

配电市场下考虑配电网重构的基于纳什谈判的多微电网电能交易方法

常堃, 杜欣慧, 张日新, 姜海鹏, 张文轩, 苏珈

(太原理工大学电气与动力工程学院, 太原 030024)

摘要: 多微电网交易行为不仅实现了有效的能源协同管理, 还为配电市场中的主体带来了经济效益。为了实现多微电网运行成本最小化的同时降低配电网的网损, 提出了一种考虑配电网重构的多微电网电能交易纳什谈判方法。首先, 考虑多微电网的电能交易, 建立多微电网优化运行模型。其次, 基于纳什谈判理论, 建立多微电网电能交易模型, 并将纳什谈判原问题等价转换为两个子问题, 即多微电网运行成本最小化和支付效益最大化。然后, 基于混合整数二阶锥规划方法建立配电网重构模型, 对配电网进行潮流优化和网络重构, 并利用 Dijkstra 算法寻找该网络拓扑下微电网间的最短电气距离, 更新电能传输路径。最后, 通过算例验证了所提方法的有效性, 仿真结果表明, 考虑配电网重构的多微电网电能交易纳什谈判方法最大化了社会效益, 使社会总成本降低 13.67%。

关键词: 多微电网; 纳什谈判; 配电网重构; 电能交易; 配电市场

Nash Bargaining-Based Multi-Microgrid Power Energy Trading Method Considering Distribution Network Reconfiguration in the Distribution Market

CHANG Kun, DU Xinhui, ZHANG Rixin, JIANG Haipeng, ZHANG Wenxuan, SU Jia

(School of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Multi-microgrid trading behavior not only achieves effective energy collaborative management but also brings economic benefits to entities in the distribution market. To minimize the operational costs of multi-microgrid while reducing power losses in the distribution network, a Nash bargaining method for multi-microgrid electricity trading considering distribution network reconfiguration is proposed. Firstly, an optimal operation model for multi-microgrid is established, accounting for their electricity trading. Secondly, based on Nash bargaining theory, a multi-microgrid electricity trading model is constructed, and the original Nash bargaining problem is equivalently transformed into two subproblems: minimizing multi-microgrid operational costs and maximizing payment benefits. Then, a distribution network reconfiguration model is developed using the mixed-integer second-order cone programming method to optimize power flow and reconfigure the network. The Dijkstra algorithm is employed to find the shortest electrical distance between microgrids under this network topology, updating the electricity transmission paths. Finally, case studies validate the effectiveness of the proposed method. Simulation results demonstrate that the Nash bargaining method for multi-microgrid electricity trading considering distribution network reconfiguration maximizes social benefits, reducing total social costs by 13.67%.

Key words: multi-microgrid; Nash bargaining; distribution network reconfiguration; electric energy transaction; distribution market

0 引言

面对“双碳”目标的历史使命, 我国正坚定不移

地迈向能源体系的深度变革, 核心在于构建一个以新能源为主导的现代电力系统^[1]。微电网(microgrid, MG)作为一种先进的分布式能源系统^[2-4], 有效地促进了可再生能源的本地消纳和优化调度, 同时加强了其与大电网之间的协同工作能力, 成为配电网智能化升级的关键推手。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52307130)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China(52307130).

在电力市场改革持续深化的背景下,配电市场作为多微电网(networked microgrids, NMGs)有望进入的市场类型之一,正发挥着越来越重要的作用。文献[5]提出了一种市场清算框架,该框架通过整合输电网和配电网中的灵活性资源,促进能源商品与灵活性服务的高效交易,实现了系统层面的供需平衡。文献[6]提出了一种电力市场清算机制,不仅确保了配电系统与微电网的协同作业,还考虑了电能交换和不确定性资源的成本,体现了市场公平与效率的双重追求。文献[7]着眼于配电系统运营商(distribution system operator, DSO)的角色,提出了一种运营模型,该模型具备较强的应变能力,能够在市场价格波动中保持运营的稳健性。文献[8]提出了一种配电网与微电网的协同运营模式,旨在最大化配电公司的利润并最小化微电网的成本。

在配电市场下,多微电网交易行为本质上是各个微电网为获得自身最大利润的博弈。合作博弈理论是博弈论的一个分支,注重参与者的总体利益,可分为两大类。一类是联盟博弈^[9-10],通过集体行动来最大化整个联盟的收益。另一类是纳什谈判^[11],可以达到纳什均衡状态,实现帕累托最优。文献[12]通过引入过网费用因素,构建了多微电网间的纳什谈判模型,算例验证了该模型能够显著降低微电网的运营成本,促进资源的高效利用。文献[13]基于纳什谈判理论设计了一套风光氢多主体协同运行机制,可使各主体获得更大收益,该模型进一步拓展了合作博弈的应用范围。上述研究证明了合作博弈在多微电网系统协同优化中的有效性。联盟博弈在参与者数量较多时,会出现组合爆炸,且求解核心和沙普利值比较复杂。

目前,国内外对微电网与配电网的协调优化调度研究成果颇丰。文献[14]提出了考虑电池储能的微电网并网能量管理策略,算例验证该策略可以降低MG和DSO成本。文献[15]提出了含多微电网主动配电网(active distribution system, ADN)的优化调度模型,通过租赁共享储能系统实现多微电网间的联盟。文献[16]提出了园区微电网与ADN的协调调度策略。文献[17]提出了基于博弈论的考虑主/被动需求响应的微电网-配电系统协调优化策略;文献[18]提出了含智慧工业园区的配电系统双层优化调度策略,以上文献展现了不同场景下的调度策

略。文献[19]从不确定性角度出发,提出了日前-实时双层随机优化方法。文献[20]提出了互动博弈下的多微电网与配电网协作调度模型。文献[21]提出了分层调度策略,目标是对多微电网和配电网之间的电能交易进行约束。文献[22]提出了基于峰谷平电价的多微电网和配电网协同调度方法。文献[23]提出了含多微电网的配电网分层协同优化模型,实现了削峰填谷和参与方利益平衡。现有的研究通常采取了两种极端假设:要么所有微电网统一接入同一配电节点,要么它们分散连接至不同节点,普遍没有考虑配电网拓扑结构对MG电能交易行为的影响。NMGs接入公共配电网,相互之间进行电能交易时,要考虑电能传输损耗成本,而配电网重构可以改变电能的传输路径,就改变了损耗成本,进而影响电能交易行为。因此,在构建NMGs的电能交易模型时,要同时考虑配电网与MG的电能交易和配电网重构对电能交易行为产生的影响,DSO承担起运作配电市场和优化配电网重构的双重角色。而且不同微电网接入配电网的具体位置,也会影响电能传输成本,进而影响交易行为。因此,要验证微电网的位置规划对交易行为的影响。

综上,为了实现多微电网运行成本最小的同时降低配电网的网损,本文提出一种考虑配电网重构的多微电网电能交易纳什谈判方法。首先,考虑多微电网的电能交易,建立多微电网的优化运行模型;其次,基于纳什谈判理论,建立多微电网电能交易模型,并将纳什谈判原问题等效转换成两个子问题,即多微电网运行成本最小化和支付效益最大化,构成了上层模型;然后,基于混合整数二阶锥规划方法建立配电网重构模型,即下层模型,对配电网进行潮流优化和网络重构,并利用Dijkstra算法寻找该网络拓扑下微电网间最短电气距离,更新电能传输路径并传递至上层模型。最后,通过算例验证了所提方法的有效性。

