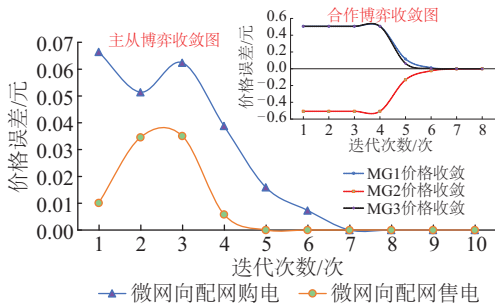


图7 混合博弈迭代收敛图

Fig. 7 Iterative convergence diagram for hybrid games

在第二阶段合作博弈框架下,MG间的交易电价通过纳什议价价的协商过程来达成。该过程采用ATC算法,通过对惩罚函数因子的不断更新来引导各MG的报价趋于一致,内部交易电价在第8次迭代后便达到了收敛要求,证明了该算法在求解纳什议价问题上的有效性。

5 结论

本文聚焦于含多类型微网的配电网系统,旨在解决其中不同利益主体在经济目标与资源调度的冲突问题。其核心在于设计了一种能够协调多层次复杂交互的混合博弈能源交易机制。主要结论如下:

1)考虑碳排放责任的多微网配电系统混合博弈低碳策略,能综合考虑各主体经济与低碳的诉求,协调电能交易与碳排放责任划分的关系,充分利用了各主体的资源禀赋,使得DSO以牺牲少量经济性的前提下,实现碳排放削减17.33%,MMG则实现碳排放下降41.59%与运行成本降低4.39%的双重优化。综合来看,MMDS的运行成本降低2.39%,碳排放总量则大幅消减了30.22%,验证了该机制在保障多主体利益均衡协调的前提下,提高了系统整体运行的经济性和低碳性。

2)结合二分法与目标级联法的求解策略,能够将复杂的集中式优化问题转化为通过有限信息交互的分布式问题,有效保证了各主体在迭代收敛过程中的独立性和良好的收敛性,实现了配电网和多微网的高效协调优化。

[参考文献]

- [1] 杨挺,党兆帅,王旭东,等.混合交易模式下电力系统全环节碳排放核算方法[J].中国电机工程学报,2025,45(1):38-51.
YANG T, DANG Z S, WANG X D, et al. Carbon emission accounting method for the entire electricity system in the mixed trading model[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 38-51.
- [2] 张沈习,王丹阳,程浩忠,等.双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J].电力系统自动化,2022,46(8):189-207.
ZHANG S X, WANG D Y, CHENG H Z, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and carbon neutrality [J]. Automation of electric power systems, 2022, 46(8): 189-207.
- [3] 陈毅,何山,谢少华,等.基于合作博弈的风-光-电-氢微网容量配置[J].太阳能学报,2024,45(2):395-405.
CHEN Y, HE S, XIE S H, et al. Capacity configuration of wind-photovoltaic-electric hydrogen microgrid based on

