

局域能源市场多产消者P2P交易框架设计

张凡¹,高红均¹,吴子豪²,刘俊勇¹

(1. 四川大学 电气工程学院,四川 成都 610065;2. 国网陕西省电力公司电力科学研究院,陕西 西安 710099)

摘要:随着局域能源市场中分布式能源的大量接入和电力系统运行方式的逐渐转变,具有电能生产/消费行为的产消者得到了广泛关注与研究。在此背景下,为提高小规模能源在局域能源市场中的就地消纳能力,设计了一种面向局域能源市场中多产消者的点对点(P2P)日前市场交易框架。在局域能源市场建立了P2P市场交易平台,并对产消者的基本特征进行了归纳分析,提出了典型的产消者组合类型;在产消者层面,采用供给函数均衡模型对产消者竞价行为进行建模,确立了含多产消者的P2P交易平台参与局域能源市场交易;采用连续双边拍卖机制对产消者之间进行P2P匹配,并确定交易过程中的拍卖价格和交易价格。最后,通过算例验证了所提P2P交易框架的有效性。

关键词:局域能源市场;P2P交易;产消者;连续双边拍卖;交易框架设计

中图分类号:F 123.9;TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202205033

0 引言

随着局域能源市场中分布式能源的快速发展以及电力市场的逐渐放开,具有生产、消费电能的产消者在配电网中逐渐兴起。2017年11月国家能源局发布了《关于开展分布式发电市场化交易试点的通知》,明确分布式能源市场化交易机制,允许分布式能源与电力负荷等产消者用户进行电量直接交易,产消者能够整合多种分布式能源参与市场交易^[1]。通过合理协调调度产消者可以实现局域能源市场电能共享,具有降低运行成本、为配电网扩容、实现分布式能源就地消纳等优点。

传统的集中式交易模式下,随着交易主体规模的扩大和数量的增多可能会产生维数灾和求解复杂等问题。文献[2]中的交易模式通过中心化机构对市场中的交易进行管理,其存在着运行成本提高、交易信任问题有危机、运行效率下降等问题。相较而言,目前点对点P2P(Peer-to-Peer)交易平台已经出现在许多领域,可以为在局域能源市场中的推广提供借鉴意义。如Uber的P2P运输,Airbnb的P2P住宿和eBay的P2P拍卖已经兴起^[3]。在电力市场领域,智能电网架构委员会提出了交互能源的概念,为P2P交易模式推广至局域能源市场中提高小规模能源的就地消纳能力提供了政策支持^[4]。P2P平台上产消者之间的匹配机制可以分为以上级系统为中心或以点为中心^[5],这种交易模式为适应产消者偏好^[6]提供了更多的灵活性,降低了电网公司管理存在的

信息安全风险和终端用户隐私数据泄露^[7]。针对目前电力市场中集中式交易存在的不足以及P2P交易在许多领域的发展现状,考虑在局域能源市场中推广P2P交易以提高区域配电网层面交易的高效性、可靠性以及可再生能源的消纳率。

P2P能源交易市场应该尊重市场参与者的差异化偏好,允许产消者内部资源发生动态变化。将产品进行差异化表征应用于电力系统中可以显著诱导产消者更有效、更精准地满足用户对电力的需求^[8]。文献[9]提出了基于城市社区微电网信息物理网络系统进行P2P能源交易,考虑了产消者的差异化特征,以实现2种不同产消者之间资源的协调和互补。但是产消者的种类考虑得较少,可能不满足未来产消者的多元发展需求。针对以上文献的不足,本文更细致地考虑了产消者动态组合所产生的差异化特征,包括了效益型、电源型、可中断负荷型、可平移负荷型等动态组合模式的典型产消者类型参与局域能源市场交易。

在产消者的竞价行为模式方面,主要有3种模型:伯特兰德模型^[10]是基于产消者设置的市场报价进行调度;古诺模型^[11]是采用对产消者的电量进行竞标;供给函数均衡^[12]SFE(Supply Function Equalization)模型是采用向调度部门提交包括电价和电量的竞标信息,相较于前2种模型,SFE模型可产生比伯特兰德模型更低的纯粹竞争价格,比古诺模型更接近实际市场价格,使产消者获得更高收入^[13]。P2P市场交易的求解算法主要可分为以下2类:其一是包括拉格朗日松弛法^[14]、交替方向乘子法^[15]等直接迭代的求解方式,这种基于对偶价格变量更新的算法迭代次数相对较多,运算时间较长;其二是融入经济机制设计理论,以连续拍卖理论^[16]、均衡占优策略^[17]、VCG(Vickrey-Clarke-Groves)机制^[18]等来处理

收稿日期:2021-07-24;修回日期:2022-03-31

在线出版日期:2022-04-13

基金项目:国家电网有限公司科技项目(SGSNKY00KJJS2000046)
Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(SGSNKY00KJJS2000046)

用户侧P2P交易,这类方法具有低信任成本、短决策时间等优势,符合P2P日前交易环境下产消费者对交易公平性和隐私性等的要求^[19]。综合以上研究,本文考虑产消费者采用SFE模型进行竞价,采用连续拍卖理论对局域能源市场中的产消费者进行交易撮合以实现不同类型产消费者之间的能量交易求解。

综上所述,针对局域能源市场中含有多个产消费者参与日前市场交易,本文设计了基于连续双边拍卖机制的P2P日前交易框架。首先,对产消费者的类型、基本特性进行归纳分析,根据不同的对外特性对多类型产消费者进行组合分类;然后,在产消费者层面采用SFE模型对产消费者竞价行为进行建模,确立了含多产消费者的P2P交易平台参与局域能源市场交易,同时采用连续双边拍卖方法对产消费者之间进行P2P匹配,以提升小规模能源就地消纳能力;最后,基于含有多个产消费者的不同规模的系统验证了在局域能源市场中该P2P日前市场交易框架的有效性。

1 局域能源市场框架设计

1.1 产消费者特性和组合策略

局域能源市场可含有多种能源,本文的交易主体主要考虑进行电力交易的产消费者。产消费者是由包括微型燃气轮机MT(MicroTurbine)、风电机组WT(Wind Turbine)、光伏PV(PhotoVoltaic)、储能系统ESS(Energy Storage System)、可响应负荷RL(Responsive Load)、电动汽车EV(Electric Vehicle)等资源聚合而成的聚合体,因此具有源荷双重属性。电力与信息的高度融合与交互、对“价值”信号的高度敏感是产消费者区别于传统电源和负荷的重要特征。产消费者具有角色多重性、效用趋优性、多样性、非一致性、不确定性、复杂性、交互性等基本特性^[1]。

产消费者内部用户资源的组合具有动态性,是由于其内部资源在不同时段的发用电特性不同,可以由不同生产、消费方进行组合构成不同对外特性的产消费者参与局域能源市场进行交易。在不同时段,未达到市场交易准入的资源可以通过集体联盟参与组建产消费者,共同达到准入量。图1展示了市场中

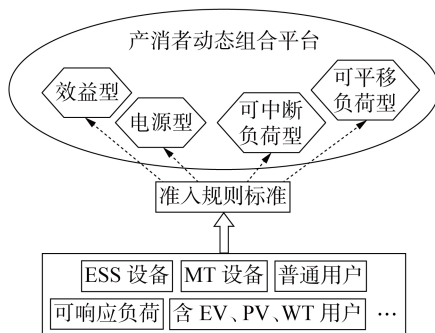


图1 产消费者组合策略机制

Fig.1 Combination strategy mechanism of prosumer

某一个产消费者内部的组合机制,组合形成效益型、电源型、可中断负荷型和可平移负荷型产消费者,将组合后形成的产消费者实时上报上层交易中心。产消费者准入规则的设立主要在于考虑到规模过小的分散式资源,若直接参与传统电网调度机制,则缺乏自主决策权。因此,也给予小规模资源参与P2P交易的权利,产消费者代理商可优先考虑将未达到准入规则的小用户组合起来参与P2P平台进行交易。

