



电力系统自动化

Automation of Electric Power Systems

ISSN 1000-1026, CN 32-1180/TP

《电力系统自动化》网络首发论文

题目： 配电网中点对点电力交易市场设计与出清方法
作者： 冯昌森，谢方锐，胡嘉骅，文福拴，张有兵
收稿日期： 2021-06-27
网络首发日期： 2022-02-15
引用格式： 冯昌森，谢方锐，胡嘉骅，文福拴，张有兵. 配电网中点对点电力交易市场设计与出清方法[J/OL]. 电力系统自动化.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20220214.1421.004.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

配电系统中点对点电力交易市场设计与出清方法

冯昌森¹, 谢方锐¹, 胡嘉骅², 文福拴³, 张有兵¹

(1. 浙江工业大学信息工程学院, 浙江省杭州市 310023;

2. 国网浙江省电力有限公司经济技术研究院, 浙江省杭州市 310008; 3. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027)

摘要: 随着配电系统中用户侧智能设备的不断并网和电力市场化改革的推进,越来越多的电力用户逐渐从传统的消费者转变为能同时生产电力的产消者,使得终端用户之间点对点电力交易成为可能。在此背景下提出一种能够有效考虑配电系统运行约束的事件驱动型点对点(P2P)电力交易市场机制及其出清方法。首先,讨论P2P市场与现有电力市场的关系,初步建立事件驱动规则与市场运行机制。其次,采用灵敏度刻画P2P交易对电力系统运行的影响,进而建立市场出清优化模型,并采用拉格朗日乘子法进行分布式出清。然后,基于区块链平台实现完全去中心化的P2P电力交易市场机制。最后,通过算例验证所提模型能在保护配电网安全运行的前提下,快速、有效处理配电系统电力社区之间的P2P电力交易需求。

关键词: 配电系统; 点对点交易; 交易机制; 分布式求解; 拉格朗日乘子法; 区块链技术

0 引言

随着配电系统中用户侧智能设备配置逐步增多,一些电力用户正逐渐转变为具有发电能力的产消用户^[1]。产消用户为开展点对点(P2P)的电力交易带来可能。这不仅能充分发挥市场手段对发电和储能资源优化配置的作用,而且能促进可再生能源发电的就地消纳、缓解配电系统容量压力、改善负荷特性,是中国售电侧市场化改革的重要方向之一^[2-3]。

目前,P2P电力交易已发展出一定的基础。在学术研究方面,P2P电力交易主要分为完全型P2P市场^[4]和基于社区的P2P市场^[5]。在完全型P2P市场中,用户之间可以直接议价,在没有中心机构监督的情况下完成电力交易。文献[4]考虑了完全去中心化的P2P市场,提出基于连续双向拍卖机制的自适应P2P交易策略。由于完全型P2P电力市场模型未考虑电网安全运行约束,导致其实用性不强。基于社区的P2P市场则是由各个社区作为市场主体,社区管理者负责社区内部的交易,并作为社区与其他社区、上级网络交流的中介。文献[5]研究虚拟电厂之间的P2P电力交易,建立了日前与实时两阶段

市场出清模型。文献[6]构建了包含光伏、储能、电动汽车等多类型配电侧可控资源的智能园区P2P电力交易模型,并采用次梯度优化方法对模型进行求解。文献[7]研究购电价格对含有分布式发电的产消者、售电商和一般终端用户的区域P2P电力交易的影响。现有研究侧重经济性角度考虑,未充分考虑P2P电力交易对电力系统安全运行的影响,导致研究结果的实用性较差。

在工业实践方面,由于具备透明化和适于分布式交易的技术特点,区块链等分布式账本技术可为去中心化的P2P电力交易提供技术支撑。区块链技术作为一种去中心化、透明化、合约执行自动化且同时具有可追溯性的数据库技术,其核心优势在于能够保证不同主体之间的相互信任^[8]。美国LO3 Energy公司开发了基于区块链技术Exergy点对点能源交易平台^[9]并已投入商业运行。安装在产消用户侧的智能电表将供用电数据上传到用户区块链账户作为代币,用户可在Exergy平台上进行能源交易。能源分销公司Tata Energy与科技公司Power Ledger合作,在新德里启动了P2P太阳能交易项目^[10]。中国由国家电网电商公司牵头的“区块链+碳交易”国际标准——《基于区块链的碳交易应用标准》也已正式立项,成为全球首个碳交易领域的区块链国际标准^[11]。

由于产消用户接入了可再生发电设备,其出力存在一定的波动性和不确定性,需要设计灵活的市

收稿日期: 2021-06-27; 修回日期: 2021-11-17。

国家自然科学基金资助项目(51777193)。

场机制以消纳可再生能源出力。文献[12]在考虑了光伏发电出力不确定性与负荷调度灵活性的前提下设计了本地电力市场的分布式出清机制。文献[13]以分布式能源就近消纳为原则,设计了分布式综合能源分层市场,促进了分布式可再生能源交易的市场化。文献[14]将多微网之间的P2P电力交易用广义纳什议价(generalized Nash bargaining)问题建模,并设计了收益分配机制,促进微电网间的电力交易。在目前关于P2P交易机制的研究文献中,大多未考虑用户出力的波动性对P2P电力交易的影响。文献[15]考虑了可再生能源出力的时序波动性,建立了基于事件驱动的本地P2P电力交易市场,并采用强化学习算法求解市场模型。