- cooperative game[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2024, 45(2): 395-405.
- [4] 吕天光, 艾芊, 孙树敏, 等. 含多微网的主动配电系统综合优化运行行为分析与建模[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(1): 122-132.
- LYU T G, AI Q, SUN S M, et al. Behavioural analysis and optimal operation of active distribution system with multi-microgrids[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(1): 122-132.
- [5] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 电力系统碳排放流分析理论初探[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(7): 38-43, 85.
- ZHOU T R, KANG C Q, XU Q Y, et al. Preliminary theoretical investigation on power system carbon emission flow[J]. *Automation of electric power systems*, 2012, 36(7): 38-43, 85.
- [6] 黄铭浩, 唐坤杰, 董树锋, 等. 基于碳流理论考虑用户侧碳排放配额的最优潮流[J]. *电网技术*, 2023, 47(7): 2703-2712.
- HUANG M H, TANG K J, DONG S F, et al. Optimal power flow considering user-side carbon emission allowances based on carbon flow theory[J]. *Power system technology*, 2023, 47(7): 2703-2712.
- [7] 李姚旺, 张宁, 杜尔顺, 等. 基于碳排放流的电力系统低碳需求响应机制研究及效益分析[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(8): 2830-2841.
- LI Y W, ZHANG N, DU E S, et al. Mechanism study and benefit analysis on power system low carbon demand response based on carbon emission flow[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(8): 2830-2841.
- [8] 汪超群, 陈懿, 文福拴, 等. 电力系统碳排放流理论改进与完善[J]. *电网技术*, 2022, 46(5): 1683-1691.
- WANG C Q, CHEN Y, WEN F S, et al. Improvement and perfection of carbon emission flow theory in power systems[J]. *Power system technology*, 2022, 46(5): 1683-1691.
- [9] 康重庆, 程耀华, 孙彦龙, 等. 电力系统碳排放流的递推算法[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(18): 10-16.
- KANG C Q, CHENG Y H, SUN Y L, et al. Recursive calculation method of carbon emission flow in power systems[J]. *Automation of electric power systems*, 2017, 41(18): 10-16.
- [10] 颜湘武, 王庆澳, 卜劲勇, 等. 计及不确定性的基于主从博弈的社区微网运营商电价优化方法[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(8): 78-85.
- YAN X W, WANG Q A, BU J Y, et al. Electricity price optimization method for community microgrid operators based on leader-follower game considering uncertainty[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2024, 45(8): 78-85.
- [11] 李昌杰, 陈玉柱, 秦方, 等. 基于主从博弈的燃气-太阳能-地热能耦合系统运行优化[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(7): 333-339.
- LI C J, CHEN Y Z, QIN F, et al. Optimal operation of coupled gas-solar-geothermal energy system based on Stackelberg game[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2024, 45(7): 333-339.
- [12] 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, I0069-I0076.
- ZHANG Z H, XIONG X Y, WAN C, 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, I0069-I0076.
- [13] 徐睿婕, 任永峰, 祝荣, 等. 基于绿证-碳交易交互机制与合作博弈理论的IES系统低碳经济调度[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(9): 91-100.
- XU R J, REN Y F, ZHU R, et al. Low carbon economic dispatch of ies based on green certificate-carbon trading interaction mechanism and cooperative game theory[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2024, 45(9): 91-100.
- [14] 陈倩, 王维庆, 王海云. 计及需求响应和混合博弈含多微网主动配电网协调优化[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(9): 99-109.
- CHEN Q, WANG W Q, WANG H Y. Coordinated optimization of active distribution network with multiple microgrids considering demand response and mixed game[J]. *Automation of electric power systems*, 2023, 47(9): 99-109.
- [15] 王泽淇, 贾燕冰, 韩肖清, 等. 考虑产消者响应与不确定性的微能网双层混合博弈优化[J]. *电网技术*, 2024, 48(7): 2754-2764.
- WANG Z Q, JIA Y B, HAN X Q, et al. Optimization of a two-layer hybrid game between micro-energy networks and producer-consumers considering demand response and uncertainty[J]. *Power system technology*, 2024, 48(7): 2754-2764.
- [16] YANG D F, HE Z Q, SUN Y, et al. Optimised operation of integrated community energy system considering integrated energy pricing strategy: a two-layer Stackelberg game approach[J]. *Journal of energy storage*, 2024, 87: 111383.
- [17] 陈乐飞, 朱自伟, 王凯, 等. 基于混合博弈的配电网与

