

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240777

# 基于动态运行包络的多微网合作运行方法

张栋梁<sup>1</sup>, 魏奇<sup>1</sup>, 赵阳<sup>1</sup>, 王强<sup>2</sup>, 薛雪<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学电气工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 国网江苏省电力有限公司  
连云港供电分公司, 江苏 连云港 222000)

**摘要:** 多能微网间的联网协作可以缓解分布式发电与需求不匹配的问题, 降低电力系统的运行成本。现有的微网合作方法往往忽略了底层配电网运行的网络约束, 难以适用于实际系统。为此, 提出一种基于动态运行包络(dynamic operating envelopes, DOEs)的多微网纳什议价模型。首先, 建立配电网及具有多种能量形式的微网模型。其次, 根据配电网最优潮流在不同时间动态设置微网进出口限制, 计算 DOEs 并将其分配给不同微网。最后, 微网内部的异质能在原微网调度策略的目标函数和约束条件下加入 DOEs 约束进行优化, 按照纳什议价策略使所有参与的微网进行交易。算例结果表明所提模型能够将配电网与微网所做的决策解耦, 配电网通过 DOEs 保证网络完整性, 而不直接控制微网间的交易。并且通过优化电量交易, 促进了微网内部异质能之间的互补, 提高了能源利用率。

**关键词:** 多能微网; 网络约束; 动态运行包络; 最优潮流; 纳什议价

## Multi-microgrids cooperative operation method based on dynamic operating envelopes

ZHANG Dongliang<sup>1</sup>, WEI Qi<sup>1</sup>, ZHAO Yang<sup>1</sup>, WANG Qiang<sup>2</sup>, XUE Xue<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Lianyungang Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Company Limited, Lianyungang 222000, China)

**Abstract:** Interconnection and cooperation between multi-energy microgrids can alleviate the mismatch between distributed generation and demand, and reduce the operating costs of the power system. Existing microgrid cooperation methods often overlook the network constraints of the underlying distribution network operation, making them difficult to apply to real systems. Therefore, a multi-microgrid Nash bargaining model based on dynamic operating envelopes (DOEs) is proposed. First, a distribution network and a microgrids model incorporating multiple energy forms are established. Second, based on the optimal power flow of the distribution network, the import and export limits of microgrids are dynamically set at different times, while DOEs are calculated and assigned to different microgrids. Finally, the heterogeneous energy within each microgrid is optimized by incorporating DOEs constraints into the original microgrid scheduling objective function and constraints, and transactions between participating microgrids are carried out using the Nash bargaining strategy. Case study results show that the proposed model is able to decouple the decisions made by the distribution grid and microgrids, and the distribution grid ensures its integrity through DOEs without directly controlling the transactions among the microgrids. In addition, by optimizing the electricity transactions, the model promotes the complementarity among heterogeneous energies within the microgrids and improves the energy utilization rate.

This work is supported by the Carbon Summit Carbon Neutral Technology and Innovation Special Funds in Jiangsu Province (No. BE2022609).

**Key words:** multi-energy microgrids; network constraints; dynamic operating envelopes; optimal power flow; Nash bargaining

## 0 引言

在能源短缺和气候变化的大背景下, 发展清洁

能源和建设智能电网已成为各国的共同选择<sup>[1-3]</sup>。构建风电、光伏、储能、氢燃料等设备协同高效利用的多能微网, 能够更好地适应当地的能源需求, 对于缓解气候变化具有重要的意义<sup>[4]</sup>。然而每个多能微网的能源生产和消费模式各不相同, 导致大量的能源生产没有在微网内迅速消耗<sup>[5]</sup>。为了进一步提

**基金项目:** 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金资助 (BE2022609); 徐州市“双碳”专项基础研究 (KC23076)

高微网的能源利用效率,同一地区地理位置相近的多个微网可以形成微网集群<sup>[6]</sup>。端到端(peer-to-peer, P2P)能源交易可以优化区域内多主体、多类别能源资源的配置,有利于解决能源生产过剩的问题,并克服了不同微网的需求短缺<sup>[7]</sup>。此外,电力市场中的其他参与者也可以通过此运行模式获得利益<sup>[8]</sup>。

作为合作博弈的一个分支,纳什议价理论广泛应用于解决电气工程领域的合作交互问题。文献[9]运用纳什议价理论来协调配电网公司和柔性需求响应聚合商在分配层面的经济互动。文献[10]提出一种基于交互价值贡献度的纳什议价方法,对微网联盟合作收益及混合能源共享站成本进行合理分配。文献[11]提出了基于纳什谈判理论的多综合能源系统联合规划方法以解决不同投资主体的利益竞争问题。

然而,以上研究主要针对网络的虚拟层,而关于网络的物理层建模关注太少<sup>[12]</sup>。这些技术限制确保了产消者在不超过电力系统节点电压限制的情况下可靠运行,同时将整体网络损耗控制在合理范围内。为了应对这些挑战,配电系统运营商(distribution system operator, DSO)可以通过调节产消者的输出来应对网络运行问题,解决方案可以进一步分为两类。第一类方法将网络约束纳入到产消者的控制决策中,DSO或第三方(例如聚合器)通过调整产消者输出的有功和无功来应对网络运行问题。文献[13]提出了一种基于纳什议价的主动配电网合作能源市场模型,在交流潮流约束下求解社会福利最大化问题。文献[14]提出了一种基于网络约束的电动汽车充电站交易控制方法。文献[15]考虑配电网潮流提出配电网多阶段分层管理策略,其保证了配电网的稳定运行。然而直接控制产消者的方法允许DSO直接参与管理本地电力市场的市场价格和产消者资产,增加了产消者隐私泄露的风险。第二类间接控制的方法假设产消者使用自己的能源管理系统对其资产进行管理决策,而DSO只能决定其进出口限制<sup>[16]</sup>。其中一种方案正在由澳大利亚的电网运营商进行试验,即动态运行包络(dynamic operating envelopes, DOEs)的概念<sup>[17-18]</sup>。

在文献[19]中,DOEs被定义为“根据本地网络或整个电力系统的可用容量,随着时间和地点的变化而改变出口限制的运行包络”。DOEs作为一种保证网络完整性的方法,在最近的一些研究中得到了应用。文献[20]设计了一种DOEs计算机制来估计产消者在不同时间段的电力输出和进口限制,利用合作博弈论开发了一个网络感知的P2P交易框架。文献[21]提出了一种两阶段自上向下的中低压综合配电网DOEs分配方法,保证了能源分配的合理公平性。

本文提出了一种基于动态运行包络的多能微网纳什议价模型。为了保证微网的点对点电网(peer-to-peer-to-grid, P2P2G)行为满足网络约束,将DOEs引入到现有的P2P2G交易中,以限制微网与配电网的电力交换。将纳什议价问题转化为联盟成本最小化和支付效益最大化两个子问题,运用交替方向乘子算法(alternating direction method of multipliers, ADMM)进行分布式求解。所提方法可以在保证电网物理约束的前提下,使微网以分布式的方式优化运行,保证了配电系统运行的安全性和各微网主体隐私。最后通过算例仿真证明所提方法的有效性。

## 1 多微网系统模型配置

### 1.1 配电网模型

假设一个低压辐射型配电网模型,其中微网连接到不同的母线。本文采用Distflow二阶锥模型进行建模,假设所有微网接入点均为PQ节点,即已知微网注入的有功功率和无功功率。系统的平衡节点为配电网与上级电网的连接点,其电压相角设定为 $0^\circ$ ,用于平衡整个系统的有功功率和无功功率,所考虑的低压配电网支路潮流模型可以用数学形式描述<sup>[22]</sup>为

$$P_{ij,t} - r_{ij} I_{ij,t} + P_{j,n,t}^{\text{inj}} = \sum_{r \in \pi(j)} P_{jr,t} + P_{j,t}^{\text{LD}} \quad (1)$$

$$Q_{ij,t} - x_{ij} I_{ij,t} + Q_{j,n,t}^{\text{inj}} = \sum_{r \in \pi(j)} Q_{jr,t} + Q_{j,t}^{\text{LD}} \quad (2)$$

$$U_{j,t} = U_{i,t} - 2(r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij,t} \quad (3)$$