1 配电市场下多微电网交易架构

配电市场下多微电网交易架构如图1所示,每个独立的微电网单元均集成了负荷需求、可再生能源发电及微型燃气轮机设施。在此配电系统内,各微电网被视作具备双向能源交易能力的实体,即它们不仅能够向邻近的微电网供应电力,同时也拥有

从其他微电网采购电力的灵活性。在图 1 中, 采用虚线描绘了潜在的双向信息交换路径, 这可通过无线传感技术或是固网基础设施得以实现, 象征着数据与指令的流通渠道; 而实线则直观地展现了物理层面的电力传输网络, 构成能源实际流动的骨架。这种架构的设计, 旨在促进微电网之间的协同作业与资源优化分配, 通过有效的信息与能源双通道互联, 实现更高效、灵活及可持续的能源管理。

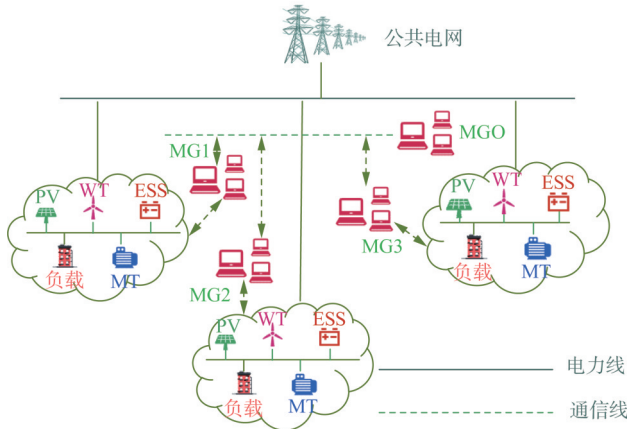


图 1 配电市场下多微电网交易架构

Fig. 1 Multi-microgrid trading architecture under distribution market

2 多微电网电能交易纳什谈判问题

2.1 多微电网交易模型

设想一个由 M 个微电网构成的集成配电体系, 令 $G = \{1, \dots, M\}$ 表示 NMGs 的集合。这些 MG 各自嵌入于配电网的不同节点, 形成复杂的能源交互网络。每个 MG 享有自主选择权, 既可直接从主电网汲取电力, 亦可与其他 MG 开展能源交易, 展现高度的自给自足与互惠互利特性。此系统的核心考量在于日前市场的协调规划与交易活动, 预设情境下, 发电量与负荷需求基于日度预测进行调度, 而供需间的任何偏差, 则在实时市场机制下得以动态平衡与校正。多微电网系统(NMGs)的集体交易策略聚焦于削减所有 MG 的总运行成本, 力求达到经济效能的最优解。与此同时, DSO 扮演着至关重要的角色, 其使命是通过配电网重构, 将电网损耗降至最低限度, 进而最大化社会效益, 推动可持续发展目标的实现。假定所有 MG 均受单一 MGO 的统一管辖, 遵循集中式优化模式。

2.1.1 单个微电网中的电能调度约束

1) 从配电系统购买电能的约束

第 i 个微电网(MGi)为满足本地负荷需求, 可以利用自身的分布式能源, 如微型燃气轮机、光伏、风电和储能系统等, 也可以从配电系统购买电能^[24-25]。

$$0 \leq P_{\text{pur}, id, t} \leq P_{\text{pur}, i}^{\max}, \forall i \in G \quad (1)$$

式中: $P_{\text{pur}, id, t}$ 和 $P_{\text{pur}, i}^{\max}$ 分别为 t 时刻 MG i 从配电系统购买的电量和 MG i 能从配电系统购买的最大电量; 下标 d 为配电系统; i 为微电网编号。相应地, MG i 的这部分成本 $C_e(P_{\text{pur}, id, t})$ 表示为:

$$C_e(P_{\text{pur}, id, t}) = \sum_{t=1}^T \sigma_{\text{LMP}, t} \cdot P_{\text{pur}, id, t} \quad (2)$$

式中: $\sigma_{\text{LMP}, t}$ 为 t 时刻的边际电价; T 为运行时段数量, $T=24$; 下标 e 为 electricity 的简称。

2) 储能系统约束

$$u_{d, t} + u_{c, t} \leq 1 \quad (3)$$

$$u_{d, t} P_d^{\min} \leq P_{d, t} \leq u_{d, t} P_d^{\max} \quad (4)$$

$$u_{c, t} P_c^{\min} \leq P_{c, t} \leq u_{c, t} P_c^{\max} \quad (5)$$

$$E_{t+1}^{\text{ESS}} = E_t^{\text{ESS}} + \eta_c P_{c, t} - \eta_d P_{d, t} \quad (6)$$

$$E^{\text{ESS}, \min} \leq E_t^{\text{ESS}} \leq E^{\text{ESS}, \max} \quad (7)$$

式中: $u_{d, t}$ 和 $u_{c, t}$ 分别表示储能系统(energy storage system, ESS)处于放电状态和充电状态, 在任一时刻 ESS 不能同时充放电; $P_{d, t}$ 和 $P_{c, t}$ 分别为储能系统放电功率和充电功率; $P_d^{\max}$ 、 $P_d^{\min}$ 分别为储能系统放电功率的上下限约束; $P_c^{\max}$ 、 $P_c^{\min}$ 分别为储能系统充电功率的上下限约束; E_{t+1}^{ESS} 、 E_t^{ESS} 分别为 $t+1$ 和 t 时段 ESS 的电量; η_d 和 η_c 分别为放电效率系数和充电效率系数; $E^{\text{ESS}, \max}$ 和 $E^{\text{ESS}, \min}$ 分别为电量的上下限。同时, 要考虑电量日均衡约束, 每天的初始电量等于终止电量。

3) 微型燃气轮机约束

$$0 \leq P_{\text{MT}, i, t} \leq P_{\text{MT}, i}^{\max} \quad (8)$$

$$C_{\text{MT}}(P_{\text{MT}, i, t}) = \alpha_{\text{MT}} (P_{\text{MT}, i, t})^2 + \beta_{\text{MT}} P_{\text{MT}, i, t} + \gamma_{\text{MT}} \quad (9)$$

式中: $P_{\text{MT}, i, t}$ 为 MG i 的微型燃气轮机 t 时段输出功率; $P_{\text{MT}, i}^{\max}$ 为其上限极值; α_{MT} 、 β_{MT} 和 γ_{MT} 为成本系数; $C_{\text{MT}}(P_{\text{MT}, i, t})$ 为发电成本。

2.1.2 多微电网电能交易约束

位于配电系统不同节点的 MG 各自承载着各自的内部属性, 通过相互间的议价并作出能源交易决策, NMGs 得以灵活调整自身的发电策略, 进而促

进彼此间的互利。为了实现 Pareto 最优状态,提出的模型融入了纳什谈判理论进行框架设计,旨在通过博弈机制引导 MGO 趋向于最优的能源配置与交易决策,确保整体系统的协同增益。

$$0 \leq P_{\text{pur},ij,t} \leq P_{\text{pur},ij}^{\max}, \forall t, \forall i, j \in G, i \neq j \quad (10)$$

$$0 \leq P_{\text{sel},ji,t} \leq P_{\text{sel},ji}^{\max}, \forall t, \forall i, j \in G, i \neq j \quad (11)$$

$$P_{\text{pur},ij,t} = P_{\text{sel},ji,t}, \forall t, \forall i, j \in G, i \neq j \quad (12)$$

$$\varphi_{ij} = -\varphi_{ji}, \forall i, j \in G, i \neq j \quad (13)$$

$$C_{\text{tr}}(\varphi_i) = \sum_{i \neq j} \varphi_{ij}, \forall i, j \quad (14)$$

$$C_{\text{del}}(P_{\text{pur},ij,t}) = \sum_{t=1}^T \beta \cdot R_{ij,t} \cdot P_{\text{pur},ij,t}^2 \quad (15)$$

$$\varphi_{ij} = P_{\text{pur},ij,t} \cdot \sigma_{\text{sel},ji,t}, \forall t, \forall i, j \in G, i \neq j \quad (16)$$

