

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231608

## 计及 P2P 市场产消者灵活性的配电网阻塞管理

周 玮<sup>1</sup>, 王誉颖<sup>2</sup>, 芝昕雨<sup>1</sup>, 彭飞翔<sup>3</sup>, 许连春<sup>4</sup>, 高纪阳<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 国网重庆市电力公司市南供电分公司, 重庆 401336; 3. 安徽大学电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230601; 4. 国网辽宁省电力有限公司大连供电公司, 辽宁 大连 116001)

**摘要:** 多点接入的柔性负荷和可再生分布式电源会使配网潮流大小和方向频繁变动, 而配电侧产消者通常仅考虑自身效益最大为目标进行端对端(peer-to-peer, P2P)电能交易, 忽略了不同设备能量流动对系统安全运行的影响, 使得交易结果极易导致网络阻塞。针对采用连续双向拍卖机制和零智商增强型投标策略的分散式 P2P 交易模式所引起的配网阻塞, 兼顾产消者数据隐私管理和消费心理学影响, 提出一种两级市场动态协调阻塞管理方法。该方法以产消者综合效益最大和解决网络阻塞调节量最小为目标, 利用 Distflow 潮流模型, 构建基于节点边际电价的节点灵活性辅助服务价格计算模型。进而通过分布式优化算法求解得到阻塞成本, 将该成本按照 P2P 交易时序和线路阻塞贡献度分摊至有责任的产消者, 实现阻塞消除。算例采用 IEEE 33 节点改进的 11 节点配网系统, 结果表明该方法可在设定的时间尺度和计算精度条件下有效解决网络阻塞, 降低阻塞成本和分散式 P2P 电能交易的效益损失。

**关键词:** P2P 能源交易; 配电网; 阻塞管理; 分布式能源; 灵活性辅助服务

### Distribution network congestion management considering the flexibility of prosumers in P2P markets

ZHOU Wei<sup>1</sup>, WANG Yuying<sup>2</sup>, ZHI Xinyu<sup>1</sup>, PENG Feixiang<sup>3</sup>, XU Lianchun<sup>4</sup>, GAO Jiyang<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Shinan Power Supply Branch of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401336, China; 3. School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230601, China; 4. Dalian Power Supply Company, State Grid Liaoning Electric Power Company, Dalian 116001, China)

**Abstract:** Multi-point access of flexible loads and renewable distributed energy sources can lead to frequent changes in the magnitude and direction of distribution network flows. On the distribution side, prosumers often engage in peer-to-peer (P2P) energy trading with the sole goal of maximizing their own benefits, neglecting the impact of energy flows from different devices on the safe operation of the system. This makes transactions results easily lead to network congestion. This paper addresses the network congestion caused by the decentralized P2P trading model using continuous double auction mechanism and zero-intelligence enhanced bidding strategies, taking into account prosumer data privacy management and consumer psychology. A two-tier market dynamic coordination congestion management method is proposed. This aims to maximize the overall benefits of prosumers and minimize the adjustment of network congestion, using the Distflow model to construct a node flexibility ancillary service price calculation model based on node marginal electricity prices. Subsequently, the congestion cost is obtained through distributed optimization algorithms, and the cost is allocated to responsible prosumers based on the sequence of P2P transactions and the contribution of line congestion. This achieves elimination of congestion. A case study using an improved 11-bus distribution system based on the IEEE 33-bus system demonstrates that the proposed method can effectively address network congestion over specified time scales and computational accuracy conditions, reducing congestion costs and losses in decentralized P2P energy trading benefits.

This work is supported by the Joint Fund Key Project of National Natural Science Foundation of China (No. U22A20223).

**Key words:** P2P energy trading; distribution network; congestion management; distributed energy resources; flexibility ancillary services

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目资助(U22A20223); 安徽省高校科研项目资助(2023AH050074)

## 0 引言

为提升可再生能源发电量在区域能源供应中的比重,实现能源结构转型和“双碳”目标,我国先后出台了多项电力市场政策<sup>[1-3]</sup>来促进分布式能源(distributed energy resources, DER)<sup>[4]</sup>发展。对此,国内外有研究学者根据“共享经济”<sup>[5-6]</sup>概念,在区域电网范围内的经济层面提出了适用于本地产消者<sup>[7]</sup>的端对端(peer-to-peer, P2P)能源交易模式<sup>[8-10]</sup>,即各产消者<sup>[8]</sup>以自身效益最大化为目标在智能平台<sup>[11]</sup>中直接进行电能交易,降低了交易成本。但大多非专线供电的产消者在实际电能交换时仍通过公用线路传输,而配网侧具有一定规模的DER的分散式接入使线路潮流呈现双向流动特点,同时受气候和社会环境特征影响,产消者在时间上会出现“聚集”发用电现象,导致配电网发生线路阻塞。

配网阻塞本质上是因某些节点或区域的电能需求或供给太高引起的,使电能从较多区域流向较少区域,导致配网中某些线路功率违反安全运行约束。P2P能源交易具有市场中心化程度低、交易时间短、主体发用电决策灵活等特点,故传统电力库交易模式中阻塞调度<sup>[12]</sup>和中长期双边交易<sup>[13]</sup>模式无法很好地适应P2P市场特性。目前,针对P2P交易引起的网络阻塞解决方法主要有两类。第一类是在P2P交易机制和投标策略中考虑网络安全运行边界,即事前阻塞管理,使得最终电能交易结果不会违反线路功率或节点电压限制。文献[14-16]在P2P市场中将交易产生的额外费用作为“惩罚项”,以线路阻塞产生的惩罚费用高低引导交易走向,确保交易结果的安全性。文献[17]采用辅助服务市场和P2P能量市场联合出清方式处理网络阻塞。但事前阻塞方式需在P2P交易过程中考虑复杂的网络运行情况并及时反馈至每位市场参与者处,在日内或时前等短时间尺度上可能使分散式P2P市场效率降低,甚至可能出现P2P市场无法出清的情况。

第二类则遵循“价格引导市场”原则,在P2P交易过程中不考虑网络安全约束,市场主体自由投标并按照交易规则进行匹配及出清,当规定时段的交易完成后对所有成交的交易进行安全校核。若校验不通过,则使用市场化手段解决,确保电网满足安全运行要求。事后阻塞管理方式可以更好地激发本地能源价格优势,由价格反映当前系统中能源的供需关系和真实价值。文献[18]通过构建本地灵活性市场激励产消者进一步参与电能交易,解决了微

网日前阻塞问题。文献[19]基于通用能源框架构建了灵活性市场,旨在解决低压网络的日前阻塞问题。文献[20]利用聚合商的灵活特性,构建了由配电系统运营商(distribution system operator, DSO)主导的灵活性市场模型,并提出了相应的出清算法,以高效解决配网阻塞。文献[18-20]研究结果表明灵活性市场价格激励的高低直接决定了产消者可提供的灵活性调节裕度充足与否,进而决定了阻塞管理效果的好坏。文献[21]采用机会成本决定灵活性市场出清价格,确保提供灵活性辅助服务的产消者总体效益不会亏损。文献[22-23]通过协调时前能量市场和实时灵活性市场的双侧竞拍机制确定各市场价格,追求主体效益最大化的同时确保系统运行安全。文献[24]采用P2P能量市场和辅助服务市场顺次出清的方法解决配网阻塞问题。但文献[21-24]未针对具体的交易场景提出详细的激励机制和费用计算及分摊规则,导致阻塞损失和灵活性收益权责不清晰,不利于事后结算。事后阻塞管理可根据不同的P2P市场模式和交易方法确定两级市场运行的具体协调框架、交易机制、价格计算、出清原则以及费用结算和成本分摊等,须针对性地建立配网阻塞管理模型进行求解,以提高阻塞管理效率,降低阻塞成本。

本文针对时前分散式P2P电能交易导致的线路阻塞问题,提出两级市场动态协调机制和考虑P2P交易时序及阻塞贡献度的阻塞成本分摊机制。本文建立了基于Distflow潮流模型和配网节点边际电价的节点灵活性辅助服务价格模型,利用该价格激励分散式P2P市场主体提供灵活性辅助服务以消除阻塞,然后采用分布式优化算法对产消者优化模型和DSO阻塞管理模型进行降维求解,算例结果表明该阻塞管理方法能满足时前市场时间和精度的计算要求,提高了阻塞管理经济性,确保电网和市场安全稳定运行。

## 1 两级市场协调机制及阻塞管理框架

DSO阻塞管理采用两级市场动态协调机制,如图1所示。在P2P能量市场中,任何符合市场准入的产消者均可根据自身发用电预测数据和市场历史交易信息在P2P交易智能平台上投标。市场主体采用零智商增强型策略<sup>[25]</sup>进行报价,交易平台采用连续双向拍卖机制<sup>[26]</sup>,根据产消者事先给定的初始报价及利润率偏好进行自动匹配,匹配过程中按照交易机制和历史交易信息自动对每个产消者的利润率偏好进行调整,期间产消者无法主动修改报价,最

终交易结果包括不同成交价和成交量的 P2P 交易对。交易匹配失败的产消者的剩余能量可选择在下一时段交易或选择与大电网交易。交易时间截止后,本地能源市场运营商(local energy market operator, LEMO)对交易结果进行汇总,并上报给 DSO 进行安全校核。若校核不通过,则需 DSO 开放灵活性辅助服务市场(flexibility ancillary services market, FASM)来解决网络阻塞,在解决阻塞的同时获得辅助服务费用和阻塞成本。辅助服务费用以激励的形式按照设定原则补偿给中标的产消者,阻塞成本以惩罚的形式按照设定机制分摊给有阻塞责任的产消者,最终形各产消者以两级市场总中标量在规定时间内进行电能交换和事后结算。