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ I_{ij,t} - U_{i,t} \end{array} \right\|_2 \leq I_{ij,t} + U_{i,t} \quad (4)$$

$$U_i^{\text{min}} \leq U_{i,t} \leq U_i^{\text{max}} \quad (5)$$

$$P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2 \leq S_{ij,t}^2 \quad (6)$$

$$(P_{ij,t} - r_{ij} I_{ij,t})^2 + (Q_{ij,t} - x_{ij} I_{ij,t})^2 \leq S_{ij,t}^2 \quad (7)$$

式中: $i, j$ 为节点编号; $ij$ 为连接节点 $i$ 和 $j$ 的支路编号; $t$ 为时段编号; $P_{ij,t}$ 和 $Q_{ij,t}$ 分别为支路 $ij$ 在 $t$ 时段的有功功率和无功功率; $P_{j,n,t}^{\text{inj}}$ 和 $Q_{j,n,t}^{\text{inj}}$ 分别为节点 $j$ 处接入的微网 $n$ 净注入的有功和无功功率; $P_{j,t}^{\text{LD}}$ 和 $Q_{j,t}^{\text{LD}}$ 分别为节点 $j$ 在 $t$ 时段的有功负荷和无功负荷; $r_{ij}$ 和 $x_{ij}$ 分别为支路 $ij$ 的电阻和电抗; $I_{ij,t}$ 为支路 $ij$ 在 $t$ 时段的电流幅值的平方; $U_{i,t}$ 和 $U_{j,t}$ 分别为节点 $i$ 和 $j$ 在 $t$ 时段的电压幅值的平方; $\pi(j)$ 为节点 $j$ 所在母线的子节点集; $P_{jr,t}$ 和 $Q_{jr,t}$ 分别为支路

$j_r$  在  $t$  时段的有功负荷和无功负荷,  $r$  为子节点;  $U_i^{\min}$  和  $U_i^{\max}$  分别为节点  $i$  处电压幅值平方的最小值和最大值;  $S_{ij,t}$  为支路  $ij$  在  $t$  时段视在功率的最大值。

## 1.2 多能微网模型

本文研究的多能微网系统模型如图 1 所示, 包括分布式可再生能源、热电联产装置(combined heat and power, CHP)、燃气锅炉(gas boiler, GB)、电制冷机(electric chillers, EC)、吸收式制冷机(absorption chillers, AC)等。

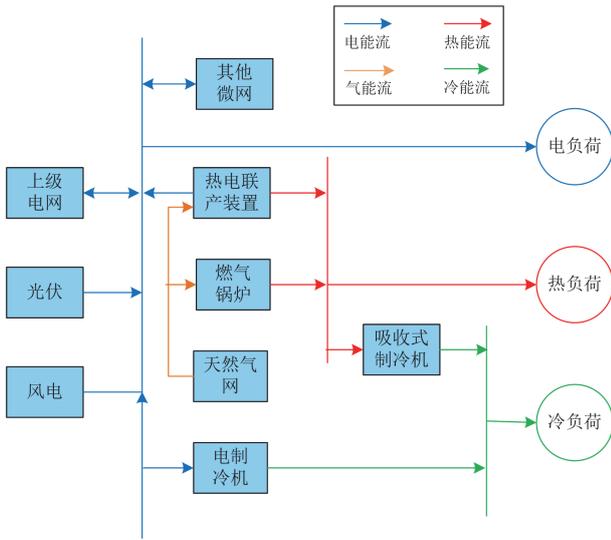


图 1 多能微网系统模型

Fig. 1 Model of multi-energy microgrid system

### 1.2.1 目标函数

本文中每个微网隶属于不同的利益主体, 即均为理性的独立个体。它们根据自身的供需制定运行计划, 并且微网间通过配电网进行电能交易, 提升各主体收益。构建系统内多能微网优化运行的模型, 每个微网的目标是使其总运行成本最小化, 包括能源成本、需求响应成本和 P2P 交易成本。目标函数为

$$\min C_n = \sum_{t=1}^{24} (C_{n,t}^{\text{buy}} + C_{n,t}^{\text{dr}} + C_{n,t}^{\text{P2P}}) \quad (8)$$

$$C_{n,t}^{\text{buy}} = u_{n,t}^{\text{e,buy}} P_{n,t}^{\text{e,buy}} - u_{n,t}^{\text{e,sell}} P_{n,t}^{\text{e,sell}} + u_{n,t}^{\text{gas}} G_{n,t}^{\text{gas}} \quad (9)$$

$$C_{n,t}^{\text{dr}} = u_{n,t}^{\text{e,tr}} |P_{n,t}^{\text{e,tr}}| - u_{n,t}^{\text{e,cut}} P_{n,t}^{\text{e,cut}} + u_{n,t}^{\text{h,cut}} P_{n,t}^{\text{h,cut}} \quad (10)$$

$$C_{n,t}^{\text{P2P}} = - \sum_{n'=1, n' \neq n}^N u_{nn',t} P_{nn',t}^{\text{P2P}} \quad (11)$$

式中:  $C_n$  为联盟中微网  $n$  的总日运行成本;  $C_{n,t}^{\text{buy}}$ 、 $C_{n,t}^{\text{dr}}$ 、 $C_{n,t}^{\text{P2P}}$  分别为微网  $n$  在  $t$  时段的能源成本、需求响应成本和 P2P 交易成本;  $u_{n,t}^{\text{e,buy}}$ 、 $u_{n,t}^{\text{e,sell}}$  分别为微网  $n$  在  $t$  时段向电网购、售电的电价;  $P_{n,t}^{\text{e,buy}}$ 、 $P_{n,t}^{\text{e,sell}}$

分别为微网  $n$  在  $t$  时段向电网购、售电的电量;  $u_{n,t}^{\text{gas}}$  为天然气价格;  $G_{n,t}^{\text{gas}}$  为微网  $n$  在  $t$  时段的购气量;  $u_{n,t}^{\text{e,tr}}$ 、 $u_{n,t}^{\text{e,cut}}$ 、 $u_{n,t}^{\text{h,cut}}$  分别为单位可转移电负荷、可削减电负荷和可削减热负荷的补偿成本;  $P_{n,t}^{\text{e,tr}}$ 、 $P_{n,t}^{\text{e,cut}}$ 、 $P_{n,t}^{\text{h,cut}}$  分别为微网  $n$  在  $t$  时段可转移电负荷量、可削减电负荷量和可削减热负荷量;  $N$  为联盟中微网的总数;  $u_{nn',t}$ 、 $P_{nn',t}^{\text{P2P}}$  分别为微网  $n$  在  $t$  时段与微网  $n'$  交互的电价和电量,  $P_{nn',t}^{\text{P2P}}$  为正, 表明微网  $n$  向微网  $n'$  售电,  $P_{nn',t}^{\text{P2P}}$  为负, 表明微网  $n$  向微网  $n'$  购电。

### 1.2.2 约束条件

各能源转换设备采用常规模型, 具体的表达式为

$$P_{n,t}^{\text{e,CHP}} = \eta^{\text{CHP}} Q^{\text{gas}} G_{n,t}^{\text{CHP}} \quad (12)$$

$$P_{n,t}^{\text{h,CHP}} = \frac{1 - \alpha^{\text{CHP}}}{\alpha^{\text{CHP}} \beta^{\text{CHP}}} P_{n,t}^{\text{e,CHP}} \quad (13)$$

$$P_{n,t}^{\text{h,GB}} = \eta^{\text{GB}} Q^{\text{gas}} G_{n,t}^{\text{GB}} \quad (14)$$

$$P_{n,t}^{\text{c,EC}} = \eta^{\text{EC}} P_{n,t}^{\text{e,EC}} \quad (15)$$

$$P_{n,t}^{\text{c,AC}} = \eta^{\text{AC}} P_{n,t}^{\text{h,AC}} \quad (16)$$

式中:  $P_{n,t}^{\text{e,CHP}}$ 、 $P_{n,t}^{\text{h,CHP}}$  分别为微网  $n$  在  $t$  时段 CHP 的发电功率和产热功率;  $P_{n,t}^{\text{h,GB}}$  为微网  $n$  在  $t$  时段 GB 的产热功率;  $\eta^{\text{CHP}}$ 、 $\eta^{\text{GB}}$  分别为 CHP 的发电效率和 GB 的产热效率;  $G_{n,t}^{\text{CHP}}$ 、 $G_{n,t}^{\text{GB}}$  分别为微网  $n$  在  $t$  时段 CHP 和 GB 的耗气量;  $Q^{\text{gas}}$  为天然气燃烧热值;  $\alpha^{\text{CHP}}$ 、 $\beta^{\text{CHP}}$  为 CHP 电热转换系数;  $P_{n,t}^{\text{c,EC}}$ 、 $P_{n,t}^{\text{c,AC}}$  分别为微网  $n$  在  $t$  时段 EC 和 AC 的制冷功率;  $\eta^{\text{EC}}$ 、 $\eta^{\text{AC}}$  分别为 EC 的电制冷效率和 AC 的热制冷效率;  $P_{n,t}^{\text{e,EC}}$  为微网  $n$  在  $t$  时段 EC 消耗的电功率;  $P_{n,t}^{\text{h,AC}}$  为微网  $n$  在  $t$  时段 AC 吸收的热功率。