式中: $P_{\text{pur},ij,t}$ 为 t 时段 MG i 从 MG j 的购电量; $P_{\text{pur},ij}^{\max}$ 为 MG i 从 MG j 的最大购电量; φ_{ij} 为 MG i 从 MG j 购电的交易支付金额,且为非负值; $P_{\text{sel},ji,t}$ 为 t 时段 MG j 向 MG i 售电的电量; $P_{\text{sel},ji}^{\max}$ 为 MG j 向 MG i 售电的最大电量; $C_{\text{tr}}(\varphi_i)$ 为电能交易成本; $C_{\text{del}}(P_{\text{pur},ij,t})$ 为电能交易的传输损耗成本,此项考虑了 NMGs 位于配电系统不同节点时的传输损耗^[9]; $R_{ij,t}$ 为 t 时段 MG i 与 MG j 的最短电气距离,即途径线路的总电阻; β 为损耗成本系数; $\sigma_{\text{sel},ji,t}$ 为 MG j 售电的价格。

2.2 基于纳什谈判理论的电能交易模型

配电系统的购电成本、微型燃气轮机发电成本和电能传输损耗成本共同构成 MG i 的运行成本 $C_{0,i}$, 如式(17)所示。

$$C_{0,i} = C_e(P_{\text{pur},id,t}) + C_{\text{MT}}(P_{\text{MT},i,t}) + C_{\text{del}}(P_{\text{pur},ij,t}) \quad (17)$$

MG i 仅在确认通过电能交易能够实现总运行成本的削减时,才会主动寻求与其他 MG 进行能源交换。这意味着成本效益是驱动 MG i 参与交易的关键因素。故有:

$$C_{0,i} + C_{\text{tr}}(\varphi_i) \leq C_{\text{non},i} \quad (18)$$

式中: $C_{\text{non},i}$ 为纳什谈判中的分歧点,即非合作情况的边界。交易过程中必须确保公平,该问题涉及博弈,因此采用纳什均衡理论。假设 M 个微电网均参与配电市场,纳什谈判问题表示如式(19)所示。

$$\begin{cases} \max \prod_{i=1}^K [C_{\text{non},i} - (C_{0,i} + C_{\text{tr}}(\varphi_i))] \\ \text{s.t. 式(1)—(18)} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $\prod_{i=1}^M [\cdot]$ 为连乘符号,即把从 $i=1$ 到 K 的所有 $[\cdot]$ 项里的数值相乘; K 为微电网数量。

式(19)为非凸非线性优化问题,难以直接求解,故将其等效转化为两个易于求解的子问题。

子问题1: 多微电网运行成本最小化。

$$\begin{cases} \min C_{0,i}(P_{\text{pur},id,t}, P_{\text{MT},i,t}, P_{\text{pur},ij,t}) \\ \text{s.t. 式(1)—(9), (17)} \end{cases} \quad (20)$$

子问题2: 支付效益最大化。

$$\begin{cases} \max \prod_{i=1}^K (\xi^* - (C_{\text{tr}}(\varphi_i))) \\ \text{s.t. 式(10)—(16)} \end{cases} \quad (21)$$

式中: $\xi^* = C_{\text{non},i} - C_{0,i}(P_{\text{pur},id,t}^*, P_{\text{MT},i,t}^*, P_{\text{pur},ij,t}^*)$ 为式(20)的最优解; $P_{\text{pur},id,t}^*$ 、 $P_{\text{MT},i,t}^*$ 、 $P_{\text{pur},ij,t}^*$ 分别为 $P_{\text{pur},id,t}$ 、 $P_{\text{MT},i,t}$ 、 $P_{\text{pur},ij,t}$ 的最优值。通过求解式(21)的优化问题,收益会被每个参与交易的 MG 公平获取。

3 DSO 配电网重构

3.1 配电网重构模型

3.1.1 支路潮流约束

基于支路潮流模型和混合整数二阶锥规划 (mixed-integer second-order cone programming, MISOCP) 的方法,构建配电网重构潮流模型,该模型为凸优化模型。

$$U_{i,t}^{\text{sqr}} = U_{i,t}^2 \quad (22)$$

$$I_{ij,t}^{\text{sqr}} = I_{ij,t}^2 \quad (23)$$

式中 $U_{i,t}^{\text{sqr}}$ 、 $I_{ij,t}^{\text{sqr}}$ 分别为 t 时刻节点 i 电压幅值 ($U_{i,t}$) 的平方、 t 时刻流经支路 ij 电流 ($I_{ij,t}$) 的平方。

式(22)—(23)引入 $U_{i,t}^{\text{sqr}}$ 、 $I_{ij,t}^{\text{sqr}}$ 进行相角松弛,去除了电压和电流的相角。

$$-\alpha_{ij} M_1 \leq P_{ij,t} \leq \alpha_{ij} M_1, \forall ij \in E \quad (24)$$

$$-\alpha_{ij} M_2 \leq Q_{ij,t} \leq \alpha_{ij} M_2, \forall ij \in E \quad (25)$$

式中: α_{ij} 为 0-1 变量,当 α_{ij} 取值为 1 时,支路 ij 闭合;当 α_{ij} 取值为 0 时,支路 ij 断开。 E 为配电网支路的集合; M_1 和 M_2 为很大的正数。利用大 M 法实现凸松弛,若某条支路在某个时刻断开,则 $P_{ij,t}$ 和 $Q_{ij,t}$ 应为 0。

$$P_{j,t} = \sum_{k \in \delta(j)} P_{jk,t} - \sum_{i \in \pi(j)} (P_{ij,t} - r_{ij} I_{ij,t}^{\text{sqr}}), \forall j \in B \quad (26)$$

$$\begin{aligned} Q_{j,t} = & \sum_{k \in \delta(j)} Q_{jk,t} - \\ & \sum_{i \in \pi(j)} (Q_{ij,t} - x_{ij} I_{ij,t}^{\text{sqr}}), \forall j \in B \end{aligned} \quad (27)$$

$$P_{j,t} - P_{j,t}^{\text{load}} - \alpha_{\text{MGi}} P_{j,t}^{\text{MGi}} = 0, \forall j \in B \quad (28)$$

$$Q_{j,t} - Q_{j,t}^{\text{load}} - \alpha_{\text{MGi}} Q_{j,t}^{\text{MGi}} = 0, \forall j \in B \quad (29)$$