基于节点灵活性辅助服务价格(flexibility ancillary services prices, FASP)的 DSO 阻塞管理框架如图 2 所示。在市场交易中心化程度较低时,产消者灵活性投标量的多少取决于 FASP 的高低,通常 FASP 越高,激励越强,产消者灵活性投标量越多,反之则越少。当灵活性投标总量不能解决线路阻塞

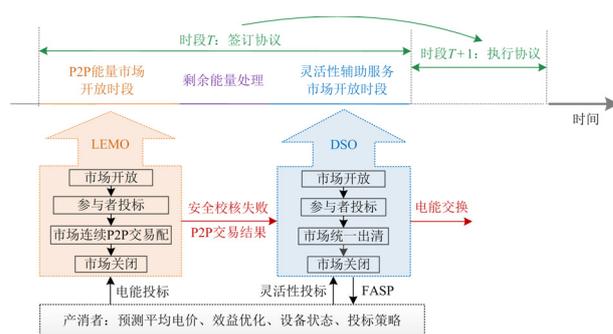


图 1 两级市场协调机制

Fig. 1 Coordination mechanism of two-tier market

时, DSO 会根据上一次灵活性投标情况重新计算节点 FASP 并将其反馈给各市场主体,主体根据更新后的节点 FASP,结合自身设备运行状态修改投标量,直到能解决线路阻塞为止。该方法利用 FASP 合理引导产消者调整发用电功率,能最大程度地避免因参与者灵活性投标不足而导致的 P2P 交易取消风险,同时考虑不同产消者的设备特性和响应特性,保障了阻塞管理的有效性和经济性。

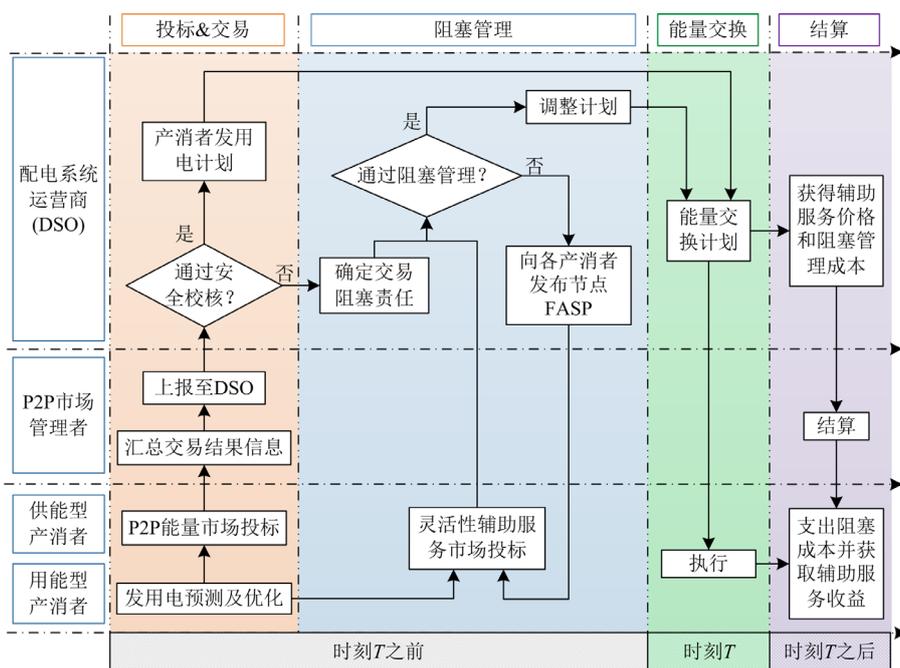


图 2 基于 FASP 的配电网阻塞管理框架

Fig. 2 FASP-based distribution network congestion management framework

## 2 阻塞成本计算及分摊模型

### 2.1 节点 FASP 计算模型

配网节点边际电价<sup>[27]</sup>能反映当前时刻系统不同运行情况下节点的实际能量价值,以经济信号引

导市场主体调整发用电行为以消除阻塞。在辐射状配网中,采用 Distflow 潮流模型<sup>[28]</sup>,通过引入对偶变量  $\gamma$  和  $\mu$ ,利用 Karush-Kuhn-Tucker 条件<sup>[29]</sup>可推导出节点  $j$  的配网节点边际电价(distribution local marginal price, DLMP)计算公式,如式(1)所示。式(1)

将节点  $j$  的 DLMP 表示为该节点的无功价格、父节点的有功价格和无功价格、相邻线路容量价格相关的函数。当出现与节点  $j$  相关的线路阻塞或电压阻塞时, 节点  $j$  的 DLMP 会相应升高或降低。

$$\pi_{\text{DLMP},j}^{t,k} = A_1^{t,k} \gamma_{A_j,p}^{t,k} + A_2^{t,k} \gamma_{j,q}^{t,k} + A_3^{t,k} \gamma_{A_j,q}^{t,k} + A_4^{t,k} \mu_{j,i^+}^{t,k} + A_5^{t,k} \mu_{j,i^-}^{t,k} \quad (1)$$

式中:  $\pi_{\text{DLMP},j}^{t,k}$  表示节点  $j$  在  $t$  时段中第  $k$  次采用交替方向乘法(alternating direction method of multipliers, ADMM)迭代计算时的 DLMP;  $A_j$  表示节点  $j$  的唯一父节点; 乘子  $\gamma_{A_j,p}^{t,k}$ 、 $\gamma_{j,q}^{t,k}$ 、 $\gamma_{A_j,q}^{t,k}$ 、 $\mu_{j,i^+}^{t,k}$ 、 $\mu_{j,i^-}^{t,k}$  分别对应  $t$  时段第  $k$  次 ADMM 迭代时节点  $A_j$  的有功平衡约束、节点  $j$  的无功平衡约束、节点  $A_j$  的无功平衡约束、以节点  $j$  为末端节点的线路  $l$  首端容量约束、以节点  $j$  为末端节点的线路  $l$  末端容量约束;  $A_1^{t,k} - A_5^{t,k}$  是与线路变量  $P_{ij}$ 、 $Q_{ij}$  和  $I_{ij}$  相关的非线性函数, 其具体表达式见附录 A 式(A1)~式(A5)。当  $t$  时段计算的节点  $j$  的 DLMP 收敛时, 可得到  $\pi_{\text{DLMP},j}^t$ 。

传统边际出清采用参与者报价报量形式, 所求 DLMP 在边际能量价格的基础上变化, 而本文设定 FASM 主体投标形式为报量不报价, 首次出清需确定每个节点 FASP 基础价格, 模型收敛时实际节点 FASP 在设定的基础值上下波动, 其表达式为

$$\pi_{\text{FASP},j}^t = \pi_{\text{FASP},B,j}^t + \pi_{\text{DLMP},j}^t \quad (2)$$

$$\Pi_i^{\text{FASP}} = \sum_{j=1}^N \left( \pi_{\text{FASP},j}^t \cdot \sum_{i \in \{i | i \Rightarrow j\}} P_{i,t}^{\text{dx}} \right) \quad (3)$$

式中:  $\pi_{\text{FASP},B,j}^t$  表示  $t$  时段由 DSO 根据接在节点  $j$  上所有产消者的 P2P 交易价格的算术平均值所确定的节点  $j$  的 FASP 基础价格, 元/kWh;  $\Pi_i^{\text{FASP}}$  表示  $t$  时段 DSO 按照节点 FASP 结算应支付给所有中标产消者的总辅助服务费用;  $P_{i,t}^{\text{dx}}$  表示  $t$  时段接在节点  $j$  上的产消者  $i$  的灵活性辅助服务中标量, kW;  $i \in \{i | i \Rightarrow j\}$  表示接在节点  $j$  上的产消者  $i$ 。

需说明的是, FASP 作为产消者获得的经济补偿计算依据, 而 DLMP 通常作为节点电价对接在该节点上的发电商和用户进行购售电结算依据, 两种价格的经济含义有本质区别。

## 2.2 阻塞成本分摊机制

如图 3 所示, 当  $t$  时段 P2P 交易结果导致线路阻塞时, DSO 根据 P2P 交易结果, 并按照 P2P 交易时间的先后顺序和其对阻塞线路的潮流贡献度逐一每笔 P2P 交易进行潮流计算。

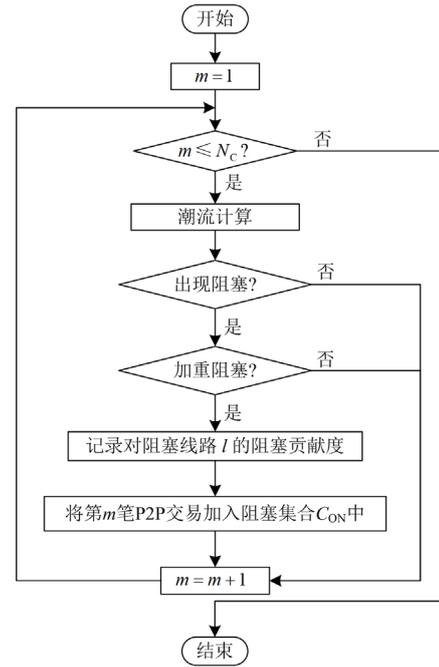


图 3 考虑阻塞责任的集合  $C_{\text{ON}}$  计算流程

Fig. 3 Process of calculating the set  $C_{\text{ON}}$  considering congestion responsibility