- 多综合能源微网优化运行[J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2229-2238.
- CHEN L F, ZHU Z W, WANG K, et al. Optimal operation of distribution networks and multiple integrated energy microgrids based on mixed game theory[J]. Power system technology, 2023, 47(6): 2229-2238.
- [18] 崔明勇, 宣名阳, 卢志刚, 等. 基于合作博弈的多综合能源服务商运行优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(10): 3548-3564.
- CUI M Y, XUAN M Y, LU Z G, et al. Operation optimization strategy of multi integrated energy service companies based on cooperative game theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(10): 3548-3564.
- [19] ALOWAIFEER M, ALKHRAIJAH M, SAKIS MELIOPOULOS A P, et al. Grid services optimization from multiple microgrids[J]. IEEE transactions on smart grid, 2022, 13(1): 8-19.
- [20] 陈俊先, 贾燕冰, 韩肖清, 等. 考虑需求侧碳交易机制的多微能网分布式协同优化调度[J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2196-2206.
- CHEN J X, JIA Y B, HAN X Q, et al. Distributed coordinated optimal scheduling of multi-micro integrated energy systems considering demand-side carbon trading mechanism[J]. Power system technology, 2023, 47(6): 2196-2206.
- [21] 王常乐, 刘海涛, 窦真兰, 等. 基于园区IES购电方案优化的低碳运行模型[J]. 高电压技术, 2023, 49(4): 1441-1454.
- WANG C L, LIU H T, DOU Z L, et al. Low carbon operation model based on the optimization of power purchase in park IES[J]. High voltage engineering, 2023, 49(4): 1441-1454.
- [22] 周特, 薛云飞, 季节, 等. 考虑电力间接碳排放不确定性的电-冷-热综合能源系统两阶段鲁棒优化方法[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 50-60.
- ZHOU T, XUE Y F, JI J, et al. Two-stage robust optimization for electricity-cooling-heat integrated energy system considering uncertainty of indirect carbon emissions of electricity[J]. Power system technology, 2024, 48(1): 50-60.
- [23] TZIOVANI L, HADJIDEMETRIOU L, KOLIOS P, et al. Energy management and control of photovoltaic and storage systems in active distribution grids[J]. IEEE transactions on power systems, 2022, 37(3): 1956-1968.
- [24] 吕超贤, 邢润发, 梁睿, 等. 考虑多维联动碳减排策略的多微网配电系统分层分布式调度[J]. 电网技术, 2026, 50(1): 92-101.
- LYU C X, XING R F, LIANG R, et al. Hierarchical distributed scheduling of multi-microgrid distribution system considering multi-dimensional linked carbon emission reduction strategies[J]. Power system technology, 2026, 50(1): 92-101.

HYBRID-GAME BASED LOW-CARBON STRATEGY FOR MULTI-MICROGRID DISTRIBUTION SYSTEM CONSIDERING CARBON EMISSION RESPONSIBILITIES

Lyu Chaoxian¹, Yan Xiangyuan¹, Zhang Yang¹, Zhang Heng², Xing Runfa^{1,3}, Liang Rui¹

(1. School of Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Linyi Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Linyi 276000, China;

3. Smart Distribution Network Center, State Grid Jibei Electrical Power Company Limited, Qinhuangdao 066100, China)

Abstract: To address the issue of low-carbon operation in multi-microgrid distribution systems under conflicting interests, this paper proposes a hybrid-game based low-carbon strategy for multi-microgrid distribution system considering carbon emission responsibilities. Firstly, a carbon accounting mechanism based on carbon flow theory is employed to allocate source-side carbon emissions to the load side, thereby clarifying the carbon emission responsibilities of all parties. Simultaneously, considering the game relationships among multiple stakeholders, a hybrid game-based low-carbon operation framework for multi-microgrid distribution systems is developed. This framework incorporates both master-slave and cooperative game models to enable effective multi-stakeholder participation. In this framework, the master-slave game takes the distribution network as the leader and the multi-microgrids as followers. The distribution network aims to minimize its operation costs while accounting for carbon emissions by optimizing electricity pricing. This pricing strategy guides the demand response and operational behaviors of the multi-microgrids, leveraging their collaborative carbon reduction potential under carbon flow theory to enhance the low-carbon operational performance of the system. Moreover, using the power interaction data among microgrids obtained from the master-slave game, a cooperative game model based on Nash negotiations theory is established. This model aims to achieve balanced benefit distribution among the microgrids, promoting fairness and enhancing collaborative efficiency within the system. Finally, the proposed hybrid game model is solved using a combined of the dichotomy and the analytical target cascading approach, ensuring efficient and accurate optimization of the system. The case study analysis demonstrates the effectiveness of the hybrid game model proposed in this paper in addressing the conflicts of interest between the distribution grid and multi-microgrids, and in improving the low-carbon operation level.

Keywords: game theory; electric load dispatching; microgrids; carbon emission responsibility; Nash negotiations