式中: $P_{j,t}$ 和 $Q_{j,t}$ 分别为在 t 时刻节点 j 注入的有功功率和无功功率; $P_{jk,t}$ 和 $Q_{jk,t}$ 分别为 t 时段支路 jk 流过的有功功率和无功功率; $\pi(j)$ 和 $\delta(j)$ 分别为父节点和子节点的集合; $P_{jk,t}$ 和 $Q_{jk,t}$ 分别为 t 时段支路 ij 流过的有功功率和无功功率; r_{ij} 为支路 ij 的阻抗, x_{ij} 为支路 ij 的电抗; B 为所有节点的集合; $P_{j,t}^{\text{load}}$ 和 $Q_{j,t}^{\text{load}}$ 分别为在 t 时刻节点 j 的有功和无功负荷; $P_{j,t}^{\text{MGi}}$ 和 $Q_{j,t}^{\text{MGi}}$ 分别为在 t 时刻节点 j 注入 MG i 的有功和无功功率; α_{MGi} 为 0-1 变量, 当其为 1 时表示节点 j 接入微电网 MG i 。式(26)~(29)考虑了微电网并网对配电网潮流的影响, 实现了功率平衡。

$$U_{j,t}^{\text{sqr}} \leq M_3(1 - \alpha_{ij}) + U_{i,t}^{\text{sqr}} - 2(r_{ij}P_{ij,t} + x_{ij}Q_{ij,t}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)I_{ij,t}^{\text{sqr}}, \forall ij \in E \quad (30)$$

$$U_{j,t}^{\text{sqr}} \geq -M_3(1 - \alpha_{ij}) + U_{i,t}^{\text{sqr}} - 2(r_{ij}P_{ij,t} + x_{ij}Q_{ij,t}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)I_{ij,t}^{\text{sqr}}, \forall ij \in E \quad (31)$$

式中 M_3 为很大的正数, 利用大 M 法松弛电压约束。

$$\left\| \begin{matrix} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ U_{i,t}^{\text{sqr}} - I_{i,t}^{\text{sqr}} \end{matrix} \right\|_2 \leq U_{i,t}^{\text{sqr}} + I_{i,t}^{\text{sqr}}, \forall ij \in E \quad (32)$$

式中 $\|\cdot\|_2$ 为二范数。

式(32)为进行二阶锥松弛的潮流约束。

综上, 式(22)~(32)为 MISOCp 的配电网重构潮流约束。

3.1.2 配电系统的运行约束

1) 节点电压约束

$$(U_{i,t}^{\min})^2 \leq U_{i,t}^{\text{sqr}} \leq (U_{i,t}^{\max})^2 \quad (33)$$

$$U_{i,t}^{\text{sqr}} = 1.00 \text{ p.u.}, i \in \Omega^{\text{sub}} \quad (34)$$

式中: Ω^{sub} 为变电站节点的集合; $U_{i,t}^{\max}$ 和 $U_{i,t}^{\min}$ 分别为节点 i 的电压上限和电压下限。

2) 支路电流约束

$$0 \leq I_{ij,t}^{\text{sqr}} \leq \alpha_{ij}(I_{ij,t}^{\max})^2 \quad (35)$$

式中 $I_{ij,t}^{\max}$ 为时段 t 线路 ij 能通过的电流上限。

3.1.3 拓扑约束

拓扑约束, 即配电网的辐射状约束, 要保证无孤岛和环路。利用图论中的有向图理论进行约束。

$$\sum_{ij \in E} \alpha_{ij} = n - 1 \quad (36)$$

$$\beta_{ij} + \beta_{ji} = \alpha_{ij} \quad (37)$$

$$\alpha_{ij} = \alpha_{ji} \quad (38)$$

$$\sum_{j \in B} \beta_{ij} = 1, i = 2, \dots, n \quad (39)$$

$$\beta_{ij} = 0, j \in B \quad (40)$$

$$\beta_{ij} \in \{0, 1\} \quad (41)$$

式中: n 为配电网节点数量; β_{ij} 为从节点 i 到节点 j 的支路状态; β_{ji} 为从节点 j 到节点 i 的支路状态; i 和 j 分别为父节点和子节点; B 为节点集合。

3.1.4 基于 MISOCp 的配电网重构模型

$$\begin{cases} \min C = \sum_{i=1}^T (\sigma_{\text{LMP},t} I_{ij,t}^{\text{sqr}} r_{ij}), \forall ij \in E \\ \text{s.t. 式(22)~(41)} \end{cases} \quad (42)$$

配电网重构以最小化 DSO 的成本为目标函数, 而通过网损乘以 LMP 考量 DSO 成本。

3.2 Dijkstra 算法

配电网重构计算完成后, 得到了一个新的网络拓扑, 改变了 NMGs 间的电气距 $C_{\text{del}}(P_{\text{pur},ij,t})$ 离。为了使上层模型中电能交易的损耗成本降低, 就要得到 $R_{ij,t}$ 的最小值。利用 Dijkstra 算法可以解决加权图中的单源最短路径问题^[26-29]。该算法可以找到从一个指定的起始节点到图中其他所有节点的最短路径。如果以 MG i 为起始点, 就能计算出到其他 MG 的电气距离, MG i 与 MG j 在时段 t 的最短电气距离为 $R_{ij,t}$ 。如图 2 所示为 Dijkstra 算法的流程图, 主要步骤如下。

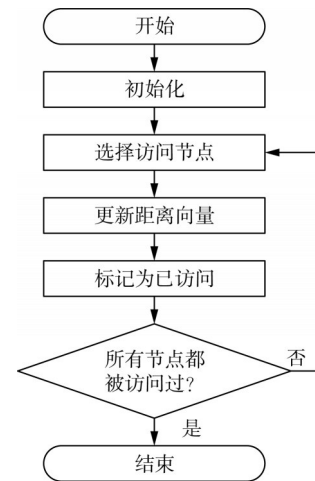


图 2 Dijkstra 算法流程图

Fig. 2 Dijkstra algorithm flow chart

1) 初始化: 创建一个未访问节点的集合, 将源节点定为 MG i 连接的节点, 其距离向量应该为 0, 因为源节点到自身的距离为 0。所有其他节点的距离向量设为无穷大, 表示初始状态下所有节点到源节点的距离未知。

2) 选择访问节点: 从未访问节点的集合中找到

当前距离源节点最近的未访问节点 u 。

3)更新距离向量:更新与节点 u 相邻的未访问节点 v 的距离,如果该距离比当前已知的距离短,则更新距离向量。

4)标记为已访问:将节点 u 标记为已访问,从未访问顶点的集合中移除。

5)重复步骤2至4,直到所有节点都被访问过。

4 考虑配电网重构的多微电网电能交易纳什谈判方法求解流程

如图3所示,提出的考虑配电网重构的多微电网电能交易纳什谈判方法包括两个问题:上层为多微电网电能交易纳什谈判问题,每个MG考虑自身的运行条件约束,同时NMGs彼此之间可以进行电能交易以降低运行成本,并将纳什谈判问题分解为两个子问题,即多微电网运行成本最小化和支付效益最大化;下层为DSO配电网重构问题,DSO利用上层传递来的各个MG的等效负荷对配电网进行潮流优化和网络重构,以确保配电网稳定和高效运行,并利用Dijkstra算法寻找该网络拓扑下微电网间最短的电气距离,更新电能传输路径。这一流程保护了MG的商业机密,同时确保了MG电能管理的有效性和配电网优化运行的顺利实施。