基于组合的产消费者对外特性,将外部特性呈现供需并存的产消费者定义为效益型产消费者;将外部特性呈电源特性的产消费者定义为电源型产消费者;将外部特性呈负荷特性的产消费者根据可中断负荷、可平移负荷进一步分为可中断负荷型产消费者和可平移负荷型产消费者。局域能源市场中的分散式资源可通过向产消费者动态组合平台上报实时电量和价格,优先组合上报电量、电价低于准入规则的分散式资源。在不同交易时刻,根据内部资源的产消特性,产消费者的对外特性都有可能发生转变。具体各类产消费者内部所含有的资源将在第2节进行详细说明。

1.2 P2P交易规则

在局域能源市场中设立P2P交易平台主要是让产消费者之间进行P2P的日前市场电量合同交易。P2P交易可分为P2P协同交易和P2P分布式交易,两者区别主要是前者需要第三方中心化机构进行协调,后者不需要第三方中心化机构对交易进行协调。考虑到P2P交易平台在局域能源市场处于推广建设初期,因此本文引入拍卖商对产消费者之间P2P交易进行协调,P2P交易平台中进行的是P2P协同交易,随着市场逐步成熟,可进一步发展为P2P分布式交易。局域能源市场交易模式如图2所示,在局域能源市场中主要有产消费者和普通用户、拍卖商、电网公司3类主体。

1)产消费者和普通用户。图2中含有多余电能的产消费者将多余的电能出售给P2P平台中其他的产消费者,存在电量缺额的产消费者需要向其余产消费者购买电能,此时该产消费者可视为用电用户。对于未参与P2P平台交易的普通用户,由电网公司向其供电。

2)拍卖商。拍卖商是P2P交易过程的管理者与

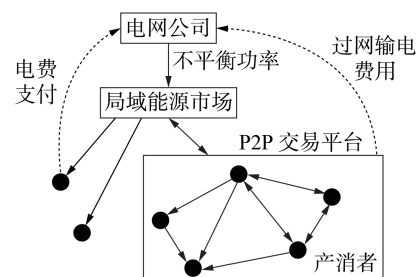


图2 局域能源市场交易模式

Fig.2 Local energy market trading mode

监督者,保证 P2P 交易安全执行。具有独立优化决策且完全理性的产消者通过向拍卖商提交投标、报价曲线与其余产消者形成竞争,以最大化自身利益。对于拟达成交易的订单,需经由拍卖商签字确认。

3) 电网公司。在建立 P2P 交易平台后,电网公司的角色逐渐由传统配电网从上一级电网购电转变为拥有配电经营权,主要为用户提供保底供电服务的公共服务类企业。一方面,向局域能源市场中的产消者收取过网输电费用;另一方面,在局域能源市场中主体存在供电不足时维持电量平衡,保证供电的可靠性。除此以外,对于未参与 P2P 交易的局域能源市场普通用户,电网公司还可直接向其供电,为传统配电网交易模式向 P2P 交易模式转变提供平稳过渡。

首先对产消者内部进行优化调度确定其购售电需求。然后在交易窗口期,产消者买卖双方分别向第三方中心化机构提交由电价/电量组成的购售电报价,买卖双方可以同时提交多个报价;P2P 交易平台中拍卖商展示所有可选用的报价,买家和卖家除了提交自己的报价外,还可以分别浏览平台内其他产消者报价;拍卖商基于连续双边拍卖机制撮合产消者之间进行 P2P 交易,当买家浏览到一份合约并有意进行交易时,其可以向该售电产消者发送一份合同,并请求确认。同样地,卖家也可以浏览买家报价并寻求交易。

产消者之间确认合同后,会自动发送至拍卖商进行最终审核,并删除平台上显示的报价,以防多次购买。在交易窗口期,拍卖商进行审批流程,检查当前收到的所有合同是否符合系统安全约束,拒绝对系统安全运行造成威胁的合同,并批准剩余的合同。通知已批准合同的买卖双方产消者,已批准的合同不得再撤回。被拒绝的客户,经调整后,可以重新提交报价。拍卖商在后续的审批过程中总是接纳先前批准的合同,即已批准的合同不会在后续的审批过程中被拒绝。

2 产消者模型

本文研究的局域能源市场中产消者可能含有可再生资源、MT、ESS、EV、需求响应等资源^[20],本节对不同产消者内部资源以及竞价行为分别进行建模。

2.1 产消者内部资源模型

1) 电源型产消者。

电源型产消者内部大多是发电单元,对外整体呈现供电特性,包括 PV、WT、MT 等资源。设产消者的数量为 N ,对于其中的产消者 $i(i=1,2,\dots,N)$ 而言,其 PV 和 WT 模型如下:

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{PV}} \leq P_{i,t}^{\text{PV},\max} \quad (1)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{WT}} \leq P_{i,t}^{\text{WT},\max} \quad (2)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{PV}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{WT}}$ 分别为 t 时段实际 PV、WT 出力值; $P_{i,t}^{\text{PV},\max}$ 、 $P_{i,t}^{\text{WT},\max}$ 分别为根据历史数据预测的 PV、WT 出力最大值。

对于产消者 i 而言,其 MT 模型如下:

$$C_i^{\text{MT}} = a_i + b_i P_{i,t}^{\text{MT}} + c_i (P_{i,t}^{\text{MT}})^2 \quad (3)$$

$$P_{i,t}^{\text{MT},\min} \leq P_{i,t}^{\text{MT}} \leq P_{i,t}^{\text{MT},\max} \quad (4)$$

$$\begin{cases} P_{i,t-1}^{\text{MT}} - P_{i,t}^{\text{MT}} \leq r_{d,i} \Delta T \\ P_{i,t}^{\text{MT}} - P_{i,t-1}^{\text{MT}} \leq r_{u,i} \Delta T \end{cases} \quad (5)$$

式中: C_i^{MT} 为 MT 运行成本; a_i 、 b_i 、 c_i 为运行成本相关系数; $P_{i,t}^{\text{MT},\max}$ 、 $P_{i,t}^{\text{MT},\min}$ 分别为 MT 申报的独立合同中有功出力上、下限; $P_{i,t}^{\text{MT}}$ 为 t 时段 MT 出力值; $r_{d,i}$ 、 $r_{u,i}$ 分别为 MT 的向下和向上爬坡率; ΔT 为一个运行时段时长。

2) 可中断负荷型产消者。

产消者中允许用户参与需求响应。需求响应可以分为可中断负荷和可平移负荷,可中断负荷型产消者模型如下:

$$C_{i,t}^{\text{IL}} = \rho_i^{\text{IL}} P_{i,t}^{\text{IL}} \quad (6)$$

$$P_{i,t}^{\text{IL},\min} \leq P_{i,t}^{\text{IL}} \leq P_{i,t}^{\text{IL},\max} \quad (7)$$

式中: $C_{i,t}^{\text{IL}}$ 为 t 时段可中断负荷的调节成本; $P_{i,t}^{\text{IL}}$ 为 t 时段可中断负荷用户的负荷中断量; ρ_i^{IL} 为可中断负荷用户负荷中断的单位补偿费用; $P_{i,t}^{\text{IL},\max}$ 、 $P_{i,t}^{\text{IL},\min}$ 分别为可中断负荷用户申报的独立可中断负荷合同上、下限。可中断负荷型产消者中可能也含有少量的 PV、WT,其建模分别见式(1)和式(2)。

3) 可平移负荷型产消者。

可平移负荷型产消者中包含了 EV 和可平移负荷,其模型如下。

EV 调度成本为:

$$C_{i,t}^{\text{EV}} = \sum_{v=1}^{n_v} \frac{C_v^{\text{b}}}{L_v^{\text{c}} E_v h_v} \left(\frac{P_{v,t}^{\text{discharge}}}{\xi_v^{\text{discharge}}} + S_v d_{v,t} \right) \quad (8)$$