在上述背景下,本文提出了P2P市场的事件驱动规则以及运行机制。通过灵敏度法刻画P2P电力交易对电网运行的影响,进而建立P2P电力交易出清模型,并基于拉格朗日乘子法设计分布式出清算法。最后,在区块链平台构建了完全去中心化的市场运行模式。本文的创新点可以概括为以下3点:1)考虑了配电网物理约束的P2P交易市场机制,采用灵敏度方法将P2P电能交易产生的网损与电压偏差融入市场出清模型;2)利用节点电价概念设计市场出清的交互迭代机制,通过拉格朗日乘子法与次梯度法将P2P电力市场中的报价迭代过程与节点电价结合,赋予P2P迭代过程明确的物理意义;3)基于区块链平台运行P2P电力交易市场,利用智能合约来代替市场运营商的职能实现去中心化的市场机制。

1 市场机制与建模

1.1 事件驱动机制

本文在现有的电力市场机制之外,建立了一个事件驱动型本地P2P电力交易市场,其与现有的市场机制关系如附录A图A1所示。该P2P电力交易市场主要辅助接入配电网的电力社区之间实现电能互补协调,满足短期内社区之间的电力交易请求,为电网终端用户直接参与电力交易提供平台,补充现有电力市场没有覆盖的短期电能P2P交易的部分。电力社区可以由分布式电源、储能装置、能量转换装置、负荷、监控和保护装置等组成。P2P电力交易市场成员包括市场运营商和社区运营商。按照社区当前对电能的需求可分为购买方和售卖方两类。

本文拟利用事件驱动技术来设计本地P2P市场机制。与现有的电力现货批发市场等运行规则不同,只有在满足一定条件时,事件驱动器才会触发该

本地P2P电力交易市场启动、运行和出清等操作。参与市场的成员通过向事件驱动器发送交易请求进入市场,交易请求包括电量、电价、交易时段等信息。事件驱动器根据当地光照强度、风速等环境情况,以及当前和未来时段市场存在的交易成员数量和交易功率来设定驱动条件。如果事件驱动器执行出清动作,需要各个参与者与市场运营商交互信息,直至出清算法收敛。最后,市场运营商将出清结果发送给社区运营商来执行。社区之间的P2P电力交易概念如附录A图A2所示。本文设计的P2P电能交易市场目的是促进零售能源交易。除了现有的集中型供电服务外,这种市场机制将提供额外的能源交易机会,无需全年不间断开放,可以为社区用户作为交易者直接参与本地能源交易提供平台。

1.2 P2P电力交易市场模型

P2P电力交易市场的出清目标函数为最大化社会效益,可表示为:

$$\max \sum_{i \in N_b} U_i(p_i, q_i) - \sum_{j \in N_s} C_j(p_j, q_j) \quad (1)$$

式中: $U_i(p_i, q_i)$ 为购买方效益函数; $C_j(p_j, q_j)$ 为售卖方成本函数; p_i, q_i 和 p_j, q_j 分别为购买方节点 i 与售卖方节点 j 注入/流出的有功与无功电量; N_b 和 N_s 分别为购买方和售卖方集合。

需要指出的是,目标函数为无功电能设置相应的成本函数,实际是考虑产生或消纳无功电能的成本。

1) 购买方的效用函数

对于参与P2P交易的每个购买方,其效用函数可以表示购电、用电的满意度与便利性^[16]:

$$U_i(p_i) = -\frac{1}{2} \theta_{p,i} p_i^2 + \beta_{p,i} p_i \quad (2)$$

式中: $\theta_{p,i}$ 和 $\beta_{p,i}$ 为购买方 i 的有功效用参数。

2) 售卖方的成本函数

假设售卖方的成本函数是有功功率的二次凸函数,如式(3)所示。

$$C_j(p_j) = a_{p,j} p_j^2 + b_{p,j} p_j + c_{p,j} \quad (3)$$

式中: $a_{p,j}, b_{p,j}, c_{p,j}$ 为售卖方 j 的有功成本参数。

由于配电网电压水平对于确保配电网电力的输送至关重要,而无功功率是提高系统效率和支撑系统电压的关键因素。因此,本文所提出的市场出清模型包含了市场参与者提供无功支撑服务,应计及其相应无功成本。无功成本一般包括运行成本和机会成本,可用二次函数来建模^[17]。本文模型也考虑市场参与者的无功成本,并用二次函数模拟。市场中的购买方与售卖方均会产生无功成本。以购买方

i 为例,其无功成本可表示为:

$$C_i(q_i) = \frac{1}{2} \theta_{q,i} q_i^2 \quad (4)$$

式中: $\theta_{q,i}$ 为购买方 i 的无功成本参数。

1.3 电力交易约束条件

P2P电力交易是依托配电系统进行的,因而必须考虑其对配电系统运行造成的影响。相对于配电网日常基础供电功率,P2P电力交易功率相对较小,因此本文采用灵敏度系数来描述P2P电力交易对配电网运行的影响。

1.3.1 电压灵敏度

以配电网节点 i 为例,当节点 i 注入总功率为 $S_i = P_i + jQ_i$ 时,其中 P_i 和 Q_i 分别为节点 i 注入的有功功率与无功功率,则配电网中各节点的电压与注入功率的关系如式(5)所示。

$$S_i = V_i \left(\sum_{j \in N_{\text{set}}} Y_{ij} V_j \right)^* \quad \forall i \in N_{\text{set}} \quad (5)$$

式中: S_i 为复功率; V_i 和 V_j 分别为节点 i 和节点 j 的电压向量; Y_{ij} 为节点导纳矩阵;*表示共轭; N_{set} 为配电网节点集合, $N_{\text{set}} = \{1, 2, \dots, N\}$ 。

