

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211078

基于模型预测控制的能源产消者端对端交易策略

周玮¹, 高焱², 彭飞翔¹, 吴建中³, 党伟¹, 刘颖¹, 王钟辉⁴

(1. 大连理工大学电子信息与电气工程学部, 辽宁 大连 116024; 2. 国网吉林省电力有限公司经济技术研究院, 吉林 长春 130000; 3. 卡迪夫大学工程学院, 卡迪夫 CF24 3AA; 4. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110000)

摘要: 新能源政策市场化无补贴发展背景下, 为保障分布式光伏资源的消纳, 须探索有效的市场机制, 发挥用户调动灵活性资源的主动性。端对端(Peer-to-Peer, P2P)能源交易作为本地电力消费者和生产者间直接能源交易模式, 有利于局部区域功率平衡。采用连续双向拍卖市场机制, 提出基于模型预测控制的 P2P 市场交易策略。针对储能参与后的产消者电量投标决策问题, 利用模型预测控制滚动优化储能的充放电功率, 指导市场主体的电量投标。在此基础上, 将具有学习能力的增强零信息策略作为报价方法, 实现各主体的自主决策。辽西某区域电网算例结果表明: 所提方法能够有效调动市场主体的积极性, 指导其投标行为, 进一步增加个体收益, 提高配网接纳分布式光伏的能力。

关键词: 分布式光伏; P2P 能源交易; 连续双向拍卖; 模型预测控制; 灵活性资源

Peer-to-peer energy trading strategy for prosumers based on model predictive control

ZHOU Wei¹, GAO Yao², PENG Feixiang¹, WU Jianzhong³, DANG Wei¹, LIU Ying¹, WANG Zhonghui⁴

(1. Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Economic and Technological Research Institute of State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Changchun 130000, China;
3. School of Engineering, Cardiff University, Cardiff CF24 3AA, United Kingdom;
4. State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110000, China)

Abstract: Under the market development of new energy without subsidies, an effective market mechanism is necessary for ensuring the accommodation of distributed PV. It can also promote the initiative of participants. Peer-to-peer energy trading is a method, and it can make electricity consumers and producers trade directly and then facilitate local power balance. This paper proposes a P2P trading strategy based on a model predictive control method and continuous double auction. The model predictive control is used to optimize the charge and discharge power of energy storage in order to guide the electricity bidding of market players. To realize the autonomous decision-making of each participant, a zero-intelligence-plus strategy with learning ability is adopted as the bidding price method. The calculation results of a regional power grid in west Liaoning province show that the trading strategy of distributed P2P market based on model predictive control can guide the bidding behavior of users. This strategy can further increase the benefits of prosumers and improve distributed photovoltaic hosting capacity in distribution networks.

This work is supported by the National Natural Sciences Foundation of China (No. 61873048).

Key words: distributed photovoltaic; P2P energy trading; continuous double auction; model predictive control; flexibility resources

0 引言

十三五以来, 在一系列新能源产业政策扶持下, 我国分布式光伏并网规模持续扩大, 呈现城市和农

村全方位推进的态势。然而, 农村配电网规划建设严重滞后于新能源发展, 现有的调控手段受制于技术、经济、政策等现实因素无法有效提高局部区域光伏的消纳率。国家发展改革委、国家能源局联合印发的《关于积极推进风电、光伏发电无补贴平价上网有关工作的通知》^[1]中指出要促进风电、光伏

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61873048)

发电通过电力市场化交易无补贴发展,除户用、扶贫外,光伏发电已经从固定上网电价走到了全面竞价的时代。国家能源局综合司于 2021 年 6 月给出了《关于报送整县(市、区)屋顶分布式光伏开发试点方案的通知》^[2],并明确了试点工作应坚持市场主导和充分竞争的原则。在政策回归市场的大背景下,鼓励用户参与市场交易,充分发挥用户主动调动灵活性资源的市场作用,是促进局部功率平衡、保障分布式光伏资源消纳的重要手段。端对端(Peer-to-Peer, P2P)能源交易是在拥有小型分布式能源的用户、工厂等本地电力消费者和生产者之间的直接能源交易模式^[3],其可行性已经在全球众多示范项目中得到证明^[4]。

P2P 交易模式能够促使参与者改变发用电模式,实现利益最大化。目前已有文献将灵活性资源引入到 P2P 市场中,并证明这对于提高产消者的经济利益^[5-6]、减轻电网的运行压力、推迟新线路的投资建设具有重要意义。社区级 P2P 市场中,通常采用分布式储能^[7-8]和需求响应^[9-10]作为功率调节手段,实现社区整体购电成本最小,从而促进本地能源自平衡。以上文献均基于集中式的市场结构实现 P2P 交易过程,从全局角度调整灵活性资源功率,获取每个参与者的发用电计划,达到整个社区利润最大化的目标。在此基础上,采用 Shapley 值^[7]和 SDR^[8-9]等方法进行统一价格出清,实现利益分配。但集中式市场结构不能反映个体意愿,也难以保证所有参与者从中受益。

分散式市场是一种自下而上的管理模式,能够激励产消者通过管理其负荷、发电和储能等来采取积极主动的市场行为^[11]。连续双向拍卖(Continuous Double Auction, CDA)^[12]由于其直观的交易过程和良好的分配效率被广泛用于分散式 P2P 能源交易中。基于 CDA 理论的市场可视为竞争性市场,其中多个参与者之间相互竞争,而且每个个体可以独立决定其能源交易参数。目前相关文献主要从报价策略^[13-14]、影响评估^[15]和实现平台^[16]等角度展开研究,但大多没有考虑灵活性资源参与投标的问题。在 CDA 市场中,由于不具备中心管理者,没有统一的目标,产消者需要自主决定投标行为。这将促使其充分挖掘现有的功率调整能力,实现个体利益最大化。然而,利用灵活性资源实现功率调整与未来一段时间内的可再生分布式电源和负荷的预测结果及市场状态密切相关。因此,如何安排灵活性资源出力是市场参与者在决策投标电量时要解决的关键问题。文献[17]采用人工智能的方法实现了投标行为与产消者优化运行之间的耦合。但是该方法需

