

# 考虑网络服务费的电-热综合能源 端对端交易策略

陈俞邑 刘健辰

(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

**摘要** 在端对端(P2P)综合能源交易中,网络服务费达交易费用的25%以上,严重影响产消者的交易效益,因此本文提出一种计及网络服务费的电-热综合能源系统P2P交易策略。基于电能交易路径中的电气距离和热能交易路径中的管道热阻与长度,对电-热网络服务费分别建模,通过声誉指数计及双方的交易意愿,构建电-热综合能源P2P交易策略的优化问题,并提出一种基于交替方向乘子法(ADMM)的分布式求解方法。构建一个由15节点配电网和8节点供热网组成的P2P综合能源仿真系统,并扩展为33节点配电网-23节点供热网系统,以验证所提方法的有效性及其在P2P交易中的可扩展性。仿真结果表明,考虑网络服务费的电-热综合能源P2P交易策略有助于降低能源交易成本,促进当地能源消纳和提高社会福利。

**关键词:** 端对端(P2P)能源交易;产消者;分布式能源;网络服务费;交替方向乘子法(ADMM)

## Peer-to-peer trading of integrated electricity-heat energy considering network utilization cost

CHEN Yuyi LIU Jianchen

(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao, Liaoning 125105)

**Abstract** Considering that the network utilization cost in peer-to-peer (P2P) integrated energy transactions often accounts for more than 25% of the transaction costs, which significantly impacts the transaction benefits for prosumers, a P2P transaction strategy for the integrated electricity-heat energy system, which accounts for the network utilization cost, is proposed. Electrical distances in transaction path for electrical energy, and thermal resistances and lengths of pipelines in transaction path for thermal energy, are modeled to calculate the network utilization cost for both electricity and heat networks. By using the reputation index to assess the willingness of both parties participating in transactions, the optimization problem of P2P energy transaction strategy is constructed. Furthermore, a distributed solution method based on alternating direction method of multipliers (ADMM) is proposed. A P2P integrated energy simulation system comprising a 15-node electrical grid and an 8-node thermal network is established and further extended to a 33-node electrical grid and a 23-node thermal network system to verify the effectiveness of the proposed method and its scalability in P2P energy trading. Simulation results show that electricity-heat integrated energy P2P transactions with considering the network utilization cost are helpful to reducing energy transaction costs, promoting local energy consumptions, and increasing social welfares.

**Keywords:** peer-to-peer (P2P) energy transaction; prosumer; distributed energy resources (DERs); network utilization cost; alternating direction method of multipliers (ADMM)

## 0 引言

随着能源革命与数字技术的深度融合,传统电

力系统逐渐演变为涵盖多能源生产、传输、消费和交易的综合能源系统<sup>[1]</sup>。作为减少碳排放的重要手段,分布式能源正以大规模、高度分散的趋势迅速

发展。分布式能源通常配置在需求端,这使传统的能源生产者和消费者“合二为一”,成为兼具能源生产和消费功能的“产消者(producer+consumer)”。然而,产消者的空间分散性和分布式能源的波动性增加了交易策略的复杂性<sup>[2]</sup>,同时本地灵活交易市场的发展尚处于起步阶段,仍面临诸多挑战,如信息共享困难和高效交易模式等<sup>[3]</sup>。因此,在能源网络自身调节能力有限、市场机制尚未完善的背景下,如何促进分布式能源的本地交易成为亟须解决的问题。

为了提升发电、产热和用能的区域内协调能力,近年来有关人员可对再生/不可再生能源的交易机制进行了广泛研究,其中端对端(peer-to-peer, P2P)能源市场是一种具有良好应用前景的灵活交易方案<sup>[4]</sup>。除此之外, P2P 能源交易平台还具有如下优势:首先, P2P 平台的去中心化结构,适于集成分布式能源,实现产消者的本地能源供需平衡;其次,由于能量传输距离短,能量损耗更低,市场出清更容易,投资成本更少;再次,虚拟交易平台为市场参与者提供了安全的通信链接,使 P2P 能源交易的安全性和隐私性远优于传统电网<sup>[5]</sup>;最后,由于产消者地理位置相近,有利于优先消纳本地剩余能源<sup>[6]</sup>。

近期,国内外学者提出了多种针对分布式电源的 P2P 交易方法。刘任等基于产消者社区微电网,提出了拍卖机制的 P2P 能源交易模型<sup>[7]</sup>。文献[8]建立了一种双层 P2P 交易能源管理框架,允许产消者通过分布式定价参与本地电力市场。然而,现有研究大多集中于电力交易模式<sup>[9]</sup>,对多能源系统在能源交易中的潜力挖掘不足,而 P2P 电-热能源交易市场为我国能源交易体系提供了一种新模式。文献[10]讨论了涵盖电、天然气的多能源交易系统,但未将多能源交易与 P2P 能源交易相结合。文献[11]构建了一个含分布式供热的综合电力交易框架,利用本地剩余热能减少热量损失。文献[12]验证了用户向热力网络反馈热能的可行性。文献[13]提出了一种 P2P 能量交易代理平台,用于在源荷不确定性条件下,促进热电联产系统中的电-热协调。但是,上述研究并未考虑综合能源交易中的网络服务费和产消者的交易意愿。

在 P2P 能源交易市场中,网络服务成本约占交易费用的 25%<sup>[14]</sup>,对产消者的经济效益有不可忽视的影响。网络服务费通常由能源网运营商决定,产

消者在进行能源交易时必须遵守这些收费规定,并在制定交易策略时纳入考虑。已有的网络服务费制定和收取策略包括平均分摊给所有市场参与者<sup>[15]</sup>、分时差异定价策略<sup>[16-17]</sup>、基于交易路径电气距离制定网络服务费<sup>[18]</sup>,以及购能方单向收费策略<sup>[19]</sup>等。然而,这些研究均针对供电网络服务费,未探讨供热网络服务费问题。

此外,产消者的交易意愿需要通过双边关系进行量化,并将其纳入 P2P 能源定价模型中,以确保交易的公平性和有效性。

综上所述,本文构建一种包含分布式电/热源的综合能源系统,研究计及电-热网络服务费和交易意愿的电-热综合能源 P2P 交易策略问题。主要工作如下:

1) 不同于现有研究仅关注单纯电力能源交易,本文提出一种电-热综合能源 P2P 交易模型。该模型不仅配置电-热分布式能源,还考虑电-热产消者的交易意愿,能够保护交易双方的隐私,同时充分实现区域内能源消纳和最大化社会福利。

2) 借鉴供电网服务费制定方法,从管道热阻和管道长度角度,首次提出一种供热网服务费定价机制。结合基于电气距离的供电网服务费,制定电-热综合能源网络服务费定价策略。

## 1 电-热综合能源 P2P 交易系统模型

### 1.1 系统结构

在 P2P 产消者社区中,电-热综合能源系统交易结构如图 1 所示,不同产消者通过供电网和供热网实现互联与能源共享。在日常生活中,商业和住宅建筑的能源消耗占总能源需求的比例相当大<sup>[11]</sup>。因此,本文考虑代表商业和住宅建筑的电-热产消者,它们配备了多种分布式电-热能源和负荷,包括太阳能集热器(solar collector, SC)和光伏发电系统(photovoltaic, PV)、刚性/柔性电-热负荷和储能系统(energy storage system, ESS)。这些分布式能源设备不仅可以为建筑物自身提供电力和热能,还能在网络中实现能源的双向流动和优化配置。通过这种结构,不同产消者之间能够有效利用多余的电-热能,促进能源的高效使用和整体碳排放的减少。对于能源交易,假设产消者知道自身的能源生产和消费,并可以共享交易信息。产消者之间传递的信息真实可靠,且无需独立与主网或其他运营商交易。