电压灵敏度反映的是电压幅值与功率的关系,故在式(5)两端对有功功率求偏导数,可得:

$$\frac{\partial S_i}{\partial P_j} = \frac{\partial V_i}{\partial P_j} \left(\sum_{j \in N_{\text{set}}} Y_{ij} V_j \right)^* + V_i \sum_{j \in N_{\text{set}}} Y_{ij}^* \frac{\partial V_j^*}{\partial P_j} = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ 1 & i = j \end{cases} \quad (6)$$

通过求解线性方程组可得 $\partial V_i / \partial P_j$ 与 $\partial V_i^* / \partial P_j$ 的数值解。电压幅值 V_i 对有功功率的灵敏度为:

$$\frac{\partial V_i}{\partial P_j} = \frac{1}{V_i} \text{Re} \left(V_i \frac{\partial V_i^*}{\partial P_j} \right) \quad (7)$$

同理可得,电压幅值对无功功率的灵敏度为:

$$\frac{\partial V_i}{\partial Q_j} = \frac{1}{V_i} \text{Re} \left(V_i \frac{\partial V_i^*}{\partial Q_j} \right) \quad (8)$$

通过式(7)和式(8),可量化P2P电力交易对节点 i 所带来的电压幅值扰动量 $\Delta V_i(p, q)$:

$$\Delta V_i(p, q) = \frac{\partial V_i}{\partial P} p + \frac{\partial V_i}{\partial Q} q \quad (9)$$

式中: p 和 q 分别为市场参与者参与P2P电力交易时所有配电网节点注入的有功、无功功率向量,其形式为 N 阶列向量;电压灵敏度 $\partial V_i / \partial P$ 和 $\partial V_i / \partial Q$ 分别为节点 i 由于配电网中各节点注入有功、无功功率而产生的电压变化,其形式为 N 阶行向量。

1.3.2 网损敏感度

对于辐射形配电系统可以采用关联结构法(incidence structure)对其建模^[18]。定义配电网关联矩阵 B 为 $N \times N$ 的方阵, N 为配电网节点总数。定义根节点编号为1,子节点的编号大于父节点,则关联矩阵如式(10)所示:

$$B(i, j) = \begin{cases} 1 & j \text{ 为 } i \text{ 子树的节点} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $B(i, j)$ 为关联矩阵中的第 i 行第 j 列的元素。

图1为配电网支路单线示意图。

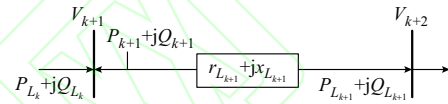


图1 支路 L_k 的单线图
Fig. 1 Single-line diagram of the branch

节点 k 与 $k+1$ 组成的支路 L_k 所示的潮流为:

$$P_{L_k} = - \sum_{j=k+1}^N B(k+1, j) P_j + \sum_{j=k+2}^N B(k+1, j) P_{\text{Loss}}^{L_{j-1}} \quad (11)$$

$$Q_{L_k} = - \sum_{j=k+1}^N B(k+1, j) Q_j + \sum_{j=k+2}^N B(k+1, j) Q_{\text{Loss}}^{L_{j-1}} \quad (12)$$

式中: P_{L_k} 为支路 L_k 的有功潮流; Q_{L_k} 为支路 L_k 的无功潮流; $P_{\text{Loss}}^{L_{j-1}}$ 为除支路 L_k 外的有功网损; $Q_{\text{Loss}}^{L_{j-1}}$ 为除支路 L_k 外的无功网损。

支路 L_k 的有功和无功网损对节点 i 有功和无功注入功率的灵敏度可表示为:

$$\frac{\partial P_{\text{Loss}}^{L_k}}{\partial P_i} = \left(2P_{L_k} \frac{\partial P_{L_k}}{\partial P_i} + 2Q_{L_k} \frac{\partial Q_{L_k}}{\partial P_i} \right) \frac{r_{L_k}}{V_{k+1}^2} \quad (13)$$

$$\frac{\partial P_{\text{Loss}}^{L_k}}{\partial Q_i} = \left(2P_{L_k} \frac{\partial P_{L_k}}{\partial Q_i} + 2Q_{L_k} \frac{\partial Q_{L_k}}{\partial Q_i} \right) \frac{r_{L_k}}{V_{k+1}^2} \quad (14)$$

$$\frac{\partial Q_{\text{Loss}}^{L_k}}{\partial P_i} = \left(2P_{L_k} \frac{\partial P_{L_k}}{\partial P_i} + 2Q_{L_k} \frac{\partial Q_{L_k}}{\partial P_i} \right) \frac{x_{L_k}}{V_{k+1}^2} \quad (15)$$

$$\frac{\partial Q_{\text{Loss}}^{L_k}}{\partial Q_i} = \left(2P_{L_k} \frac{\partial P_{L_k}}{\partial Q_i} + 2Q_{L_k} \frac{\partial Q_{L_k}}{\partial Q_i} \right) \frac{x_{L_k}}{V_{k+1}^2} \quad (16)$$

式中: r_{L_k} 和 x_{L_k} 分别为支路 L_k 的电阻和电抗。

式(11)和式(12)两侧分别对 P_i 、 Q_i 求导并带入式(13)至式(16),可得网损灵敏度的递归表达式。

以 $\frac{\partial P_{\text{Loss}}^{L_k}}{\partial P_i}$ 为例,可得:

$$\frac{\partial P_{\text{Loss}}^{L_k}}{\partial P_i} = \frac{2r_{L_k}}{V_{k+1}^2} \left(-P_{L_k} B(k+1, j) + \sum_{j=k+2}^{N_A} B(k+1, j) \frac{\partial P_{\text{Loss}}^{L_{k-1}}}{\partial P_i} \right) + \frac{2r_{L_k}}{V_{k+1}^2} \left(-Q_{L_k} \sum_{j=k+2}^{N_A} B(k+1, j) \frac{\partial Q_{\text{Loss}}^{L_{k-1}}}{\partial P_i} \right) \quad (17)$$