本文考虑微网内电需求响应的可削减负荷和可转移负荷, 热需求响应的可削减负荷, 通过电、热需求响应引导需求侧用户根据实时电价和经济激励主动优化用电、用热。

可转移电负荷上下限约束为

$$-a_1 P_{n,t}^{\text{e,load}^0} \leq P_{n,t}^{\text{e,tr}} \leq a_1 P_{n,t}^{\text{e,load}^0} \quad (17)$$

式中:  $P_{n,t}^{\text{e,load}^0}$  为微网  $n$  在  $t$  时段的实际电负荷;  $a_1$  为可转移电负荷系数。

可转移电负荷在周期内总量为零, 表达式为

$$\sum_{t=1}^{24} P_{n,t}^{\text{e,tr}} = 0 \quad (18)$$

可削减电、热负荷的约束为

$$-a_2 P_{n,t}^{\text{e,load}^0} \leq P_{n,t}^{\text{e,cut}} \leq 0 \quad (19)$$

$$0 \leq P_{n,t}^{\text{h,cut}} \leq a_3 P_{n,t}^{\text{h,load0}} \quad (20)$$

式中:  $P_{n,t}^{\text{h,load0}}$  为微网  $n$  在  $t$  时段的实际热负荷;  $a_2$ 、 $a_3$  分别为可削减电、热负荷系数。

需求响应的电、热负荷功率平衡约束为

$$P_{n,t}^{\text{e,load}} = P_{n,t}^{\text{e,load0}} + P_{n,t}^{\text{e,cut}} + P_{n,t}^{\text{e,tr}} \quad (21)$$

$$P_{n,t}^{\text{h,load}} = P_{n,t}^{\text{h,load0}} - P_{n,t}^{\text{h,cut}} \quad (22)$$

式中,  $P_{n,t}^{\text{e,load}}$ 、 $P_{n,t}^{\text{h,load}}$  分别为微网  $n$  在  $t$  时段需求响应后的电负荷和热负荷。

风光出力约束为

$$0 \leq P_{n,t}^{\text{new}} \leq P_{n,t}^{\text{predict}} \quad (23)$$

式中,  $P_{n,t}^{\text{new}}$ 、 $P_{n,t}^{\text{predict}}$  分别为微网  $n$  在  $t$  时段风光发电的实际功率和预测值。

微网内各能源转换设备的输出功率与设备容量的约束为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{n,t}^{\text{e,CHP}} \leq M_n^{\text{CHP}} \\ 0 \leq P_{n,t}^{\text{h,GB}} \leq M_n^{\text{GB}} \\ 0 \leq P_{n,t}^{\text{e,EC}} \leq M_n^{\text{EC}} \\ 0 \leq P_{n,t}^{\text{e,AC}} \leq M_n^{\text{AC}} \end{cases} \quad (24)$$

式中,  $M_n^{\text{CHP}}$ 、 $M_n^{\text{GB}}$ 、 $M_n^{\text{EC}}$ 、 $M_n^{\text{AC}}$  分别为微网  $n$  中 CHP、GB、EC 和 AC 的配置容量。

考虑多微网 P2P 交易的电、热、冷功率平衡约束为

$$P_{n,t}^{\text{e,CHP}} + P_{n,t}^{\text{new}} + P_{n,t}^{\text{e,buy}} = P_{n,t}^{\text{e,sell}} + P_{n,t}^{\text{e,EC}} + P_{n,t}^{\text{e,load}} + \sum_{n'=1, n' \neq n}^N P_{nn',t}^{\text{P2P}} \quad (25)$$

$$P_{n,t}^{\text{h,CHP}} + P_{n,t}^{\text{h,GB}} = P_{n,t}^{\text{h,load}} + P_{n,t}^{\text{h,AC}} \quad (26)$$

$$P_{n,t}^{\text{e,EC}} + P_{n,t}^{\text{e,AC}} = P_{n,t}^{\text{e,load}} \quad (27)$$

式中,  $P_{n,t}^{\text{e,load}}$  为微网  $n$  在  $t$  时段实际的冷负荷。

微网  $n$  在  $t$  时段与微网  $n'$  交互的电价约束为

$$u_{n,t}^{\text{e,sell}} \leq u_{nn',t} \leq u_{n,t}^{\text{e,buy}} \quad (28)$$

## 2 基于 DOEs 的多微网合作模型

本节对 DOEs 的计算流程和网络感知的 P2P2G 交易框架进行介绍。DOEs 保证微网在网络约束内进行交易, P2P2G 交易框架基于纳什议价博弈, 使得微网在不违反指定的进出口限制的情况下进行能源交易, 并将 DSO(管理网络并确保其完整性)与微网所做的决策解耦<sup>[23]</sup>。

### 2.1 基于 DOEs 的多微网合作模型描述

P2P2G 交易过程中由 DSO 负责维护配电网的

安全, DSO 仅提供由 DOEs 计算得到的网络进出口电量限制, 并不影响 P2P2G 交易量的实际结算, 这些交易参数完全由参与的微网决定。基于 DOEs 的多微网合作运行的模型如图 2 所示。

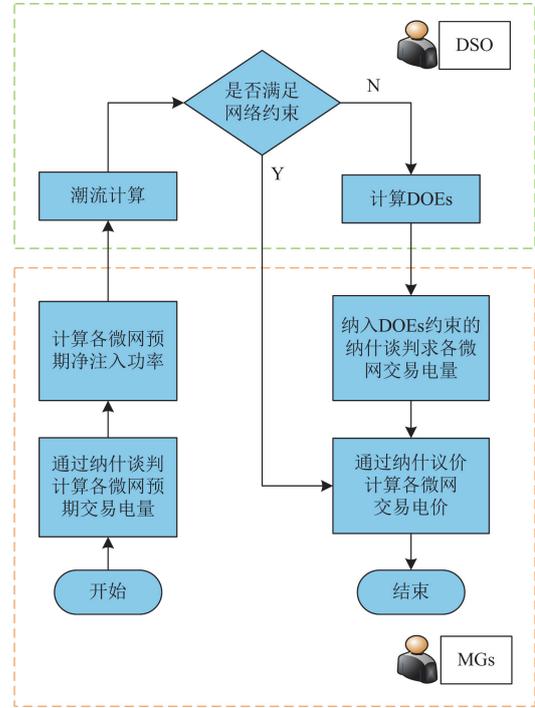


图 2 多微网合作运行的模型

Fig. 2 Model of cooperative operation of multiple microgrids

该问题是一个双层优化问题, 包括解决最优潮流(optimal power flow, OPF)问题的网络层和协调多微网间电能交易的市场层。首先, 下层用纳什谈判来解决多微网 P2P2G 交易量的问题, 将模型转化为多微网联盟成本最小化问题, 并基于 ADMM 的分布式算法进行求解。在所提的方法中, 每个微网只需要与其他微网通信, 没有中心节点。其中各微网通过纳什谈判计算各微网预期的进出口量, 预期的进出口量不受静态限制, 并将其发送给 DSO 以获得 DOEs。然后, 在上层, DSO 求解一个交流潮流来验证网络的完整性, 以便在给定参数下安全执行微网间的预期交易。如果没有发生电压越限, 微网按照预期的进出口量进行交易。否则, DSO 激活交流 OPF 求解器, 以确定 DOEs, 即在不损害网络完整性的情况下, 计算 P2P2G 交易的微网的最大进出口限制。OPF 公式考虑了微网净注入功率限制、有功和无功功率平衡以及其他潮流约束, 以分配尽可能接近预期的 DOEs, 并将批准的 DOEs 发送给下层。最后, 在下层, 微网根据 DSO 分配的 DOEs 再进行纳入 DOEs 约束的纳什议价, 以确定最终的交易电