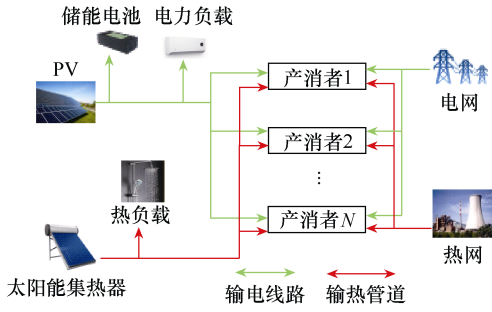


图1 电-热综合能源系统交易结构

## 1.2 电-热产消者模型

假设综合能源社区中产消者集合为  $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$ ，交易时段集合为  $\mathcal{T} = \{1, 2, \dots, T\}$ ，每个产消者都以独立卖方或买方身份参与能源交易市场。

产消者  $i$  的运行目标是 minimized 综合成本，即

$$\min C_i = \sum_{t=1}^T C_{i,t}^{\text{DR}} + C_{i,t}^{\text{SF}} - U_{i,t}^{\text{ET}} \quad (1)$$

其中，对于  $\forall t \in \mathcal{T}$ ，

$$C_{i,t}^{\text{DR}} = c_{\text{drp}} (P_{i,t}^{\text{EC}} - P_{i,t}^{\text{pre}})^2 + c_{\text{drq}} (Q_{i,t}^{\text{EC}} - Q_{i,t}^{\text{pre}})^2 \quad (2)$$

$$C_{i,t}^{\text{SF}} = c_{\text{pv}} P_{i,t}^{\text{PV}} + c_{\text{SC}} Q_{i,t}^{\text{SC}} + c_{\text{ess}} (P_{i,t}^{\text{ch}} + P_{i,t}^{\text{dch}}) + c_{i,j}^{\text{serv,p}} + c_{i,j}^{\text{serv,q}} \quad (3)$$

$$U_{i,t}^{\text{ET}} = \sum_{i=1, i \neq j}^N (\lambda_{i,t}^{\text{p}} P_{i,j,t}^2 + \lambda_{i,t}^{\text{p}} P_{i,j,t} + \lambda_{i,t}^{\text{q}} Q_{i,j,t}^2 + \lambda_{i,t}^{\text{q}} Q_{i,j,t}) \quad (4)$$

$$P_{i,j,t}^{\text{b}} = \sum_{j=1, j \neq i}^N P_{i,j,t} \quad (5)$$

$$Q_{i,j,t}^{\text{b}} = \sum_{j=1, j \neq i}^N Q_{i,j,t} \quad (6)$$

式中： $C_i$  为产消者  $i$  的综合成本； $C_{i,t}^{\text{DR}}$  为用二次函数描述的柔性负荷与分布式能源引起的能源消耗成本； $C_{i,t}^{\text{SF}}$  为包括 PV、SC 和 ESS 的设备成本和网络服务费用； $U_{i,t}^{\text{ET}}$  为产消者的效用值（“效用”指个体从某种商品、服务或行为中获得的满足程度或价值。此处用来衡量产消者能源偏好或选择的重要概念）； $c_{\text{drp}}$  和  $c_{\text{drq}}$  分别为电/热分布式能源成本系数； $P_{i,t}^{\text{EC}}$  和  $Q_{i,t}^{\text{EC}}$  分别为产消者的实际电/热能消耗； $P_{i,t}^{\text{pre}}$  和  $Q_{i,t}^{\text{pre}}$  为产消者的预测电/热消耗；常数  $c_{\text{pv}}$ 、 $c_{\text{SC}}$  和  $c_{\text{ess}}$  分别为光伏、太阳能集热器和储能电池

的成本系数； $P_{i,t}^{\text{PV}}$  为光伏发电的产能； $Q_{i,t}^{\text{SC}}$  为单位时段内 SC 的产热量； $P_{i,t}^{\text{ch}}$  和  $P_{i,t}^{\text{dch}}$  为储能电池的充电和放电功率； $c_{i,j}^{\text{serv,p}}$  和  $c_{i,j}^{\text{serv,q}}$  分别为电/热力网络服务费； $\lambda_{i,t}^{\text{p}} \geq 0$  和  $\lambda_{i,t}^{\text{q}} \geq 0$  分别为产消者的电能和热能效用函数系数； $P_{i,j,t}^{\text{b}}$  和  $Q_{i,j,t}^{\text{b}}$  分别为产消者电力和热力买卖之和； $P_{i,j,t}$  和  $Q_{i,j,t}$  分别为产消者交易的电功率/热功率，下标的含义将在产消者的能量交易平衡约束中说明。

产消者  $i$  应该满足以下约束。

1) 产消者能耗约束

产消者的电/热能量消耗需要满足

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T P_{i,t}^{\text{EC}} = \sum_{t=1}^T P_{i,t}^{\text{pre}} \\ \sum_{t=1}^T Q_{i,t}^{\text{EC}} = \sum_{t=1}^T Q_{i,t}^{\text{pre}} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} p_{i,t}^{\min} \leq P_{i,t}^{\text{EC}} \leq p_{i,t}^{\max} \\ q_{i,t}^{\min} \leq Q_{i,t}^{\text{EC}} \leq q_{i,t}^{\max} \end{cases} \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (8)$$

式中， $p_{i,t}^{\min}$ 、 $p_{i,t}^{\max}$  和  $q_{i,t}^{\min}$ 、 $q_{i,t}^{\max}$  分别为电/热能源消耗的下、上限。

2) 储能电池约束

对于  $\forall t \in \mathcal{T}$ ，储能电池的充/放电功率和储能余量应满足

$$E_{i,t} = E_{i,t-1} + \eta_i^{\text{ch}} P_{i,t}^{\text{ch}} - \frac{P_{i,t}^{\text{dch}}}{\eta_i^{\text{dch}}} \quad (9)$$

$$E_{i,t}^{\min} \leq E_{i,t} \leq E_{i,t}^{\max} \quad (10)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,t}^{\text{ch}} \leq \bar{P}_{i,t}^{\text{ch}} \\ 0 \leq P_{i,t}^{\text{dch}} \leq \bar{P}_{i,t}^{\text{dch}} \end{cases} \quad (11)$$

式中： $E_{i,t}$  为储能电池的电量； $\eta_i^{\text{ch}}$  和  $\eta_i^{\text{dch}}$  为储能电池的充/放电效率； $E_{i,t}^{\min}$  和  $E_{i,t}^{\max}$  为储能电池的储能余量下、上限； $\bar{P}_{i,t}^{\text{ch}}$  和  $\bar{P}_{i,t}^{\text{dch}}$  为储能电池的充/放电功率上限。

为了避免储能电池同时充电和放电，引入以下约束，即

$$P_{i,t}^{\text{ch}} P_{i,t}^{\text{dch}} = 0 \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (12)$$

约束式(12)为非线性互补约束,难以直接求解。但是,可以通过大M方法引入0-1变量 $\delta_{i,t}$ ,将其线性化为

$$\begin{cases} \delta_{i,t} \leq P_{i,t}^{\text{ch}} \leq \delta_{i,t} M \\ 1 - \delta_{i,t} \leq P_{i,t}^{\text{dch}} \leq (1 - \delta_{i,t}) M \end{cases} \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (13)$$

式中, $M$ 为足够大的正数。

### 3) 能量交易平衡约束

在产消者 $i$ 和 $j$ 进行交易时,为了避免重复共享能源,应确保若产消者 $i$ 作为生产者,则产消者 $j$ 必须作为消费者,反之亦然。以电力交易为例,应该考虑当产消者 $i$ 向产消者 $j$ 出售电力时,交易电功率 $P_{i,j,t}$ 在时段 $t$ 中为正;当产消者 $i$ 向产消者 $j$ 购买电力时,交易电功率 $P_{j,i,t}$ 在时段 $t$ 中为负,即 $P_{i,j,t}$ 和 $P_{j,i,t}$ 大小相等而符号相反,热力交易同理。这样,参与交易的产消者 $i$ 和 $j$ 应该满足以下耦合约束,即

$$P_{i,j,t} + P_{j,i,t} = 0 \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (14)$$

$$Q_{i,j,t} + Q_{j,i,t} = 0 \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (15)$$