求解由式(17)组成的线性方程组可得网损灵敏度。在此基础上,系统网损 P^{Loss} 、 Q^{Loss} 可由网损灵敏度近似表示,如式(18)和(19)所示:

$$P^{\text{Loss}} \approx \frac{\partial P^{\text{Loss}}}{\partial P} p + \frac{\partial P^{\text{Loss}}}{\partial Q} q \quad (18)$$

$$Q^{\text{Loss}} \approx \frac{\partial Q^{\text{Loss}}}{\partial P} p + \frac{\partial Q^{\text{Loss}}}{\partial Q} q \quad (19)$$

1.3.3 社区用户本地出力约束

不论购买方或售卖方,每个参与P2P交易的社区用户均须服从一定的功率限制。对于社区用户 i ,其所遵守的功率约束可表示为:

$$0 \leq p_i \leq p_i^{\max} \quad (20)$$

$$-q_i^{\max} \leq q_i \leq q_i^{\max} \quad (21)$$

式中: p_i^{\max} 和 q_i^{\max} 分别为社区用户 i 节点注入的有功、无功功率的最大值。

2 市场交易模型及出清

2.1 P2P电力交易市场模型

通过综合考虑节点电压幅值约束和交易过程所产生的网损,电力社区P2P电力交易市场优化模型可表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max \sum_{i \in N_b} U_i(p_i, q_i) - \sum_{j \in N_s} C_j(p_j, q_j) \\ \text{s.t. } \bar{V}_i - \hat{V}_i - \Delta V_i(p, q) \geq 0 \quad \forall i, \bar{\mu} \\ \hat{V}_i - \underline{V}_i + \Delta V_i(p, q) \geq 0 \quad \forall i, \underline{\mu} \\ \sum_{i \in N_b} p_i - \sum_{j \in N_s} p_j + P^{\text{Loss}}(p, q) = 0 \quad \lambda_p \\ \sum_{i \in N_b} q_i - \sum_{j \in N_s} q_j + Q^{\text{Loss}}(p, q) = 0 \quad \lambda_q \end{array} \right. \quad (22)$$

式中: λ_p 和 λ_q 分别为有功功率、无功功率平衡约束的拉格朗日算子; $\bar{\mu}$ 和 $\underline{\mu}$ 分别为电压上、下限约束的拉格朗日算子向量; \hat{V}_i 为配电网中 i 节点的运行电压值。

2.2 分布式出清

针对式(22),可通过传统的集中式方法进行求解和出清。本文利用拉格朗日乘子法设计分布式出清算法,各个市场参与者仅利用拉格朗日乘子等有限信息在本地求解自身优化问题。通过迭代交互机

制完成P2P电力交易市场的出清。

首先,定义拉格朗日函数为:

$$\begin{aligned} \ell(p, q, \bar{\mu}, \underline{\mu}, \lambda_p, \lambda_q) = & \sum_{i \in N_b} U_i(p_i, q_i) - \sum_{j \in N_s} C_j(p_j, q_j) + \\ & \sum_{i=1}^{N_A} \bar{\mu} (\bar{V}_i - \hat{V}_i - \Delta V_i(p, q)) + \\ & \sum_{i=1}^{N_A} \underline{\mu} (\hat{V}_i - \underline{V}_i + \Delta V_i(p, q)) + \\ & \lambda_p \left(\sum_{i \in N_b} p_i - \sum_{j \in N_s} p_j + P^{\text{Loss}}(p, q) \right) + \\ & \lambda_q \left(\sum_{i \in N_b} q_i - \sum_{j \in N_s} q_j + Q^{\text{Loss}}(p, q) \right) \end{aligned} \quad (23)$$

将拉格朗日函数进行分布式求解,以社区运营商 n 为例,在第 t 次迭代中,其接收相应的拉格朗日乘子信息后,求解下式:

$$\{p_n^{(t)}, q_n^{(t)}\} := \arg \min_{p_n, q_n \in \{\text{式}(20-21)\}} \ell(p, q, \bar{\mu}^{(t)}, \underline{\mu}^{(t)}, \lambda_p^{(t)}, \lambda_q^{(t)}) \quad (24)$$

在迭代出清过程中,还需进行拉格朗日乘子的更新。本文采用次梯度法来更新拉格朗日乘子,如式(25)至式(28)所示。

$$\lambda_p^{(t)} = \lambda_p^{(t-1)} + \rho^{(t)} (\nabla \ell_{\lambda_p}(p_n^{(t)}, q_n^{(t)})) \quad (25)$$

$$\lambda_q^{(t)} = \lambda_q^{(t-1)} + \rho^{(t)} (\nabla \ell_{\lambda_q}(p_n^{(t)}, q_n^{(t)})) \quad (26)$$

$$\bar{\mu}^{(t)} = (\bar{\mu}^{(t-1)} + \rho^{(t)} \nabla \ell_{\bar{\mu}}(p_n^{(t)}, q_n^{(t)}))^+ \quad (27)$$

$$\underline{\mu}^{(t)} = (\underline{\mu}^{(t-1)} + \rho^{(t)} \nabla \ell_{\underline{\mu}}(p_n^{(t)}, q_n^{(t)}))^+ \quad (28)$$