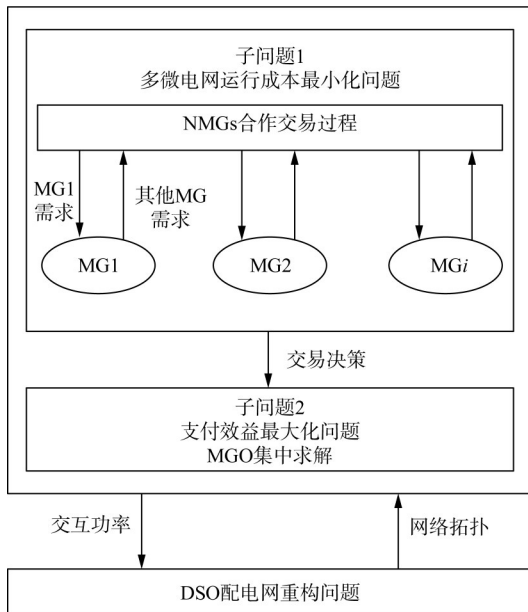


图3 考虑配电网重构的多微电网电能交易纳什谈判方法

Fig. 3 Nash bargaining method for multi-microgrid electric energy transaction considering distribution network reconfiguration

双层模型的求解迭代过程为:

1)模型上层:设定LMP和预测的微电网负荷,求解式(20)的优化问题,用得到的 $P_{pur, id, t}^*$, $P_{MT, i, t}^*$, $P_{pur, ij, t}^*$ 求解式(1)的优化问题,得到每个MG的电能交易成本 $C_{tr}(\varphi_i)$ 和售电价格 $\sigma_{sel, j, t}^*$ 。上层传递到下层的交互功率即为 $P_{pur, id, t}^*$ 。

2)模型下层:交互功率 $P_{pur, id, t}^*$ 与式(28)中的有功功率 $P_{j, t}^{MGi}$ 相等,表示配电网与MG传输的有功功率。设定初始网络拓扑和潮流,以网损最小为目标求解式(2)的优化问题,并利用Dijkstra算法求解MG间的最短电气距离。

3)当交互功率 $P_{pur, id, t}^*$ 改变时,配电网潮流发生变化,可以进行重构优化。配电网重构计算后,将改变的网络拓扑传递到上层,从而影响MGO交易行为,改变交互功率 $P_{pur, id, t}^*$,再将其传递到下层计算配电网重构问题。上下层模型进行迭代。

4)迭代收敛判据:上层的交互功率不再改变,下层的网络拓扑结构也不再变化,达到稳定状态。

5 算例分析

为了进行测试,本文使用MATLAB编写程序,采用IEEE 33节点配电系统,该系统拓扑结构如图4所示,包含33个节点,其中节点1为变电站节点,37条支路,5个联络开关和32个分段开关。配电网基准电压为12.66 kV,基准功率为10 MW。节点9、11和29被选定为MG1、MG2和MG3的接入点,每个微电网内部均配备一台微型燃气轮机作为其主要的发电装置,并配备了光伏发电系统。此外,MG3还配置了ESS,使得它能够有效管理其电力供需。以YALMIP为平台调用CPLEX求解器进行求解,验证所提方法的有效性。

5.1 不考虑配电网重构的多微电网电能交易

在此案例中,分析4种运行模式,探讨微电网

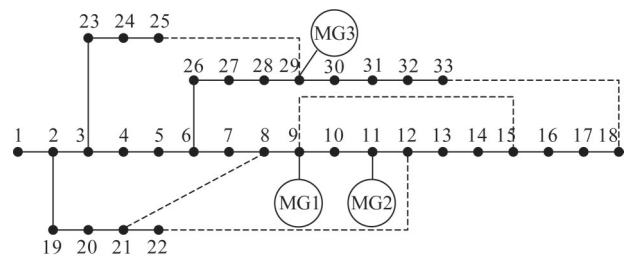


图4 IEEE 33节点图

Fig. 4 IEEE 33-bus diagram

在不同交易规则下的行为。

模式一：微电网选择独立运作，完全不依赖于 DSO 的电力供应。这意味着，微电网将仅依靠其内部的微型燃气轮机、光伏和 ESS 来满足自身的负荷需求，不与 DSO 进行购电交易。

模式二：NMGs 开启电能交易，允许相互交易电力，但与 DSO 的交易仍然被排除在外。这种模式促进了 NMGs 间的能源共享，通过配电市场机制优化电能分配。然而，不与 DSO 交易限制了微电网在极端情况下的电能获取途径。

模式三：微电网不仅可以在彼此之间进行电能交易，还开放了与 DSO 的双向电能交易通道。

对照模式：作为模式三的对照，微电网之间不进行交易，但可与 DSO 进行交易。

模式一导致 NMGs 的总运行成本最高，为 1 229.73 美元。这种模式强调了微电网的自给自足能力，但也限制了其在电力不足或过剩时的灵活性和经济性。

模式二由于引入了 NMGs 电能交易机制，总体上促进了能源的优化配置，导致 MGO 的总运行成本显著降低至 1 183.12 美元。表 1 为第 12 h 的交易情况，MG1 出现“转售”行为，一方面从 MG2 购电 8.43 kW，另一方面又将 26.72 kW 的电量出售给了 MG3，其中包含了从 MG2 间接获取的电量。模式二揭示了通过分配 MG3 的电力需求至 MG1 和 MG2，能够实现发电成本优化，达到最低成本。说明模式二能够协调 NMGs 的调度与交易活动，确保 MGO 获利。若考虑传输成本，NMGs 在做出交易决策时会综合考虑发电成本和电气距离，即纳入配电网结构对电力传输的影响，从而促使交易决策更加合理，成本控制更为精细。

表 1 多微电网购售电情况

Tab. 1 Purchases and sales of NMGs electricities kW

项目	MG1 售电量	MG2 售电量	MG3 售电量	购电总和
MG1 购电量		8.43		8.43
MG2 购电量				0
MG3 购电量	26.72	22.61		49.33
售电总和	26.72	31.05	0	

模式三的仿真结果如图 5 所示。模式三的特点在于 DSO 直接参与到配电市场中，为 NMGs 提供了更加多元化的购电选项。从图 5 中可以看出，

DSO 实际上成为了 NMGs 部分电力需求的供应者。在 14:00 至 19:00 之间，NMGs 开展了活跃的电能交易，以追求更高的经济效益。当 LMP 较低时，MG₃ 从 DSO 购买更多电能，并通过 ESS 储存，NMGs 也未相互进行交易。随着 LMP 升高，MG₃ 从 DSO 购电量趋于 0，而 ESS 放电以支撑本地部分负荷，NMGs 电能交易量达到最大。

由于 NMGs 进入配电市场参与电能交易，能源得到有效利用，NMGs 也可从电能交易中获利。模式三表明，所提出的配电市场机制适合 DSO 参与，且能有效促成最低运营成本 644.50 美元。

通过纳什谈判，MG1、MG2 和 MG3 分别获得 2.45 美元、2.45 美元和 2.44 美元的收益，收益分配较为公平。表 2 给出模式三和对照模式的对比。