### 4) 太阳能集热器模型

对于 $\forall t \in \mathcal{T}$ ,太阳能集热器模型<sup>[11]</sup>为

$$\eta_t^{\text{SC}} = c_1 \left[ \left( \frac{S_{It}}{S_{I0}} \right)^{c_2} + c_3 \frac{S_{It}}{S_{I0}} \right] \left[ 1 + c_4 \left( \frac{T_t}{T_0} \right)^{c_2} + c_5 \frac{A_{Mt}}{A_{M0}} \right] \quad (16)$$

$$Q_{i,t}^{\text{SC}} = A_{\text{SC},i} \eta_t^{\text{SC}} S_{It} \quad (17)$$

$$0 \leq Q_{i,t}^{\text{SC}} \leq Q_{i,t,\text{max}}^{\text{SC}} \quad (18)$$

式中: $\eta_t^{\text{SC}}$ 为SC的产热效率; $S_{It}$ 为实际太阳辐射指数( $\text{W}/\text{m}^2$ ); $S_{I0}$ 为标准太阳辐射指数( $\text{W}/\text{m}^2$ ); $T_t$ 为实际环境温度; $T_0$ 为固定环境温度; $A_{Mt}$ 为实际空气质量指数; $A_{M0}$ 为空气质量; $c_1 \sim c_5$ 为SC的设备系数; $A_{\text{SC},i}$ 为SC板面积( $\text{m}^2$ ); $Q_{i,t,\text{max}}^{\text{SC}}$ 为单位时段内SC的最大产热量。

### 5) 能量平衡约束

对于 $\forall t \in \mathcal{T}$ ,产消者的能量输出和输入都应该保持平衡,即

$$P_{i,t}^{\text{PV}} + P_{i,t}^{\text{dch}} + P_{i,t} = P_{j,t}^{\text{EC}} + P_{j,t}^{\text{ch}} + P_{j,t} \quad (19)$$

$$Q_{i,t}^{\text{SC}} + Q_{i,t} = Q_{j,t}^{\text{EC}} + Q_{j,t} \quad (20)$$

式中: $P_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$ 和 $P_{j,t}$ 、 $Q_{j,t}$ 分别为产消者每次交易中购买和售卖的电/热功率;等式两边下标 $i$ 和 $j$ 的含义与式(14)和式(15)相同。

对于 $\forall t \in \mathcal{T}$ ,产消者不能同时购买或出售电/热能量,因此需要满足

$$\langle P_{i,t}, P_{j,t} \rangle = 0 \quad (21)$$

$$\langle Q_{i,t}, Q_{j,t} \rangle = 0 \quad (22)$$

式中, $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示内积。

## 1.3 电-热网络服务费

1) 在使用电力/热力网络和基础设施进行电/热能量交易时,将带来网络损耗、网络拥塞等附加交易成本,因此主网需要对参与交易的产消者收取网络服务费。为了提高市场效率和透明度,避免网络服务费被滥用,本文引入事前网络服务定价(ex-ante network utilization cost, ex-NUC)机制,电网在P2P市场清算之前设置电力网络服务费(power-network utilization cost, P-NUC)。该机制旨在能源交易开始前分配网络服务成本,提前为市场参与者提供明确的网络服务费信息,使之能够在制定交易策略时将其考虑在内。事前定价不仅有助于促进本地能源交易,减少系统总损耗,还可以防止因过高的服务费导致市场参与度下降。

已有的网络服务费制定和收取策略有平均分摊法、分时差异定价和交易路径定价<sup>[15-19]</sup>等。其中,基于交易路径定价法,可使市场参与者在与电气或地理上较近的交易伙伴进行交易时,所支付的网络服务费较低,从而促进本地能源交易。交易路径定价法通过预定义的电力路径进行能量交易,无需潮流计算,比较简便易用。依据不同的路径距离计算方法,目前已经有多种交易路径定价法,其中基于路径阻抗的电气距离方法<sup>[18]</sup>,由于具有明确的物理意义且计算简单,最为实用。本文采用基于电气距离的交易路径定价法,设置电力网络服务费为

$$c_{i,j}^{\text{serv,p}} = \gamma d_{i,j} \quad (23)$$

式中: $\gamma$ 为单位电气距离对应的电力网络服务费;

$d_{i,j}$  为参与交易的产消者  $i$  和  $j$  之间的电气距离，为产消者  $i$  和  $j$  之间交易路径上的总支路阻抗。

$$d_{i,j} = \sum_{l \in \mathcal{L}_{i,j}} |z_l| \quad (24)$$

式中： $\mathcal{L}_{i,j}$  为电力交易路径上的支路集合； $z_l$  为支路  $l$  的阻抗。当产消者  $i$  和  $j$  之间有多条路径时，优先考虑总支路阻抗最小的路径<sup>[18]</sup>。

2) 关于网络服务费的已有研究均针对电力网络，因此本文首次提出一种热网服务费定价方法。受文献[18]启发，类似基于电气距离的交易路径定价法，基于平均管道热阻和管道长度，将热力网络服务费 (heat network utilization cost, H-NUC) 定义为

$$c_{i,j}^{\text{serv. q}} = \theta h_{i,j} \quad (25)$$

式中： $\theta$  为单位热力距离对应的热力网络服务费； $h_{i,j}$  为产消者  $i$  和  $j$  之间交易路径上的总管道热阻之和。

$$h_{i,j} = \kappa T_a \sum_{k \in \mathcal{H}_{i,j}} |L_k| \quad (26)$$

式中： $\kappa$  为平均管道热阻 ( $\text{kW}/(\text{km} \cdot ^\circ\text{C})$ )； $T_a$  为管道平均温度 ( $^\circ\text{C}$ )； $\mathcal{H}_{i,j}$  为节点间热力交易路径上的管道集合； $L_k$  为管道  $k$  的长度 ( $\text{km}$ )。通过不同节点之间的管道长度之和计算交易路径。例如，在图2所示的8节点热网中，节点7处的产消者A和节点2处的产消者B进行交易时，两者之间的交易路径为  $h_{7,2} = h_{7,1} + h_{1,2}$ ，在图中用红色虚线段标出。

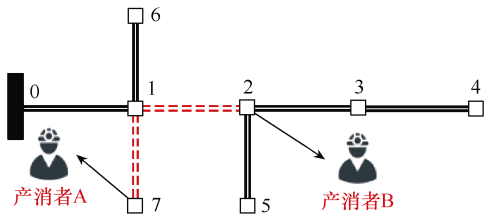


图2 8节点热网拓扑

#### 1.4 基于声誉指数的产品质量和信任度差异化

双边交易在很大程度上受交易双方过往积累的人脉、声誉关系和经验的影响。基于能源交易历史记录，产消者倾向于与声誉更高的贸易伙伴进行交易。为此，本文引入交易者之间的声誉指数 (mutual reputation index, MRI)，交易双方能够通过分布式方式对该指数进行计算。

时段  $t$  内产消者  $i$  和  $j$  之间交易的 MRI 为

$$\sigma_{i,j,t} = \sigma_{i,j,t-1} + \varphi \frac{\pi_{i,j,t-1} \left| \frac{P_{i,j,t-1}}{Q_{i,j,t-1}} \right|}{\sum_{y=1}^Y \pi_{i,j,y} \left| \frac{P_{i,j,y}}{Q_{i,j,y}} \right|} \quad (27)$$