量和交易电价。

通过管理微网到配电系统的能源进出口, 并通过更大的互操作性提高网络效率, DOEs 可以为微网和配电系统带来许多好处。首先, 一旦计算并将 DOEs 分配给不同的微网, 当所有微网的净注入功率在 DOEs 内时, 电压将不会超过允许的界限。其次, DOEs 不要求 DSO 管理市场价格和微网资产, 微网在它们指定的 DOEs 内单独管理资产, 使用自己的管理系统在本地电力市场中进行交易, 这有助于保护各主体的隐私<sup>[24]</sup>。

## 2.2 DOEs 计算算法

微网与其他对等体交易的连接点, 净注入功率可分为与配电网交互(P2G 行为)和与对等体交易(P2P 行为)的功率两部分<sup>[25]</sup>。

$$P_{j,n,t}^{\text{inj}} = P_{n,t}^{\text{e,sell}} - P_{n,t}^{\text{e,buy}} + \sum_{n'=1, n' \neq n}^N P_{n',t}^{\text{P2P}} \quad (29)$$

如果  $P_{j,n,t}^{\text{inj}} = 0$ , 说明微网是自给自足的。相反, 该微网有电力剩余或电力不足。

在提出的模型中, 由 DSO 确定的 DOEs 限制了微网的预期进出口, 以满足配电网运行限制。DOEs 直接传递给微网, 微网可以自主管理其资产, 限制其他代理对其信息和资产的访问。DOEs 算法用来解决最大化网络承载能力的确定性 OPF 问题, 在满足电压约束的配电网中利用 DSO 计算 DOEs。通过潮流分析, 如果微网的预期进出口满足网络约束, 则 DSO 接受微网的进出口。否则, 微网的进出口将受到 DOEs 的限制。

约束式(30)和式(31)分别限制了微网的进口能力和出口能力。由于 DOEs 定义了微网的动态运行限制, 因此, 如果微网希望输出电力, 输出电力可以减少到零, 但不能强迫微网输入电力, 也不能强迫微网输出超过预期的电力。同样, 如果微网希望进口电力, 则不能强迫其输出电力, 也不能强迫其进口超过预期的电力。

$$0 \leq P_{j,n,t}^{\text{doc}} \leq \widetilde{P}_{j,n,t}^{\text{inj}}, \text{ if } \widetilde{P}_{j,n,t}^{\text{inj}} > 0, \forall n \in N \quad (30)$$

$$\widetilde{P}_{j,n,t}^{\text{inj}} \leq P_{j,n,t}^{\text{doc}} \leq 0, \text{ if } \widetilde{P}_{j,n,t}^{\text{inj}} \leq 0, \forall n \in N \quad (31)$$

式中,  $\widetilde{P}_{j,n,t}^{\text{inj}}$  和  $P_{j,n,t}^{\text{doc}}$  分别为节点  $j$  接入的微网  $n$  在  $t$  时段预期进出口和分配的 DOEs。

支路有功平衡约束为

$$P_{ij,t} - r_{ij} I_{ij,t} + P_{j,n,t}^{\text{doc}} = \sum_{r \in \pi(j)} P_{jr,t} + P_{j,t}^{\text{LD}} \quad (32)$$

DOEs 计算算法目标函数为

$$\begin{cases} \min \left\{ \sum_{n=1}^N \left| \widetilde{P}_{j,n,t}^{\text{inj}} - P_{j,n,t}^{\text{doc}} \right| + \sum_{ij=1}^L r_{ij} I_{ij,t} \right\} \\ \text{s.t. 式(2)一式(7), 式(29)一式(32)} \end{cases} \quad (33)$$

式中,  $L$  为配电网支路集。该目标函数是为了最小化预期进出口  $\widetilde{P}_{j,n,t}^{\text{inj}}$  与分配的  $P_{j,n,t}^{\text{doc}}$  之间的绝对差值。

根据 DOEs 的定义, 每个微网应将其净注入功率限制在给定的进出口限制内。

$$0 \leq P_{j,n,t}^{\text{inj}} \leq P_{j,n,t}^{\text{doc}}, \text{ if } P_{j,n,t}^{\text{doc}} > 0, \forall n \in N \quad (34)$$

$$P_{j,n,t}^{\text{doc}} \leq P_{j,n,t}^{\text{inj}} \leq 0, \text{ if } P_{j,n,t}^{\text{doc}} \leq 0, \forall n \in N \quad (35)$$

## 2.3 基于 DOEs 的多微网纳什议价模型

隶属于不同利益主体的多能微网在对外交易方式的选择上是自主且理性的, 在满足自身供需平衡的前提下, 通过配电网进行电能交易。为了使微网间的交易电量和交易电价达成共识, 寻求提升各主体利益均衡的策略, 并进一步降低微网自身运行成本, 通过纳什议价来公平合理地制定微网电能交易的购售电量和电价策略。

对于多能微网的合作运行问题, 将多微网运行成本模型代入纳入 DOEs 约束的纳什议价数学表达式, 可得

$$\begin{cases} \max \prod_{n=1}^N (C_n^0 - C_n) \\ \text{s.t. } C_n^0 \geq C_n \\ \text{式(8)一式(29),} \\ \text{式(34), 式(35)} \end{cases} \quad (36)$$

式中:  $C_n^0$  为谈判破裂点, 即未进行议价前微网  $n$  的总日运行成本;  $C_n^0 - C_n$  为微网  $n$  参与合作获得的支付效益。

由于纳什议价合作博弈模型本质上是一个非凸非线性优化问题, 难以直接进行求解。可将其转换为两个易于求解的子问题: 多微网联盟成本最小化子问题 1 和支付效益最大化子问题 2, 对两个问题进行依次求解, 转化过程见文献[26], 篇幅原因, 本文不再赘述。

多微网联盟成本最小化的子问题 1 模型为

$$\begin{cases} \min \sum_{n=1}^N C_n \\ \text{s.t. 式(8)一式(29), 式(34), 式(35)} \end{cases} \quad (37)$$

利用 ADMM 算法求解出最优交易电量  $P_{n',t}^{\text{e,P2P}^*}$  和  $C_n$  的最优解  $C_n^*$ , 将其代入式(36), 得到支付效益最大化的子问题 2 模型为

$$\begin{cases} \min \left[ -\sum_{n=1}^N \ln \left( C_n^0 - C_n^* + \sum_{n'=1, n' \neq n}^N \sum_{t=1}^{24} u_{nn',t} P_{nn',t}^{P2P*} \right) \right] \\ \text{s.t. } C_n^0 - C_n^* + \sum_{n'=1, n' \neq n}^N \sum_{t=1}^{24} u_{nn',t} P_{nn',t}^{P2P*} \geq 0 \end{cases} \quad (38)$$

式(8)一式(29), 式(34), 式(35)

## 2.4 多微网纳什议价模型分布式求解方法

由于子问题 1 包含了合作运行微网之间电能交易的耦合变量, 该耦合变量需要满足各主体之间的购售电能相等, 即多微网之间达成了电能交易共识, 因此引入辅助变量对其进行解耦。

$$P_{nn',t}^{P2P} = -P_{n'n,t}^{P2P} \quad (39)$$

式中,  $P_{n'n,t}^{P2P}$  为微网  $n'$  在  $t$  时段与微网  $n$  交互的电量。

子问题 1 基于 ADMM 算法分布式求解的具体步骤如下所述。

1) 构造子问题 1 的增广拉格朗日函数, 优化变量为  $\lambda_{nn'}^1 (P_{nn',t}^{P2P} + P_{n'n,t}^{P2P})$ 。

$$\begin{aligned} \min L_n^1 = & C_n + \sum_{n'=1, n' \neq n}^N \sum_{t=1}^{24} \lambda_{nn'}^1 (P_{nn',t}^{P2P} + P_{n'n,t}^{P2P}) + \\ & \sum_{n'=1, n' \neq n}^N \sum_{t=1}^{24} \frac{\rho_1}{2} \|P_{nn',t}^{P2P} + P_{n'n,t}^{P2P}\|_2^2 \end{aligned} \quad (40)$$

式中:  $\lambda_{nn'}^1$  和  $\rho_1$  分别为子问题 1 的拉格朗日乘子和惩罚因子;  $\|\cdot\|_2^2$  表示取变量 2-范数的平方。

2) 微网  $n$  通过本地的第  $k$  次迭代计算更新其交易策略  $P_{nn',t}^{P2P}(k+1)$ 。

$$P_{nn',t}^{P2P}(k+1) = \arg \min L_n^1(\lambda_{nn'}^1(k), P_{nn',t}^{P2P}(k), P_{n'n,t}^{P2P}(k)) \quad (41)$$