5.2 考虑配电网重构的多微电网电能交易

DSO 不仅积极参与配电市场运作，还承担配电网重构与优化的任务。为此，设置 3 种场景以深入剖析这一双重角色带来的影响与效益。

场景 1：节点 9、11 和 29 被选定为 MG1、MG2 和 MG3 的接入点，同时考虑配电网重构。

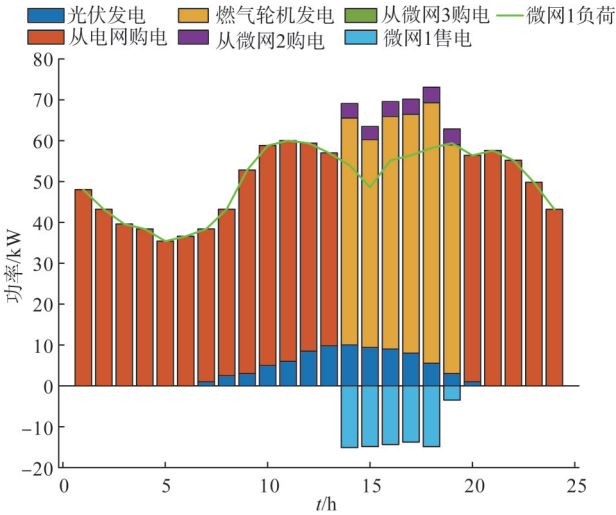
场景 2：仅将 MG3 接入点改为节点 33。

场景 3：作为场景 1 的对照，不考虑配电网重构。

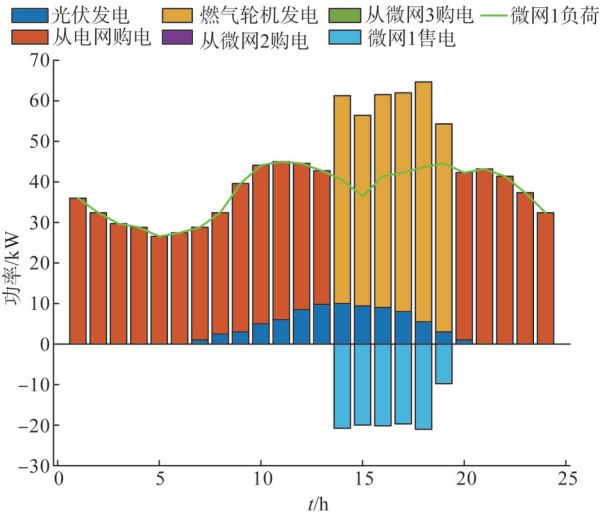
在场景 1 和场景 3 下的 NMGs 和 DSO 总成本如图 6 所示。NMGs 的成本由式 (6) 计算得出，DSO 的成本由式 (7) 计算得出。图 6 表明，所提出的考虑配电网重构的多微电网电能交易纳什谈判方法可以有效降低社会成本，即 NMGs 的成本与 DSO 的成本之和。考虑配电网重构下的社会总成本为 1 042.32 美元，不考虑配电网重构下的社会总成本为 1 207.30 美元，社会总成本降低了 13.67 %。DSO 的成本主要以网损衡量，该模型在实现多微电网运行成本最小的同时降低了配电网的网损。

从图 7 可以看出，当 MG3 更换节点后，在 14—19 时段内，即 NMGs 之间相互交易的时段，NMGs 总成本有所下降，这是因为改变微电网的位置改变了电能传输成本。同时，从图 8 可以看出，场景 2 的 DSO 成本，即配电网的网损，也有所下降。由此可见，为了使社会总成本进一步下降，可利用考虑配电网重构的多微电网电能交易纳什谈判方法对微电网的选址进行规划。

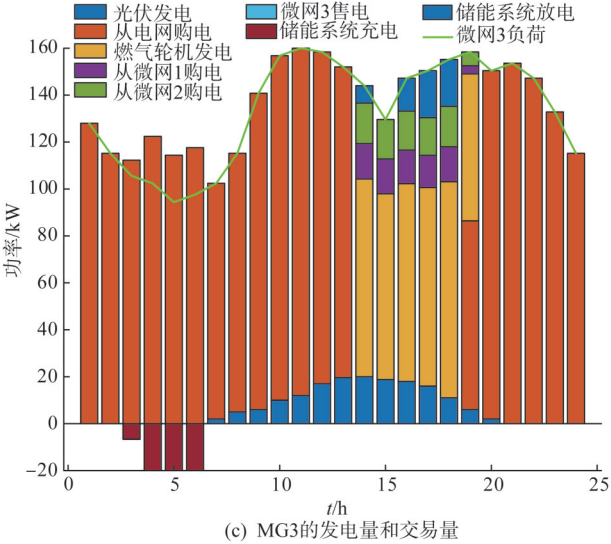
表 3 给出了场景 1 第 19 h DSO 和 NMGs 之间的



(a) MG1的发电量和交易量



(b) MG2的发电量和交易量



(c) MG3的发电量和交易量

图5 模式三的多微电网交易决策

Fig. 5 NMGs transaction decision in mode 3

表2 模式三和模式四的对比

Tab. 2 Comparison between mode 3 and mode 4 美元

成本与获利	MG1	MG2	MG3	总和
模式四成本	153.12	117.38	381.34	651.83
模式三成本	168.98	149.03	326.49	644.50
模式三支付金额	-18.31	-34.10	52.40	0
模式三成本+支付金额	150.67	114.93	378.90	644.50
获利	2.45	2.45	2.44	7.33

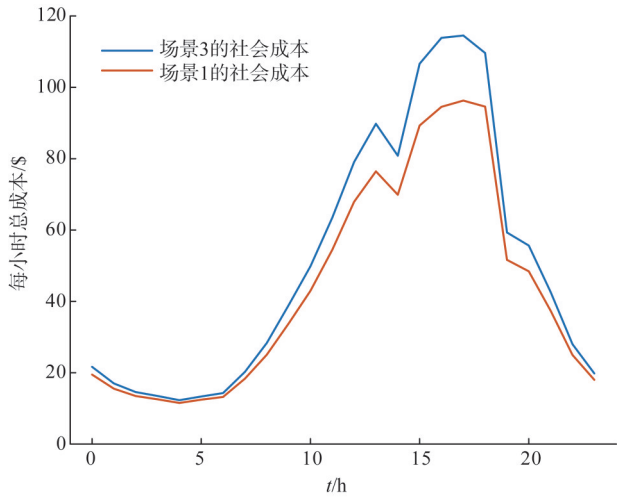


图6 社会成本对比

Fig. 6 Social costs comparison

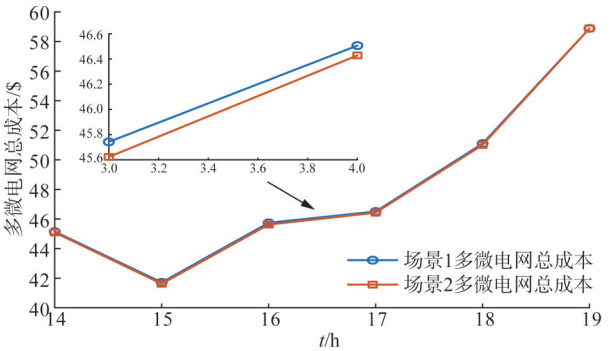


图7 多微电网总成本对比

Fig. 7 Comparison of total costs of NMGs

交互过程。在迭代次数 $k=0$ 时, 初始化网络拓扑、微电网运行特性、DSO 的 LMP 和系统负荷等。当 $k=3$ 时, 得到的网络拓扑与 $k=2$ 时相同, 说明已达到稳定, 结束迭代过程。表 4 给出场景 2 在第 19 时段的结果, NMGs 的交易决策与场景 1 不同, 且经过 1 次迭代网络拓扑即稳定。