式中: $\rho^{(t)}$ 为乘子更新的步长系数。

直至迭代收敛。显然,上式(24)缺乏明确的物理意义。本文利用节点电价的概念挖掘式(24)的物理意义。定义节点有功电价 τ_p 与节点无功电价 τ_q 如下所示:

$$\begin{aligned} \tau_p^{(t)} = & \lambda_p^{(t)} \left(\frac{\partial P^{\text{Loss}}}{\partial P} - 1 \right) + \lambda_q^{(t)} \frac{\partial Q^{\text{Loss}}}{\partial P} - \bar{\mu}^{(t)} \frac{\partial V}{\partial P} + \\ & \underline{\mu}^{(t)} \frac{\partial V}{\partial P} \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \tau_q^{(t)} = & \lambda_p^{(t)} \frac{\partial P^{\text{Loss}}}{\partial Q} + \lambda_q^{(t)} \left(\frac{\partial Q^{\text{Loss}}}{\partial Q} - 1 \right) - \bar{\mu}^{(t)} \frac{\partial V}{\partial Q} + \\ & \underline{\mu}^{(t)} \frac{\partial V}{\partial Q} \end{aligned} \quad (30)$$

以购买方为例,此时式(24)可等价转化为:

$$\begin{aligned} \{p_n^{(t)}, q_n^{(t)}\} = & \arg \min_{p_n, q_n \in \{\text{式}(20-21)\}} -U_n(p_n, q_n) + \\ & \tau_{p,n}^{(t-1)} p_n + \tau_{q,n}^{(t-1)} q_n \end{aligned} \quad (31)$$

上式具有明确的物理意义,即购买者最小化自身总购电成本(购电成本减去其效用函数)。因此,

在迭代过程中,社区运营商接收P2P市场运营商发布的节点电价 $\tau_p^{(t)}$ 和 $\tau_q^{(t)}$,然后根据电价优化自身出力,如式(31)所示,并将更新后的出力信息返回给P2P市场运营商。市场运营商根据出力信息来更新节点电价,如式(25)至式(30)所示。可以看出节点电价仅需要少量解析计算就能得到。

完成一轮迭代后,若市场运营商与社区运营商对该轮的电价与电量达成一致,则P2P市场以该轮电价与电量进行出清。若双方未能达成一致,则根据式(24)至式(31)进行下一轮迭代,直至迭代收敛。

3 基于区块链技术的P2P市场出清

基于事件驱动型的P2P电力市场以及分布式出清机制与区块链技术相契合,因而本文拟用智能合约来代替市场运营商的职能,实现完全去中心化的市场机制。智能合约^[19]是一种部署于区块链中,在无第三方参与的情况下,以代码方式形成、验证或执行合约的计算机协议。它保障了区块链在无第三方监督的条件下高效执行各类脚本算法,适应各类应用场景的逻辑与需求。

本文通过编写相应的智能合约以实现市场的开启、运行以及结算,主要包括市场触发合约、市场运行合约与市场结算合约。

1) 市场触发合约

市场触发合约以队列数组形式接受社区运营商的报价与报量,即电力交易意向。当合约接收到一定数量的交易请求且交易总功率达到一定值(交易方数量启动阈值与交易功率量启动阈值为提前写入合约的常量),则开启本地P2P电力交易市场。

2) 市场运行合约

在市场运行过程中,社区运营商根据获得的电价信息完成自身的更新,并通过SendMessage函数将更新后的信息发布给市场运行合约,实现信息交互。通过获得的出力功率信息更新乘子与电价信息,实现迭代出清机制。

3) 出清结算合约

在确定参与市场的各方的交易电量与交易电价后,售电方通过addAsset函数进行挂单交易,购电方通过buyAsset函数认购订单,并支付相应数量的电子货币,完成市场中各笔交易的出清结算。

本文拟借用区块链的跨链技术实现本地P2P电力交易市场运营。中继链是一条功能完备的区块链,可以读取并验证连接到其上的区块链数据信息,中继机制可以在不依赖可信第三方的情况下完成交

易验证,是一种灵活、易于扩展的跨链技术。如图2和图3所示,本地电力交易市场由市场运营区块链,社区运营区块链以及电力交易中继链3条链构成。市场运营链主要记录市场中的电价与对应乘子的迭代更新信息。社区运营链主要记录各个社区运营商根据电价变化而调整自身的功率信息。中继交易链主要作为2条链的价值流通与数据通信的枢纽,在市场出清过程中,中继链传递电价信息与电量信息。在出清结束后的结算阶段,通过中继链上的出清结算合约完成各笔交易的结算。在链上的所有信息均通过SHA-256算法加密,即在中继链上无法得知具体的电价电量信息与交易金额,仅作为信息与价值的传输通道。

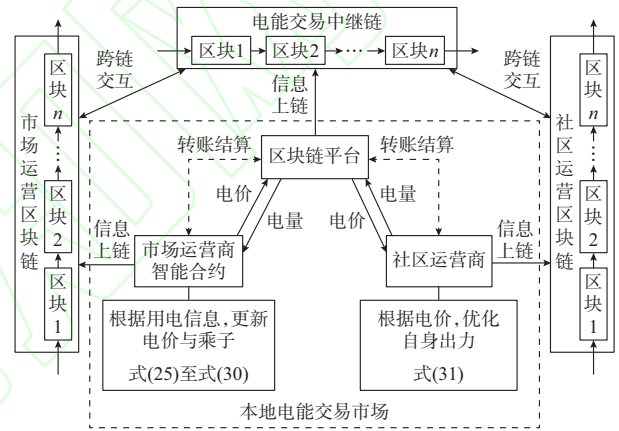


图2 区块链平台上P2P电力交易市场的信息交互
Fig. 2 Information interaction of P2P electricity trading market on blockchain platform