当网络中出现线路阻塞后, 且该笔 P2P 交易对阻塞线路的功率贡献与潮流阻塞方向一致时, 会被添加到阻塞责任集合  $C_{\text{ON}}$  中, 若该笔交易对线路阻塞没有贡献甚至具有缓解阻塞的效果时, 被认定为没有阻塞责任, 如此循环操作, 直到校验完所有 P2P 交易为止。对集合  $C_{\text{ON}}$  中  $t$  时段所有 P2P 交易双方收取的总阻塞费用为  $\Pi_i^{C_{\text{ON}}}$ :

$$\Pi_i^{C_{\text{ON}}} = \xi \cdot \Pi_i^{\text{FASP}} \quad (4)$$

$$P_{l,i,t}^{C_{\text{ON}}} = \sum_{m \in C_{\text{ON}}} P_{l,m,t}^{C_{\text{ON}}} \quad (5)$$

$$\Pi_{l,t}^{C_{\text{ON}}} = \Pi_i^{C_{\text{ON}}} \cdot \frac{P_{l,i,t}^{C_{\text{ON}}}}{\sum_{l=1}^{L_c} \sum_{m=1}^{N_c} P_{l,m,t}^{C_{\text{ON}}}} \quad (6)$$

式中:  $N_c$ 、 $L_c$  分别表示集合  $C_{\text{ON}}$  中的 P2P 总交易数和出现阻塞的总支路数;  $\xi$  为 DSO 设定的服务系数, 作为提供安全保障的电网公司所收取的服务费, 该费用可根据当下市场主体收益情况确定, 通常为略大于 1 的实数;  $P_{l,i,t}^{C_{\text{ON}}}$  表示  $t$  时段产消者  $i$  对阻塞线路  $l$  的总阻塞贡献度, kW;  $\Pi_{l,t}^{C_{\text{ON}}}$  表示  $t$  时段集合  $C_{\text{ON}}$  中产消者  $i$  需支付的阻塞成本, 元;  $P_{l,m,t}^{C_{\text{ON}}}$  表示  $t$  时段集合  $C_{\text{ON}}$  中第  $m$  笔 P2P 交易在阻塞线路  $l$  上的阻塞贡献值, kW, 该值定义为当线路  $l$  出现阻塞

后, 加入第  $m$  笔 P2P 交易进行潮流计算, 得到其在阻塞线路  $l$  上导致的有功变化量。当有功变化量小于等于 0 时, 该笔交易对线路  $l$  没有阻塞贡献, 即不会支出阻塞成本; 当有功变化量大于 0 时, 该笔交易对阻塞线路  $l$  有贡献, 且阻塞贡献度数值上与阻塞线路  $l$  的有功变化量相同。

### 3 多边协商阻塞管理方法

该方法中产消者建立效益优化目标和设备运行约束模型, DSO 建立阻塞调节量目标和网络安全运行约束模型, 通过设置辅助变量使各产消者和 DSO 之间进行信息交互, 采用迭代优化算法模拟协商过程, 最终实现最大化产消者两级市场总效益和解决网络阻塞的目的。产消者与 DSO 的两级市场动态协调阻塞管理具体流程见附录 A 图 A1。

#### 3.1 产消者效益优化模型

含不同类型发用电设备的产消者作为独立的经济个体, 不仅要让参与两级市场的综合效益尽可能多, 同时要考虑设备的运行成本尽可能低和用电舒适度尽可能高。本文纯光伏用户和刚性用户被认为不具备灵活性条件, 仅参与分散式 P2P 市场或向电网购电, 故不对其进行两级市场效益分析。

##### 3.1.1 储能型产消者优化模型

接在节点  $j$  上的光-储产消者  $i$  的目标包含最大化自身收益  $f_{pv1}(P_{i,t})$  和最小化储能寿命折损成本  $f_{pv2}(P_{i,t})$ , 如式(7)所示。约束条件包含储能充放电功率和荷电状态(state of charge, SOC)约束。

$$f_{pv}(P_{i,t}) = \begin{cases} \max f_{pv,1}(P_{i,t}) = \sum_{t=t_1}^T (P_{pv,i,t}^{P2P} \pi_{e,t} + P_{pv,i,t}^{flx} \pi_{FASP,j}^t) \Delta t \\ \min f_{pv,2}(P_{i,t}) = \sum_{t=t_1}^T C_{loss}^{es} (P_{es,ch}^t + P_{es,dis}^t) \Delta t \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} S_{OCes,t} = \frac{E(t-1) + \eta_c \cdot P_{es,ch}^t \cdot \Delta t}{E_B} \\ S_{OCes,t} = \frac{E(t-1) + P_{es,dis}^t \cdot \Delta t}{E_B} + \frac{P_{es,dis}^t \cdot \Delta t}{\eta_d E_B} \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} P_{es,ch,t}^{\min} \leq P_{es,ch,t} \leq P_{es,ch,t}^{\max} \\ -P_{es,dis,t}^{\max} \leq P_{es,dis,t} \leq P_{es,dis,t}^{\min} \\ S_{OCes,t}^{\min} \leq S_{OCes,t} \leq S_{OCes,t}^{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $P_{pv,i,t}^{P2P} \Delta t$  为产消者  $i$  在  $t$  时段参与 P2P 能量市场的中标电量;  $\Delta t$  为单位时间间隔;  $P_{pv,i,t}^{flx} \Delta t$  为产消

者  $i$  在  $t$  时段参与 FASM 的中标电量;  $P_{pv,i,t}^{P2P}$  为光伏发电功率和储能充放电功率的代数和;  $P_{pv,i,t}^{flx}$  为仅包含储能充放电功率的变化量;  $\pi_{FASP,j}^t$  为  $t$  时段节点  $j$  的 FASP, 由 DSO 通过求解阻塞管理模型后计算得到, 并在辅助服务市场发布;  $\pi_{e,t}$  为  $t$  时段 P2P 市场中根据能源供需比预测得到的交易价格,

$\pi_{e,t} = \pi_t^{ToU} - \frac{sdr_t}{sdr_{\max}} (\pi_t^{ToU} - \pi_t^{FiT} \pi_t^{ToU} - \pi_t^{FiT})$ , 其中  $\pi_t^{ToU}$ 、 $\pi_t^{FiT}$  分别为销售电价和上网电价,  $sdr_{\max}$  对应一天中供需比最大时刻的值;  $C_{loss}^{es}$  为单位充放电电量对应的折损成本, 元/kWh;  $P_{es,ch}^t$  和  $P_{es,dis}^t$  分别为电池充、放电功率, 在  $\Delta t$  间隔内储能仅有一种工作模式, 即  $P_{i,t} = P_{es,ch}^t$  或  $P_{i,t} = P_{es,dis}^t$ ;  $t_1$  表示从当前时刻开始;  $T$  为设定的时间间隔总数;  $P_{es,ch,t}^{\max}$  和  $P_{es,ch,t}^{\min}$  分别为储能  $t$  时段充电功率上、下限;  $\eta_c$  和  $\eta_d$  分别为储能的充、放电效率;  $E_B$  为储能容量;  $P_{es,dis,t}^{\max}$  和  $P_{es,dis,t}^{\min}$  分别为储能  $t$  时段放电功率上、下限;  $S_{OCes,t}^{\max}$  和  $S_{OCes,t}^{\min}$  分别为储能  $t$  时段荷电状态上、下限。对于仅含有储能设备的负荷而言, 其目标  $f_{es}(P_{i,t})$  为自身购电成本和储能寿命折损成本最小, 约束条件同式(11)类似, 故不再赘述。

##### 3.1.2 电动汽车型产消者优化模型

对于含有电动汽车(electric vehicle, EV)的用能型产消者  $i$  而言, 不仅要考虑自身购电成本和灵活性辅助服务收益, 还要考虑因提供灵活性辅助服务而造成的出行满意度下降程度, 故其目标包含最小化购电成本和最大化 EVs 车主出行满意度, 如式(10)所示, 约束条件包含 EVs 的充电功率和电池 SOC 约束, 如式(11)所示。

$$f_{ev}(P_{i,t}) = \begin{cases} \min f_{ev,1}(P_{i,t}) = \sum_{t=t_1}^T (P_{ev,i,t}^{P2P} \pi_{e,t} - P_{ev,i,t}^{flx} \pi_{FASP,j}^t) \Delta t \\ \max f_{ev,2}(P_{i,t}) = \sum_{t=t_1}^T \left( 1 - \left| \frac{S_{OCfit,t} - S_{OCev,t}}{S_{OCfit,t}} \right| \right) \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} P_{ev,cha}^{\min} \leq P_{ev,cha}(t) \leq P_{ev,cha}^{\max} \\ S_{OCev}^{\min} \leq S_{OCev}(t) \leq S_{OCev}^{\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $P_{ev,i,t}^{P2P}$  为产消者  $i$  的刚性负荷功率与电动汽车充电功率的代数和;  $P_{ev,i,t}^{flx}$  为仅包含电动汽车充电功率的变化量;  $S_{OCfit,t}$  为车主在  $t$  时段出行设定的  $S_{OC}$

预期值,  $S_{OC, ev, t}$  由  $P_{ev, ch}(t)$  决定<sup>[30]</sup>, 当  $S_{OC, ev, t}$  越靠近预期值时车主的出行满意度越高, 反之越低;  $P_{ev, ch}(t)$  为 EVs 产消者在  $t$  时段的充放电功率, 本文暂不考虑 EVs 放电情况;  $P_{ev, cha}^{\max}$ 、 $P_{ev, cha}^{\min}$  分别为 EVs 的最大、最小充电功率;  $S_{OC, ev}^{\max}$  和  $S_{OC, ev}^{\min}$  分别是 EV 电池荷电状态的上、下限。