以场景 1 为例, 配电网重构优化的参数变化如表 5 所示。每当配电网重构后的网络拓扑发生变化时, 微电网之间的电能传输路径随之改变, 模型上

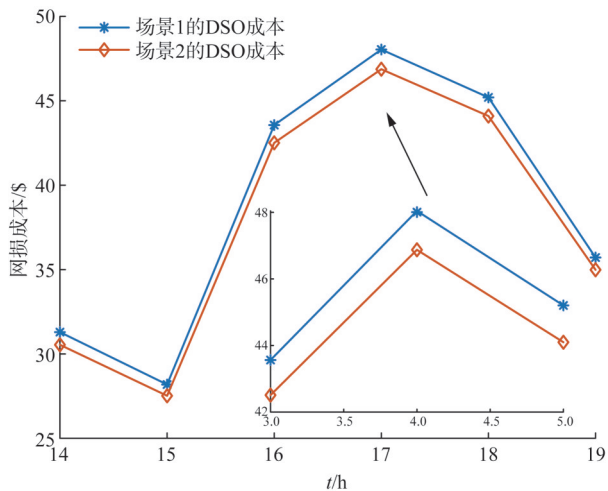


图8 DSO总成本对比

Fig. 8 Comparison of total costs of DSO

表3 场景1结果

Tab. 3 Results of scenario 1

k	交易决策		支付金额/ 美元	断开线路	DSO成本/ 美元
	购电量/kW	售电量/kW			
0	0	0	0	33, 34, 35, 36, 37	50.79
1	$P_{pur,12} = 6.63$ $P_{pur,31} = 6.92$ $P_{pur,32} = 6.85$	$P_{sel,1} = 6.92$ $P_{sel,2} = 13.48$	$\varphi_1 = -0.12$ $\varphi_2 = -3.14$ $\varphi_3 = 3.26$	7, 10, 13, 32, 37	35.89
2	$P_{pur,12} = 3.85$ $P_{pur,31} = 3.46$ $P_{pur,32} = 5.90$	$P_{sel,1} = 3.46$ $P_{sel,2} = 9.75$	$\varphi_1 = 0.05$ $\varphi_2 = -2.25$ $\varphi_3 = 2.20$	7, 10, 32, 34, 37	35.71
3	$P_{pur,12} = 3.85$ $P_{pur,31} = 3.46$ $P_{pur,32} = 5.90$	$P_{sel,1} = 3.46$ $P_{sel,2} = 9.75$	$\varphi_1 = 0.05$ $\varphi_2 = -2.25$ $\varphi_3 = 2.20$	7, 10, 32, 34, 37	35.71

表4 场景2结果

Tab. 4 Results of scenario 2

k	交易决策		支付金额/ 美元	断开线路	DSO成本/ 美元
	购电量/kW	售电量/kW			
1	$P_{pur,12} = 4.71$ $P_{pur,31} = 5.31$ $P_{pur,32} = 4.99$	$P_{sel,1} = 5.31$ $P_{sel,2} = 9.70$	$\varphi_1 = -0.19$ $\varphi_2 = -2.24$ $\varphi_3 = 2.43$	7, 9, 14, 28, 32	35.89

层将重新计算与新拓扑结构对应的微电网间电能传输损耗成本，即新拓扑结构也对应一个新的多微电网运行成本。通过上述计算与分析，该模型能识别出电网损耗最低的拓扑结构，并计算出该结构下的多微电网最小运行成本。这一过程体现了对系统经济性和效率的双重优化。

表5 场景1参数变化

Tab. 5 Parameter changes in scenario 1

k	微电网间等效电气距离/ Ω			传输损耗总成本/ 美元
	MG1-MG2	MG1-MG3	MG2-MG3	
1	1.24	4.28	5.52	1.90
2	6.11	9.52	9.57	2.45
3	6.11	9.52	9.57	2.45

6 结论

针对配电网潮流和网络重构影响多微电网交易行为的问题，本文提出一种考虑配电网重构的多微电网电能交易纳什谈判方法。首先，考虑多微电网的电能交易，建立多微电网的优化运行模型。其次，基于纳什谈判理论，建立多微电网电能交易模型，并将纳什谈判原问题等效转换成两个子问题，即多微电网运行成本最小化和支付效益最大化。然后，基于混合整数二阶锥规划方法建立配电网重构模型，对配电网进行潮流优化和网络重构，并利用Dijkstra算法寻找该网络拓扑下微电网间最短的电气距离，更新电能传输路径。通过算例分析，得出结论如下。

1)提出了一种考虑配电网重构的多微电网电能交易纳什谈判方法，与不参与交易相比，微电网通过纳什谈判，获得了更高收益，有效降低了运行成本。另外，纳什谈判理论可使各微电网公平获得收益。

2)该方法降低了配电网的网损，提高了多微电网的总体经济效益，社会总成本降低了13.67%。

本文构建的模型未考虑线路开关限制及配电网节点边际电价的影响，后续将开展相关研究。

参考文献

[1] 辛保安. 加快建设新型电力系统助力实现“双碳”目标[J]. 电力设备管理, 2021(11): 23–24.

[2] 向真, 谈赢杰, 舒放, 等. 弱联络海岛微电网群故障检测与定位方法[J]. 南方电网技术, 2026, 20(2): 126–136.

XIANG Zhen, TAN Yingjie, SHU Fang, et al. Fault detection and location methods for weakly connected island microgrids group[J]. Southern Power System Technology, 2026, 20(2): 126–136.

[3] 张磊, 陈轩妮, 叶婧, 等. 考虑动态频率响应的孤岛微电网日前一日内两阶段高分辨率优化调度[J]. 高压电器, 2025, 61(5): 72–79.

ZHANG Lei, CHEN Xuanni, YE Jing, et al. High resolution optimal dispatch of island microgrid considering dynamic