式中: $C_{i,t}^{\text{EV}}$ 为 t 时段 EV 调度成本; C_v^{b} 、 L_v^{c} 、 E_v 、 h_v 分别为第 v 辆 EV 的电池购买成本、电池可用循环次数、电池容量和电池可用放电限度; n_v 为愿意参与调度 EV 数量; $P_{v,t}^{\text{discharge}}$ 为 t 时段第 v 辆 EV 的放电电量; $\xi_v^{\text{discharge}}$ 为第 v 辆 EV 的放电效率; S_v 、 $d_{v,t}$ 分别为第 v 辆 EV 的单位行驶距离所消耗的电量 and t 时段行驶的距离。

可平移负荷模型为:

$$C_{i,t}^{\text{TL}} = \rho_i^{\text{TL}} P_{i,t}^{\text{TL}} \quad (9)$$

$$P_{i,t}^{\text{TL},\min} \leq P_{i,t}^{\text{TL}} \leq P_{i,t}^{\text{TL},\max} \quad (10)$$

$$P_{i,t}^{\text{TL},+} = P_{i,t}^{\text{TL},+} \quad (11)$$

式中: $C_{i,t}^{\text{TL}}$ 为 t 时段可平移负荷的调度成本; $P_{i,t}^{\text{TL}}$ 为 t 时段可平移负荷用户的负荷平移量; ρ_i^{TL} 为可平移负荷用户负荷平移的单位补偿费用; $P_{i,t}^{\text{TL},\max}$ 、 $P_{i,t}^{\text{TL},\min}$ 分别为可平移负荷用户申报的独立可平移负荷合同上、下

限; $P_{i,t}^{\text{TL}-}$ 、 $P_{i,t}^{\text{TL}+}$ 分别为负荷平移削减量和负荷平移增量。可平移负荷型产消者中可能也含有少量的PV、WT,其建模分别见式(1)和式(2)。

4) 效益型产消者。

效益型产消者内部可能包含了包括ESS在内的多种资源,对外呈现供需并存的特性。

产消者中第 k 个ESS模型为:

$$u_{k,t}^{\text{discharge}} + u_{k,t}^{\text{charge}} \leq 1 \quad (12)$$

$$\left| u_{k,t}^{\text{discharge}} + u_{k,t-1}^{\text{charge}} \right| \leq N_{\text{ESS}} \quad (13)$$

$$\begin{cases} u_{k,t}^{\text{discharge}} P_k^{\text{discharge, min}} \leq P_{k,t}^{\text{discharge}} \leq u_{k,t}^{\text{discharge}} P_k^{\text{discharge, max}} \\ u_{k,t}^{\text{charge}} P_k^{\text{charge, min}} \leq P_{k,t}^{\text{charge}} \leq u_{k,t}^{\text{charge}} P_k^{\text{charge, max}} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} E_{k,t+1}^{\text{ESS}} = E_{k,t}^{\text{ESS}} + \alpha_k^{\text{charge}} P_{k,t}^{\text{charge}} - \alpha_k^{\text{discharge}} P_{k,t}^{\text{discharge}} \\ E_k^{\text{ESS, min}} \leq E_{k,t}^{\text{ESS}} \leq E_k^{\text{ESS, max}} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $u_{k,t}^{\text{discharge}}$ 、 $u_{k,t}^{\text{charge}}$ 分别为 t 时段表征ESS放电和充电状态的0-1变量,放电时 $u_{k,t}^{\text{discharge}} = 1$ 、 $u_{k,t}^{\text{charge}} = 0$,充电时 $u_{k,t}^{\text{charge}} = 1$ 、 $u_{k,t}^{\text{discharge}} = 0$; N_{ESS} 为ESS放电和充电状态转换次数上限; P_k^{charge} 、 $P_k^{\text{discharge}}$ 分别为ESS的充、放电电量; $P_k^{\text{discharge, max}}$ 、 $P_k^{\text{discharge, min}}$ 分别为ESS放电电量上、下限; $P_k^{\text{charge, max}}$ 、 $P_k^{\text{charge, min}}$ 分别为ESS充电电量上、下限; $E_{k,t}^{\text{ESS}}$ 为 t 时段ESS的容量; $E_k^{\text{ESS, max}}$ 、 $E_k^{\text{ESS, min}}$ 分别为考虑ESS寿命等因素的容量上、下限; α_k^{charge} 、 $\alpha_k^{\text{discharge}}$ 分别为ESS充、放电效率系数,两者的取值范围为 $0 < \alpha_k^{\text{charge}} < 1$ 、 $\alpha_k^{\text{discharge}} > 1$ 。效益型产消者中可能也含有少量的PV、WT,其建模分别见式(1)和式(2),含有的MT建模见式(3)~(5)。

5) 产消者能量平衡约束。

在满足市场准入规则的情况下,产消者可以参与局域能源市场进行P2P交易,根据其在调度时段所属角色不同,产消者 i 又可细分为卖方 e 或买方 f 。产消者的购售电需满足如下约束:

$$0 \leq P_{e,f,t}^{\text{sell}} \leq P_{e,f,t}^{\text{sell, max}} \quad (16)$$

$$0 \leq P_{e,f,t}^{\text{buy}} \leq P_{e,f,t}^{\text{buy, max}} \quad (17)$$

$$P_{e,t}^{\text{sell}} \leq \sum_f P_{e,f,t}^{\text{buy}} \quad (18)$$

$$P_{f,t}^{\text{buy}} \leq \sum_e P_{e,f,t}^{\text{sell}} \quad (19)$$

式中: $P_{e,f,t}^{\text{sell}}$ 、 $P_{e,f,t}^{\text{sell, max}}$ 分别为 t 时段产消者 e 向产消者 f 的售电电量及其上限; $P_{e,f,t}^{\text{buy}}$ 、 $P_{e,f,t}^{\text{buy, max}}$ 分别为 t 时段产消者 f 从产消者 e 购买的电量及其上限; $P_{e,t}^{\text{sell}}$ 为 t 时段产消者 e 售电总电量; $P_{f,t}^{\text{buy}}$ 为 t 时段产消者 f 购电总电量。式(18)、(19)表示产消者的预期购售电电量不大于从其余各产消者购售电电量之和。

卖方产消者需满足如下电量平衡约束:

$$\sum_f P_{e,f,t}^{\text{buy}} + P_{e,t}^{\text{MT}} + P_{e,t}^{\text{PV}} + P_{e,t}^{\text{WT}} + \alpha_k^{\text{discharge}} P_{k,t}^{\text{discharge}} = P_{e,t}^{\text{load}} + P_{e,t}^{\text{sell}} + \alpha_k^{\text{charge}} P_{k,t}^{\text{charge}} + \xi_v^{\text{charge}} P_{v,t}^{\text{charge}} \quad (20)$$

式中: $P_{e,t}^{\text{load}}$ 为 t 时段产消者 e 的负荷量; $P_{v,t}^{\text{charge}}$ 为 t 时段第 v 辆EV的充电电量; ξ_v^{charge} 为第 v 辆EV的充电效

率。买方产消者的电量平衡约束类似。

除此以外,在P2P交易过程中仍需满足系统潮流约束等约束条件,不再赘述。

2.2 产消者竞价模型

产消者利用分布式资源产生的电能除了需满足自身需求外,还可以与其他产消者进行P2P模式下日前市场电量合同签订。考虑到在一天24h进行每时段报价交易过于频繁复杂,不符合实际各产消者需求,本文根据电力市场中峰、谷、平电价时段进行分段报价,具体将一天24h分为4段报价,单日用电峰时段为07:00—11:00、19:00—23:00;平时段为11:00—19:00;谷时段为23:00至次日07:00。设 d 为分段报价时段, T 为某一分段中 t 时段的集合, D 为分段 d 集合,则有 $t \in T$, $d \in D$ 。在局域能源市场中产消者不会按照边际发电成本和用电需求进行投标、报价,而是为提高收益或降低成本调整投标、报价曲线。产消者向拍卖商提交包括电价和电量的竞标信息,因此产消者竞价函数考虑使用SFE模型能够很好地保证其收益。