要大量的训练数据,现阶段难以获取,在一定程度上限制了它的应用。文献[18]针对社区级用户,将 P2P 交易问题等效为一个马尔科夫决策过程,并对各学习要素进行建模,通过供需比定价进而决策灵活性资源的分配。然而,在配电网中,用户交易电量相对较大,并不适合采用供需比定价的方式。针对配电网侧含储能的产消者,文献[19]采用交替方向乘法以总成本最小为目标在保证产消者隐私的前提下进行分布式求解,通过有限的信息交互实现了产消者 P2P 交易。文献[20]以含光伏、微型燃气轮机和固定负荷资源组成的多个产消者集群为研究对象,采用拉格朗日对偶分解原理和次梯度法,以产消者运行成本最小为目标,制定了基于 P2P 市场交易模式的产消者购售电计划。上述两篇文献都实现了分散式 P2P 电能交易灵活性资源的分配,但实质上是对总体优化目标的分布式求解,其整体目标函数体现的是整体利益最大化,不能实现产消者完全自主的决策。模型预测控制^[21-25](Model Predictive Control, MPC)通过预测模型、滚动优化和反馈校正 3 个内在过程形成闭环系统,时刻进行优化控制,以确保控制时域的最优性和实时性,避免大规模数据的训练过程,已经在经济调度^[26-28]和储能管理^[29-30]等方面取得良好效果。因此,本文采用 MPC 方法解决灵活性资源出力优化问题,指导用户的电量投标。

为体现市场参与者主观意愿,本文采用基于连续双向拍卖理论的分散式市场结构。其中,灵活性资源以分布式储能为例,针对储能参与后的产消者电量投标决策问题,提出对应的 P2P 市场投标策略:利用供需比来描述电价变化趋势,以个体购电成本最小为目标,基于 MPC 理论优化分布式储能的出力计划,从而决定投标电量;在此基础上,利用增强零信息报价策略(Zero-Intelligence Plus, ZIP)进行报价,通过对历史交易信息的学习得出合理的投标价格。算例结果表明:MPC 为具有灵活性资源的产消者参与 CDA 市场提供了有效的解决方法,能够进一步提高产消者参与 CDA 市场的经济效率。同时,证明了 MPC 方法和 CDA 市场的结合可以有效改善系统运行状态,提高光伏并网容量。

1 基于 CDA 理论的市场架构

1.1 P2P 市场结构

集中式的电力市场由控制中心从参与方收集信息,并根据既定的目标函数直接确定参与者的发/用电功率或其设备的运行状态。由于权力集中、信息不透明、规则不公开等问题会损害用户的用电意

愿和隐私, 难以保证获利的公平性, 不利于能源交易的长久发展。因此, 为创造透明、自由的交易环境, 采用分散式的市场结构, 如图 1 所示。该市场是一种去中心化的交易市场, 由于没有集中的协调者, 参与者能够完全掌控自身意愿, 并根据能源偏好和保留价值提交竞价或要价。

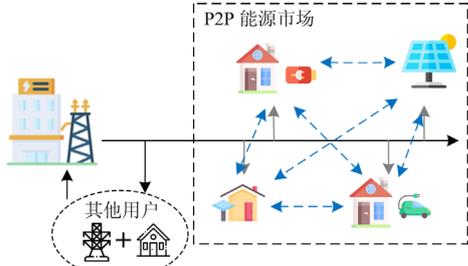


图 1 分散式 P2P 市场结构

Fig. 1 Decentralized P2P energy market structure

CDA 理论通常用于实现分散式能源交易过程, 为局部区域的产消者提供交易平台, 促进本地能量平衡。因此, 本文采用基于 CDA 理论的市场机制。市场主体分散决策、公平竞争, 能够提高能源交易的自主性、竞争性和公平性。

市场主体包括安装小型光伏系统的电力生产者和具有灵活性资源的电力消费者。目前关于不同形式灵活性资源已有大量研究成果, 本文的重点是探究所提交交易策略的有效性。因此, 本文建模时仅以分布式储能为例进行 P2P 交易策略的研究, 对于其他形式的灵活性资源, 仅需要引入其外部特性, 本文交易策略仍然具有适用性。

1.2 市场主体参与 CDA 市场过程

市场参与者通过通信系统向市场提交订单, 验证模块检查订单的有效性。如果通过检验则被转发到市场核心模块, 执行交易过程。否则, 订单无效, 退还用户。交易的结果通过市场输出单元进行记录并广播。如果买(卖)方提交的订单通过检验, 但此时售(购)电量已全部清空, 那么该订单将与主网进行交易。图 2 给出了市场主体参与 CDA 市场的过程。

1) 首先参与者 i 根据自身的实际情况进行投标决策。参与者 i 采用 MPC 方法决定投标电量: 预测市场各主体的发/用电功率, 通过估算市场的供需比来描述市场的电价变化趋势。以购电成本最小为目标优化储能的充放电功率, 基于储能的结果计算此时的投标电量 $\delta_{i,t}$ 。根据自身的边际成本/利益, 利用 ZIP 策略的学习能力, 动态地调整利润率, 计算投标电价 $\pi_{i,t}$ 。

2) 参与者 i 将投标信息 (δ_i, π_i) 提交到 P2P 市场

后, P2P 市场会根据报价是否超过市场允许的范围、交易的时间是否是当前时刻等规则检验订单的有效性。如果报价信息有效, 将会进入到相应的订单簿中排列, 并触发匹配过程。一旦交易成功, 将更新订单簿, 记录交易信息。其余个体将会根据输出单元发布的交易信息进行投标行为的调整。