其他微网  $n'$  接收更新后的决策信息  $P_{nn',t}^{P2P}(k+1)$

以更新  $P_{n'n,t}^{P2P}(k+1)$ 。

$$P_{n'n,t}^{P2P}(k+1) = \arg \min L_n^1(\lambda_{n'n}^1(k), P_{nn',t}^{P2P}(k+1), P_{n'n,t}^{P2P}(k)) \quad (42)$$

3) 更新拉格朗日乘子

$$\lambda_{nn'}^1(k+1) = \lambda_{nn'}^1(k) + \rho_1 (P_{nn',t}^{P2P}(k+1) + P_{n'n,t}^{P2P}(k+1)) \quad (43)$$

4) 判断算法收敛情况

$$\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} \|P_{nn',t}^{P2P}(k+1) + P_{n'n,t}^{P2P}(k+1)\|_2 \leq \varepsilon_1 \quad (44)$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} \|P_{nn',t}^{P2P}(k+1) - P_{nn',t}^{P2P}(k)\|_2 \leq \delta_1 \quad (45)$$

式中,  $\varepsilon_1$ 、 $\delta_1$  分别为子问题 1 的原始残差和对偶残差收敛阈值。

若满足收敛条件则迭代终止, 输出子问题 1 最优值; 否则更新迭代次数  $k = k + 1$ , 返回步骤 2), 直至满足收敛条件或最大迭代次数。

子问题 2 求解过程与子问题 1 求解过程相同,

不再赘述。

## 3 算例分析

### 3.1 算例参数

为验证所提策略的有效性, 本文基于 IEEE 33 节点配电系统构建算例。设定电压允许波动范围为 0.95~1.05 p.u., 规划时间段设置为一日 24 h, 步长为 1 h。在节点 15 安装额定容量为 900 kW 的光伏, 节点 17 和 33 分别安装额定容量为 900 kW 的风电 1 和 600 kW 的风电 2。分布式电源出力曲线如图 3 所示, 配电网各节点负荷变化如图 4 所示。含有风电出力的微网 1 接于节点 20, 含有光伏出力的微网 2 和微网 3 分别接于节点 18 和 31。3 个微网均配置同型 CHP、GB、EC、AC 等设备。各微网内的风光出力和冷热电负荷如图 5 所示。假设只有微网参与 P2P 交易, 需要遵守 DOEs 限制, 所有剩余节点都被视为具有固定主动和被动负载的消费者节点。微网购售电价格、购气价格如表 1 所示, 微网的系统参数如表 2 所示。

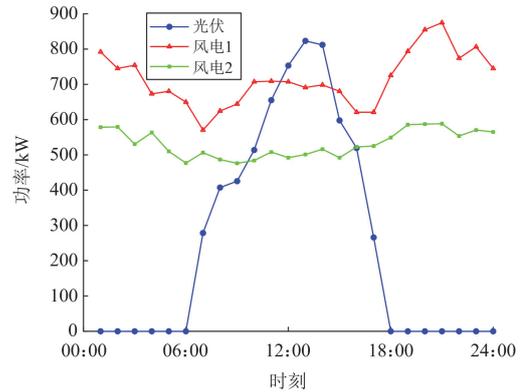


图 3 分布式电源出力曲线

Fig. 3 Curves of distributed power output

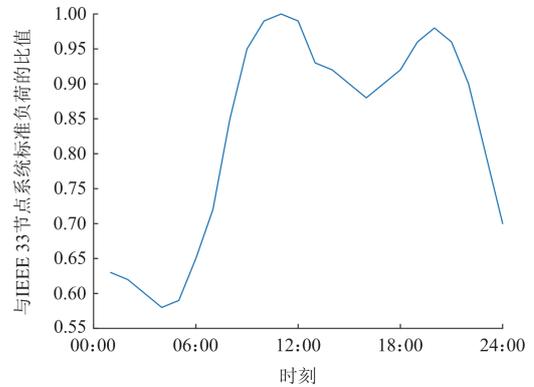
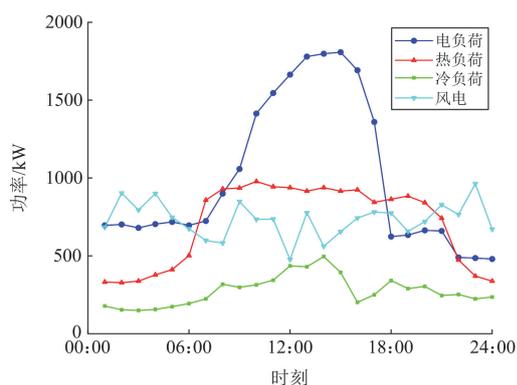
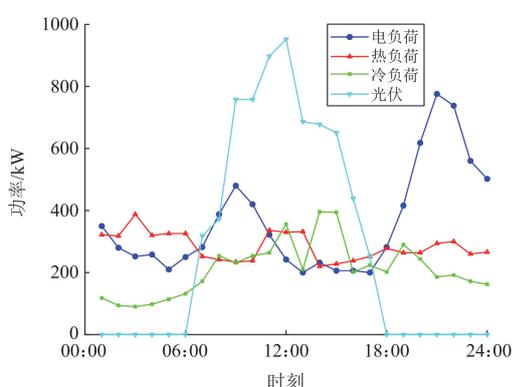


图 4 配电网各节点负荷变化

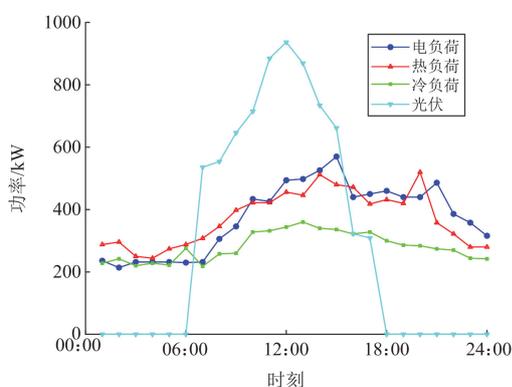
Fig. 4 Load variations at various nodes of distribution network



(a) 微网1



(b) 微网2



(c) 微网3

图5 各微网内的风光出力 and 冷热电负荷

Fig. 5 Wind and photovoltaic output and cooling, heating and electrical loads within each microgrid

所有实验均在 Matlab 环境下进行, 通过 YALMIP 调用 Gurobi 9.0.3 求解器进行求解。ADMM 算法参数设置如下: 最大迭代次数为 300; 子问题 1 收敛阈值为  $10^{-3}$ , 惩罚因子为  $5 \times 10^{-4}$ ; 子问题 2 收敛阈值为  $10^{-2}$ , 惩罚因子为  $10^{-1}$ 。算法的收敛特性曲线如图 6 所示。

表 1 购售电价格、购气价格

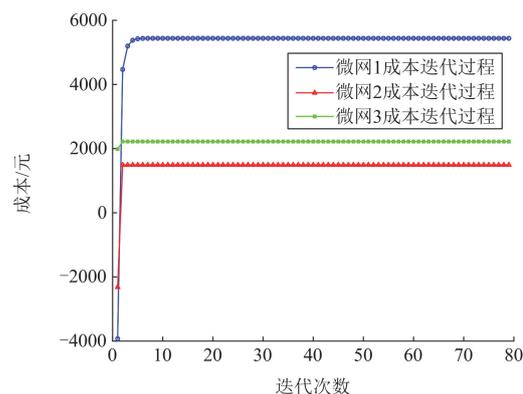
Table 1 Purchase and sale price of electricity and gas

时段	购电电价/ (元/kWh)	售电电价/ (元/kWh)	购气气价/ (元/m <sup>3</sup> )
11:00—14:00	1.30	0.3	2.2
18:00—22:00			
07:00—11:00	0.75	0.3	2.2
14:00—18:00			
00:00—07:00	0.45	0.3	2.2
22:00—24:00			