式中： $\varphi$  为一个与 MRI 有关的小正比例因子； $Y$  为从初始时段 1 到时段  $t-1$  的交易总数； $\sigma_{i,j,t-1}$  为一个时段的 MRI； $\pi_{i,j,t}$  为能源交易价格。式 (27) 等号右侧第二项的分子代表最后一笔交易的支付金额，分母则代表截至前一个时段的总支付金额。这意味着对于任何能源价格  $\pi_{i,j,t}$  或交易量  $P_{i,j,t}/Q_{i,j,t}$ ，每次交易都会向 MRI 添加一个非负值，并且支付金额越高，MRI 也越高。MRI 初始值应设置为 0，并在成功交易之前保持为 0。在任何交易中都有  $\sigma_{i,j,t} = \sigma_{j,i,t}$ 。

综上所述，本文将产消者的声誉成本函数量化为

$$r_{i,t} = \sum_{j \in \mathcal{N}} c \sigma_{i,j,t} \frac{P_{i,j,t}}{Q_{i,j,t}} \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (28)$$

式中， $c$  为单位时段内能源交易的声誉收益参数。同时，参与交易的产消者的买卖价格应相等，即满足

$$\pi_{i,j,t}^{\text{P/Q}} = \pi_{j,i,t}^{\text{P/Q}} \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (29)$$

式中， $\pi_{i,j,t}^{\text{P/Q}}$  和  $\pi_{j,i,t}^{\text{P/Q}}$  为产消者  $i$  和  $j$  买/卖的电/热能价格。

#### 1.5 电-热综合能源 P2P 交易策略

从社会角度来看，本地化的电-热综合能源 P2P 交易应最大化产消者的声誉成本函数  $r_{i,t}$ ，同时最小化其总成本函数，来实现社会福利最大化，从而达到市场均衡。基于式 (1) ~ 式 (29)，电-热综合能源 P2P 交易策略可以表述为如下优化问题，即

$$\begin{cases} \min \sum_{t=1}^T (C_{i,t}^{\text{DR}} + C_{i,t}^{\text{CSF}} - U_{i,t}^{\text{ET}} - r_{i,t}) \\ \text{s.t. 式 (1) ~ 式 (29)} \end{cases} \quad (30)$$

最优化问题式 (30) 是一个混合整数线性规划 (mixed-integer linear programming, MILP) 问题，可以使用商用解算器求解。然而，在求解过程中，

产消者需要分享各自的成本函数系数及能源生产和消耗状况等不愿意披露的敏感信息,因此存在隐私泄露问题。为此,本文提出一种基于交替方向乘子法(alternating direction method of multipliers, ADMM)的电-热综合能源 P2P 交易策略的分布式求解方法。

## 2 基于 ADMM 的分布式求解方法

ADMM 是一种求解耦合约束优化问题的有效方法。标准 ADMM 的收敛速度为  $O(1/k)^{[18]}$ , 其中  $k$  为迭代次数。在目标函数为混合整数线性规划的情况下, ADMM 稳定收敛。

从式(14)、式(15)可以看出,产消者  $i$  和  $j$  在时段  $t$  内存在功率耦合。为此,  $\forall t \in \mathcal{T}, i, j \in \mathcal{N}$ , 将耦合约束式(14)、式(15)重述为

$$\begin{cases} \rho_{i,j,t}^P = P_{i,j,t} \\ \rho_{i,j,t}^Q = Q_{i,j,t} \end{cases} \quad (31)$$

$$\begin{cases} \rho_{j,i,t}^P = P_{j,i,t} \\ \rho_{j,i,t}^Q = Q_{j,i,t} \end{cases} \quad (32)$$

$$\begin{cases} \rho_{i,j,t}^P + \rho_{j,i,t}^P = 0 \\ \rho_{i,j,t}^Q + \rho_{j,i,t}^Q = 0 \end{cases} \quad (33)$$

式中,  $\rho_{i,j,t}^P$  和  $\rho_{i,j,t}^Q$  分别为电/热功率的辅助变量。

令  $\pi_{i,j,t}^P$  和  $\pi_{i,j,t}^Q$  为等式约束式(31)对应的对偶变量,可以构建问题式(30)的增广拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(P_{i,j,t}, \pi_{i,j,t}, \rho_{i,j,t}) = & \sum_{t=1}^T (C_{i,t}^{\text{DR}} + C_{i,t}^{\text{SF}} - U_{i,t}^{\text{ET}} - r_{i,t}) + \\ & \sum_{t=1}^T \left[ \pi_{i,j,t}^P (\rho_{i,j,t}^P - P_{i,j,t}) + \frac{\eta}{2} \|\rho_{i,j,t}^P - P_{i,j,t}\|_2^2 + \right. \\ & \left. \pi_{i,j,t}^Q (\rho_{i,j,t}^Q - Q_{i,j,t}) + \frac{\eta}{2} \|\rho_{i,j,t}^Q - Q_{i,j,t}\|_2^2 \right] \end{aligned} \quad (34)$$

式中,  $\eta$  为正惩罚参数。

这样,可以将优化问题式(30)分解为3个子问题,在第  $k$  次迭代中,进行如下求解更新。

### 1) 交易功率更新

给定当前对偶变量  $\pi_{i,j,t}^k$  和辅助变量  $\rho_{i,j,t}^k$ , 产消者  $i$  求解以下优化问题,更新电/热交易功率  $P_{i,j}^{k+1}$  和  $Q_{i,j}^{k+1}$ 。

$$\begin{cases} \min \sum_{t=1}^T (C_{i,t}^{\text{DR}} + C_{i,t}^{\text{SF}} - U_{i,t}^{\text{ET}} - r_{i,t}) + \\ \sum_{t=1}^T \left[ \pi_{i,j,t}^{\text{P},k} (\rho_{i,j,t}^{\text{P},k} - P_{i,j,t}) + \frac{\eta}{2} \|\rho_{i,j,t}^{\text{P},k} - P_{i,j,t}\|_2^2 + \right. \\ \left. \pi_{i,j,t}^{\text{Q},k} (\rho_{i,j,t}^{\text{Q},k} - Q_{i,j,t}) + \frac{\eta}{2} \|\rho_{i,j,t}^{\text{Q},k} - Q_{i,j,t}\|_2^2 \right] \\ \text{s.t. 式(1)~式(29)} \end{cases} \quad (35)$$

### 2) 辅助变量更新

根据交易功率更新子问题的解,求解以下优化问题,更新辅助变量  $\rho_{i,j,t}^{\text{P},k+1}$  和  $\rho_{i,j,t}^{\text{Q},k+1}$ 。

$$\begin{cases} \min_{\rho_{i,j,t}^{\text{P}}, \rho_{i,j,t}^{\text{Q}}} \sum_{i,j \in \mathcal{N}} \left[ \pi_{i,j,t}^{\text{P},k} (\rho_{i,j,t}^{\text{P}} - P_{i,j,t}^{k+1}) + \frac{\eta}{2} \|\rho_{i,j,t}^{\text{P}} - P_{i,j,t}^{k+1}\|_2^2 + \right. \\ \left. \pi_{i,j,t}^{\text{Q},k} (\rho_{i,j,t}^{\text{Q}} - Q_{i,j,t}^{k+1}) + \frac{\eta}{2} \|\rho_{i,j,t}^{\text{Q}} - Q_{i,j,t}^{k+1}\|_2^2 \right] \\ \text{s.t. 式(33)} \end{cases} \quad (36)$$