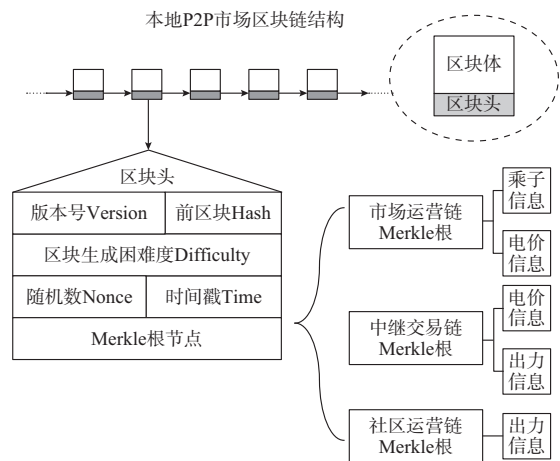


图3 本地P2P市场区块链结构
Fig. 3 Blockchain structure of local P2P market

4 算例与结果

4.1 参数设置

本文基于IEEE 33节点测试系统构建本地P2P电力交易市场并进行算例分析,其拓扑如附录A图

A3所示。社区用户的拓扑如附录A图A4所示。假设参与市场交易的电力社区有5个,分别位于节点2、9、19、23、33,其中节点9与33为购买方节点,分别用 C_1 与 C_2 表示。节点2、19、23为售卖方节点,分别用 P_1 、 P_2 和 P_3 表示。需要说明的是,配电网节点均拥有基础负荷,其值采用测试系统原始数据。拉格朗日乘子法中迭代步长 ρ 设置为0.001。拉格朗日乘子的迭代初值设置为0。

社区运营商的效用函数、成本函数系数与出力上下限约束取自文献[20]。无功成本函数系数参考文献[21],设定为有功的1/10,如表1与表2所示。

表1 市场购买方基本参数
Table 1 Basic parameters of market buyers

购买方	$\theta_{p,i}/(\text{美元}\cdot(\text{kWh}^2)^{-1})$	$\beta_{p,i}/(\text{美元}\cdot\text{kWh}^{-1})$	$\theta_{q,i}/(\text{美元}\cdot(\text{kvarh}^2)^{-1})$	\bar{p}_i/kW	$\underline{p}_i/\text{kW}$	\bar{q}_i/kvar	$\underline{q}_i/\text{kvar}$
C_1	0.009 0	0.625	0.000 9	20	2	20	-20
C_2	0.010 0	0.590	0.001 0	25	2	25	-25

表2 市场售卖方基本参数
Table 2 Basic parameters of market sellers

售卖方	$a_{p,j}/(\text{美元}\cdot(\text{kWh}^2)^{-1})$	$b_{p,j}/(\text{美元}\cdot\text{kWh}^{-1})$	$\theta_{q,j}/(\text{美元}\cdot(\text{kvarh}^2)^{-1})$	\bar{p}_j/kW	$\underline{p}_j/\text{kW}$	\bar{q}_j/kvar	$\underline{q}_j/\text{kvar}$
P_1	0.0040	0.205	0.000 8	30	2	30	-30
P_2	0.0030	0.330	0.000 6	20	2	20	-20
P_3	0.0035	0.330	0.000 7	20	2	20	-20

4.2 灵敏度误差分析

本节进行电压和网损灵敏度误差分析。首先,在测试系统中随机选取5个节点(分别为节点5、6、15、16、28),随机注入一定量的有功功率与无功功

率,注入功率服从正态分布,如式(32)所示:

$$\Delta_i \sim N(0, 0.15\Delta_i) \quad (32)$$

式中: Δ_i 为注入节点的有功或无功功率; Δ_i 为节点基础负荷功率。

分别使用牛顿-拉夫逊方法与本文灵敏度模型计算配电网各节点电压幅值与网损情况,其中牛顿-拉夫逊方法通过Matpower 7.0工具计算,所得结果如表3所示。如表3所示,本文所提的灵敏度方法所得电压幅值误差不超过1%,网损误差不超过3%,均有较高的精确度。

表3 电压和网损灵敏度模型误差分析
Table 3 Error analysis of voltage and network loss sensitivity model

测试次数	节点电压误差/%	网损误差/%
1	0.07	0.29
2	0.08	2.96
3	0.06	0.08
4	0.07	1.88
5	0.07	2.33

4.3 场景分析

为分析配电网P2P电力交易市场对配电网运行的影响,本文设置以下3种场景,分别研究P2P交易中的电压约束与网损约束对配电网运行的影响,并对比分析。

场景1:不考虑电压约束的电能P2P交易市场。

场景2:不考虑网损约束的电能P2P交易市场。

场景3:本文设计的电能P2P交易市场(考虑网损约束与电压约束)。

3种场景下的交易电量以及配电网运行数据如表4所示。

表4 3种场景的运行数据
Table 4 Operation data of 3 scenarios

场景	有功功率/kW					无功功率/kvar					电压最低节点	最低电压
	P_1	P_2	P_3	C_1	C_2	P_1	P_2	P_3	C_1	C_2		
1	21.2	7.5	9.2	-20.0	-17.2	-13.2	-17.4	-7.2	13.4	24.9	18	0.909 0
2	21.2	7.4	8.8	-19.7	-17.7	-12.0	-16.0	-8.4	20.0	16.5	18	0.910 0
3	21.1	7.4	9.1	-20.0	-17.1	-14.0	-18.5	-8.0	15.9	25.0	18	0.910 0