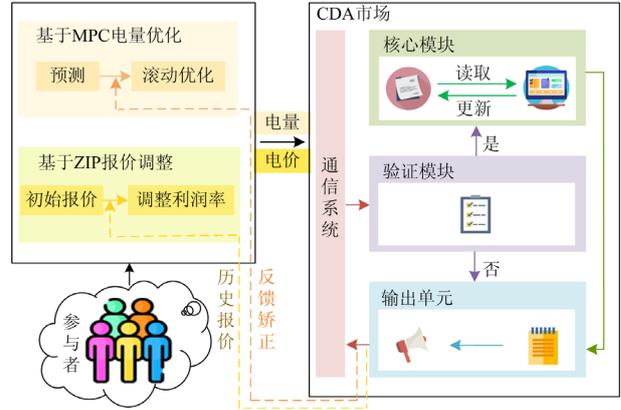


图 2 市场主体参与 CDA 市场过程

Fig. 2 Process of market participants participating in the CDA market

2 连续双向拍卖交易机制

CDA 给对交易感兴趣的买卖双方提供了能够灵活投标的市场机制, 在参与者 i 具有合理的投标目标时(参与者以获利为目的), 交易始终是帕累托改进的, CDA 是一种高效的市场机制^[31]。在 CDA 市场开放期间, 买卖双方可以随时提交报价。买方 i 的报价信息为 $O_{Bt}(B, \pi_{Bt}, \sigma_{Bt})$, 意味着买方 i 想要在 t 时刻以 π_{Bt} 的单价购买 σ_{Bt} 单位的电量, 卖方的信息 $O_{St}(s, \pi_{St}, \sigma_{St})$ 同理。出价和要价分别会在“买方订单簿”和“卖方订单簿”中进行排列。出价按价格降序排列, 而要价则升序排列, 价格相同时则按照报价时间顺序排列。买方订单簿中的最高价格称为最优出价 π_{Bt}^* ; 卖方订单簿中的最低价格称为最优要价 π_{St}^* 。有新的报价信息到达时, 立即触发匹配过程。CDA 能够对该信息进行实时匹配, 这使 CDA 不同于传统市场中高低匹配的撮合机制。图 3 给出了 CDA 市场的交易流程。具体如下所述。

1) 接收新的订单信息。在市场开放期间, 产消者可以随时提交报价。当有新的报价出现时, 将根据卖方或买方的身份在相应的订单簿中排序。

2) 判断交易是否发生。如果满足 $\pi_{Bt}^* \geq \pi_{St}^*$, 则会发生交易。交易电量为 σ_t , 交易价格为 π_t 。

$$\sigma_t = \min(\sigma_{Bt}, \sigma_{St}) \quad (1)$$

$$\pi_t = \frac{\pi_{Br} + \pi_{Sr}}{2} \quad (2)$$

3) 记录已成交订单并更新订单簿。能够完全交易的卖方或买方, 则从相应的订单簿中移除; 不能完全进行交易的卖方或买方按照下列原则更新订单信息:

$$\begin{cases} \sigma'_{Br} = \sigma_{Br} - \sigma_t \\ \sigma'_{Sr} = \sigma_{Sr} - \sigma_t \end{cases} \quad (3)$$

4) 判断交易是否结束。如果所有的交易都完成或到截止时间, 市场关闭。未能成功交易的个体可向主网进行购电或售电。

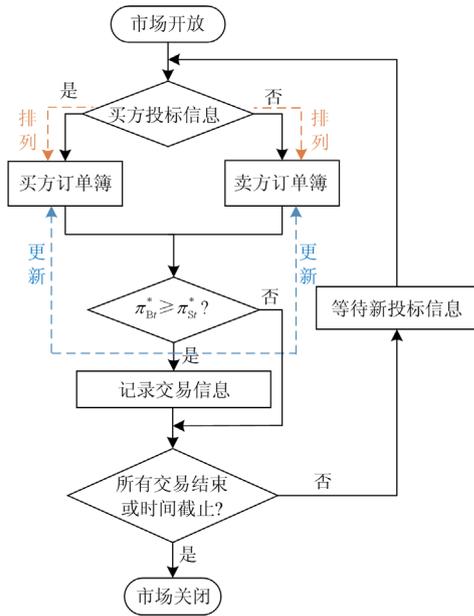


图3 CDA 市场交易流程图

Fig. 3 Flow chart of the trading in CDA market

3 投标策略

在 CDA 市场中, 产消者需要向市场提交投标价格和电量。在决定投标电量时, 需要明确储能的功率。但是储能的出力具有时序性, 不仅受荷电状态的约束, 也与未来一段时间内光伏发电和负荷功率的预测值相关。因此, 鉴于 MPC 方法具有前瞻性和实时性的特点, 本文采用 MPC 方法来优化储能的充放电功率, 并结合自身发用电情况, 实现产消者电量投标。为了简化复杂的决策过程, 本文中量和价的决策过程是独立进行的。即在进行电量投标的基础上, 再采用 ZIP 策略实现价格投标。

3.1 基于模型预测控制的电量投标

MPC 方法首先需要对不确定性因素进行预测, 并在每个采样间隔(从当前状态开始), 都会制定当前及未来时域内的计划。优化所得解序列中仅第一

步被真正执行, 并在每一个决策指令执行后的下一时刻, 通过实际测量到的系统输出量更新下一个预测范围的状态, 进行新一轮的优化, 如图 4 所示。本文通过预测模型, 滚动优化和反馈校正 3 个 MPC 的内在过程, 实现产消者对个体储能的实时优化控制。根据 MPC 过程得到的储能功率计算当前时段的投标电量, 控制过程如图 5 所示。

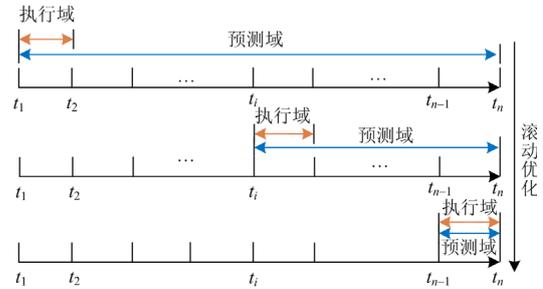


图4 基于 MPC 的多时段优化示意图

Fig. 4 Schematic diagram of multi-period optimization based on MPC

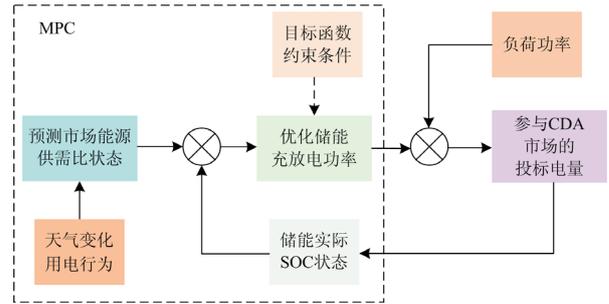


图5 基于 MPC 的储能优化控制过程

Fig. 5 Optimal control process of energy storage based on MPC

1) 预测模型

在 CDA 市场中, 每个交易对之间的交易价格不同, 交易对的匹配没有规律可循, 无法进行电价的预测。已有研究证明了 CDA 市场电价和能源状态的相关性^[15]。因此, 本文根据经济学中需求定理和供给定理^[32]的概念, 用市场中的能源供需比(Supply-Demand Ratio, SDR)表示市场平均电价的变化趋势, 电价和供需比的关系以反比例函数表示^[33]。