### 3) 对偶变量更新

根据交易功率更新子问题和辅助变量更新子问题的解,求解以下优化问题,更新对偶变量  $\pi_{i,j,t}^{\text{P/Q},k+1}$ 。

$$\begin{cases} \pi_{i,j,t}^{\text{P},k+1} = \pi_{i,j,t}^{\text{P},k} + \eta (\rho_{i,j,t}^{\text{P},k+1} - P_{i,j,t}^{k+1}) \\ \pi_{i,j,t}^{\text{Q},k+1} = \pi_{i,j,t}^{\text{Q},k} + \eta (\rho_{i,j,t}^{\text{Q},k+1} - Q_{i,j,t}^{k+1}) \end{cases} \quad (37)$$

产消者  $i$  和  $j$  在每次迭代中仅共享交易的能量量和对应的价格信息,不会向其他产消者公开总体能源交易量或价格数据,从而有效保护了产消者的隐私。

产消者 P2P 能源交易策略的 ADMM 求解流程如图3所示。

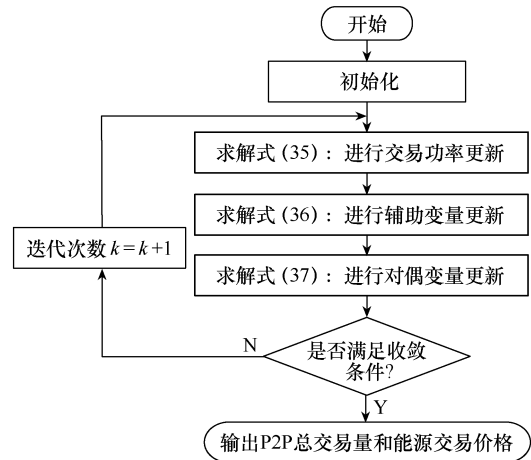


图3 ADMM 求解流程

### 3 案例研究

#### 3.1 仿真设置

为了证明所提 P2P 电-热综合能源交易框架的有效性, 本文基于修改的 IEEE 15 节点配电网<sup>[18]</sup>和 8 节点热网<sup>[12]</sup>构建电-热综合能源系统, 如图 4 所示, 以下简称网络 1。网络 1 中共有 5 个产消者 A~E, 根据产消者类型的不同, 进一步分为纯电力产消者节点和电-热产消者节点。纯电力产消者节点配备光伏发电和储能电池, 电-热产消者节点额外配备太阳能集热器。电-热产消者同时具有电能和热能的需求和生产。

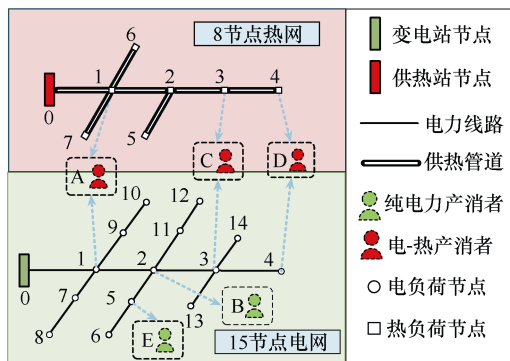


图 4 含 P2P 交易的电-热综合能源系统

分布式能源出力和负荷预测数据源自中国南方电网的示范项目<sup>[11]</sup>。产消者的效用函数系数在区间  $\lambda_{i,t}^p \in [0.26, 0.78]$  和  $\lambda_{i,t}^q \in [0.20, 0.55]$  内随机生成。功率和价格的初始值设置为  $P_{i,j,t}^k = Q_{i,j,t}^k = 0$  和  $\pi_{i,j,t}^{P,k} = \pi_{i,j,t}^{Q,k} = 0$ 。假设不同时段的购电价格分别为 0.443 元/(kW·h)、0.728 元/(kW·h)和 1.095 元/(kW·h), 电能出售价格为 0.370 元/(kW·h)<sup>[9]</sup>, 购热价格为 0.490 元/(kW·h)<sup>[20]</sup>。单位能源交易声誉收益参数取为  $c = 0.01$ <sup>[18]</sup>, 平均管道热阻为  $\kappa = 0.018 \text{ kW}/(\text{km} \cdot \text{C})$ <sup>[12]</sup>, 管道平均温度为  $T_a = 65 \text{ C}$ <sup>[12]</sup>, 电网和热网的单位服务费的初始值分别设定为  $\gamma = 0.01$  元/(kW·h)和  $\theta = 0.015$  元/(kW·h), 其他系统参数见表 1。本文采用 Matlab 2021 调用 CPLEX 求解器进行求解。

#### 3.2 案例研究

为了证明所提综合能源交易模型的优点和评估其有效性, 本文基于产消者的数量和种类设置 2 个研究案例。在所有研究案例中, 除目标函数中的网络服务费参数外, 所有产消者及其分布式能源拥有相同的参数。

表 1 系统参数

参数	数值
$\eta_i^{\text{dch}}, \eta_i^{\text{ch}}, \eta_i^{\text{SC}} / \%$	90 <sup>[21]</sup>
$\bar{P}_{i,t}^{\text{ch}}, \bar{P}_{i,t}^{\text{dch}} / \text{kW}$	12 <sup>[21]</sup>
$E_{i,t}^{\text{min}}, E_{i,t}^{\text{max}} / (\text{kW} \cdot \text{h})$	0, 55 <sup>[22]</sup>
$c_{\text{dnp}}, c_{\text{dtrq}}, c_{\text{pv}}, c_{\text{SC}}, c_{\text{ess}}$	0.1 <sup>[23]</sup>
$P_{i,t}^{\text{min}}, P_{i,t}^{\text{max}} / \text{kW}$	0, 50
$q_{i,t}^{\text{min}}, q_{i,t}^{\text{max}} / \text{kW}$	0, 20

#### 1) 案例 1: 纯电力 P2P 交易

案例 1 不考虑电-热综合能源系统中的热网部分, 仅存在电力产消者之间的交易。整个能源系统的产消者总发电量和总耗电量如图 5 所示, 可见 26 次迭代后即可达到收敛。产消者在 24h 之内的 P2P 总交易量如图 6 所示, 其中正值表示买入, 负值表示卖出, 总交易量为 498.6kW·h。

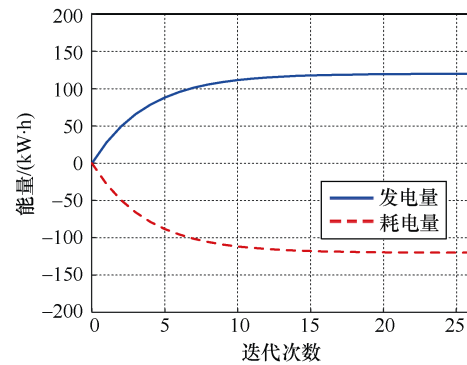


图 5 产消者的总发电量和总耗电量（案例 1）

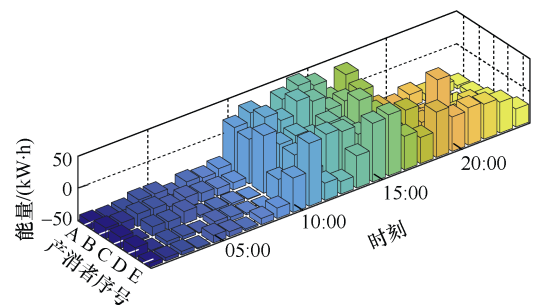


图 6 P2P 总交易量（案例 1）

由图 6 可见, 在 10:00—18:00, 光伏电源产能较高, 最大增幅达到 19.8%; 在其他时段, 光伏电源产能降低, 特别是在 20:00 晚用电高峰时段, 电能交易也处于较高水平。这样, 产消者根据电能价格优化能源交易, 实现电能的本地生产和消费, 主网仅收取由产消者之间交易产生的网络服务费, 从而达成 P2P 交易的核心要求。