从表3可以得知,在场景3的情况下,售卖方 P_1 、 P_2 、 P_3 在P2P市场中注入的有功功率分别为21.1、7.4、9.1 kW;消纳的无功功率分别为14.0、18.5、8.0 kvar,购买方 C_1 、 C_2 在P2P市场中消耗有功功率分别为20.0、17.1 kW;注入的无功功率分别为15.9、25.0 kvar。可观察到在不考虑电压约束的情

况下(即场景1),配电网的末端节点(节点18)的电压幅值在P2P电力交易时跌落至0.909 0,低于配电网电压安全运行下限(本文设为0.910 0),出现了线路末端电压过低情况。而在场景3,在考虑电压约束的情况下, C_1 和 C_2 社区无功功率注入较场景1增加,有效减小了配电网馈线压降,从而避免末端节点

电压过低。在仅考虑电压约束,不考虑网损约束(即场景2),由于忽略了网损约束,其节点电价仅受到电压约束乘子影响,各节点电价差异不大,节点电价模型逐渐退化为统一出清电价模型。

通过拉格朗日算子计算节点电价,所得结果如表4所示。因为考虑网损和节点电压约束,造成各节点电价不同。需要指出此处无功电价有正值和负值,可以很好地反应网络各节点无功功率稀缺程度,例如节点 P_1 处无功电价为负值,说明该节点需要消纳过剩无功功率。从前文对无功成本建模来看,各节点不论是产生或消纳无功,均需要一定的成本。结合表4和表5可以看出,不论注入或消纳无功,各节点均获得一定收益,这与无功成本建模一致。而在在不考虑网损约束时(场景2),仅剩电压上下限约束会对节点电价机制造成影响。在配电网绝大部分节点都没有发生电压越限的情况时(仅节点18越下限),电压约束产生的影响较小。因此,场景2中所有节点的电价在数值上相差不大。同时忽略了网损约束的上抬电价部分,场景2下的电价低于场景3中任意一个节点的电价。

表5 场景3的各节点出清电价
Table 5 Market clearing price of each bus in scenario 3

节点	有功电价/(美元·(kWh) ⁻¹)	无功电价(美元·(kvarh) ⁻¹)
P_1	0.373 8	-0.011 3
P_2	0.374 0	-0.011 2
P_3	0.384 0	-0.005 1
C_1	0.409 8	0.011 3
C_2	0.417 1	0.024 1
场景2	0.372 7	0.010 4

注:电价均为售电电价。

场景3中各市场参与方的有功与无功出力功率迭代过程如图4所示。有功和无功功率平衡约束所对应的乘子迭代情况如图5所示。由图4和图5可

见,市场参与方通过30次交互迭代达到收敛。本文所提出的P2P分布式出清算法具有较好的收敛性。

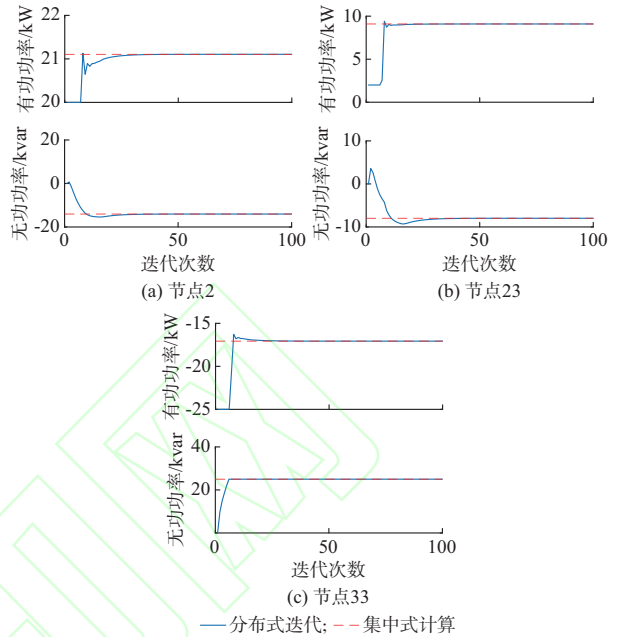


图4 场景3的部分节点出力情况
Fig. 4 Output of selected buses in scenario 3

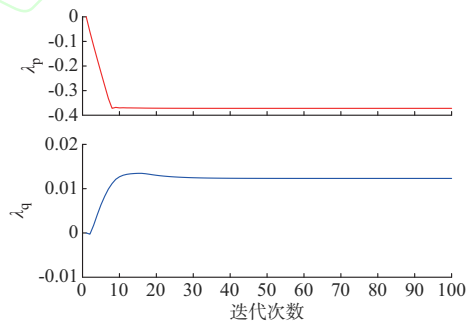


图5 场景2的乘子迭代情况
Fig. 5 Iteration process of multipliers in scenario 2

4.4 区块链平台的市场运行分析

如表6所示,通过区块链技术主要实现了P2P电力市场的电价与电量信息的传递交互以及市场结算等操作。

表6 原始电力信息
Table 6 Original power information

迭代轮次	有功功率/kW					无功功率/kvar				
	P_1	P_2	P_3	C_1	C_2	P_1	P_2	P_3	C_1	C_2
9	20.499	6.543	8.497	-20.0	-16.991	-13.804	-18.208	-6.575	20.000	25.0
57	21.105	7.352	9.095	-20.0	-17.069	-14.042	-18.523	-7.979	15.894	25.0