### 3.1.3 空调型产消者优化模型

对于含有空调(air conditioner, AC)负荷的用能型产消者  $i$  而言, 不仅要考虑自身购电成本和灵活性辅助服务收益最大, 还要考虑因此造成的用户用能舒适度下降程度。故其目标为两级市场综合效益最大和用电舒适度最大, 如式(12)所示, 约束条件包含空调用电功率和虚拟储能, 如式(13)所示。

$$f_{ac}(P_{i,t}) = \begin{cases} \min f_{ac,1}(P_{i,t}) = \sum_{t=t_1}^T (P_{ac,i,t}^{P2P} \pi_{e,t} - P_{ac,i,t}^{\text{flx}} \pi_{FASP,t}^t) \Delta t \\ \max f_{ac,2}(P_{i,t}) = \sum_{t=t_1}^T \left( 1 - \left| \frac{T_{set,t} - T_{ac,t}}{T_{set,t}} \right| \right) \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} P_{ac,i}^{\min}(t) \leq P_{ac,i}(t) \leq P_{ac,i}^{\max}(t) \\ 0 \leq S_{OCac,i}(t) \leq 1 \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $T_{set,t}$  为  $t$  时段产消者设定的室内温度, 当变量  $T_{ac,t}$  越接近  $T_{set,t}$  时, 舒适度越高, 反之越低;  $P_{ac,i}(t)$  为空调负荷在  $t$  时段的用电功率;  $P_{ac,i}^{\max}(t)$ 、 $P_{ac,i}^{\min}(t)$  分别为  $t$  时段空调负荷的最大和最小用电功率;  $S_{OCac,i}(t)$  为空调虚拟储能, 由  $P_{ac,i}(t)$  决定<sup>[31]</sup>。

针对不同类型产消者的多目标优化问题, 先采用 min-max 标准化<sup>[32]</sup>统一目标量纲, 再采用线性加权法<sup>[33]</sup>将多目标转换为单目标进行求解, 单目标优化模型采用内点法进行求解。

### 3.2 DSO 阻塞管理模型

当 P2P 交易结果安全校核失败时, DSO 在 FASM 中发布需求, 具备灵活可调能力的产消者均可投标。每个  $t$  时段 DSO 以解决阻塞的节点调整功率总和最小为目标出清 FASM, 如式(14)所示。阻塞管理时以 P2P 交易对为单位, 买卖双方同时调整功率, 以确保联络线交换功率波动最小, 避免给上级电网造成能量不平衡负担。约束条件为  $t$  时段配电网节点电压和线路潮流约束, 如式(15)所示。

$$\min f(P_{j,t}^{\text{flx}}) = \sum_{j=1}^N |P_{j,t}^{\text{flx}}| \quad (14)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} P_{Gj} - P_{Lj} = \sum_{k:j \rightarrow k} P_{jk} - \sum_{i:i \rightarrow j} (P_{ij} - r_{ij} |I_{ij}|^2) \\ Q_{Gj} - Q_{Lj} = \sum_{k:j \rightarrow k} Q_{jk} - \sum_{i:i \rightarrow j} (Q_{ij} - x_{ij} |I_{ij}|^2) \\ U_j^2 = U_i^2 + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \cdot \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} - 2(r_{ij} \cdot P_{ij} + x_{ij} \cdot Q_{ij}) \\ U_{i,t}^{\min} \leq U_{i,t} \leq U_{i,t}^{\max} \\ P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2 \leq (S_{ij,t}^{\max})^2 \\ (P_{ij,t} - I_{ij}^2 r_{ij})^2 + (Q_{ij,t} - I_{ij}^2 x_{ij})^2 \leq (S_{ij,t}^{\max})^2 \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $P_{j,t}^{\text{flx}} \Delta t$  为  $t$  时段灵活性辅助服务市场中节点  $j$  的电能调整中标量;  $S_{ij}$ 、 $S_{jk}$  分别为流过线路  $L_{ij}$  和  $L_{jk}$  的首端功率;  $k:j \rightarrow k$  为以节点  $j$  为父节点的子节点  $k$  的集合;  $i:i \rightarrow k$  为以  $j$  为子节点的父节点  $i$ ;  $I_{ij}$  为流过线路  $L_{ij}$  的电流;  $y_j$  为节点  $j$  的对地导纳;  $S_j$  节点  $j$  的注入功率,  $S_j = P_j + jQ_j$ ;  $z_{ij}$  为线路  $L_{ij}$  的阻抗;  $U_j$  为节点  $j$  的电压;  $P_{Gj}$  和  $P_{Lj}$  分别为节点  $j$  的电源有功和负荷有功;  $Q_{Gj}$  和  $Q_{Lj}$  分别为节点  $j$  的电源无功和负荷无功。

### 3.3 迭代优化算法

#### 3.3.1 交替方向乘子法(ADMM)

引入节点注入功率  $P_j^t$  的辅助变量  $\tilde{P}_j^t$  作为 DSO 和产消者之间的信息交换参数。当节点  $j$  上仅接有某一类产消者  $i$  时, 节点注入功率数值上与产消  $i$  在两级市场中的总中标量相等, 如式(16)所示。全局阻塞管理目标函数和约束分别如式(17)、式(18)所示。

$$\begin{cases} P_j^t = P_{i,t}^{P2P} + P_{i,t}^{\text{flx}} \\ P_{j,t}^{\text{flx}} = P_{i,t}^{\text{flx}} \end{cases} \quad (i \in \{i | i \Rightarrow j\}) \quad (16)$$

$$\min f = -f_{pv}(P_{i,t}) + f_{es}(P_{i,t}) + f_{ev}(P_{i,t}) + f_{ac}(P_{i,t}) + f(P_{j,t}^{\text{flx}}) \quad (17)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \text{式(9)、式(11)、式(13)、式(15)} \\ P_j^t = \tilde{P}_j^t \quad (j \in \{1, 2, \dots, N\}) \end{cases} \quad (18)$$

该模型变量数量较多, 全局计算效率较低, 故对其进行降维处理, 采用并行计算的方式提高计算速度, 进一步将式(17)写成增广拉格朗日函数形式得到式(19), 其中:  $\lambda_j^t$  为等式约束  $P_j^t = \tilde{P}_j^t$  对应的拉格朗日乘子;  $\eta$  为一正数。

$$f = -\sum_{n=1,2} f_{pv,n}(P_{i,t}) + \sum_{h \in \{es, ev, ac\}} f_h(P_{i,t}) + f(P_{j,t}^{fix}) + \sum_{t=t_1}^T \sum_{j=1}^N \left[ \lambda_j^t (P_j^t - \tilde{P}_j^t) + \frac{\eta}{2} (P_j^t - \tilde{P}_j^t)^2 \right] \quad (19)$$

ADMM 是一种分布式迭代优化算法, 在第  $k$  次优化计算中, 根据产消者类型将目标函数分解为 4 个子优化问题, 对应变量由  $t$  时段的  $P_{i,t}$ 、 $P_{j,t}^{fix}$ 、 $P_j^t$ 、 $\tilde{P}_j^t$ 、 $\lambda_j^t$  转变为  $t$  时段考虑迭代次数  $k$  的  $P_{i,t}^k$ 、 $P_{j,t}^{fix,k}$ 、 $P_j^{t,k}$ 、 $\tilde{P}_j^{t,k}$ 、 $\lambda_j^{t,k}$ , 第  $k$  次迭代各类产消者采用的计算模型如下所述。

#### 1) 供能型产消者优化模型

接在节点  $j$  上的每个供能型产消者  $i$  计算从当前时段  $t_1$  开始至设定周期  $T$  内的两级市场综合收益最大优化问题。

$$\begin{cases} \min f_1 = -\sum_{n=1,2} f_{pv,n}(P_{i,t}^k) + \sum_{t=t_1}^T \left( \lambda_j^{t,k} (P_j^{t,k} - \tilde{P}_j^{t,k}) + \frac{\eta}{2} (P_j^{t,k} - \tilde{P}_j^{t,k})^2 \right) \\ \text{s.t. 式(11)} \end{cases} \quad (20)$$

#### 2) 用能型产消者优化模型

接在节点  $j$  上的每个用能型产消者  $i$  计算从当前时段  $t_1$  开始至设定周期  $T$  内的综合成本最小优化问题。

$$\begin{cases} \min f_2 = \sum_{h \in \{es, ev, ac\}} f_h(P_{i,t}^k) + \sum_{t=t_1}^T \left( \lambda_j^{t,k} (P_j^{t,k} - \tilde{P}_j^{t,k}) + \frac{\eta}{2} (P_j^{t,k} - \tilde{P}_j^{t,k})^2 \right) \\ \text{s.t. 式(9) 或 式(11) 或 式(13)} \end{cases} \quad (21)$$

#### 3) DSO 优化模型

DSO 考虑所有节点  $j \in \{1, 2, \dots, N\}$ , 利用产消者在 FASM 中的灵活性报量解决配网当前时段  $t$  的阻塞问题。

$$\begin{cases} \min f_3 = f(P_{j,t}^{fix,k}) + \sum_{j=1}^N \left\{ \lambda_j^{t,k} (P_j^{t,k} - \tilde{P}_j^{t,k}) + \frac{\eta}{2} (P_j^{t,k} - \tilde{P}_j^{t,k})^2 \right\} \\ \text{s.t. 式(17)} \end{cases} \quad (22)$$

当系统中的节点  $j$  仅接有某一类产消者  $i$  时,  $P_{j,t}^{fix,k} = P_{i,t}^{fix,k}$ 。

#### 4) 更新 ADMM 乘子

优化得到的  $P_j^{t,k}$  和  $\tilde{P}_j^{t,k}$  用于更新计算  $t$  时段第  $k+1$  次迭代的 ADMM 乘子  $\lambda_j^{t,k+1}$ 。

$$\begin{cases} P_j^{t,k+1} \in \arg \min_{P_j^t} L_w(P_j^t, \tilde{P}_j^{t,k}, \lambda_j^{t,k}) \quad (w=1,2) \\ \tilde{P}_j^{t,k+1} \in \arg \min_{\tilde{P}_j^t} L_3(P_j^{t,k+1}, \tilde{P}_j^t, \lambda_j^{t,k}) \\ \lambda_j^{t,k+1} = \lambda_j^{t,k} + \eta(P_j^{t,k+1} - \tilde{P}_j^{t,k+1}) \end{cases} \quad (23)$$