$$price_t = \frac{K}{SDR_t} \quad (4)$$

$$SDR_t = \frac{\sum_{i \in S} P_{S,i,t}}{\sum_{i \in B} P_{B,i,t}} \quad (5)$$

$$\begin{cases} P_{S,i,t} = P_{G,i,t} - P_{L,i,t} & P_{G,i,t} > P_{L,i,t} \\ P_{B,i,t} = P_{L,i,t} - P_{G,i,t} & P_{G,i,t} < P_{L,i,t} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $price_t$ 表示 t 时刻的市场电价; K 表示系数,

为正值; SDR_t 表示 t 时刻市场供需比; $P_{S,i,t}$ 表示卖方 i 在 t 时刻的售电功率; $P_{B,i,t}$ 表示买方 i 在 t 时刻的购电功率; $P_{L,i,t}$ 表示产消者 i 在 t 时刻的负荷功率; $P_{G,i,t}$ 表示发电功率。参与者可通过预测 P2P 市场的供需比, 估算电价曲线, 作为滚动优化的输入。 K 的取值不影响每个时段价格的变化趋势。

2) 滚动优化

优化的目标函数为用户 i 购电成本最小, 并基于电价变化趋势和储能的荷电状态生成预测域内的储能工作计划, 仅第一个控制策略被采纳。根据储能的优化结果计算该时刻的净负荷, 参与 P2P 市场投标。

$$\min C_i = \sum_{t=t_0}^{t=t_T} (P_{L,i,t} + P_{\text{bess},i,t} - P_{G,i,t}) \cdot \text{price}_t \quad (7)$$

$$P_{\text{bess},i,\max}^d \leq P_{\text{bess},i,t} \leq P_{\text{bess},i,\max}^c \quad (8)$$

$$\text{soc}_{i,t+1} = \text{soc}_{i,t} + \frac{P_{\text{bess},i,t}}{P_{\text{bess},i}} \quad (9)$$

$$\text{soc}_{i,\min} \leq \text{soc}_{i,t} \leq \text{soc}_{i,\max} \quad (10)$$

$$\text{soc}_{i,1} = \text{soc}_{i,t_T} \quad (11)$$

式中: t_0 是当前交易时段; t_T 是总交易时段; $P_{\text{bess},i,\max}^d$ 表示参与者 i 的储能最大放电功率; $P_{\text{bess},i,\max}^c$ 表示参与者 i 的储能最大充电功率; $P_{\text{bess},i,t}$ 表示参与者 i 的储能功率, 充电为正, 放电为负; $\text{soc}_{i,t}$ 表示参与者 i 储能 t 时段初始荷电状态; $\text{soc}_{i,\min}$ 表示参与者 i 储能的荷电状态最小值; $\text{soc}_{i,\max}$ 表示参与者 i 储能的荷电状态最大值; $\text{soc}_{i,1}$ 表示参与者 i 交易前初始储能荷电状态; soc_{i,t_T} 表示参与者 i 交易结束后储能的荷电状态; $t_0 + 1$ 时刻, 重复上述过程。

3) 反馈矫正

买方报价过低、卖方报价过高都会导致其电量不能完全被交易, 无法成功交易的个体可考虑是否和主网进行交易, 若不选择与主网交换功率, 则根据实际交易电量修改储能的荷电状态, 并更新光伏和负荷的预测值作为下一轮优化的初始值。

3.2 ZIP 报价策略

由于 ZIP (Zero-Intelligence Plus, ZIP)^[34] 策略可以对市场动态变化做出适当的响应以及根据市场信息进行自学习^[35], 在许多关于 P2P 交易的文献研究中得到应用。本文首先利用 MPC 方法得到 t 时刻市场主体的投标电量, 然后在市场能源状态确定的情况下, 进行 P2P 交易, 交易进行多个回合, 可达成

多笔交易。市场主体利用 ZIP 策略的学习能力, 根据市场内上一笔交易成交的结果, 调整报价, 增加交易机会。

h 时刻, 参与者 i 的初始报价为

$$p_{i,h} = \lambda_i (1 + \mu_{i,h}) \quad (12)$$

式中: λ_i 表示用户 i 的保留价格; $\mu_{i,h}$ 表示市场中 h 时刻的利润率。 $h+1$ 时刻的利润率根据 “Widrow-Hoff” 算法进行调整。

$$\mu_{i,h+1} = \frac{p_{i,h+1} - 1}{\lambda_i} \quad (13)$$

$$p_{i,h+1} = p_{i,h} + \Delta_{i,h} \quad (14)$$

$$\Delta_{i,h} = \beta_i (\Gamma_{i,h} - p_{i,h}) \quad (15)$$

$$\Gamma_{i,h} = R_{i,h} q_h + A_{i,h} \quad (16)$$

式中: β_i 表示交易主体 i 的学习步长; $\Gamma_{i,h}$ 为 h 时刻的目标报价, 式(16)表示目标报价和上一个报价 q_h 之间的关系。

$$\begin{cases} T_{i,h+1} = r_i T_{i,h} + (1 - r_i) \Delta_{i,h} \\ T_{i,0} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

为了防止预测值 $\Gamma_{i,h}$ 频繁地变化, 采用 $T_{i,h}$ 代替式(14)中 $\Delta_{i,h}$, r_i 是为阻尼系数, 每位参与者有各自的阻尼系数, 不随时间变化而变化。最后得到利润率 $\mu_{i,h+1}$ 的表达式如式(18)所示。

$$\mu_{i,h+1} = \frac{p_{i,h} + T_{i,h}}{\lambda_i} - 1 \quad (18)$$

对于卖方 i 来说, 当上一个报价被接受且 $p_{i,h} < q_h$ 时, 提高利润率; 当上一个报价是交易失败的且卖方要价 $p_{s,i,h} > q_h$ 或者上一个报价是成功交易的且买方出价满足 $p_{s,i,h} > q_h$, 则降低利润率。对于买方 i 来说, 当上一个报价被接受且 $p_{b,i,h} > q_h$ 时, 提高利润率; 当上一个报价是被拒绝的, 买方出价同时满足 $p_{b,i,h} < q_h$, 或者是成功交易的且卖方要价满足 $p_{b,i,h} < q_h$, 则降低利润率。