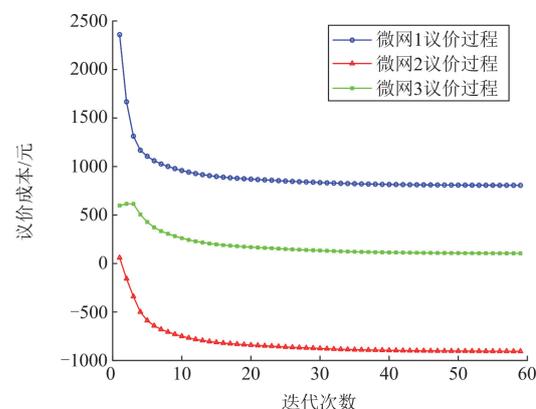
表 2 微网的系统参数

Table 2 System parameters of the microgrid

参数	取值	参数	取值
$\eta^{\text{CHP}}$	0.35	$M_{1/2/3}^{\text{CHP}}/\text{kW}$	600,400,400
$Q^{\text{GBS}}/(\text{kW}/\text{m}^3)$	9.7	$M_{1/2/3}^{\text{GB}}/\text{kW}$	200,200,200
$\alpha^{\text{CHP}}$	0.35	$M_{1/2/3}^{\text{EC}}/\text{kW}$	200,200,200
$\beta^{\text{CHP}}$	0.83	$M_{1/2/3}^{\text{AC}}/\text{kW}$	200,200,200
$\eta^{\text{GB}}$	0.9	$a_1, a_2, a_3$	0.15, 0.15, 0.2
$\eta^{\text{EC}}$	4	$u^{\text{e,lr}}, u^{\text{e,cut}}/(\text{元}/\text{kW})$	0.03, 0.05
$\eta^{\text{AC}}$	1.2	$u^{\text{h,cut}}/(\text{元}/\text{kW})$	0.025



(a) 纳入DOEs后子问题1迭代收敛结果



(b) 子问题2迭代收敛结果

图6 算法的收敛特性曲线

Fig. 6 Convergence characteristic curves of the algorithm

### 3.2 纳入 DOEs 对网络完整性的影响

在 DSO 接收到第一轮纳什谈判得到各微网预期的进出口量后,进行潮流计算,得到的配电网日电压分布图如图 7(a)所示,从图中可以看出,配电网在 11:00—13:00 时段节点 18 出现电压越上限的问题,在 18:00—22:00 时段节点 31 出现电压越下限的问题。此时,DSO 进行 DOEs 的计算,并将计算后的 DOEs 返回给各微网,微网纳入 DOEs 约束再进行纳什谈判以确定最终的进出口量。各微网预期进出口量、分配的 DOEs 和最终的进出口量如图 8 所示,从图 8(b)、图 8(c)可以看出,微网 2 在 11:00—13:00 时段的出口量过大导致节点 18 出现电压越上限问题,微网 3 在 18:00—22:00 时段的进口量过大导致节点 31 出现电压越下限问题。在电压越限时段,分配给微网 2 和微网 3 的 DOEs 均低于预期的进出口量,纳入 DOEs 约束后新一轮纳什谈判的交易量被严格限制在配电网分配给各微网的 DOEs 下。纳入 DOEs 后配电网日电压分布图如图 7(b)所示,可以看出,在任意时段,每个节点电压都在 0.95~1.05 p.u. 的标准电压范围内。

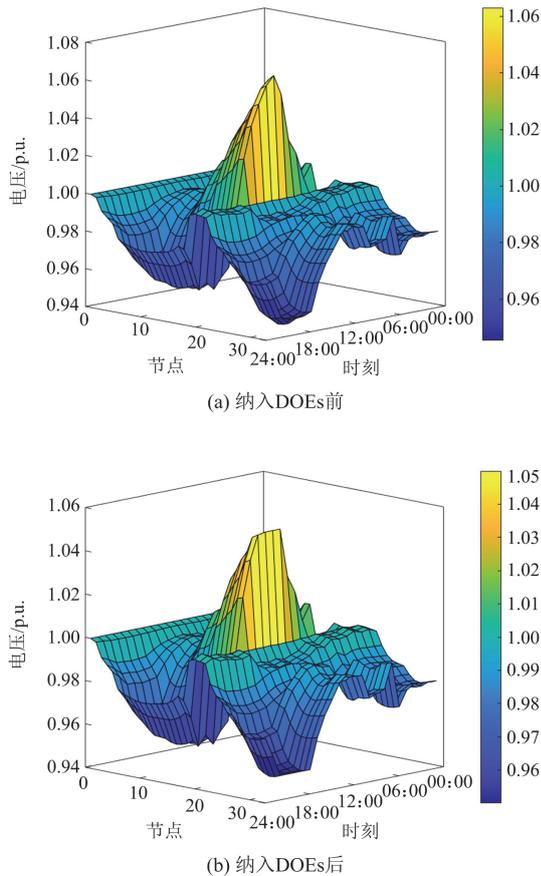


图 7 配电网日电压分布图

Fig. 7 Maps of daily voltage distribution in distribution networks

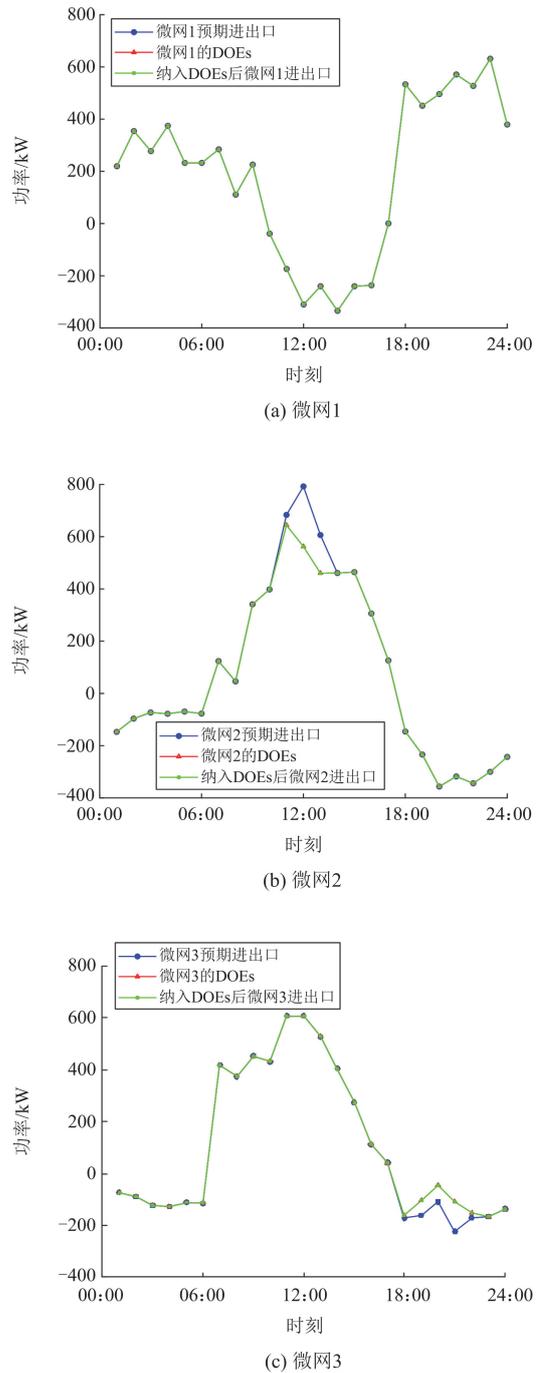


图 8 各微网预期进出口量、分配的 DOEs 和最终的进出口量  
Fig. 8 Expected imports and exports, allocated DOEs and final imports and exports of each microgrid

通过以上分析看出,在求解微网预期进出口量的第一轮纳什谈判中,由于不考虑网络约束,微网可以无限交易,系统存在电压越限的问题,在纳入 DOEs 后,新一轮纳什谈判得到的进出口量使电压处于安全范围内。

### 3.3 微网间电能交易

为分析各个时段微网间的能源互补关系, 纳入DOEs后纳什议价电能交易量的结果如图9(a)所示。可以看出, 微网2和微网3在09:00—16:00时段的光伏出力过剩, 选择出售电能, 此时微网1作为电能需求方, 从微网2和微网3购电。在00:00—06:00时段和17:00—24:00时段, 情况恰好相反。因此, 微网间的互补性在纳什议价模型中得到了很好的利用。