当决策变量满足式(24)时, 证明此时 ADMM 算法收敛, 优化模型求得最优解。

$$\begin{cases} \|P_j^{t,k} - \tilde{P}_j^{t,k}\|_2 \leq \varepsilon \\ \|\tilde{P}_j^{t,k} - \tilde{P}_j^{t,k-1}\|_2 \leq \varepsilon \end{cases} \quad (24)$$

#### 3.3.2 Rockafellar 乘子法

针对 DSO 阻塞管理模型中的式(22), 将有约束优化模型转化为式(25)中的无约束优化模型, 求得  $t$  时段第  $k$  次迭代的乘子  $\gamma^{t,k}$  和  $\mu^{t,k}$  以及非线性函数  $A_1^{t,k} - A_5^{t,k}$ , 从而计算得到  $\pi_{DLMP,j}^{t,k}$ , 进而计算得到  $\pi_{FASP,j}^{t,k}$ , 然后将  $\pi_{FASP,j}^{t,k}$  反馈至各产消者处, 准备第  $k+1$  次迭代计算。

$$\begin{aligned} f &= f(P_{j,t}^{fix,k}) + \sum_{j=1}^N \left[ \lambda_j^{t,k} (\tilde{P}_j^{t,k} - P_j^{t,k}) + \frac{\eta}{2} (\tilde{P}_j^{t,k} - P_j^{t,k})^2 \right] + \\ &\sum_{p=1}^{2N+L} \gamma_p^{t,k} h_p(x) + \frac{C}{2} \sum_{p=1}^{2N+L} h_p^2(x) + \\ &\frac{1}{2C} \sum_{q=1}^{2(N+L+M)} (\max^2\{0, Cg_q(x) + \mu_q^{t,k}\} - (\mu_q^{t,k})^2) \end{aligned} \quad (25)$$

式中:  $L$  为支路总数;  $M$  为 P2P 交易对总数;  $x$  为节点和支路相关的变量集合, 包括节点电压、支路功率和 P2P 交易对调整量;  $h_p(x)$  为包含式(2)和式(5)的标准等式约束集合;  $\gamma_p^{t,k}$  为  $t$  时段第  $k$  次迭代等式约束  $h_p(x)$  对应的乘子;  $g_q(x)$  为包含式(17)和 P2P 交易调整量的标准不等式约束集合;  $\mu_q^{t,k}$  为  $t$  时段第  $k$  次迭代不等式约束  $g_q(x)$  对应的乘子;  $C$  为一较小正数。

式(25)中子优化问题的乘子  $\gamma_p^{t,k}$  和  $\mu_q^{t,k}$  需进行修正, 如式(26)所示。

$$\begin{cases} x^{t,k+1} = \arg \min_x L(x, \gamma^{t,k}, \mu^{t,k}) \\ \gamma_p^{t,k+1} = \gamma_p^{t,k} + Ch_p(x^{t,k+1}) \quad (p=1, 2, \dots, 2N+L) \\ \mu_q^{t,k+1} = \max\{0, Cg_q(x^{t,k+1}) + \mu_q^{t,k}\} \\ \quad (q=1, 2, \dots, 2(N+L+M)) \end{cases} \quad (26)$$

最终, DSO 阻塞管理优化模型采用乘子法计算的收敛准则如式(27)所示。

$$\sum_{p=1}^{2N+L} h_p^2(x^{t,k}) + \sum_{q=1}^{2(N+L+M)} \left( \max \left( g_q(x^{t,k}), -\frac{\mu_q^{t,k}}{C} \right) \right)^2 < \varepsilon^2 \quad (27)$$

### 4 算例分析

算例网架采用 IEEE 33 节点改进后的 11 节点配电系统<sup>[16]</sup>, 见附录 A, 输入参数见附录 A。采用 2017b 版 Matlab 进行仿真计算。

#### 4.1 P2P 交易结果及阻塞管理效果分析

如表 1、表 2 所示, 11 时进行的 9 笔 P2P 交易总结果会导致网络出现阻塞情况, 其中交易 T5、T8 分别导致线路 L3、L8 出现反向潮流越限, 结合分散式 P2P 交易, “时间优先, 价格优先” 的特点, 该现象说明在分散式 P2P 市场交易过程中, 越早成交的 P2P 交易, 其线路容量的使用份额越大, 即该笔交易造成线路阻塞的可能性越小。算例中 DSO 通过最优解下的 FASP 计算得到阻塞成本  $\Pi^{CON}$ , 再除以本时段阻塞量得到单位阻塞价格, 为 1.3594 元/kWh, 远高于 P2P 交易双方成交的单位价格。该阻塞价格可激励 P2P 市场参与者尽早投标、尽快成交以及尽量避免受到阻塞惩罚, 支付阻塞成本, 即在兼顾中标率和自身效益的前提下调整利润率, 最终提高 P2P 市场整体交易效率。

表 1 分散式 P2P 市场交易结果

Table 1 Decentralized P2P market trading results

交易编号	卖方编号	买方编号	价格/(元/kWh)	电量/kWh
T1	S4	B1	0.642 378	520.947
T2	S4	B6	0.611 539	11.553
T3	S2	B6	0.626 379	457.373
T4	S1	B5	0.600 052	377.003
T5	S1	B4	0.574 021	426.274
T6	S1	B3	0.586 840	175.581
T7	S3	B3	0.610 601	194.127
T8	S3	B2	0.620 038	350.901
T9	S2	B2	0.624 100	114.360

表 2 阻塞责任集合  $C_{ON}$

Table 2 Congestion responsibility set  $C_{ON}$

交易编号	卖方编号	买方编号	电量/kWh	价格/(元/kWh)	阻塞线路	阻塞贡献/kW
T5	S1	B4	426.274	0.574 021	L3	75.994
T8	S3	B2	350.901	0.620 038	L8	44.272

如图 4 红色折线所示, 在中午光伏较多的 11 时, 所有光-储产消者都会尽量多地出售电能, 导致线路 L3 和 L8 出现反向阻塞, 总阻塞量为 120.265 kW。

如图 5 所示, DSO 通过在 FASM 中发布灵活性辅助服务需求, 获得了 125.101 kW 的下调裕度, 灵活性分别来自于卖方 S2、S3 和买方 B2、B6, 此时光-储卖方通过储能多充电提供下调灵活性, 买方通过降低设备用能舒适度提供下调灵活性。图 4 绿色折线表明 DSO 阻塞管理后的线路功率均在安全范围内, 验证了本文所提方法的有效性。

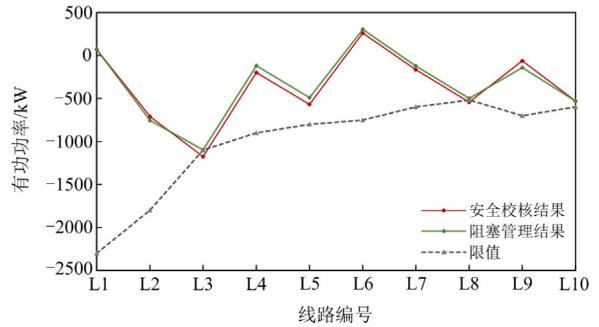
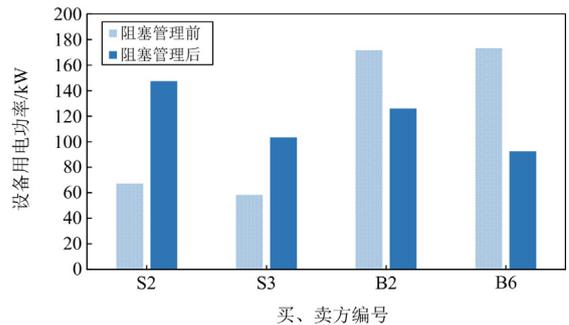
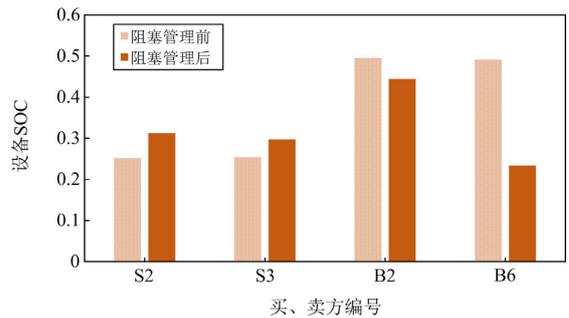


图 4 阻塞管理前后线路有功功率分布情况

Fig. 4 Line active power before/after congestion management



(a) P2P 市场买卖双方用电功率变化



(b) P2P 市场买卖双方设备 SOC 变化

图 5 阻塞管理前后产消者设备状态变化

Fig. 5 Changes in prosumer's equipment condition before/after congestion management

#### 4.2 两级市场参与者成本效益分析

如图 6 所示, 针对线路反向阻塞情况, 阻塞线路下游节点需降低节点功率净注入, 对于电源节点

(光-储产消者所接节点)而言, 提供灵活性不仅会减少本时刻的售电收益, 还会增加储能的寿命折损成本, 因此电源节点的 FASP 较高, 且均高于该时刻的预测平均电价 0.6118 元/kWh(红色虚线), 只有这样才能激励产消者主动提供灵活性服务。对于负荷节点而言, 用电功率的隐性成本来自于用户对设备的使用舒适度或满意度降低, 该隐性成本相较于电源显性收益的降低具有更大的弹性, 且受用户主观调整意愿影响较大, 故 DSO 用低于 0.6118 元/kWh 的 FASP 便可激励用能型产消者调整设备功率, 达到阻塞消除目的。