2) 案例 2: 电-热 P2P 交易

案例 2 考虑同时拥有分布式电源和热源的电-热产消者之间的 P2P 交易捆绑出清, 图 4 中的产消者 A、C 和 D 同时具有分布式电-热源。引入热源并增加耦合约束后, 整个能源系统的产消者的总发电量和总耗电量如图 7 所示, 可见 46 次迭代后达到收敛。

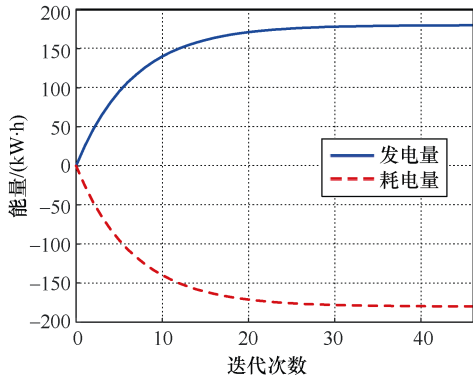


图 7 产消者的总发电量和总耗电量 (案例 2)

P2P 总交易量如图 8 所示。由图 8 可见, 在 24h 内, 所有产消者的 P2P 交易量表现出波动性, 总交易量为 752.9kW·h, 正值代表能源购买, 负值代表能源出售。在 10:00—18:00, 分布式能源 (尤其是太阳能发电设备) 产能较高, 最大增幅达到 35.3%(单个时段波动上限为 20%)。在其他时段, 产消者根据电价动态优化其能源买卖策略。尤其是在 20:00 晚高峰时段, 尽管发热产能有所下降, 但由于热力需求增加, 热能交易量依然保持较高水平。通过这种调节机制, 区域内的电能和热能能够自我平衡, 实现了自给自足, 主网仅收取由产消者之间交易产生的网络服务费, 达成了 P2P 交易的核心要求。

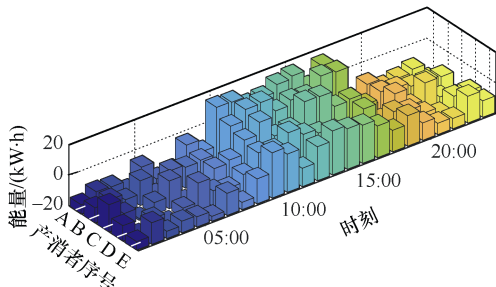


图 8 P2P 总交易量 (案例 2)

以上两个案例中产消者的交易总成本见表 2。表 2 中, 网络 1 中的产消者总成本平均降低了 20.4%; 同时案例 1 比案例 2 的总交易量增加了

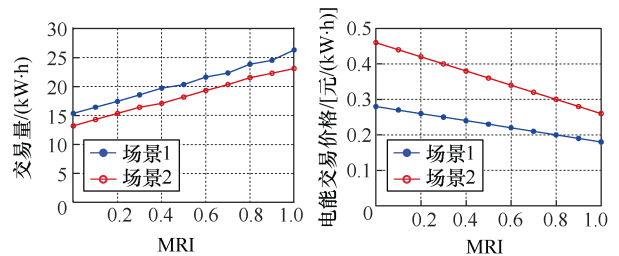
51%。这个结果说明相比于纯电力 P2P 交易, 电-热综合能源 P2P 交易策略更能提高区域能源利用效率, 减少产消者总成本。

表 2 产消者交易总成本

单位: 元		
产消者序号	案例 1	案例 2
A	1 958.48	1 642.55
B	2 115.56	1 826.19
C	2 548.39	2 034.20
D	1 659.73	1 452.89
E	2 186.43	1 732.82

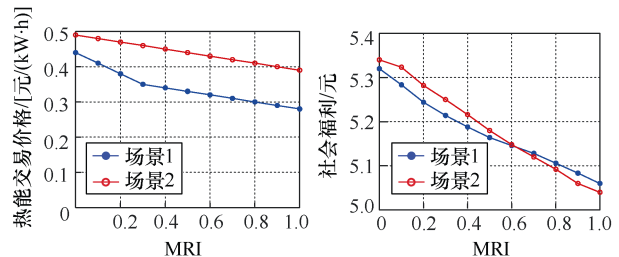
3) 产消者声誉指数与社会福利分析

下面探讨声誉指数对 P2P 交易结果和社会福利的影响。MRI 对 P2P 交易的影响如图 9 所示。针对相同时段内不同 MRI 下的能量交易进行两种情况的讨论。场景 1 表示节点 2 与节点 5 之间的电气产消者 B 与 E 的交易, 场景 2 表示节点 1 与节点 3 之间的多能产消者 A 与 C 的交易, 其中交易量为热能与电能的总和, 交易价格分别为电能价格和热能价格。以上场景均设定在交易高峰期的 10:00—11:00。



(a) 交易量随 MRI 的变化

(b) 电能交易价格随 MRI 的变化



(c) 热能交易价格随 MRI 的变化

(d) 社会福利随 MRI 的变化

图 9 MRI 对 P2P 交易的影响

从图 9 可以看出, 较高的 MRI 可以提升市场参与者在 P2P 能源交易中的积极性; 在相同时段内的场景 1 和场景 2 中, 随着 MRI 从 0 增加到 1, 交易

的能量分别上升了 71.3%和 75.1%，产消者之间的电能交易价格分别下降了 35.7%和 43.5%，热能交易价格分别下降了 36.3%和 20.4%。必须注意的是，虽然在交易中引入MRI会显著提升产消者参与交易的积极性，但对整体社会福利的影响较小。从图 9 (d) 可以看出，两种场景下社会总福利的下降幅度均不足 0.5 元，几乎可以忽略不计。同时，网络 1 的社会福利平均提升了 5.19 元。

#### 4) 网络服务费分析

为了研究单位服务费和能源传输距离对交易结果产生的影响，对目标函数中的参数  $c_{i,j}^{serv,p}$ ,  $c_{i,j}^{serv,q}$  进行敏感性分析。电能和热能的网络服务费根据交易能源类型分别计算。在相同时段内，产消者 A-E 和产消者 B-E 之间的电力 P2P 交易结果分别如图 10 (a)、图 10 (b) 所示。由图 10 (a)、图 10 (b) 可见，在相同时段内，当单位电/热服务费从 0 元增加到 1 元时，产消者 A 和 E 之间的交易量降低了 48.3%，交易价格提高了 68.1%；同理，产消者 B 和 E 之间的交易量降低了 26.4%，交易价格提高了 34.6%。随着单位服务费的增加，交易量减少，交易价格上升，这符合本文提出的基于交易路径的服务费定价机制，当产消者与电气距离或管道距离较近的其他产消者进行交易时，需支付的网络服务费相对较低。该机制能够激活本地能源交易，并促进当地能源消纳。从产消者 A 和产消者 E 之间的交易与产消者 B 和产消者 E 之间的交易对比来看，产消者 A 和产消者 E 之间的交易量和交易价格的变化率更高。

对于电-热 P2P 交易，产消者 A-C、产消者 A-D (分别对应节点 1 与 3、节点 1 与 4) 的交易结果如图 10 (c)、图 10 (d) 所示。产消者 A 和 C 之间的交易量减少了 58.6%，交易价格上升了 146.7%；同理，产消者 A 和 D 之间的交易量下降了 65.4%，交易价格上升了 154.5%。通过对比产消者 A 和 C 与产消者 A 和 D 的交易同样可以看出，产消者 A 和 D 之间的交易量和交易价格变化率更高。这种情况可以从交易双方的电气距离和管道距离来解释。根据图 4 的电-热网络拓扑结构，产消者 B 和产消者 E 之间的电气距离小于产消者 A 和产消者 E 之间的电气距离；同样，产消者 A 和产消者 C 之间的管道距离小于产消者 A 和产消者 D 之间的管道距离。因此，距离越远，交易量和交易价格的变化率越大。