需要指出的是: 本文的核心工作在于如何解决灵活性资源参与 P2P 市场的电量投标问题。而在实际的投标决策过程中, 报价与报量之间以及市场参与者之间的投标行为是相互影响的。这些也是本文作者在今后下一步工作中着重研究的内容。

4 算例分析

本文以辽西某 66 kV 变电站下局部网络为算例进行仿真分析, 如图 6 所示。该变电站共安装两台 20 MVA 主变压器, 型号均为 SZ11-20000/66, 正常

运行方式为：2号变压器运行带全部负荷，1号变压器做热备用。10 kV 母线接入出线3回。在A线末端实行P2P市场，分别有4个小型光伏拥有者和4个用户参与。参与者的报价参数如表1所示(B代表买方，S代表卖方)。滚动优化阶段的时间步长为1 h，光伏和负荷信息采用神经网络^[36]方法进行预测。表1给出了各参与者的报价参数。

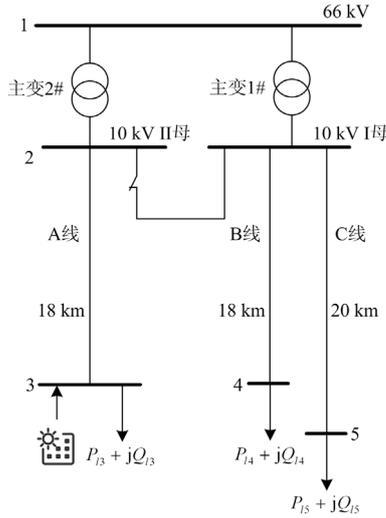


图6 66 kV 变电站下局部网络

Fig. 6 Local network under 66 kV substation

表1 P2P 市场参与者报价参数

Table 1 Bidding parameters of P2P energy market participants

编号	额定电量/MWh	报价最小值/元	报价最大值/元
B ₁	0.3	0.4	0.95
B ₂	0.35	0.4	1.05
B ₃	0.47	0.4	0.9
B ₄	0.4	0.4	1
S ₁	1.2	0.45	1
S ₂	2.3	0.55	1
S ₃	1	0.4	1
S ₄	1.5	0.5	1

4.1 市场交易过程分析

选择在市场关闭时、买卖双方均有电量剩余的典型交易市场进行交易过程和结果分析，双方交易具体结果如表2所示。

在交易周期内共达成了5笔交易，交易电量为2.1561 MWh，交易效率达到96.5%。卖方S₁和S₃的边际成本比较小，报价低，能够完全交易。而S₂和S₄报价高，交易机会小，并且此时属于供大于求的市场状态，导致其大量功率剩余在市场中。买方B₂的报价过低，且报价时间较晚，在市场关闭前没有及时调整价格，失去交易机会，剩余在市场中。

以(S₁, B₁)、(S₁, B₃)两笔交易为例，图7描述了CDA市场的交易执行过程。

表2 12:00时刻CDA市场的交易结果

Table 2 CDA market trading results at 12:00

已完成订单				
卖方编号	卖方 报价/元	买方编号	买方 报价/元	交易 电量/MWh
S ₁	0.6075	B ₁	0.6511	0.5041
S ₁	0.6075	B ₃	0.6681	0.3599
S ₃	0.5581	B ₃	0.6681	0.2599
S ₃	0.5634	B ₂	0.5649	0.4601
S ₂	0.6083	B ₄	0.6445	0.5721
未完成订单				
编号	剩余电量/MWh		报价/元	
B ₂	0.0780		0.5133	
S ₂	1.0838		0.5745	
S ₄	1.0800		0.5822	

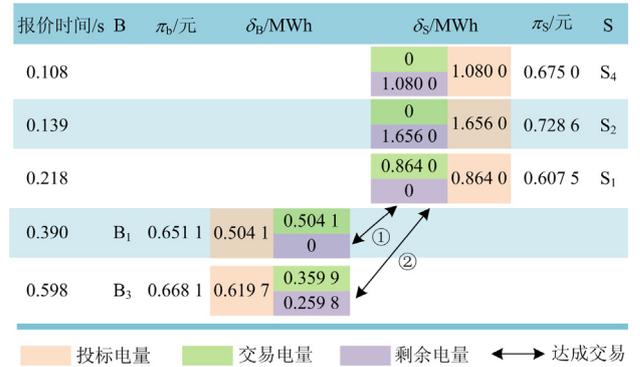


图7 12:00时刻CDA市场匹配过程

Fig. 7 CDA market matching process at 12:00

4.2 市场性能分析

传统电力市场通过控制中心集中撮合或者优化等方法匹配发用电双方，市场参与者只能被动地接受交易安排。由于权力集中，交易中心会发生内部暗箱操作损害交易的安全性和公平性。本文采用的CDA市场机制属于去中心化市场，没有集中的协调者。本文以市场与外部的购电成本最小作为集中式P2P市场的交易机制，并采用MMR^[37]方法作为定价机制，建立集中式市场。将CDA市场与集中式市场进行对比，分析CDA市场在保证市场主体自主意识、促进市场竞争方面的优势。

对上午11:00交易时段，分别采用用户自主决策的CDA市场和控制中心统一优化的集中式市场，表3列出了详细的交易信息。

由于本文只考虑用户侧带有储能，因此在两种市场下，售电量相同，购电量有所差异，但都属于供大于求的市场状态。在CDA市场中，由于S₂和

表 3 CDA 市场和集中式市场交易信息对比
Table 3 Comparison of transaction information between CDA market and centralized market

参数	交易结果	
	CDA 市场	集中式市场
售电投标电量/MWh	4.11	4.11
购电投标电量/MWh	2.384 7	2.196 7
剩余电量/MWh	S ₂ : 0.697 9	1.193 3
	S ₄ : 1.027 5	
结算电价/元	交易对决定	购电价: 0.7 售电价: 0.56