本文采用基于SFE模型构造的产消者竞价函数为:

$$p_{i,d}^{\text{bidder}} = 2\alpha_{i,d} |P_{i,d}^{\text{pro}}| + \alpha_{i,d} \quad (21)$$

式中: $p_{i,d}^{\text{bidder}}$ 为产消者的竞标电价; $\alpha_{i,d}$ 为产消者的竞价决策变量,产消者在竞价过程中可以根据自身类型和市场环境调整 $\alpha_{i,d}$ 改变竞价策略,以尽可能提高自身中标量; $P_{i,d}^{\text{pro}}$ 为产消者可参与交易的竞标电量。

根据产消者的购售电需求,可将 $p_{i,d}^{\text{bidder}}$ 和 $P_{i,d}^{\text{pro}}$ 分为卖方产消者和买方产消者竞标电价和竞标电量,具体表达式如下:

$$p_{i,d}^{\text{bidder}} = \begin{cases} p_{e,d}^{\text{seller}} & P_{e,d}^{\text{pro}} < 0 \\ p_{f,d}^{\text{buyer}} & P_{f,d}^{\text{pro}} > 0 \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} P_{e,d}^{\text{pro}} = \sum_{t \in T} (P_{e,t}^{\text{MT}} + P_{e,t}^{\text{PV}} + P_{e,t}^{\text{WT}} + \alpha_k^{\text{discharge}} P_{k,t}^{\text{discharge}} - P_{e,t}^{\text{load}} - \alpha_k^{\text{charge}} P_{k,t}^{\text{charge}} - \xi_v^{\text{charge}} P_{v,t}^{\text{charge}}) \\ P_{f,d}^{\text{pro}} = \sum_{t \in T} (P_{f,t}^{\text{MT}} + P_{f,t}^{\text{PV}} + P_{f,t}^{\text{WT}} + \alpha_k^{\text{discharge}} P_{k,t}^{\text{discharge}} - P_{f,t}^{\text{load}} - \alpha_k^{\text{charge}} P_{k,t}^{\text{charge}} - \xi_v^{\text{charge}} P_{v,t}^{\text{charge}}) \end{cases} \quad (23)$$

式中: $p_{e,d}^{\text{seller}}$ 为产消者 e 申报的售电电价; $p_{f,d}^{\text{buyer}}$ 为产消者 f 申报的购电电价; $P_{e,d}^{\text{pro}}$ 为产消者 e 可参与交易的售电电量; $P_{f,d}^{\text{pro}}$ 为产消者 f 需要购买的购电电量。本文中定义产消者购电电量为正、售电电量为负。

最终成交的拍卖价格为:

$$p_{e,d}^{\text{auc}} = p_{f,d}^{\text{auc}} = \frac{1}{2} (p_{e,d}^{\text{seller}} + p_{f,d}^{\text{buyer}}) \quad (24)$$

交易价格为:

$$p_{i,d}^{\text{trading}} = p_{i,d}^{\text{auc}} \pm p_{i,d}^{\text{trans}} \quad (25)$$

式中: $p_{i,d}^{\text{auc}}$ ($i=e, f$) 为产消者的拍卖价格; $p_{i,d}^{\text{trading}}$ 为产消

者的交易价格; $p_{i,d}^{\text{trans}}$ 为 P2P 匹配的产消者过网输电费用。本文的过网输电费用按照文献[21]中的标准制定,依据电力用户接入电压等级对应的省级电网共用网络输配电价(含政策性交叉补贴)扣除分布式发电市场化交易所涉及最高电压等级的输配电价执行。

在卖方产消者完成报价,拍卖商收集到买方产消者投标信息之后,确定买卖双方交易匹配,采用按报价结算的收益机制结算,产消者收益的具体目标为:

$$\begin{cases} \max B_e = \sum_{d \in D} (-p_{e,d}^{\text{trading}} P_{e,d}^{\text{pro}} - p_{e,d}^{\text{trans}} |P_{e,d}^{\text{pro}}| - C_{e,d}^{\text{pro}}) \\ \max B_f = \sum_{d \in D} (p_{f,d}^{\text{trading}} P_{f,d}^{\text{pro}} - p_{f,d}^{\text{trans}} |P_{f,d}^{\text{pro}}| - C_{f,d}^{\text{pro}}) \end{cases} \quad (26)$$

式中: $B_i (i=e, f)$ 为产消者的收益; $C_{i,d}^{\text{pro}} (i=e, f)$ 为产消者内部单元运行成本。

P2P 准入规则和维持市场秩序给分散式资源的准入提出了一定的要求,产消者需在满足 P2P 平台准入规则的情况下参与平台交易,即需满足如下约束:

$$p_i^{\min} \leq p_{i,d}^{\text{bidder}} \leq p_i^{\max} \quad (27)$$

$$P_i^{\text{pro}, \min} \leq P_{i,d}^{\text{pro}} \leq P_i^{\text{pro}, \max} \quad (28)$$

式中: $p_i^{\min}$ 、 $p_i^{\max}$ 分别为产消者报价/投标电价的下限和上限; $P_i^{\text{pro}, \min}$ 、 $P_i^{\text{pro}, \max}$ 分别为产消者参与 P2P 交易电量下限和上限。

3 基于连续双边拍卖机制的拍卖商交易撮合

3.1 拍卖商目标

在 P2P 交易模式下,拍卖商需要对收集到的信息进行合理审批,目标为尽可能促进局域能源市场中 P2P 交易,减少从上级电网购电电量,具体的目标函数可表示为:

$$\max \sum_{d \in D} \left(\sum_{i=1}^N p_{i,d}^{\text{trading}} P_{i,d}^{\text{pro}} - p_d^{\text{grid}} P_d^{\text{grid}} \right) \quad (29)$$

式中: p_d^{grid} 为电网公司补充 P2P 平台不平衡电量的售电电价; P_d^{grid} 为补充 P2P 平台不平衡电量的调度出力。

3.2 交易撮合过程

本文提出的连续双边拍卖机制包括多个买家和卖家,其通过相互之间的竞价来决定 P2P 交易的交易电价和交易电量。连续双边拍卖是指在市场参与者以多对多形式存在的情况下,买卖双方交易周期内可以随时提交报价,一旦价格匹配即可成交的交易形式。关于竞价交易遵循以下 2 个原则。①价格优先。当有多个产消者进行报价时,对于买方而言,买方出价高者拥有优先交易权,对于卖方而言,卖方报价低者可以优先选择交易。②时间优先。当买卖双方的物品及价格相同时,先进入市场的报价者优先交易。

产消者之间的竞价策略相互影响,属于完全信息下的非合作博弈。通常, P2P 平台拟定的拍卖计划包含买方、卖方和拍卖商这 3 个要素。买卖双方角色在每个报价时段都可能会发生转变,这取决于产消者的供需情况,具体定义如下。

买方:在某时段存在电量缺额需要向市场购买电量的产消者。

卖方:在某时段存在剩余电量可以出售的产消者。

拍卖商:拍卖商可以是第三方如局域能源市场运营商通过数字交易平台发起拍卖,或自动化网络数据库系统如区块链等。拍卖商需要确保准确地提供交易价格和交易电量给所有参与双边拍卖的客户。

在本文所建立的模型中,买方为消费者,卖方为生产者,通过拍卖商进行拍卖,然后由拍卖商完成产消者之间的合同签订。最终,各产消者之间可以达成博弈均衡。

产消者之间的拍卖分为 2 步,具体如下。

步骤 1:确定拍卖价格和参与合同签订的产消者。在拍卖过程中,拍卖商根据产消者的投标、报价来决定双边合同签订进行能源交易的产消者的数量。首先,卖方 $e \in S$ 针对交易时段提供售电报价,标明其供电数量与对应的价格需求,售电报价按照从低到高的顺序排列,可以得到 P2P 交易市场上的供应曲线;同样,买方 $f \in B$ 提交包含电量、电价信息的投标,并按照价格从高到低的顺序进行排序,可以得到 P2P 交易市场上的需求曲线。

$$p_1^{\text{seller}} < p_2^{\text{seller}} < \dots < p_n^{\text{seller}}, \quad p_1^{\text{buyer}} > p_2^{\text{buyer}} > \dots > p_m^{\text{buyer}} \quad (30)$$