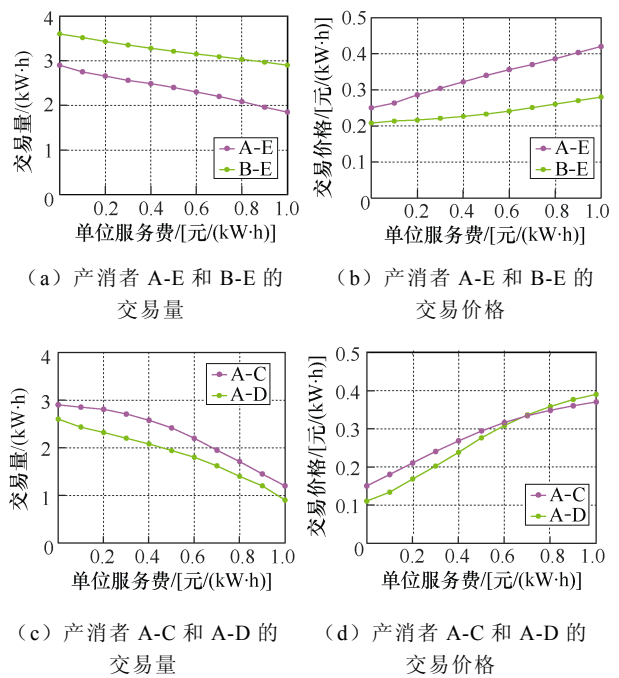


图 10 产消者的交易量和交易价格

以上分析表明，能源输送距离越远，导致电/热服务费越高，引起交易量减少。产消者更倾向于与距离较近的其他产消者进行能源交易，意味着更多的能源能够就近消费，从而有效促进了能源的本地消纳。

#### 5) P2P 交易可扩展性分析

为了验证 P2P 能源交易的可扩展性，本文进一步在较大规模的多能源网络 2 中进行测试。网络 2 基于扩展后的 33 节点配电网<sup>[24]</sup>和 23 节点供热网构建，拓扑如图 11 所示，图中注释与图 4 相同，电-热产消者位置已在图中标出。网络 2 详细参数列于附录 A，部分仿真结果列于附录 B。网络 2 中总成本平均降低了 18.31%，社会福利提升了 5.24 元，总交易量提升了 44%。

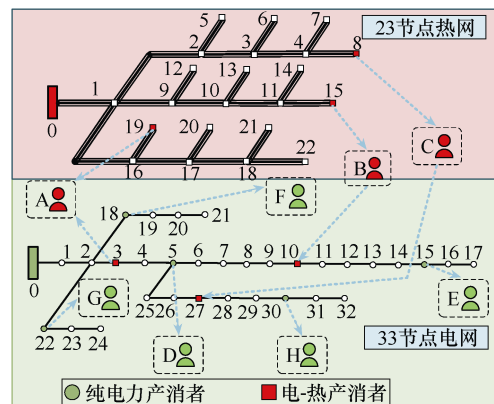


图 11 网络 2 拓扑

两种不同的多能源网络计算性能分析见表 3, 两个网络的收敛精度、最大迭代次数、罚函数相同。由表 3 可知, 对比网络 1, 网络 2 迭代次数增加 54.35%, 求解时间增加 51.37%, 大致呈线性增长, 表明 ADMM 具有良好的可扩展性。仿真结果表明, ADMM 在不同规模的多能源网络中均表现出良好的计算效率。基于表 3 结果可以得出结论: ADMM 在 P2P 能源交易问题中的计算效率较高, 且在较大规模的多能源网络中依然具有良好的可扩展性。

表 3 两种不同的多能源网络计算性能分析

项目	网络 1	网络 2
产消者数量	5	8
案例 2 求解时间/s	406.51	615.32
案例 2 迭代次数	46	71

## 4 结论

本文针对电-热综合能源系统, 提出了一种以产消者为中心的 P2P 交易策略, 综合考虑网络服务费和参与者交易意愿, 并通过不同网络配置下的仿真验证了其有效性。主要结论如下:

1) 增强能源共享与降低成本。该 P2P 交易策略有效协调了产消者之间的能源共享, 降低了个体产消者和系统整体的能源成本, 网络 1 中总成本平均降低了 20.4%。

2) 基于网络服务费机制激活本地市场。所提网络服务费定价机制能够激励本地能源交易, 促进当地能源消纳, 网络 1 中总交易量提升了 51%。

3) 提升社会福利与市场活跃度。该 P2P 交易策略提高了交易量, 优化了资源分配, 提升了社会福利, 展现出构建高效去中心化能源市场的潜力, 网络 1 中社会福利提升了 5.19 元。

4) 为进一步验证方法的可扩展性, 仿真系统由网络 1 扩展至网络 2, 网络 2 中总成本平均降低了 18.31%, 社会福利提升了 5.24 元, 总交易量提升了 44%, 表明该策略适用于更大规模的能源系统。

## 参考文献

- [1] 江美慧, 许镇江, 张其朴, 等. 面向综合能源系统的综合需求响应策略及其建模技术[J]. 电力建设, 2024, 45(12): 65-82.
- [2] 周玮, 王誉颖, 芝昕雨, 等. 计及 P2P 市场产消者灵活性的配电网阻塞管理[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(15): 91-104.
- [3] 荆朝霞, 李煜鹏, 赵昱宣, 等. 能源系统低碳转型背景下的混合电力市场体系结构与设计与设计[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(11): 24-36.
- [4] 何英静, 王曦冉, 王文涛, 等. 电力市场背景下考虑设备投资潜在价值的输电网规划[J]. 电气技术, 2022, 23(12): 1-8.
- [5] 张光儒, 任浩栋, 马振祺, 等. 提升配电网承载力和调节能力的整县分布式光伏储能配置方法[J]. 电气技术, 2022, 23(11): 49-55, 61.
- [6] 胡健, 于娣, 张晓杰. 电力 P2P 交易中计及社会福利的产消者合作联盟[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(3): 960-971.
- [7] 刘任, 刘洋, 许立雄, 等. 计及分布式需求响应的多微电网系统协同优化策略[J]. 电力建设, 2023, 44(5): 72-83.
- [8] 缪雅慧, 焦燕, 徐浩. 含储能的多能互补系统功率控制方案[J]. 电气技术, 2024, 25(5): 75-80.
- [9] 李晓蕾, 刘军会, 张艺涵, 等. 基于混合博弈的虚拟电厂优化运行与 P2P 交易机制[J]. 供用电, 2024, 41(12): 13-22.
- [10] 罗清局, 朱继忠. 基于改进交替方向乘子法的电-气综合能源系统优化调度[J]. 电工技术学报, 2024, 39(9): 2797-2809.
- [11] 吴孟雪, 房方. 计及风光不确定性的电-热-氢综合能源系统分布鲁棒优化[J]. 电工技术学报, 2023, 38(13): 3473-3485.
- [12] XUE Yixun, SHAHIDEHPOUR M, PAN Zhaoguang, et al. Reconfiguration of district heating network for operational flexibility enhancement in power system unit commitment[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(2): 1161-1173.
- [13] 林雨眠, 熊厚博, 张笑演, 等. 计及新能源机会约束与虚拟储能的电-热系统分布式多目标优化调度[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 5042-5059.
- [14] ANOH K, MAHARJAN S, IKPEHAI A, et al. Energy peer-to-peer trading in virtual microgrids in smart grids: a game-theoretic approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1264-1275.
- [15] WILKINSON S, HOJCKOVA K, EON C, et al. Is peer-to-peer electricity trading empowering users? Evidence on motivations and roles in a prosumer business model trial in Australia[J]. Energy Research & Social Science, 2020, 66: 101500.
- [16] MALDET M, REVHEIM F H, SCHWABENEDER D, et al. Trends in local electricity market design:

regulatory barriers and the role of grid tariffs[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 358: 131805.