S₄的报价过高, 剩余在市场中, 只能低价售电给上级电网, 其利益的损失由个体单独承担, 不影响其他市场主体的收益; 在集中式市场下, 与上级电网交易的收益(成本)则体现在市场内部电价上, 由市场成员统一分担。CDA 市场的结算电价是成功匹配的交易对报价的平均值, 每个市场成员的交易价格不同; 在集中式市场中, 市场成员以相同的电价进行结算, 导致边际成本低的个体收益大, 成本高的个体收益小, 无法对每个市场成员进行公平分配。图 8 表示该交易结果下, 采用不同市场机制时市场主体的利益对比。

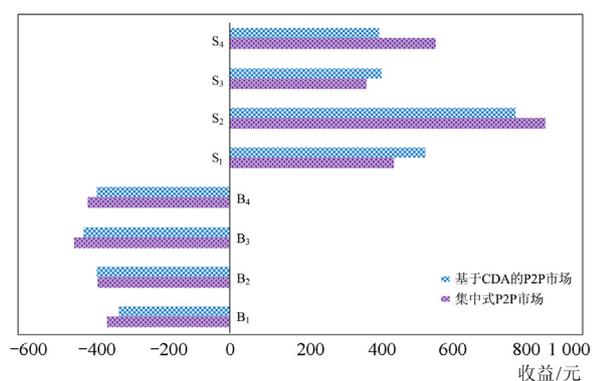


图 8 CDA 市场和集中式市场下的经济性对比

Fig. 8 Economic comparison between CDA market and centralized market

对于买方来说, 相较于集中式市场, B₁、B₃和 B₄三位用户在 CDA 市场中的购电成本更小, 而 B₂在 CDA 市场下投标的购电量更多, 但其购电成本无明显增加; 对于卖方来说, S₁和 S₃在 CDA 市场中能够交易全部电量, 交易价格由交易对决定, 比集中式市场统一结算的方式获得更高的售电收益, 而 S₂和 S₄报价过高导致大量电量剩余, 被动与电网以低价进行交易, 其交易结果由交易主体自行承担, 所以其售电收益小于集中式市场下的情况。由以上分析可知, 在 CDA 市场中, 用户能够自主决

定投标电价, 而投标电价影响市场主体的交易结果, 关系到切身利益。CDA 市场机制能够促进成员不断优化市场行为, 最终达到市场均衡, 创造良好的竞争性市场环境, 提升 P2P 市场自主性、竞争性和公平性。

为了证明本文提出的基于 MPC 方法投标策略的优越性, 分别采用 CDA 交易机制下的基于分时电价的 TOU(Time-of-Use)方法^[38]和本文方法进行对比分析。图 9 表示在 MPC 方法下及 TOU 方法下光伏的日收益对比, 图 10 表示 MPC 方法下及 TOU 方法下用户的日购电成本对比。在 TOU 方法中, 参与者以购电成本最小为目标, 利用电网的分时电价优化自身的发用电功率。由于算例中仅考虑了买方具有分布式储能, 因此, 采用本文方法时, 光伏生产者的售电收益略有提高; 但用户的购电成本相比于 TOU 方法, 所有用户个体成本都得到了降低, 其中用户 B₄降低程度最高, 达到 9%。由于电网的分时电价是根据大规模区域内用户的用能习惯制定的, 不能准确反映局部网络下的能源状态, 基于 TOU 方法的储能无法准确利用多余的光伏充电。采用本文方法时, 储能在 11:00—14:00 时段充电, 该时段光照充足, 光伏发电功率最大, 市场内的能

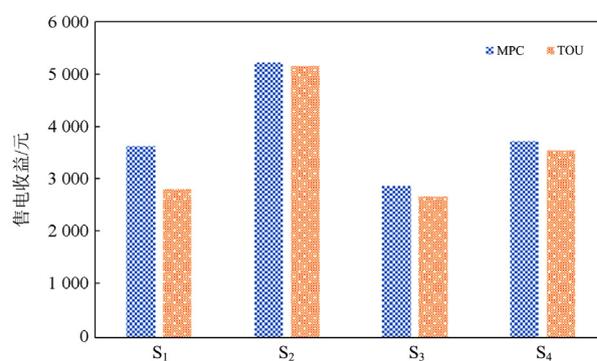


图 9 光伏的日收益对比

Fig. 9 Comparison of photovoltaic daily electricity sales revenue

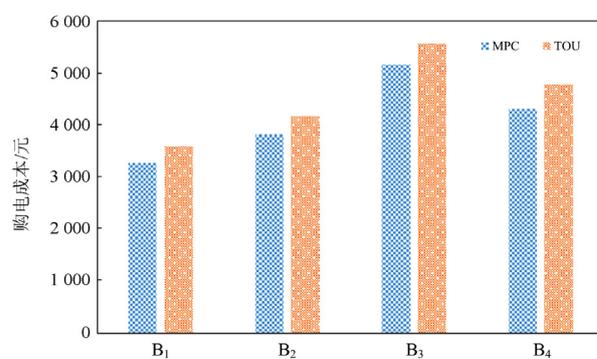


图 10 用户的日购电成本对比

Fig. 10 Comparison of users' daily energy costs

源供应远大于需求，由经济学中的供给定理可知，售电价格处于一天中的最小值，在该时段充电能够最小化购电成本。本文方法在每个时间节点重复进行预测和优化过程，所以可以针对不可预见的变化采取适当的控制，优化储能的充放电操作过程。MPC 与 CDA 市场的结合能够显著地提高市场主体的经济性，激励更多的产消者参与 CDA 市场，保证市场长期稳定运行。

4.3 配网对光伏的接纳能力分析

灵活性资源的合理调度能够平衡供需功率，促进可再生资源的消纳。本节通过与 TOU 方法进行对比，分析本文所提方法在提高分布式光伏的并网容量方面的优势。在 TOU 方法中，消费者根据电网的分时电价优化灵活性资源的功率，但是电网的分时电价不能准确地反映局部配网的能源状态。在这种情况下，灵活性资源的转移不能有效缓解光伏接入带来的过电压和过载问题。如图 11(a)所示，在该方法下，光伏接入容量为 6.5 MW 时，系统的节