式中: n, m 分别为产消者中的卖方数和买方数。

步骤 2:拍卖商根据产消者的投标报价可得到市场上的供需曲线,如附录 A 图 A1 所示。拍卖价格 $p_{i,d}^{\text{auc}}$ 可以通过式(24)计算得到,一旦确定了拍卖价格 $p_{i,d}^{\text{auc}}$,则确定了基于拍卖价格参与 P2P 交易的买家数量和卖家数量。所有满足拍卖条件 $p_f^{\text{buyer}} \geq p_e^{\text{seller}}$ 的买卖双方产消者将可以在局域能源市场中参与 P2P 交易。

交易合同经过买卖双方以及拍卖商三方签名后被视为生效,过网输电费用由买卖双方共同承担。买方所支付的费用包括确定的拍卖价格以及相应的过网输电费用,卖方获得拍卖价格减去相应的过网输电费用,所收取费用存在 P2P 平台如区块链^[22]中。当买方确定收货后,在平台中将过网输电费用和拍卖价格成交费用分别发放到电网公司和卖方账户。

4 算例验证

4.1 模型求解流程

本文采用连续双边拍卖规则与 CPLEX 求解器

相结合的方法求解模型的均衡解,具体的P2P交易流程见附录A图A2。对于拍卖商收集信息和优化决策模型,采用连续双边拍卖规则计算产消者的最优竞价策略,并将产消者形成的购售电计划和相应购售电价传输到P2P平台,各产消者通过在P2P平台中获得的信息寻求最优的买方或卖方。对于各产消者优化调度模型,基于Yalmip平台,采用CPLEX求解器进行求解,以保证解的计算效率和最优性。

4.2 仿真条件

本文采用10 kV电压等级对未来局域能源市场中多产消者并存的P2P日前市场交易机制进行仿真验证。该系统内含10个产消者和1个电网公司,电网公司拥有该配电系统经营权并可向产消者进行购售电。其余基本仿真数据见附录B,各产消者内部的PV、WT出力曲线采用预测曲线,清洁能源出力供产消者内部使用或参与市场交易。基于本文提出的模型求解流程以及已知数据,采用MATLAB 2018a仿真软件求解多产消者在P2P交易平台日前市场中的交易行为。

4.3 仿真结果

P2P交易平台中各产消者在峰谷平电价时段都可以进行电量合同签订,本文以19:00—23:00时段为例,对P2P交易行为进行分析。图3给出了19:00—23:00时段在P2P平台中各产消者的报价、投标策略,图中Pro 1表示产消者1,其他类似。从图中可以看出:产消者9、3、7、5、1在该时段处于售电状态,向市场出售电量;产消者2、4、8、6在该时段处于购电状态,从市场购买电量满足自身用电需求。

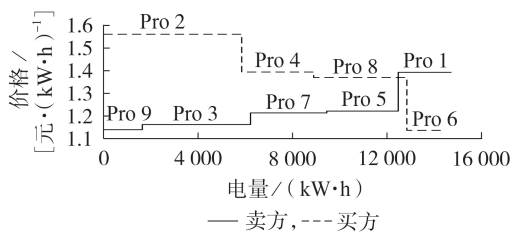


图3 19:00—23:00时段P2P交易平台的报价、投标策略

Fig.3 Quotation and bidding strategy of P2P trading platform during 19:00-23:00

根据P2P交易平台中的连续双边拍卖规则,图4给出了19:00—23:00时段各产消者在P2P平台中的交易情况,含买卖双方交易价格和交易电量。买卖双方P2P匹配后得到拍卖价格,然后以交易价格进行电量交易,达成交易的双方彼此交易价格不同是因为存在过网输电费用。19:00—23:00时段P2P交易平台中每笔交易的拍卖价格和交易价格见附录C表C1。从表中可以看出,产消者2和产消者9、产消者2和产消者3、产消者3和产消者4、产消者4和产消者7、产消者7和产消者8、产消者5和产消者8

在进行P2P匹配后的拍卖价格相同,各产消者与其余不同产消者进行匹配有着不同的拍卖价格,这是因为作为卖方产消者,同时售电给其余多个买方产消者,根据式(24)所示的拍卖价格计算规则会产生不同的拍卖价格。同时可以看出,产消者9、3、7、5的最终交易价格低于拍卖价格,而产消者2、4、8的最终交易价格高于拍卖价格,这是因为产消者9、3、7、5作为卖方需向电网公司提交一定的过网输电费用,而产消者2、4、8作为买方也需向电网公司提交一定的过网输电费用,因此实际支付费用除拍卖价格外还需额外支付一部分过网输电费用。最终只有产消者9、3、7、5、2、4、8能够达成电量成交,而且产消者8不能从该轮P2P交易中完全满足自身用电需求,产消者1、6竞标失败。

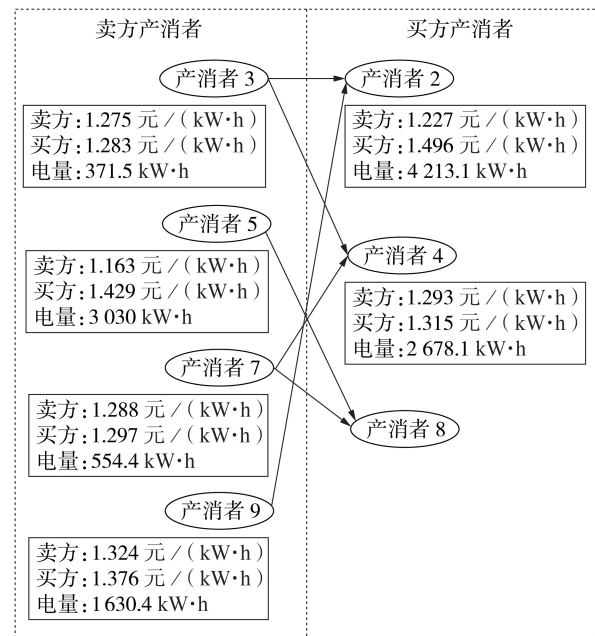


图4 19:00—23:00时段的P2P交易

Fig.4 P2P trading during 19:00-23:00

在该轮P2P交易中竞标失败不能达成交易的产消者可以调整决策变量 $\alpha_{i,d}$ 后重新提交报价,继续参与下一轮P2P交易寻求买家或卖家。产消者在各时段的投标/报价的决策变量 $\alpha_{i,d}$ 值如图5所示。图中:时段1为23:00至次日07:00;时段2为07:00—11:00;时段3为11:00—19:00;时段4为19:00—23:00。通过分析得出买卖双方的决策变量在更大的范围内取值可促进局域能源市场中达成更高比例的P2P交易成交量,产消者可以通过调整 $\alpha_{i,d}$ 提高交易电量以获得更多的利润。最终仍存在电量缺额的产消者由电网公司补充不平衡电量。为分析SFE模型的优越性,同时对产消者采用伯特兰德模型和古诺模型来进行竞价,产消者3的收益和总成交量见附录C表C2。因为在竞价过程中SFE模型可以通过