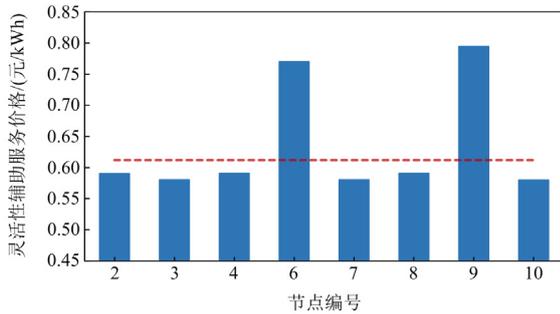
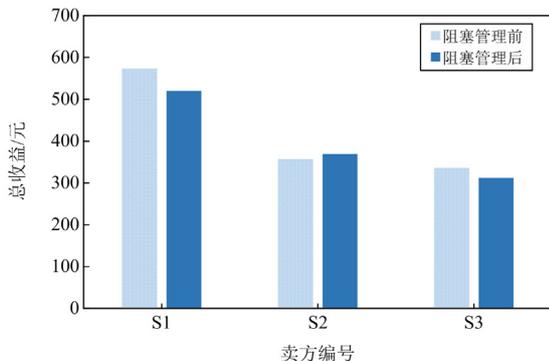


图 6 节点灵活性辅助服务价格(FASP)

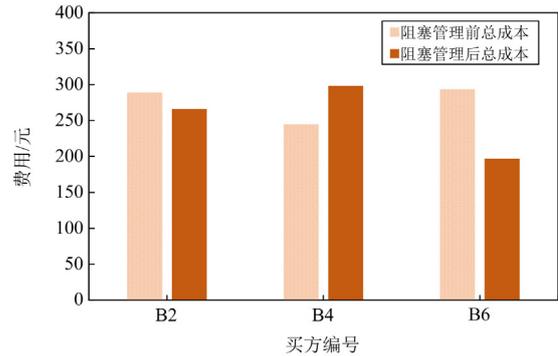
Fig. 6 Local flexibility ancillary service price (FASP)

图 7 分别为支付了阻塞费用或获得了灵活性收益的卖方总收益变化和买方总效益变化, 针对成本收益有变化的买卖双方, 可将其分为以下三类。

1) 有阻塞责任, 无灵活性收益。如 S1、B4, 因节点 FASP 较低, 不足以弥补其提供灵活性产生的机会成本, 故 S1 发电计划没变, 使得与 S1 进行 P2P 交易的 B4 也不能提供灵活性, 这是由分散式 P2P 交易特性导致的。同时 S1 和 B4 均有阻塞责任, 需向 DSO 支付阻塞费用, 故最终 S1 的总收益降低, B4 总成本增加。因既没有灵活性收益且支付了阻塞费用, 故此类产消者因网络阻塞导致的效益损失较大。



(a) 卖方总收益变化



(b) 买方总成本变化

图 7 阻塞管理前后买卖双方总效益变化

Fig. 7 Changes in buyers and sellers total revenue before/after congestion management

2) 无阻塞责任, 有灵活性收益。如 S2、B6, 不仅没有阻塞费用支出, 还有灵活性收益, 故此类产消者的总效益会增加, 即 S2 总收益增加, B6 总成本减少。但因 S2 降低发电量会减少售电收益, 而 B6 降低用电量仅降低用能舒适度, 所以 S2 总收益增加的程度没有 B6 成本减少的程度大。

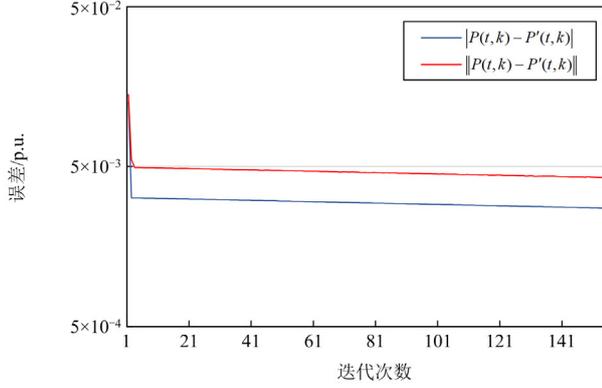
3) 有阻塞责任, 有灵活性收益。如 S3、B2, 此类产消者成本效益变化介于前两类之间。因灵活性收益可以弥补部分阻塞费用支出, 故 S3 总收益降低程度小于 S1; 同理, B2 成本降低程度小于 B6。

以上现象说明, 网络阻塞会造成有阻塞责任的产消者支出增加, 即总社会福利减少, 而产消者提供灵活性辅助服务能获得一定收益, 能降低社会福利减少的程度。因此, 无论产消者是否有阻塞责任, 其参与 FASM 辅助 DSO 解决线路阻塞就能尽量增加总效益或减少总效益损失, 即本文所提两级市场动态协调的阻塞管理方法能满足个体理性的假设, 可实现在确保网络安全运行的条件下, 尽可能提高产消者参与两级市场的经济性, 促进两级市场长久稳定运行。

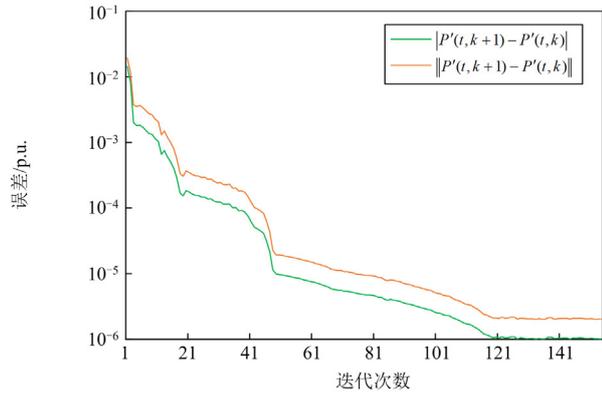
#### 4.3 迭代优化算法性能分析

如图 8(a)所示, 在 ADMM 算法优化过程中, DSO 计算的节点注入功率  $P'(t, k)$  和产消者计算的节点注入功率  $P(t, k)$  在有限的迭代次数内趋于稳定, 两者的误差数量级为  $10^{-4}$ , 即收敛点满足式(18)中的约束  $P_j' = \tilde{P}_j'$ 。DSO 根据  $P(t, k)$  计算的相邻迭代次数  $P'(t, k+1)$  和  $P'(t, k)$  之间的节点功率注入误差, 稳定时数量级为  $10^{-6}$ , 满足收敛精度, 如图 8(b)所示。本算例中每个产消者同时计算并更新辅助变量, 然后传递给 DSO, 其并行计算的平均时间约为

65.67 s, DSO 阻塞管理计算总时间约为 2 min, 故执行一次辅助服务交易出清所用总时长约为 3 min。考虑每个产消者的计算能力不同和通信延迟影响, 整体的实际计算时间与理论计算时间应较为接近, 即该算法的计算时间和精度认为可以满足时前市场的计算要求。



(a) 注入功率变量与辅助变量之间的误差



(b) 相邻迭代次数之间辅助变量的误差

图 8 节点功率注入误差变化

Fig. 8 Error variation of bus power injection

#### 4.4 方法优势对比

本文所提方法与目前较为常用的两种方法进行了对比, 在均能解决阻塞的前提下, 从 P2P 交易量变化以及总社会福利影响两方面进行分析, 如表 3 所示。需要说明的是, 本文总社会福利下降表示在 FASM 里所有中标的产消者因提供灵活性服务解决网络阻塞而导致其原 P2P 交易对中部分电量无法实际交付所产生的效益损失。

方法 1(M1): 直接取消有阻塞责任的 P2P 交易对<sup>[14]</sup>。

方法 2(M2): 考虑网络安全约束的 P2P 交易<sup>[34]</sup>。

方法 3(M3): 本文所提方法。

如表 3 所示, 在确保均能解决阻塞的前提下,

M3 的 P2P 总交易电量和总社会福利减少程度最低, 说明 M3 的经济性最好。虽然 M1 和 M2 解决阻塞的效果更好, 但 M1 和 M2 的经济性更低。在考虑市场效益的阻塞管理中, 既要考虑安全性, 又要考虑经济性, 还要考虑市场交易效率。因此, 通过对比表明 M3 优于其他两种方法。

表 3 方法对比结果

Table 3 Methods comparison results

方法	P2P 交易量下降占比	总社会福利下降占比	%
M1	25.73	24.09	
M2	14.26	4.03	
M3	8.53	3.89	

## 5 结语

两级市场动态协调机制利用节点灵活性辅助服务价格实现 DSO 与各产消者之间的良性互动, 提高了 DSO 阻塞管理的经济性。阻塞成本分摊至买卖双方的高低直接反映了产消者 P2P 交易对线路阻塞的影响程度, 实现了阻塞责任和成本支出的匹配。采用 ADMM 算法对全局优化问题进行降维处理, 提高了阻塞管理效率。通过改进的 11 节点配电系统算例得出以下结论:

1) ADMM 优化算法可在有限的迭代次数内达到收敛精度, 且各产消者和 DSO 的计算时间均能满足时前市场的计算效率要求;

2) 提出的阻塞定责和成本分摊方法不会影响产消者参与 P2P 交易的积极性, 同时能激励分散式 P2P 市场参与者更早投标、更快达成交易, 提高了电能市场交易效率;

3) 产消者参与灵活性辅助服务市场能使自身总效益增加或降低因网络阻塞导致的总效益损失。同时, DSO 也能利用产消者灵活性解决网络阻塞, 实现产消者个体理性前提下的激励相容。