点电压和线路载流已达上限。在本文方法中，用户通过预测市场内供需比作为电价变化趋势，基于 MPC 理论安排储能的工作计划，实现负荷时间转移。在中午光照充足的时刻，储能进行充电操作，促进局部区域光伏的消纳，能够抑制电压的升高，减小线路的倒送功率，提高光伏的接纳能力。在没有出现过电压和线路过载问题时，光伏的最大允许接入容量为 8.2 MW，如图 11(b)所示。

5 结论

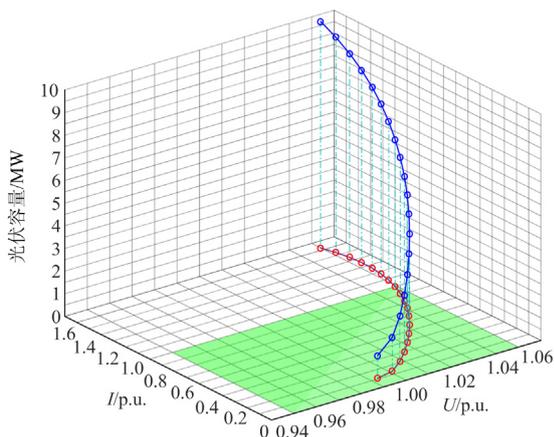
本文基于连续双向拍卖理论的市场机制，提出利用 MPC 方法对储能进行功率调节，得到用户的投标电量，并采用 ZIP 策略指导用户报价行为。通过算例分析，得出如下结论：

1) CDA 市场交易过程公开透明，实现了能源交易从集中管理走向民主决策。个体的交易情况和其投标行为相关，利益损失由主体自行承担，能够促进参与者不断优化自身行为，提高市场活力，打造竞争性市场环境，保证市场长期稳定运行。

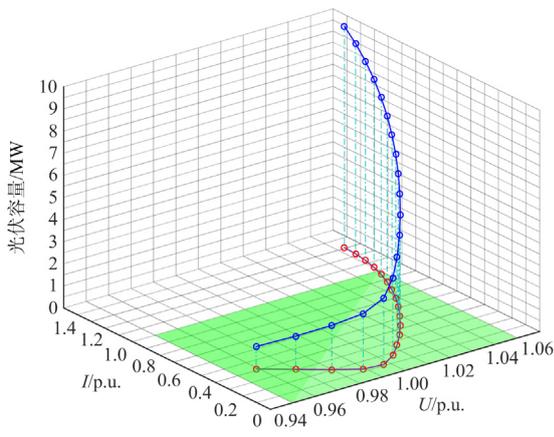
2) 基于 MPC 的用户投标行为能够及时根据市场内部能源状态变化，调整储能的充放电策略。通过与其他能源决策方法对比，基于 MPC 的投标策略能够充分利用储能等灵活性资源参与功率调节，进一步提高市场主体的经济性。同时，可以有效地抑制电压抬升，提高配电网对光伏能源的接纳能力。

参考文献

- [1] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于积极推进风电、光伏发电无补贴平价上网有关工作的通知[EB/OL]. [2019-01-10].http://www.nea.gov.cn/2019-01/10/c_137731320.htm.
- [2] 国家能源局综合司. 关于报送整县(市、区)屋顶分布式光伏开发试点方案的通知[EB/OL]. [2021-06-02]. <https://www.pvmeng.com/2021/06/20/19741/>.
- [3] ZHANG Chenghua, WU Jianzhong, ZHOU Yue, et al. Peer-to-peer energy trading in a microgrid[J]. Applied Energy, 2018, 220: 1-12.
- [4] ZHANG Chenghua, WU Jianzhong, LONG Chao, et al. Review of existing peer-to-peer energy trading projects[J]. Energy Procedia, 2017, 105: 2563-2568.
- [5] LÜTH A, ZEPTER J M, DEL GRANADO P C. Local electricity market designs for peer-to-peer trading: the role of battery flexibility[J]. Applied Energy, 2018, 229: 1233-1243.
- [6] GAO Yao, ZHOU Wei, PENG Feixiang. Study on peer-to-peer trading mechanism in local distribution network[C] // 2021 6th Asia Conference on Power and



(a) TOU方法下光伏接入容量与电压电流的关系



(b) MPC方法下光伏接入容量与电压电流的关系

图 11 系统运行状态与光伏接入容量的关系

Fig. 11 Relationship between system operation status and photovoltaic hosting capacity