调整报价决策变量获得更多的报价自主权,所以具有更高比例的成交量。

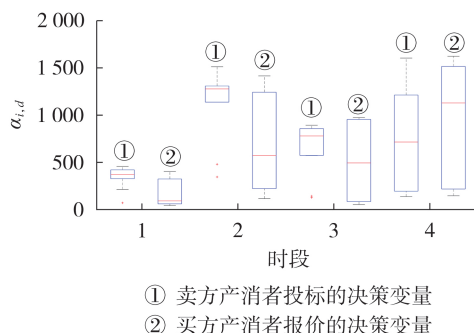


图5 产消者决策变量取值

Fig.5 Value of decision variable for prosumers

通过设置不同的过网输电费用标准,得到不同过网输电费用下的交易电价如附录 C 图 C1 所示。场景 1 不设置过网输电费用,场景 2 的过网输电费用设置为标准过网输电费用的 0.6,场景 3 的过网输电费用设置为标准过网输电费用,场景 4 的过网输电费用设置为标准过网输电费用的 1.2 倍。从图 C1 中可以看出,不同的过网输电费用设置标准对产消者的竞标结果也会产生影响,各产消者依据交易电量的不同会产生不同的过网输电费用。当不设置过网输电费用时,各产消者卖方售电价格最高,买方购电价格最低,随着过网输电费用设置标准的提高,卖方售电价格逐渐下降,买方购电价格逐渐上升,电网公司获利逐渐增加。而过网输电费用的增加也会进一步影响各产消者在 P2P 平台的交易量和交易出清顺序,使得距离较远的产消者之间的 P2P 匹配成本增加,因此电网公司设置合适的过网输电费用至关重要。

本文对典型产消者组合类型(效益型、电源型、可平移负荷型、可中断负荷型)的内部资源的出力情况进行分析,具体的调度结果见附录 C 图 C2 和图 C3。不同类型的产消者通过不同的竞价策略以最大化自身利益。产消者 1 作为效益型产消者,以自身最大化收益为目标,产消者 1 在 04:00—19:00 时段内供大于求,因此向 P2P 平台报价售电,其余时段存在电量缺额,因此需向 P2P 平台进行投标购电。产消者 4 作为电源型产消者,主要向 P2P 平台售电来获得收益,自身内部没有传统负荷,因此考虑自身发电成本后最大化地向市场售电。因为各时段 MT 的发电成本都低于向平台报价的价格,所以从图 C3 中可以看出,MT 满发出力。产消者 2 作为可中断负荷型产消者,从图 C3 中可以看出,其在负荷高峰时段电量需求大,通过可中断负荷的调控来达到削峰填谷的作用,以保持内部各单元安全稳定运行。产消者 6 作为可平移负荷型产消者,在满足内部用户用电需求的情况下,还需要尽可能减少弃风弃光量,

因此考虑对产消者内的可平移负荷进行灵活调节来减少可再生能源的弃风弃光量。另外从图 C3 中可看出,在通过利用可平移负荷的出力变化来平抑可再生能源出力波动性后,WT、PV 的电量曲线的稳定性得到大幅提升。在 09:00—12:00 和 16:00—18:00 时段内,产消者 6 因自身存在电量缺额,需向 P2P 平台进行投标购电满足电量平衡。

为进一步分析局域能源市场中产消者进行 P2P 交易相较于传统模式下集中式调度的优势,图 6 给出了在 P2P 交易模式和传统模式下产消者交易的效益对比,在此过程中,卖方产消者会获得售电收益,买方产消者需支付购电成本。通过图 6 可以发现,传统模式下卖方产消者的交易价格低于 P2P 模式,买方产消者的交易价格高于 P2P 模式,这说明在传统模式下,卖方售电价格更低,买方购电价格更高。除此以外,通过图 6 展示的 P2P 模式和传统模式下的收益可以进一步发现,传统模式下卖方产消者收益更低,买方产消者支付成本更高。这是因为在传统模式下,各产消者按照电网公司制定的购售电价买卖电量,售电利润低而购电成本高,同时传统模式需要更长的输电距离,因此产生更多的过网输电费用,而 P2P 交易则可以通过市场竞争在提高售电价格的同时降低购电价格,另外缩短输电距离也减少了过网输电费用。通过以上分析可得出,在集中式交易模式下,电网公司的收益更高,产消者的收益则更少,在 P2P 交易模式下,产消者收益更高,这可能会影响电网公司的效益。相较于传统模式的集中式调度方法,采用本文所提的 P2P 交易模式更有利于市场中的产消者获利。

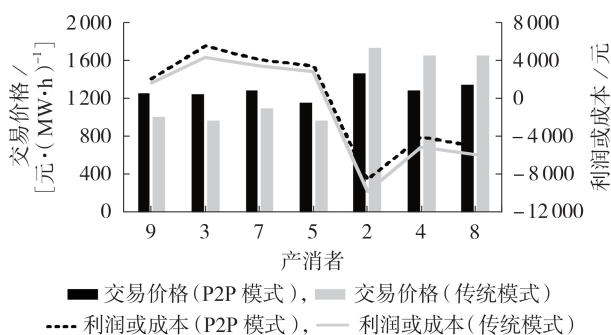


图6 P2P 交易与传统交易模式对比

Fig.6 Comparison between P2P trading mode and traditional trading mode

为说明本文所提模型在大规模市场的有效性和实用性,进一步扩大算例规模进行验证分析。将局域能源市场中的产消者数量从 10 个增加到 60 个进行 P2P 交易。附录 C 表 C3 给出了不同规模产消者接入下计算得到的交易求解时间,附录 C 图 C4 给出了 60 个产消者进行交易的连续拍卖过程。可以看

出尽管交易主体数量成倍数增加,但是交易时间仍在秒级,这是因为交易主体跟随交易市场交易信息,通过程序自动执行竞价策略发起交易请求,因此交易时间很短。故可以认为本文提出的交易机制能够适应不同规模的产消者加入局域能源市场进行交易,并且交易时间满足日前市场的交易要求。

5 结论

本文提出了一种在局域能源市场中多产消者参与日前市场的P2P交易框架,并基于SFE模型与连续双边拍卖规则设计了面向多类型产消者交易的P2P交易平台。通过算例仿真验证,得到以下结论:①所提交易框架能够有效降低不同类型产消者的购电成本,增加产消者的售电收益,提高了参与主体的利益;②所设计的P2P交易平台在产消者层面可以通过投标、报价进行供需匹配达到能量共享,降低了每个产消者和系统整体的交易成本;③在局域能源市场中建立的P2P日前交易框架提升了小规模能源就地消纳的能力,解决了因市场准入规则而导致的资源浪费。