## 附录 A

$$A_1^{t,k} = \frac{(P_{ij}^2 + Q_{ij}^2)x_{ij} + I_{ij}^2 Q_{ij} (r_{ij}^2 - x_{ij}^2) - 2I_{ij}^2 P_{ij} r_{ij} x_{ij}}{(P_{ij}^2 + Q_{ij}^2)x_{ij} - I_{ij}^2 Q_{ij} (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)} \quad (A1)$$

$$A_2^{t,k} = \frac{(P_{ij}^2 + Q_{ij}^2)r_{ij} - I_{ij}^2 P_{ij} (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)}{(P_{ij}^2 + Q_{ij}^2)x_{ij} - I_{ij}^2 Q_{ij} (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)} \quad (A2)$$

$$A_3^{t,k} = \frac{-(P_{ij}^2 + Q_{ij}^2)r_{ij} + I_{ij}^2 P_{ij} (r_{ij}^2 - x_{ij}^2) + 2I_{ij}^2 Q_{ij} r_{ij} x_{ij}}{(P_{ij}^2 + Q_{ij}^2)x_{ij} - I_{ij}^2 Q_{ij} (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)} \quad (A3)$$

$$A_4^{t,k} = \frac{2(Q_{ij}^3 r_{ij} - P_{ij}^3 x_{ij}) + 2P_{ij} Q_{ij} (P_{ij} r_{ij} - Q_{ij} x_{ij})}{(P_{ij}^2 + Q_{ij}^2)x_{ij} - I_{ij}^2 Q_{ij} (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)} \quad (A4)$$

$$A_5^{t,k} = \frac{2(Q_{ij}^3 r_{ij} - 2P_{ij}^3 x_{ij}) + 2P_{ij} Q_{ij} (P_{ij} r_{ij} - Q_{ij} x_{ij})}{(P_{ij}^2 + Q_{ij}^2)x_{ij} - I_{ij}^2 Q_{ij} (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)} + \frac{2I_{ij}^4 (Q_{ij} r_{ij}^3 - P_{ij} x_{ij}^3) - 4I_{ij}^2 P_{ij} Q_{ij} (r_{ij}^2 - x_{ij}^2)}{(P_{ij}^2 + Q_{ij}^2)x_{ij} - I_{ij}^2 Q_{ij} (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)} + \frac{4I_{ij}^2 r_{ij} x_{ij} (P_{ij}^2 - Q_{ij}^2)}{(P_{ij}^2 + Q_{ij}^2)x_{ij} - I_{ij}^2 Q_{ij} (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)} + \frac{-2I_{ij}^4 r_{ij} x_{ij} (P_{ij} r_{ij} - Q_{ij} x_{ij})}{(P_{ij}^2 + Q_{ij}^2)x_{ij} - I_{ij}^2 Q_{ij} (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)} \quad (A5)$$

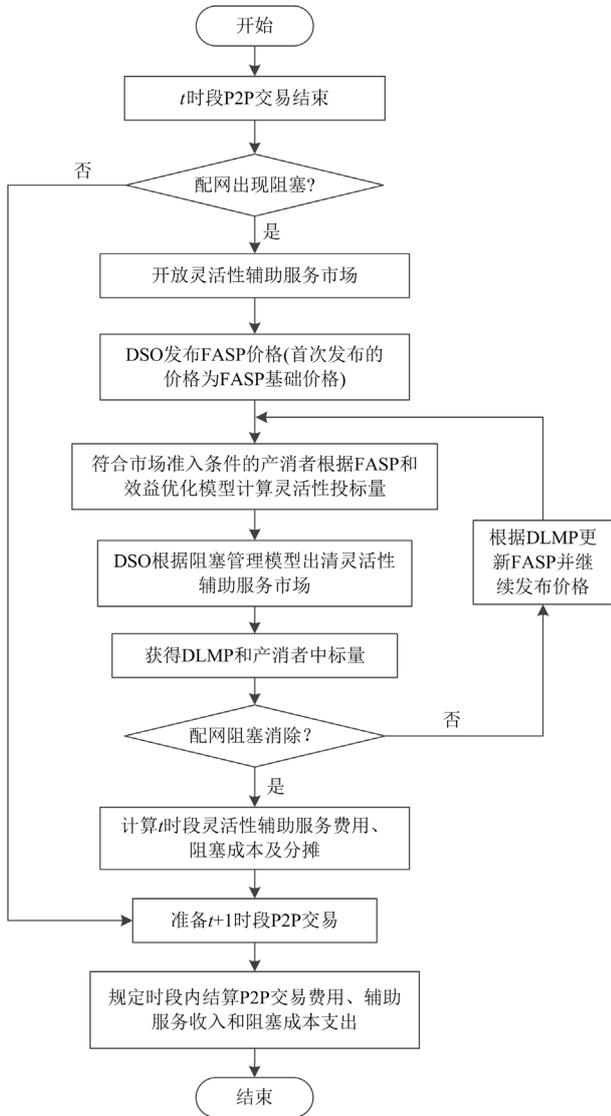
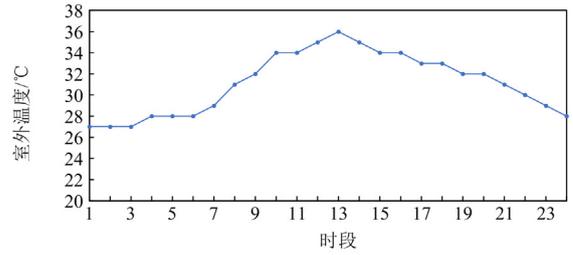
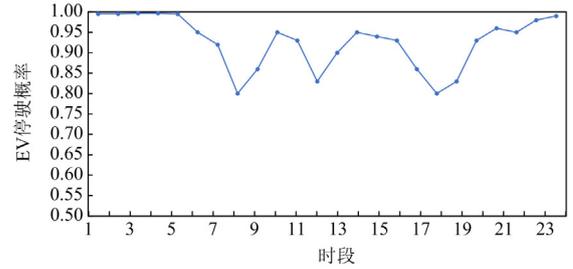


图 A1 基于两级市场动态协调的阻塞管理流程

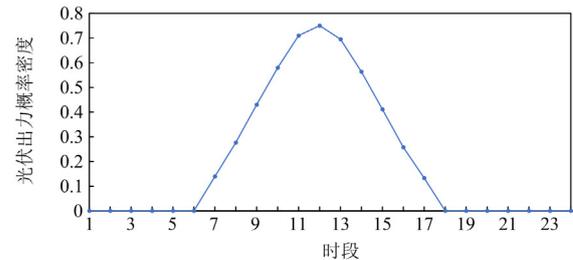
Fig. A1 Congestion management process based on dynamic coordination of two-tier markets



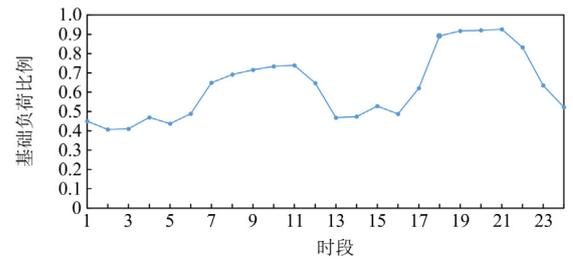
(a) 室外温度



(b) 电动汽车群驾驶概率



(c) 光伏出力概率密度



(d) 产消者基础负荷比例

图 A2 算例输入参数

Fig. A2 Input parameters of example

表 A1 空调负荷参数

Table A1 Air conditioning load parameters

空调用户编号	AC1	AC2	AC3
单体空调功率/kW	1	2	3
等效热阻 $R/(\text{°C}/\text{kW})$	4.92	4.12	3.32
等效热容 $C/(\text{kWh}/\text{°C})$	0.21	0.15	0.1
能效比 $(\text{W}/\text{W})$	2.6	2.6	2.6
聚合数量/台	220	180	150
初始设定温度/ $\text{°C}$	24	24	24

表 A2 11 节点系统支路参数

Table A2 Branch parameters of 11-bus distribution system

支路编号	支路首端	支路末端	电阻/ $\Omega$	电抗/ $\Omega$	线路容量/kW
L1	1	2	0.0922	0.047	2300
L2	2	3	0.493	0.2511	1800
L3	3	4	0.366	0.1864	1100
L4	4	5	0.3811	0.1941	900
L5	5	6	0.819	0.707	800
L6	2	7	0.164	0.1565	750
L7	7	8	1.5042	1.3554	600
L8	8	9	0.4095	0.4784	500
L9	3	10	0.4512	0.3083	700
L10	10	11	0.898	0.7091	600

表 A3 产消者 P2P 交易投标参数

Table A3 Bidding parameters for prosumer in P2P trading

买卖编号	基础电量/kWh	报价下限/(元/kWh)	报价上限/(元/kWh)
B1	450	0.4	1
B2	480	0.4	1
B3	500	0.4	0.94
B4	350	0.4	0.96

续表 A3

买卖编号	基础电量/kWh	报价下限/(元/kWh)	报价上限/(元/kWh)
B5	320	0.4	0.98
B6	400	0.4	0.92
S1	1500	0.41	1
S2	900	0.42	1
S3	850	0.44	1
S4	750	0.46	1

表 A4 电动汽车参数

Table A4 Electric vehicle parameters

参数	数值
$P_{ch}$ /kW	4.5
$M_C$ /kWh	0.456
$N_{ev}$ /辆	50
$\eta_{ch}$	0.9
$\eta_{dis}$	0.9
$B_C$ /kWh	27.3
$v$ /(km/h)	40
$S_{OC}^{min}$	0.2
$S_{OC}^{max}$	1

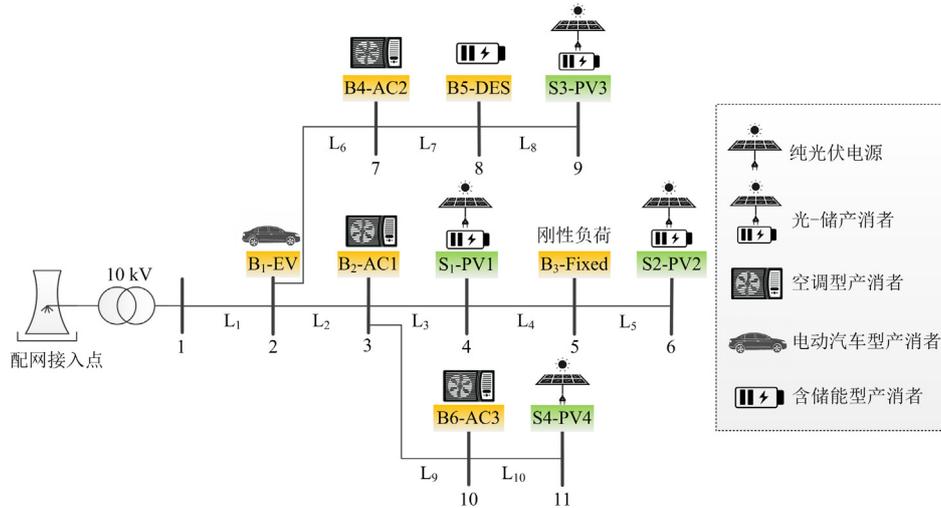


图 A3 含不同类型产消者的 11 节点配电系统图

Fig. A3 Diagram of 11-bus distribution system with different types of prosumers

参考文献

[1] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于开展分布式发电市场化交易试点的通知[EB/OL]. [2017-11-14]. [http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171113\\_3055.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171113_3055.htm). National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice on conducting pilot marketization transactions for distributed power generation[EB/OL]. [2017-11-14]. [http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171113\\_3055.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171113_3055.htm).