微网间交易电价结果如图9(b)所示, 可以看出, 微网间交易电价在各时段均高于向电网售电电价, 低于向电网购电电价, 微网可以通过议价交易获取更多的利润。

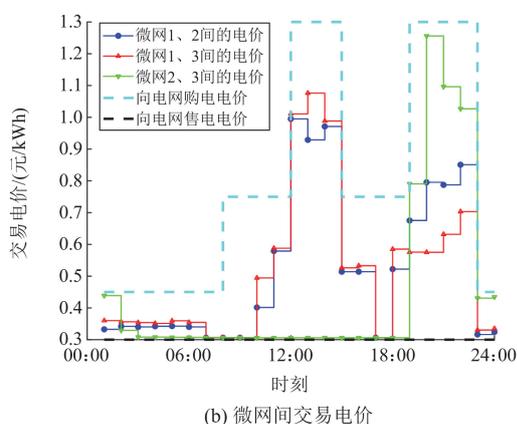
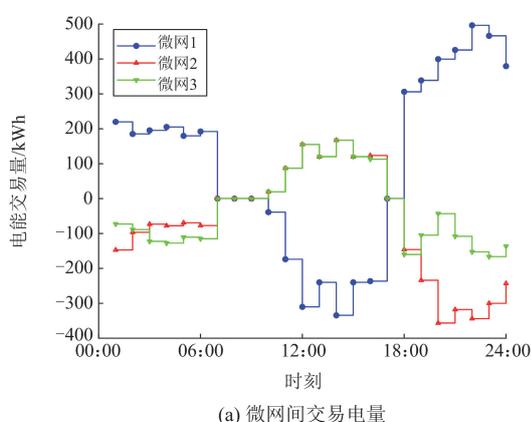


图9 微网间电能交易

Fig. 9 Electricity trading between microgrids

### 3.4 微网运行成本

为分析纳什议价对微网运行成本的影响, 表3和表4分别给出了考虑纳什议价和只与配电网交易两种模型下的微网运行成本, 两种情形均纳入DOEs以保证网络的完整性。

对比表3和表4可知, 纳什议价交易前后, 3个微网的需求响应成本变化不大, 而购气成本出现

明显的下降。微网1和微网3议价成本为负, 表明以售电为主, 它们向配电网的售电利润出现了明显的下降; 微网2议价交易成本为正, 表明以购电为主, 其向配电网的售电利润有所上升。相较于只与配电网交易, 微网1、2和3的总运行成本分别下降10.7%、18.7%与20.7%, 说明纳什议价有效降低了各微网的运行成本。

表3 考虑纳什议价模型的微网运行成本

Table 3 Microgrid operation cost of the model considering Nash bargaining

微网	与配网交互成本	购气成本	需求响应成本	议价成本	总成本
MG1	-573.63	5692.51	321.03	-805.81	4634.10
MG2	-942.50	2305.21	129.36	904.75	2396.82
MG3	-1043.05	3123.03	140.14	-104.76	2115.36

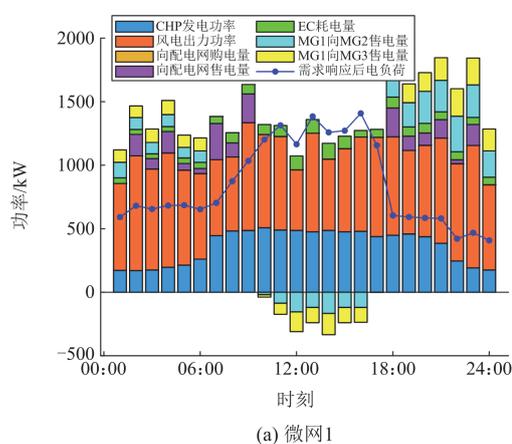
表4 只与配电网交易模型的微网运行成本

Table 4 Microgrid operation cost of the model of transactions with the distribution network only

微网	与配网交互成本	购气成本	需求响应成本	议价成本	总成本
MG1	-1138.39	5970.47	354.88	0	5186.96
MG2	-112.43	2942.53	119.58	0	2949.68
MG3	-1198.69	3719.49	147.43	0	2668.23

### 3.5 微网内部电能调度

微网1、2和3内部的电能调度结果如图10所示。可以看出, 微网2和微网3在09:00—16:00时段的光伏出力能够满足自身负荷需求, 同时将多余的电能优先出售给此时负荷需求较高的微网1, 剩余的电能再出售给配电网。此时的微网1作为电能需求方, 优先从微网2和微网3购电, 从而减少向配电网购电。在00:00—06:00时段和17:00—24:00时段的情况恰好相反。此时, 微网2和微网



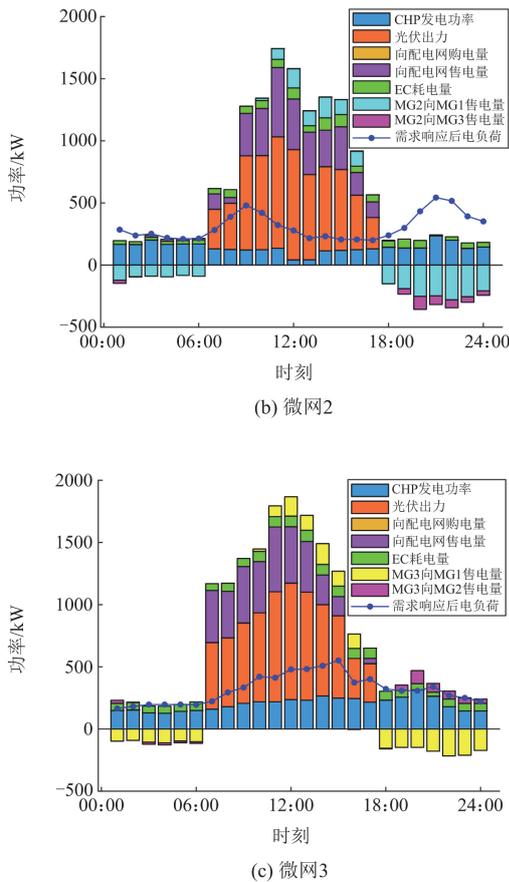


图 10 各微网内部电能调度结果

Fig. 10 Results of power scheduling within each microgrid

3 的光伏出力为 0, 微网 2 和微网 3 作为电能需求方优先向微网 1 购电。同时, 微网 1 在夜间的电能需求较低, 剩余的风电出力优先出售给微网 2 和微网 3, 剩余的电能再出售给配电网。因此, 风电的波动性和光伏发电的日变化特性可以通过 P2P 交易互相平衡, 进一步减少了系统的运行成本。通过微网间直接交易, 系统能够根据实际产能和需求动态调整, 从而实现了更为高效的资源分配。

### 3.6 微网内部异质能调度

微网 2 内部的热能和冷能调度结果如图 11 所示。可以看出, 微网 2 在 10:00—13:00 时段 GB 和 CHP 联合产热以满足自身热负荷需求, 虽然此时微网 2 作为电能剩余方, 但从图 9(b)可知, 此时微网 1 和微网 2 的交易电价较高, 微网 2 优先将自身剩余电能出售给微网 1 获取利润。其次, 微网 2 在 20:00—22:00 时段 AC 和 EC 联合制冷以满足自身冷负荷需求, 因为此时微网 2 作为电能需求方, 从图 9(b)可知, 微网 2 从其他微网和配电网购电电价都较高, 微网 2 优先购气产热, 再利用 AC 和 EC

联合制冷满足冷负荷需求。从微网 2 的设备出力运行结果可以看出, 多能微网可以使冷、热、电、气 4 种不同能量进行相互耦合实现能量梯级利用, 提高了微网的整体用能效率, 使多种设备出力更加协调, 有效降低系统运行成本。

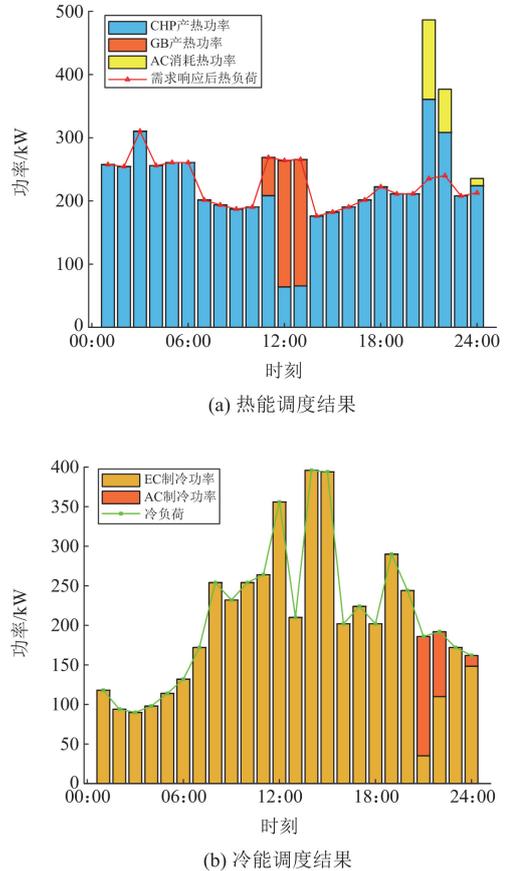


图 11 微网 2 内部热能和冷能调度结果

Fig. 11 Results of heat and cold energy scheduling within microgrid 2

## 4 结论

本文提出了一种基于 DOEs 的多微网纳什议价模型。该模型将 DSO 与微网所做的决策解耦, 通过纳入 DOEs 约束的纳什谈判得到各微网进出口量, 使系统电压处于安全范围内, 确保了网络的完整性, 并使各微网受益。采用 ADMM 求解纳什议价问题, 在 DSO 与微网协商过程中确定 DOEs, 保护了各主体的隐私。主要结论如下:

1) 当微网的预期交易决策超出指定的 DOEs 时, DOEs 能够有效限制微网的交易量, 避免电压越限的情况发生。如微网 2 在 11:00—13:00 时段的出口量过大导致节点 18 的电压越上限, 而微网 3 在 18:00—22:00 时段的进口量过大导致节点 31 出

现电压越下限问题, 通过 DOEs 确保了配电网的电压始终处于安全范围内(0.95~1.05 p.u.)。

2) 纳什议价模型有效地利用了微网间的互补性。如微网 2 和微网 3 在 09:00—16:00 时段的光伏出力过剩, 选择出售电能, 而微网 1 作为电能需求方, 从微网 2 和微网 3 购电。在 00:00—06:00 时段与 17:00—24:00 时段的情况相反, 互补性的利用降低了微网的运行成本。

3) 纳什议价交易有效降低了各微网的运行成本。与仅与配电网交易方案相比, 微网 1、2 和 3 的总运行成本分别下降了 10.7%、18.7%与 20.7%, 表明纳什议价有助于优化资源配置, 提高经济效益。

由于本文只考虑限制有功功率以满足网络约束, 在后续工作中, 还可以考虑利用光伏和电池储能系统的无功功率来进一步调节配电网中的电压。

### 参考文献

- [1] RUIDAS S, SEIKH M R, NAYAK P K. A production inventory model for high-tech products involving two production runs and a product variation[J]. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 2023, 19(3): 2178-2205.
- [2] 张跃, 张雪莹, 赖来源. 考虑负荷动态模型的智能电网灵活规划方法[J]. *电网与清洁能源*, 2023, 39(5): 106-112.  
ZHANG Yue, ZHANG Xueying, LAI Laiyuan. A flexible planning method for the smart grid considering load dynamic model[J]. *Power System and Clean Energy*, 2023, 39(5): 106-112.
- [3] 王钰, 郝毅, 王磊, 等. 基于改进粒子群算法的多能微网多目标优化调度[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(11): 29-36, 59.  
WANG Yu, HAO Yi, WANG Lei, et al. Multi-objective optimal dispatching for multi-energy microgrid based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(11): 29-36, 59.
- [4] 初壮, 赵蕾, 孙健浩, 等. 考虑热能动态平衡的含氢储能的综合能源系统热电优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(3): 1-12.  
CHU Zhuang, ZHAO Lei, SUN Jianhao, et al. Thermoelectric optimization of an integrated energy system with hydrogen energy storage considering thermal energy dynamic balance[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(3): 1-12.
- [5] WU Qiong, XIE Zhun, REN Hongbo, et al. Optimal trading strategies for multi-energy microgrid cluster considering demand response under different trading modes: a comparison study[J]. *Energy*, 2022, 254.
- [6] ZHANG Sen, HU Weihao, CAO Xilin, et al. Low-carbon economic dispatch strategy for interconnected multi-energy microgrids considering carbon emission accounting and profit allocation[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 99.
- [7] CHEN Tianyi, BU Shengrong, LIU Xue, et al. Peer-to-peer energy trading and energy conversion in interconnected multi-energy microgrids using multi-agent deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(1): 715-727.
- [8] SOTO E A, BOSMAN L B, WOLLEGA E, et al. Peer-to-peer energy trading: a review of the literature[J]. *Applied Energy*, 2021, 283.
- [9] FAN Songli, AI Qian. Bargaining-based cooperative energy trading for distribution company and demand response[J]. *Applied Energy*, 2018, 226: 469-482.
- [10] 徐艳春, 刘海权, 孙思涵, 等. 计及混合能源共享站的多微网系统双层混合整数规划[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(23): 9136-9149.  
XU Yanchun, LIU Haiquan, SUN Sihan, et al. Bi-level mixed integer programming of multi-microgrid system considering the hybrid energy sharing station[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(23): 9136-9149.
- [11] 李崎勇, 赵新哲, 郑一飞, 等. 基于纳什谈判考虑能源共享的区域综合能源系统优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(5): 22-32.  
LI Jiyong, ZHAO Xinzhe, ZHENG Yifei, et al. Optimal configuration of a regional integrated energy system considering energy sharing based on Nash negotiation[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(5): 22-32.
- [12] AZIM M I, TUSHAR W, SAHA T K, et al. Peer-to-peer kilowatt and negawatt trading: a review of challenges and recent advances in distribution networks[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 169.
- [13] ZHONG Weifeng, XIE Shengli, XIE Kan, et al. Cooperative P2P energy trading in active distribution networks: an MILP-based Nash bargaining solution[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(2): 1264-1276.
- [14] AFFOLABI L, SHAHIDEHPOUR M, GAN Wei, et al. Optimal transactive energy trading of electric vehicle charging stations with on-site PV generation in constrained power distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(2): 1427-1440.
- [15] 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 Qian, WANG Weiqing, WANG Haiyun. 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.
- [16] GERDROODBARI Y Z, KHORASANY M. Dynamic PQ operating envelopes for prosumers in distribution networks[J]. Applied Energy, 2022, 325.
- [17] LACHLAN B. On the calculation and use of dynamic operating envelopes — evolve project m4 knowledge sharing report[EB/OL]. [2020-09-01]. <https://arena.gov.au/assets/2020/09/on-the-calculation-and-use-of-dynamic-operating-envelopes.pdf>.
- [18] LACHLAN O N, LUKE R, JULIO B, et al. Analysis of the VPP dynamic network constraint management — advanced VPP grid integration project[EB/OL]. [2021-05-20]. <https://arena.gov.au/assets/2021/01/analysis-of-the-vpp-dynamic-network-constraint-management.pdf>.
- [19] DEIP. DEIP dynamic operating envelopes workstream: Outcomes report[EB/OL]. [2022-03-01]. <https://arena.gov.au/assets/2022/03/dynamic-operating-envelope-working-group-outcomes-report.pdf>.
- [20] AZIM M I, LANKESHWARA G, TUSHAR W, et al. Dynamic operating envelope-enabled P2P trading to maximize financial returns of prosumers[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(2): 1978-1990.
- [21] ALAM M R, NGUYEN P T H, NARANPANAWA L, et al. Allocation of dynamic operating envelopes in distribution networks: technical and equitable perspectives[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2024, 15(1): 173-186.
- [22] ULLAH M H, PARK J D. DLMP integrated P2P2G energy trading in distribution-level grid-interactive transactive energy systems[J]. Applied Energy, 2022, 312.
- [23] PETROU K, PROCOPIOU A T, GUTIERREZ-LAGOS L, et al. Ensuring distribution network integrity using dynamic operating limits for prosumers[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 3877-3888.
- [24] HOQUE M M, KHORASANY M, AZIM M I, et al. Dynamic operating envelope-based local energy market for prosumers with electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(2): 1712-1724.
- [25] JIANG Zhisen, GUO Ye, SUN Hongbin, et al. Dynamic operating envelopes embedded peer-to-peer-to-grid energy trading[J/OL]. ArXiv: 1-5[2023-11-23]. <https://arxiv.org/abs/2311.13832>.
- [26] 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.

收稿日期: 2024-06-24; 修回日期: 2024-08-12

作者简介:

张栋梁(1974—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电网安全与可靠性分析; E-mail: zdl@cumt.edu.cn

魏奇(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统与微电网; E-mail: ts22230164p31@cumt.edu.cn

薛雪(1980—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为智能调度与智能配电网。E-mail: cumtxx@126.com

(编辑 许威)