本文所建的交易框架主要应用于局域能源市场中多产消者P2P日前市场电量交易,下一阶段将进一步考虑融入实时市场来设计合理有效的P2P交易框架。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 许伦,王蓓蓓,李雅超,等. 配电网安全导向的分布式资源P2P区块链交易机制研究[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 215-223.
XU Lun, WANG Beibei, LI Yachao, et al. Research on P2P blockchain transaction mechanism of distributed resources oriented by distribution network security[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 215-223.
- [2] 钟佳宇,陈皓勇,陈武涛,等. 含灵活性资源交易的电力市场实时出清[J]. 电网技术, 2021, 45(3): 1032-1041.
ZHONG Jiayu, CHEN Haoyong, CHEN Wutao, et al. Real-time clearing of electricity markets with flexible resource transactions[J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 1032-1041.
- [3] CHASIN F, HOFFEN M, CRAMER M, et al. Peer-to-peer sharing and collaborative consumption platforms: a taxonomy and a reproducible analysis[J]. Information Systems and e-Business Management, 2018, 16(2): 293-325.
- [4] MORSTYN T, TEYTELBOYM A, MCCULLOCH M D. Bilateral contract networks for peer-to-peer energy trading[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 2026-2035.
- [5] MORSTYN T, MCCULLOCH D. Multiclass energy management for peer-to-peer energy trading driven by prosumer preferences[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2019, 34(5): 4005-4014.
- [6] 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.
- [7] SORIN E, BOBO L, PINSON P. Consensus-based approach to peer-to-peer electricity markets with product differentiation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 994-1004.
- [8] WOO C K, SREEDHARAN P, HARGREAVES J, et al. A review of electricity product differentiation[J]. Applied Energy, 2014, 114: 262-272.
- [9] CHEN Sijie, LIU C C. From demand response to transactive energy: state of the art[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(1): 10-19.
- [10] MACAN C A, POTA H R. Optimal energy management system for strategic prosumer microgrids: an average bidding algorithm for prosumer aggregators[C]//2017 11th Asian Control Conference. Gold Coast, Australia: IEEE, 2017: 705-710.
- [11] SU W C, HUANG A Q. A game theoretic framework for a next generation retail electricity market with high penetration of distributed residential electricity suppliers[J]. Applied Energy, 2014, 119: 341-350.
- [12] LIANG Z, SU W. Game theory based bidding strategy for prosumers in a distribution system with a retail electricity market[J]. IET Smart Grid, 2018, 1(3): 104-111.
- [13] 陈修鹏,李庚银,夏勇. 基于主从博弈的新型城镇配电网产消者竞价策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(14): 97-104.
CHEN Xiupeng, LI Gengyin, XIA Yong. Stackelberg game based bidding strategy for prosumers in new urban distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 97-104.
- [14] AHN H S, KIM B Y, LIM Y H, et al. Distributed coordination for optimal energy generation and distribution in cyber-physical energy networks[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2018, 48(3): 941-954.
- [15] 乐健,周谦,赵联港,等. 基于一致性算法的电力系统分布式经济调度方法综述[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 44-54.
LE Jian, ZHOU Qian, ZHAO Liangang, et al. Overview of distributed economic dispatch methods for power system based on consensus algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 44-54.
- [16] 秦金磊,孙文强,朱有产,等. 微电网中基于区块链的电能交易方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11): 130-138.
QIN Jinlei, SUN Wenqiang, ZHU Youchan, et al. Energy transaction method of microgrid based on blockchain[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 130-138.
- [17] SAMADI P, MOHSENIAN H, SCHÖBER R, et al. Advanced demand side management for the future smart grid using mechanism design[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1170-1180.
- [18] 平健,陈思捷,张宁,等. 基于智能合约的配电网去中心化交易机制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3682-3690.
PING Jian, CHEN Sijie, ZHANG Ning, et al. Decentralized transactive mechanism in distribution network based on smart contract[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3682-3690.
- [19] MASIELLO R, AGUERO J R. Sharing the ride of power: understanding transactive energy in the ecosystem of energy economics[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2016, 14(3): 70-78.
- [20] 高红均,张凡,刘俊勇,等. 考虑多产消者差异化特征的社区微电网系统P2P交易机制设计[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1455-1470.
GAO Hongjun, ZHANG Fan, LIU Junyong, et al. Design of P2P transaction mechanism for community microgrid system con-

dering the differentiation of users[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1455-1470.

[21] 国家发展和改革委员会,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]. (2017-10-31)[2021-07-24]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171113_3055.htm.

[22] 徐嘉辉,马立新. 区块链技术在分布式能源交易中的应用[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(8): 17-22, 30.

XU Jiahui, MA Lixin. Application of blockchain technology in distributed energy transaction[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(8): 17-22, 30.

作者简介:



张 凡

张 凡(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为配电网市场运行交易(E-mail: 1341934500@qq.com);

高红均(1989—),男,副教授,博士研究生导师,通信作者,研究方向为配电网规划运行、综合能源系统优化与市场交易等(E-mail: e-gaohongjun@163.com)。

(编辑 李玮)

Design of P2P trading framework for multiple prosumers in local energy market

ZHANG Fan¹, GAO Hongjun¹, WU Zihao², LIU Junyong¹

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710099, China)

Abstract: With the massive access of distributed energy in local energy market and the gradual transformation of power system operation mode, the prosumers with electric energy production or consumption behavior have been widely concerned and studied. Under this background, in order to improve the local consumption capacity of small-scale energy in local energy market, a P2P (Peer-to-Peer) day-ahead market transaction framework is designed for multiple prosumers in local energy market. The P2P market trading platform is established in local energy market, the basic characteristics of prosumers are summarized and analyzed, and the typical combination types of prosumers are put forward. At the level of prosumers, the supply function equilibrium model is used to model the bidding behavior of prosumers, and a P2P trading platform with prosumers is established to participate in local energy market transaction. Meanwhile, the P2P matching between prosumers is carried out by continuous bilateral auction mechanism, and the auction price and transaction price in the process of transaction are determined. Finally, an example is given to verify the effectiveness of the proposed P2P trading framework.

Key words: local energy market; P2P trading; prosumers; continuous bilateral auction; trading framework design

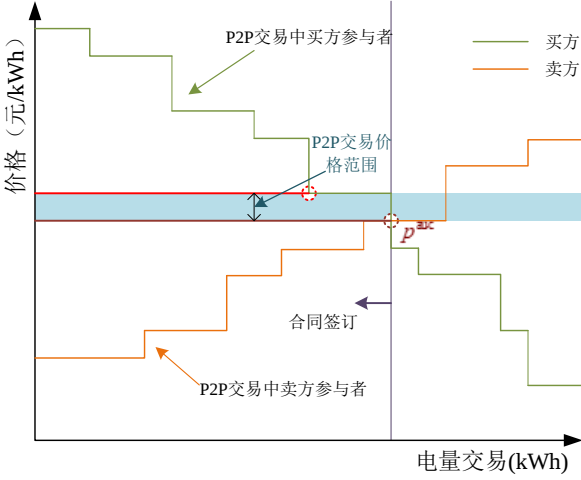


图 A1 P2P 交易中拍卖价格的确定

Fig.A1 Determination of auction prices in P2P transactions

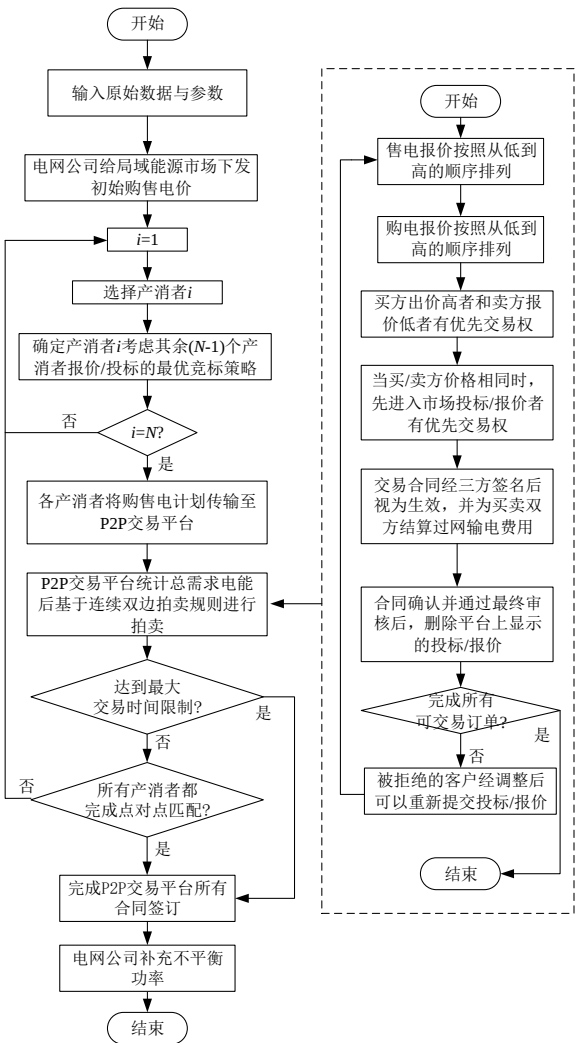


图 A2 P2P 平台交易流程

Fig.A2 Trading process of P2P platform

表 B1 ESS 参数

Table B1 Parameters of ESS					
参数	电量限制/ (MW · h)	容量限制/ MW	充电 系数	放电 系数	调度成本/ [元 · (MW · h) ⁻¹]
数值	0.3	1.5	0.9	0.9	500