- [17] ALI L, AZIM M I, PETERS J, et al. Blockchain-based local energy market enabling P2P trading: an Australian collated case study on energy users, retailers and utilities[J]. IEEE Access, 2022, 10: 124429-124447.
- [18] ULLAH M H, PARK J D. Peer-to-peer energy trading in transactive markets considering physical network constraints[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 3390-3403.
- [19] TUSHAR W, SAHA T K, YUEN C, et al. Grid influenced peer-to-peer energy trading[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1407-1418.
- [20] FROLKE L, SOUSA T, PINSON P. A network-aware market mechanism for decentralized district heating systems[J]. Applied Energy, 2022, 306: 117956.
- [21] ZHOU Yue, WU Jianzhong, LONG Chao. Evaluation of peer-to-peer energy sharing mechanisms based on a multiagent simulation framework[J]. Applied Energy, 2018, 222: 993-1022.
- [22] JING Rui, XIE Meina, WANG Fengxiang, et al. Fair P2P energy trading between residential and commercial multi-energy systems enabling integrated demand-side management[J]. Applied Energy, 2020, 262: 114551.
- [23] HUANG Ting, SUN Yi, JIAO Mengting, et al. Bilateral energy-trading model with hierarchical personalized pricing in a prosumer community[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 141: 108179.
- [24] YAO Shuhan, WANG Peng, ZHAO Tianyang. Transportable energy storage for more resilient distribution systems with multiple microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 3331-3341.

## 附录 A

表 A.1 33 节点配电网阻抗参数

始端	末端	电阻/ $\Omega$	电抗/ $\Omega$
1	2	0.092 2	0.047 0
2	3	0.493 0	0.251 1
3	4	0.366 0	0.186 4
4	5	0.381 1	0.194 1
5	6	0.819 0	0.707 0

(续表 A.1)

始端	末端	电阻/ $\Omega$	电抗/ $\Omega$
6	7	0.187 2	0.618 8
7	8	0.711 4	0.235 1
8	9	1.030 0	0.740 0
9	10	1.044 0	0.740 0
10	11	0.196 6	0.065 0
11	12	0.374 4	0.123 8
12	13	1.468 0	1.155 0
13	14	0.541 6	0.712 9
14	15	0.591 0	0.526 0
15	16	0.746 3	0.545 0
16	17	1.289 0	1.721 0
17	18	0.732 0	0.574 0
2	19	0.164 0	0.156 5
19	20	1.504 2	1.355 4
20	21	0.409 5	0.478 4
21	22	0.708 9	0.937 3
3	23	0.451 2	0.308 3
23	24	0.898 0	0.709 1
24	25	0.896 0	0.701 1
6	26	0.203 0	0.103 4
26	27	0.284 2	0.144 7
27	28	1.059 0	0.933 7
28	29	0.804 2	0.700 6
29	30	0.507 5	0.258 5
30	31	0.974 4	0.963 0
31	32	0.310 5	0.361 9
32	33	0.341 0	0.530 2
21	8	0.898 0	0.577 0
9	15	0.457 0	0.232 0
12	22	0.702 2	0.532 0
18	33	0.644 0	0.702 2
25	29	0.613 0	0.515 6

表 A.2 23 节点供热网参数

始端	末端	长度/m	始端	末端	长度/m
1	2	1 600	11	14	225
2	3	525	12	15	225
3	4	525	12	16	1 050
4	5	525	2	17	525

(续表 A.2)

始端	末端	长度/m	始端	末端	长度/m
3	6	225	17	18	525
4	7	225	18	19	525
5	8	225	17	20	1 050
5	9	1 050	18	21	225
2	10	525	19	22	225
10	11	525	19	23	225
11	12	525	4	11	630
10	13	225	12	19	630

## 附录 B

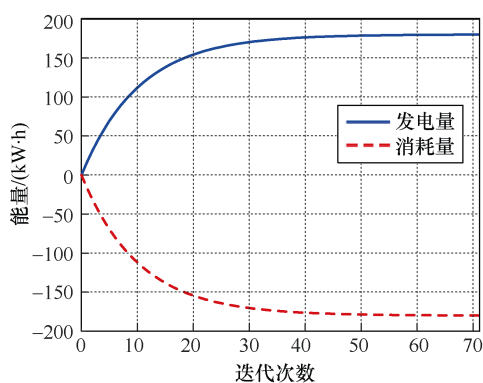


图 B.1 网络 2 总发电量和消耗量

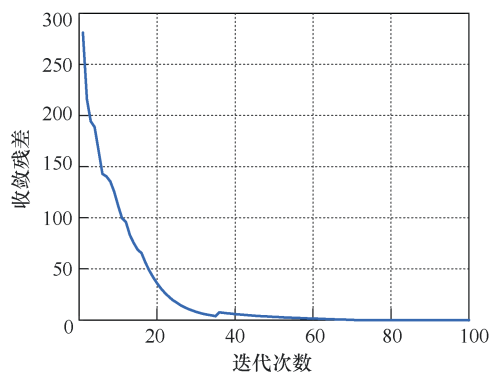


图 B.2 ADMM 收敛曲线 (网络 2)

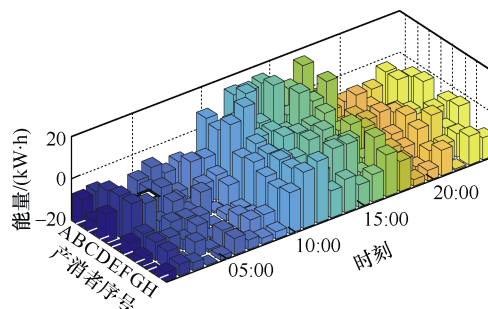


图 B.3 P2P 总交易量 (网络 2)

收稿日期: 2025-01-15

修回日期: 2025-02-25

作者简介

陈命邑 (1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力市场、分布式能源系统优化。

(上接第 16 页)

谱分析, 2023, 43(10): 3075-3080.

- [23] 牛芳鹏, 李新国, 白云岗, 等. 遗传算法和连续投影算法结合的土壤有机碳含量高光谱估算模型[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(7): 2232-2237.
- [24] 钱国超, 彭庆军, 彭惠. 变压器油中气体拉曼光谱光纤增强检测实验研究[J]. 云南电力技术, 2021, 49(6): 21-25.
- [25] PUNITHA N, DIVYA BHARATHI K, MANUSKANDAN S R, et al. Analysis of muscle fatigue progression using geometric features of surface electromyography signals and explainable XGBoost classifier[J]. Journal of Medical and Biological Engineering, 2024, 44(2): 191-197.
- [26] 韩璟琳, 冯喜春, 胡平, 等. 基于 Hyperopt-LightGBM 的直流配电网短期负荷抗噪声预测[J]. 高电压技术, 2024, 50(11): 4902-4911.

2024, 50(11): 4902-4911.

- [27] 王俊杰, 毕利, 张凯, 等. 基于多特征融合和 XGBoost-LightGBM-ConvLSTM 的短期光伏发电量预测[J]. 太阳能学报, 2023, 44(7): 168-174.
- [28] FRIFRA A, MAANAN M, MAANAN M, et al. Harnessing LSTM and XGBoost algorithms for storm prediction[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 11381.
- [29] 赖汶鸿, 刘庆珍, 鄢仁武. 基于关联信息熵和轻量级梯度提升机的油纸绝缘特征优选策略[J]. 电气技术, 2024, 25(1): 34-41, 47.

收稿日期: 2025-02-18

修回日期: 2025-03-01

作者简介

周宇含 (2000—), 男, 福建省福州市人, 硕士研究生, 研究方向为电力设备绝缘老化评估与智能故障诊断。