[2] 国家发改委. 关于 2021 年新能源上网电价政策有关事项的通知[EB/OL]. [2021-06-07]. [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-06/11/content\\_5617297.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-06/11/content_5617297.htm). National Development and Reform Commission. Notice on matters related to the 2021 new energy grid tariff policy[EB/OL]. [2021-06-07]. <http://www.gov.cn/zhengce/>

- zhengceku/2021-06/11/content\_56172\_97.htm.
- [3] 国家能源局综合司. 关于公布整县(市、区)屋顶分布式光伏开发试点名单的通知[EB/OL]. [2021-09-08]. [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/15/content\\_5637323.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/15/content_5637323.htm).  
Comprehensive Department of National Energy Administration. Notice on announcing the pilot list of roof distributed photovoltaic development in the whole county (city, district) [EB/OL]. [2021-09-08]. [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/15/content\\_5637323.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/15/content_5637323.htm).
- [4] 晏鸣宇, 王玲玲, 滕飞, 等. 面向分布式能源的可交易能源市场研究综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(18): 33-48.  
YAN Mingyu, WANG Lingling, TENG Fei, et al. Review and prospect of transactive energy market for distributed energy resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 33-48.
- [5] 嵇文路, 廖英祺, 荆江平, 等. 考虑热惯性的广义储能共享交易机制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(17): 178-186.  
JI Wenlu, LIAO Yingqi, JING Jiangping, et al. A generalized energy storage sharing mechanism considering thermal inertia[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(17): 178-186.
- [6] 詹祥澎, 杨军, 沈一民, 等. 基于价值认同的需求侧电能共享分布式交易策略[J]. 电力建设, 2022, 43(8): 141-149.  
ZHAN Xiangpeng, YANG Jun, SHEN Yimin, et al. Distributed trading strategy based on value recognition mechanism for power sharing at demand side[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(8): 141-149.
- [7] SORIANO L, AVILA M, PONCE P, et al. Peer-to-peer energy trades based on multi-objective optimization[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 131.
- [8] LONG C, WU J, ZHANG C, et al. Feasibility of peer-to-peer energy trading in low voltage electrical distribution networks[J]. Energy Procedia, 2017, 105: 2227-2232.
- [9] TUSHAR W, SAHA T K, YUEN C, et al. Peer-to-peer trading in electricity networks: an overview[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 3185-200.
- [10] 周玮, 高焱, 彭飞翔, 等. 基于模型预测控制的能源产消者端对端交易策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 1-10.  
ZHOU Wei, GAO Yao, PENG Feixiang, et al. Peer-to-peer energy trading strategy for prosumers based on model predictive control[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 1-10.
- [11] ZHANG C, WU J, ZHOU Y, et al. Peer-to-peer energy trading in a microgrid[J]. Applied Energy, 2018, 220: 1-12.
- [12] 赵一奇, 郭力, 刘一欣, 等. 计及阻塞管理的交直流柔性配电网协调优化调度方法[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 622-633.  
ZHAO Yiqi, GUO Li, LIU Yixin, et al. Coordinated optimal scheduling method of AC/DC flexible distribution network considering congestion management[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 622-633.
- [13] 杨洪明, 段献忠. 双边交易模式下基于 Aumann-Shapley 值的阻塞费用分摊方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 60-64.  
YANG Hongming, DUAN Xianzhong. A study of the Aumann-Shapley value based on allocation method for congestion cost in bilateral transaction environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 60-64.
- [14] GUERRERO J, CHAPMAN A C, VERBIC G. Decentralized P2P energy trading under network constraints in a low-voltage network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5163-5173.
- [15] BAROCHE T, PINSON P, LATIMIER G L R, et al. Exogenous cost allocation in peer-to-peer electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2553-2564.
- [16] NASIMIFAR M, VAHIDINASAB V, GHAZIZADEH M S. A peer-to-peer electricity marketplace for simultaneous congestion management and power loss reduction[C] // 2019 Smart Grid Conference (SGC), December 18-19, 2019, Tehran, Iran.
- [17] ZHANG K, TROITZSCH S, HANIF S, et al. Coordinated market design for peer-to-peer energy trade and ancillary services in distribution grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 2929-2941.
- [18] AMICARELLI E, TRAN Q T, BACHA S. Flexibility service market for active congestion management of distribution networks using flexible energy resources of microgrids[C] // 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), September 26-29, 2017, Turin, Italy.
- [19] AYMAN E, JULIO U, MARÍA M. Distribution-level flexibility market for congestion management[J]. Energies, 2018, 11(5): 1056-1079.
- [20] KHOMAMI P H, FONTEIJN R, GEELEN D. Flexibility market design for congestion management in smart distribution grids: the Dutch demonstration of the interflex project[C] // 2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), September 26-29, 2017, Hague, Netherlands.

- [21] 王小海, 齐军, 姜希伟, 等. 电力市场中灵活性产品的设计及交易机制研究[J]. 中国市场, 2020(5): 65-68.  
WANG Xiaohai, QI Jun, JIANG Xiwei, et al. Research on the design and trading mechanism of flexible products in the electricity market[J]. Chinese Market, 2020(5): 65-68.
- [22] 艾欣, 徐立敏. 考虑需求侧灵活性资源的区域市场电能共享模型[J]. 中国电力, 2022, 55(6): 53-64.  
AI Xin, XU Limin. A community energy sharing market model considering demand side flexible resources[J]. Electric Power, 2022, 55(6): 53-64.
- [23] FAIA R, PINTO T, VALE Z, et al. A local electricity market model for DSO flexibility trading[C] // 2019 16th International Conference on the European Energy Market (EEM), September 18-20, 2019, Ljubljana, Slovenia.
- [24] ZHOU Y, WU J, SONG G, et al. Framework design and optimal bidding strategy for ancillary service provision from a peer-to-peer energy trading community[J]. Applied Energy, 2020, 278.
- [25] CLI D. Minimal-intelligence agents for bargaining behaviors in market-based environments[R]. Hewlett-Packard Labs Technical Reports, 1997.
- [26] 热依娜·马合苏提, 周玮, 彭飞翔, 等. 考虑端对端交易与预测误差的配电网实时能量平衡策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(23): 1-15.  
REYINA·Mahesuti, ZHOU Wei, PENG Feixiang, et al. Real-time energy balancing strategy for distribution networks considering peer-to-peer trading and prediction errors[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(23): 1-15.
- [27] 刘志鹏, 林顺富, 钱亮, 等. 考虑金融输电权的配电网阻塞管理[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 86-94.  
LIU Zhipeng, LIN Shunfu, QIAN Liang, et al. Congestion management of a distribution network considering financial transmission rights[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 86-94.
- [28] FRANCO J F, RIDER M J, LAVORATO M, et al. A mixed-integer LP model for the optimal allocation of voltage regulators and capacitors in radial distribution systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 48: 123-130.
- [29] PAPAVASILIOU A. Analysis of distribution locational marginal prices[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4872-4882.
- [30] 孙辉, 沈钟浩, 周玮, 等. 电动汽车群响应的主动配电网阻塞调度研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5549-5559.  
SUN Hui, SHEN Zhonghao, ZHOU Wei, et al. Congestion dispatch research of active distribution network with electric vehicle group response[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5549-5559.
- [31] 王怡岚, 童亦斌, 黄梅, 等. 基于需求侧响应的空调负荷虚拟储能模型研究[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 394-401.  
WANG Yilan, TONG Yibin, HUANG Mei, et al. Research on virtual energy storage model of air conditioning loads based on demand response[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 394-401.
- [32] 朱兰, 周雪莹, 唐陇军, 等. 计及可中断负荷的微电网多目标优化运行[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1847-1854.  
ZHU Lan, ZHOU Xueying, TANG Longjun, et al. Multi-objective optimal operation for microgrid considering interruptible loads[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1847-1854.
- [33] 程浩忠, 高赐威, 马则良, 等. 多目标电网规划的一般最优优化模型[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(8): 1229-1232.  
CHENG Haozhong, GAO Ciwei, MA Zeliang, et al. General optimized model of multi-objective electricpower network planning[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(8): 1229-1232.
- [34] 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.

收稿日期: 2023-12-18; 修回日期: 2024-05-21

作者简介:

周 玮(1981—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为端对端能源交易、配电网调度与运行、智能电网能源管理; E-mail: zhouwei@dlut.edu.cn

王誉颖(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网阻塞管理、电力市场; E-mail: 512674347@qq.com

芝昕雨(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为虚拟电厂、电力市场。E-mail: 953834357@qq.com

(编辑 姜新丽)