表 B2 MT 参数

Table B2 Parameters of MT					
参数	电量上限/ (MW · h)	电量下限/ (MW · h)	爬坡率/ (MW · h)	发电成本/ [元 · (MW · h) ⁻¹]	爬坡成本/ [元 · (MW · h) ⁻¹]
数值	0.3	0.1	0.1	500	200

表 B3 各产消者内部资源

Table B3 Internal resources of prosumers							
主体	MT	WT	PV	ESS	RL	EV	负荷
Pro1	✓	✓	✓	×	×	×	✓
Pro2	✓	×	✓	×	✓	×	✓
Pro3	✓	×	✓	×	×	✓	✓
Pro4	✓	✓	✓	×	×	×	✓
Pro5	×	✓	✓	✓	×	×	✓
Pro6	✓	✓	✓	×	✓	×	✓
Pro7	✓	✓	×	×	×	×	✓
Pro8	✓	✓	✓	×	×	✓	×
Pro9	✓	✓	✓	×	×	×	✓
Pro10	✓	✓	✓	✓	×	×	✓

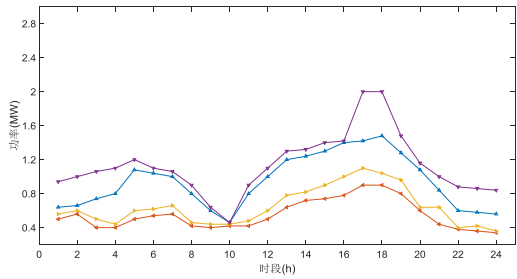


图 B1 风电预测出力

Fig.B1 Wind power forecasting output

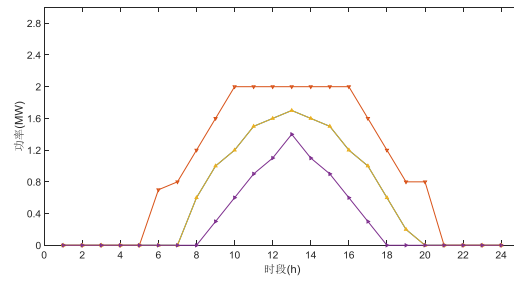


图 B2 PV 预测出力

Fig.B2 PV forecasting output

各产消者内部含有的负荷可能有居民负荷、商业负荷和工业负荷其中一种或几种组合，各产消者的负荷系数由[0,1]内的随机数生成。

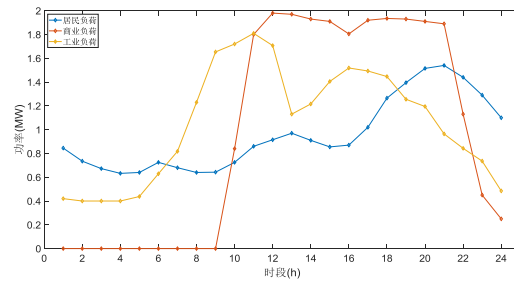


图 B3 负荷类型

Fig.B3 Load type

附录 C

表 C1 在 19: 00-23: 00 时段产消者 P2P 模式下竞价策略

Table C1 Bidding strategy under P2P mode during 19: 00-23: 00

产消者	$\alpha_{i,t}$	拍卖价格/元	交易价格/元
产消者 9(Pro9 to Pro2)	267.77	1350.10	1324.01
产消者 3(Pro3 to Pro2)	114.41	1361.44	1226.62
产消者 3(Pro3 to Pro4)	114.41	1278.62	1274.16
产消者 7(Pro7 to Pro4)	162.70	1304.98	1293.39
产消者 7(Pro7 to Pro8)	162.70	1292.05	1287.61
产消者 5(Pro5 to Pro8)	173.17	1296.07	1162.75
产消者 2(Pro9 to Pro2)	122.90	1350.10	1376.19
产消者 2(Pro3 to Pro2)	122.90	1361.44	1496.26
产消者 4(Pro3 to Pro4)	196.29	1278.62	1283.08
产消者 4(Pro7 to Pro4)	196.29	1304.98	1314.81
产消者 8(Pro7 to Pro8)	153.88	1292.05	1296.48
产消者 8(Pro5 to Pro8)	153.88	1296.07	1429.39

表 C2 产消者 3 收益及交易成功率

Table C2 Income and transaction success rate of Prosumer 3

竞价方法	产消者总收益/元	总交易量比率/%
伯特兰德模型	2672.58	45
古诺模型	3887.53	57
本文所提方法	5815.72	78

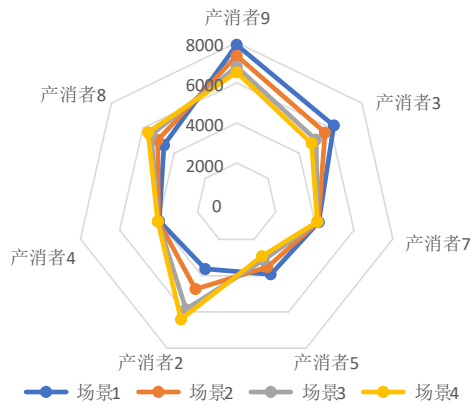


图 C1 $T=21$ h 时不同过网输电费用下的交易电价

Fig.C1 Transaction electricity price under different network usage fees when $T=21$ h

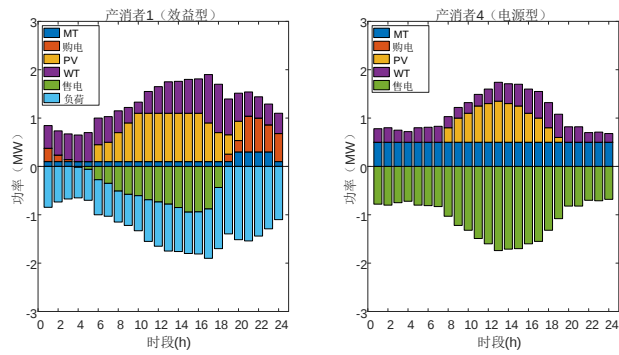


图 C2 效益型/电源型产消者优化调度结果

Fig.C2 Optimal scheduling results for utility/power supply prosumers

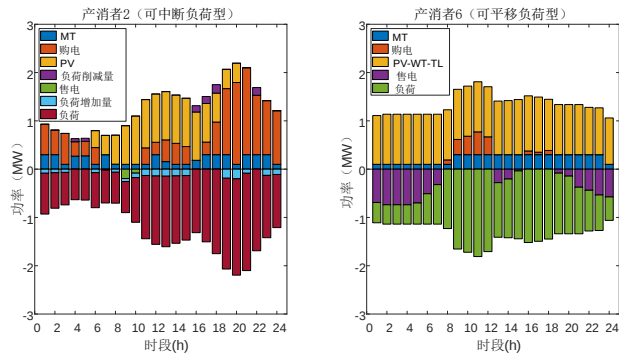


图 C3 可中断/可平移负荷型产消者优化调度结果

Fig.C3 Optimal scheduling results for IL/TL prosumers

表 C3 不同交易主体数量接入计算速度

Table C3 Number of different transactions prosumers access computing speed

接入产消者主体数量	交易时间/s	接入产消者主体数量	交易时间/s
10	5.45	40	15.02
20	7.43	50	18.20
30	9.54	60	22.49

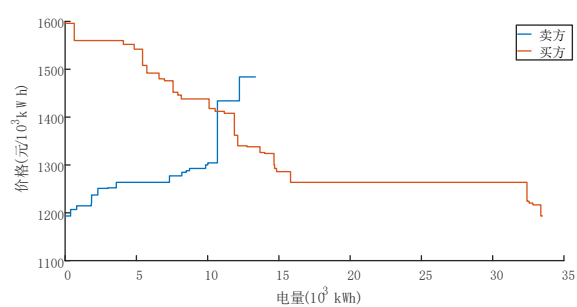


图 C4 扩大规模后在 19: 00-23: 00 时段 P2P 交易平台的报价/投标

Fig.C4 Quotation/bidding of P2P trading platform during 19: 00-23: 00 after expanding