- Electrical Engineering (ACPEE), April 8-11, 2021, Chongqing, China: 578-582.
- [7] NGUYENA S, PENG W, SOKOLOWSKI P. Optimizing rooftop photovoltaic distributed generation with battery storage for peer-to-peer energy trading[J]. *Applied Energy*, 2018, 228: 2567-2580.
- [8] LONG Chao, WU Jianzhong, ZHOU Yue, et al. Peer-to-peer energy sharing through a two-stage aggregated battery control in a community microgrid[J]. *Applied Energy*, 2018, 226: 261-276.
- [9] LIU N, YU X, WANG C, et al. Energy-sharing model with price-based demand response for microgrids of Peer-to-peer prosumers[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(5): 3569-3583.
- [10] ZHOU S, ZOU F, WU Z, et al. A smart community energy management scheme considering user dominated demand side response and P2P trading[J]. *International Journal of Electric Power Energy Systems*, 2020, 114.
- [11] ZAFAR R, MAHMOOD A, RAZZAQ S, et al. Prosumer based energy management and sharing in smart grid[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 1675-1684.
- [12] ZHOU Yue, WU Jianzhong, SONG Guanyu, 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.
- [13] WANG Zibo, YU Xiaodan, MU Yunfei, et al. A distributed peer-to-peer energy transaction method for diversified prosumers in urban community microgrid system[J]. *Applied Energy*, 2020, 260.
- [14] EL-BAZ W, TZSCHEUTSCHLER P, WAGNER U. Integration of energy markets in microgrids: a double-sided auction with device-oriented bidding strategies[J]. *Applied Energy*, 2019, 241: 625-639.
- [15] LI Zhenpeng, MA Tao. Peer-to-peer electricity trading in grid-connected residential communities with household distributed photovoltaic[J]. *Applied Energy*, 2020, 278.
- [16] 孟仕雨, 孙伟卿, 韩冬, 等. 支持现货市场的分布式电力交易机制设计与实现[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(7): 151-158.
- MENG Shiyu, SUN Weiqing, HAN Dong, et al. Design and implementation of decentralized power transaction mechanism to spot market[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(7): 151-158.
- [17] CHEN Kaixuan, LIN Jin, SONG Yonghua. Trading strategy optimization for a prosumer in continuous double auction based peer-to-peer market: a prediction-integration model[J]. *Applied Energy*, 2019, 242: 1121-1133.
- [18] 王丹, 刘博, 贾宏杰, 等. 基于强化学习的产消用户端对端电能交易决策[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(3): 139-147.
- WANG Dan, LIU Bo, JIA Hongjie, et al. Peer-to-peer energy transaction decision of prosumers based on reinforcement learning[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(3): 139-147.
- [19] 陈修鹏, 李庚银, 周明, 等. 考虑新能源不确定性和点对点交易的配网产消者分布式优化调度[J]. *电网技术*, 2020, 44(9): 3331-3340.
- CHEN Xiupeng, LI Gengyin, ZHOU Ming, et al. Distributed optimal scheduling for prosumers in distribution network considering uncertainty of renewable sources and P2P trading[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(9): 3331-3340.
- [20] 单俊嘉, 董子明, 胡俊杰, 等. 基于区块链技术的产消者 P2P 电能智能交易合约[J]. *电网技术*, 2021, 45(10): 3830-3839.
- SHAN Junjia, DONG Ziming, HU Junjie, et al. P2P smart power trading contract based on blockchain technology[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(10): 3830-3839.
- [21] MOHAMED A. High performance decoupled active and reactive power control for three-phase grid-tied inverters using model predictive control[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2021, 6(3): 311-329.
- [22] 董雷, 陈卉, 蒲天骄, 等. 基于模型预测控制的主动配电网多时间尺度动态优化调度[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(17): 4609-4617.
- DONG Lei, CHEN Hui, PU Tianjiao, et al. Multi-time scale dynamic optimal dispatch in active distribution network based on model predictive control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(17): 4609-4617.
- [23] 张宏, 董海鹰, 陈钊, 等. 基于模型预测控制的光热-光伏系统多时间尺度无功优化控制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(9): 135-142.
- ZHANG Hong, DONG Haiying, CHEN Zhao, et al. Multi-time scale reactive power optimal control strategy of a CSP-PV system based on model predictive control[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(9): 135-142.
- [24] 王晓兰, 侯天玉, 宫玮丽, 等. 基于 Tube 不变集的直流微电网鲁棒模型预测控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(17): 9-17.
- WANG Xiaolan, HOU Tianyu, GONG Weili, et al. Robust model predictive control of a DC microgrid based on a Tube invariant set[J]. *Power System Protection and*

- Control, 2020, 48(17): 9-17.
- [25] 吴传申, 刘宇, 高山, 等. 基于预测控制的储能系统多时间尺度动态响应优化研究[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(3): 222-230.
WU Chuanshen, LIU Yu, GAO Shan, et al. Multi-time scale dynamic response optimization of energy storage system based on predictive control[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 222-230.
- [26] 王成山, 吕超贤, 李鹏, 等. 园区型综合能源系统多时间尺度模型预测优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6791-6804.
WANG Chengshan, LÜ Chaoxian, LI Peng, et al. Multiple time-scale optimal scheduling of community integrated energy system based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 6791-6804.
- [27] 张彦, 张涛, 刘亚杰, 等. 基于随机模型预测控制的能源局域网优化调度研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3451-3463.
ZHANG Yan, ZHANG Tao, LIU Yajie, et al. Stochastic model predictive control for energy management optimization of an energy local network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3451-3463.
- [28] 任景, 薛晨, 马晓伟, 等. 计及新能源资源分级的柔性调度模型预测控制[J]. 智慧电力, 2020, 48(9): 30-36, 88.
REN Jing, XUE Chen, MA Xiaowei, et al. Flexible scheduling model predictive control based on new energy resource classification[J]. Smart Power, 2020, 48(9): 30-36, 88.
- [29] TANG Rui, WANG Shengwei. Model predictive control for thermal energy storage and thermal comfort optimization of building demand response in smart grids[J]. Applied Energy, 2019, 242: 873-882.
- [30] 杜祥伟, 沈艳霞, 李静. 基于模型预测控制的直流微电网混合储能能量管理策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 69-76.
DU Xiangwei, SHEN Yanxia, LI Jing. Energy management strategy of DC microgrid hybrid energy storage based on model predictive control[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 69-76.
- [31] GODE D K, SUNDER S. Allocative efficiency of markets with zero-intelligence traders: market as a partial substitute for individual rationality[J]. Journal of Political Economy, 1993, 101(1): 119-137.
- [32] 罗伯特. S. 平狄克, 鲁宾菲尔德. 微观经济学[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2020.
- [33] GANS J, KING S, STONECASH R, et al. Principles of economics[M]. Boston, MA, USA: Cengage Learning, 2011.
- [34] CLIFF D, BRUTEN J. Less than human: simple adaptive trading agents for CDA markets[J]. IFAC Proceedings Volumes, 1998, 31(16): 117-122.
- [35] GUERRERO J, GEBBRAN D, MHANNA S, et al. Towards a transactive energy system for integration of distributed energy resources: home energy management, distributed optimal power flow, and peer-to-peer energy trading[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 132.
- [36] 杨秋霞, 刘同心, 高辰, 等. 计及光伏电站功率预测的电力系统优化分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 117-123.
YANG Qiuxia, LIU Tongxin, GAO Chen, et al. Power system optimization analysis considering power prediction of PV power station[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 117-123.
- [37] 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.
- [38] GUERRERO J, CHAPMAN A C, VERBIĆ G. Decentralized P2P energy trading under network constraints in a low-voltage network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5163-5173.

收稿日期: 2021-08-12; 修回日期: 2021-11-11

作者简介:

周 玮(1981—), 女, 博士, 通信作者, 副教授, 研究方向为智能配电系统优化运行与市场交易; E-mail: zhouwei@dlut.edu.cn

高 焱(1997—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为分布式电能市场交易; E-mail: 1602048882@qq.com

彭飞翔(1993—), 男, 博士研究生, 研究方向为面向新能源消纳的电力系统优化运行与电力市场。E-mail: pfeixiang@qq.com

(编辑 魏小丽)