- frequency response and high resolution in the day-ahead and intra-day stages[J]. *High Voltage Apparatus*, 2025, 61(5): 72 – 79.
- [4] 张丽, 贾晨豪, 马泽原, 等. 一种新型的微电网三层优化调度模型研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(20): 46 – 57. ZHANG Li, JIA Chenhao, MA Zeyuan, et al. A novel three-layer optimal dispatch model for microgrids [J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(20): 46 – 57.
- [5] JIANG T, WU C, ZHANG R, et al. Flexibility clearing in joint energy and flexibility markets considering TSO-DSO coordination[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2023, 14(2): 1376 – 1387.
- [6] CHEN H, FU L, BAI L, et al. Distribution market-clearing and pricing considering coordination of DSOs and ISO: an EPEC approach[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(4): 3150 – 3162.
- [7] SAFDARIAN A, FOTUHI-FIRUZABAD M, LEHTONEN M. Integration of price-based demand response in discos' short-term decision model [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 5(5): 2235 – 2245.
- [8] BAHRAMARA S, MOGHADDAM M P, HAGHIFAM M R. A bi-level optimization model for operation of distribution networks with micro-grids[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016(82): 169 – 178.
- [9] 赵敏, 沈沉, 李顺昕, 等. 采用联盟型博弈考虑停电风险的多微电网合作条件研究[J]. *控制理论与应用*, 2018, 35(5): 688 – 698. ZHAO Min, SHEN Chen, LI Shunxin, et al. Coalitional game theoretic method to study multi-microgrids cooperation conditioning outage risk [J]. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(5): 688 – 698.
- [10] 程杉, 陈梓铭, 王瑞, 等. 基于混合博弈的多微电网双层协调优化调度[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(8): 41 – 46. CHENG Shan, CHEN Ziming, WANG Rui, et al. Double-layer coordinated optimal dispatching of multi-microgrid based on mixed game [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(8): 41 – 46.
- [11] AN LU, DUAN JIE, CHOW M Y, et al. A distributed and resilient bargaining game for weather-predictive microgrid energy cooperation [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(8): 4721 – 4730.
- [12] 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 – 2583. 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 – 2583.
- [13] 马腾飞, 裴玮, 肖浩, 等. 基于纳什谈判理论的风-光-氢多主体能源系统合作运行方法[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(1): 25 – 39, 395. MA Tengfei, PEI Wei, XIAO Hao, et al. Cooperative operation method for wind-solar-hydrogen multi-agent energy system based on Nash bargaining theory[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(1): 25 – 39, 395.
- [14] ANTONIADOU-PLYTARIA K, STEEN D, TUAN L A, et al. Energy scheduling strategies for grid-connected microgrids: a case study on chalmers campus[C]//2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), September 29-October 2, 2019, Bucharest, Romania. New York: IEEE, 2019.
- [15] 李咸善, 方子健, 李飞, 等. 含多微电网租赁共享储能能的配电网博弈优化调度[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(18): 6611 – 6625. LI Xianshan, FANG Zijian, LI Fei, et al. Game-based optimal dispatching strategy for distribution network with multiple microgrids leasing shared energy storage [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(18): 6611 – 6625.
- [16] 马燕峰, 谢家荣, 赵书强, 等. 考虑园区综合能源系统接入的主动配电网多目标优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(13): 53 – 61. MA Yanfeng, XIE Jiarong, ZHAO Shuqiang, et al. Multi-objective optimal dispatching for active distribution network considering park-level integrated energy system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(13): 53 – 61.
- [17] 范添圆, 王海云, 王维庆, 等. 计及主/被动需求响应下基于合作博弈的微电网-配电网协调优化调度[J]. *电网技术*, 2022, 46(2): 453 – 463. FAN Tianyuan, WANG Haiyun, WANG Weiqing, et al. Coordinated optimization scheduling of microgrid and distribution network based on cooperative game considering active/passive demand response[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(2): 453 – 463.
- [18] 智勇, 郭帅, 何欣, 等. 面向智慧工业园区的双层优化调度模型[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(1): 31 – 38, 101. ZHI Yong, GUO Shuai, HE Xin, et al. Bilevel optimal dispatch model for intelligent industrial park [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(1): 31 – 38, 101.
- [19] 黄张浩, 张亚超, 郑峰, 等. 基于不同利益主体协调优化的主动配电网日前-实时能量管理方法[J]. *电网技术*, 2021, 45(6): 2299 – 2308. HUANG Zhanghao, ZHANG Yachao, ZHENG Feng, et al. Day-ahead and real-time energy management for active distribution network based on coordinated optimization of different stakeholders [J]. *Power System Technology*, 2021, 45(6): 2299 – 2308.
- [20] 孔祥玉, 曾意, 陆宁, 等. 基于多智能体竞价均衡的微电网优化运行方法[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(6): 1626 – 1634. KONG Xiangyu, ZENG Yi, LU Ning, et al. Optimal bidding management for agent-based microgrid operation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(6): 1626 – 1634.
- [21] WANG Y, MAO S, NELMS R M. On hierarchical power scheduling for the macrogrid and cooperative microgrids [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2015, 11(6): 1574 – 1584.
- [22] 颜宁. 基于环网架构的多互联微电网能量管理及协调控制策略研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
- [23] 李云龙, 田书, 马亚光. 含多微网的主动配电网分层优化调度[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2020, 32(6): 88 – 93. LI Yunlong, TIAN Shu, MA Yaguang. Hierarchical optimal dispatching of active distribution network with multi-microgrid [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2020, 32(6): 88 – 93.
- [24] 陈耀圣, 杨苹, 曾智基, 等. 考虑微电网运行域的配电网分布式能源规划[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(3): 83 – 91. CHEN Yaosheng, YANG Ping, ZENG Zhiji, et al. Planning of distributed energy resources for distribution network considering dispatchable region of microgrid [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(3): 83 – 91.

- [25] 格日勒图, 张立辉, 柴剑雪. 计及微电网群合作博弈的主动配电网能量优化调度二层规划模型[J]. 可再生能源, 2020, 38(2): 205 – 211.
GE Riletu, ZHANG Lihui, CHAI Jianxue. A bilevel programming model for energy dispatching optimization of active distribution networks considering microgrid group cooperation game [J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38 (2): 205 – 211.
- [26] 周丹, 孙可, 张全明, 等. 含多个综合能源联供型微电网的配电网日前鲁棒优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40 (14): 4473 – 4485, 4727.
ZHOU Dan, SUN Ke, ZHANG Quanming, et al. Day-ahead robust dispatch of distribution network with multiple integrated energy system-based micro-grids [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4473 – 4485, 4727.
- [27] 佟新. 配电侧多微电网能量调度的主从博弈方法研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2020.
- [28] 刘磊, 郝思鹏. 含微电网的主动配电网分级优化运行策略[J]. 电测与仪表, 2019, 56(20): 76 – 81.

- LIU Lei, HAO Sipeng. Hierarchical optimal operation strategy of active distribution network with micro-grid [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(20): 76 – 81.
- [29] 张信哲, 秦文萍, 朱志龙, 等. 台风扰动下计及线路老化与连锁故障的输电网韧性评估[J]. 电网技术, 2024, 48(10): 4094 – 4108.
ZHANG Xinzhe, QIN Wenping, ZHU Zhilong, et al. Transmission system resilience assessment considering line aging and cascading failures under typhoon disturbances [J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 4094 – 4108.

收稿日期: 2024-09-10; 网络首发日期: 2025-02-06

作者简介:

常堃(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为多微电网、博弈论, changkun0355@link.tyut.edu.cn;

杜欣慧(1965), 女, 通信作者, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统运行与控制, 电力市场;

张日新(1998), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制, zrx12345ar@163.com.

(上接第 80 页 Continued from Page 80)

- [26] 彭依明, 王佳, 周长城, 等. 基于 BiLSTM-SA 的分布式光伏功率超短期概率预测[J]. 南方电网技术, 2025, 19(11): 172 – 182.
PENG Yiming, WANG Jia, ZHOU Changcheng, et al. Ultra-short-term probability prediction of distributed photovoltaic power based on BiLSTM-SA [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(11): 172 – 182.
- [27] 邵宜祥, 刘剑, 胡丽萍, 等. 一种改进组合神经网络的超短期风速预测方法研究[J]. 发电技术, 2024, 45(2): 323 – 330.
SHAO Yixiang, LIU Jian, HU Liping, et al. Research on an ultra-short-term wind speed prediction method based on

improved combined neural networks [J]. Power Generation Technology, 2024, 45(2): 323 – 330.

收稿日期: 2024-05-22; 网络首发日期: 2024-12-05

作者简介:

虞伟(1976), 男, 通信作者, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护, yuwei197612@163.com;

黄浩(1983), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向电气工程及其自动化;

金晨星(1985), 男, 工程师, 硕士, 研究方向电气工程及其自动化。