1) 加密信息的传递

在Z-ledger区块链平台上部署市场运行合约。以场景2中的第9和57轮信息交互为例,社区运营

商反馈的电量信息如表5所示。通过SHA-256算法对原始电量信息进行加密(由ASCII码转化为Hash),再传递给市场运行智能合约。市场运行合

将得到加密信息后,通过非对称加密技术进行解码,将 Hash 值转化为原本的信息。电量的加密与解密

信息如表 7 所示。解密信息传递的内容依次为“迭代轮次”,“有功电量”与“无功电量”。

表 7 加密电量信息
Table 7 Encrypted electricity information

迭代轮次	SHA-256算法加密 Hash 值	Hash 值解密信息
9	000b3b7e92cd668f0b5b37e098ad2903	Ite-9, 20.499, 6.543, 8.497, -20.0, -16.991, -13.804, -18.208, -6.575, 20.0, 25.0
57	0061cabca3bf77b2ef718b92dbc47856	Ite-57, 21.105, 7.352, 9.095, -20.0, -17.069, -14.042, -18.523, -7.979, 15.894, 25.0

2) 转账结算

在 Z-ledger 区块链平台上实现链上交易。该平台的交易链码与交易代币 Token 基于 Go 语言开发。假设 Token (代币) 和美元的折算汇率为 0.7 Token = 1 美元, P2P 市场运行周期为 30 min。市场流程时序的具体划分为: 0~5 min 为报价阶段; 5~20 min 为市场出清阶段; 20~30 min 为交易结算阶段。通过 SHA-256 算法对原始交易信息进行加密, 交易中链将加密后的交易信息链上储存, 便于日后校对查验。通过非对称加密技术可以将 Hash 值转化为原本的信息。交易的加密与解密信息如表 8 所示。解密信息的内容依次为交易序号、转账主体、交易有功电量、交易无功电量、交易货币、交易电价。

表 8 加密交易信息
Table 8 Encrypted transaction information

交易	SHA-256算法加密 Hash 值	Hash 值解密信息
1	001076859f0a936c1f30ec3b5e901fe2	Trade-1, Operator_to_P1, 21.105, -14.042, USD, 8.047 7
5	0045edae6bcecc002075f44050dde73c5	Trade-5, C2_to_Operator, 17.069, 25.0, USD, 6.517 8

各市场参与方在链上的地址与公钥信息如附录 A 表 A1 和表 A2 所示。全部交易如附录 A 图 A5 所示, 交易后市场运营账户信息如附录 A 图 A6 所示。附录 A 图 A7 为 3 笔有效的链上交易的具体信息。这三笔交易的内容分别为: 社区运营商 P_1 向市场运营出售有功电能, 并消纳无功电能获得收益, 市场运营向 P_1 转账 5.633 4 Token, 折合为 8.047 7 美元; 社区运营 P_2 向市场运营出售有功电能, 并消纳无功电能, 获得收益, 市场运营向 P_2 转账 2.067 4 Token, 折合为 2.953 4 美元; 社区运营 C_2 向市场运营购买有功电能, 并注入无功电能, 获得收益, 收入 4.562 4 Token, 折合为 6.517 8 美元。

5 结语

本文提出一种考虑配电网运行约束的事件驱动

型 P2P 电力交易市场机制及出清方法。通过电压灵敏度和网损灵敏度刻画了 P2P 电力交易对配电网运行的影响, 进而建立 P2P 电力交易的出清模型。基于拉格朗日乘子法设计分布式出清算法, 保障了用户的隐私, 并利用节点电价概念设计市场出清交互机制, 明确了 P2P 市场行为的实际物理意义。然后研究了基于区块链平台的本地 P2P 电力交易市场的实现, 利用智能合约实现了 P2P 电力交易市场的分布式出清, 构建了完全去中心化的市场运行模式。算例表明, 本文模型和方法能在保护配电网安全运行的前提下, 快速、有效处理配电系统电力社区之间的 P2P 电力交易需求。

由于考虑了网损与电压约束, 节点电价体系下必然会产生结算盈余。因此, 在后续研究中将继续研究本地 P2P 电力交易市场的结算盈余分配方法。

本文研究受到国家自然科学基金项目 (U1910216) 资助, 特此感谢!

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>), 扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] MORSTYN T, FARRELL N, DARBY S J, et al. Using peer-to-peer energy-trading platforms to incentivize prosumers to form federated power plants[J]. Nature Energy, 2018, 3(2): 94-101.
- [2] 国家能源局. 关于进一步深化电力体制改革的若干意见[EB/OL]. [2015-03-09]. http://www.gov.cn/xinwen/2015-03/09/content_2831228.htm. National Energy Administration. Several opinions on further deepening the reform of the electric power system [EB/OL]. [2015-03-09]. http://www.gov.cn/xinwen/2015-03/09/content_2831228.htm.
- [3] 国家发展改革委员会, 国家能源局, 国家工信部. 关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见[EB/OL]. [2016-02-24]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5082989.htm. National Development and Reform Commission, National

- Energy Administration, Ministry of Industry and Information Technology. Guiding opinions on promoting the development of "Internet+" smart energy [EB/OL]. [2016-02-24]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5082989.htm.
- [4] 王健,周念成,王强钢,等.基于区块链和连续双向拍卖机制的微电网直接交易模式及策略[J].中国电机工程学报,2018,38(17):5072-5084.
- WANG Jian, ZHOU Niancheng, WANG Qianggang, et al. Electricity direct transaction mode and strategy in microgrid based on blockchain and continuous double auction mechanism [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 5072-5084.
- [5] 单俊嘉,胡俊杰,吴界辰.面向虚拟电厂能量管理的点对点市场交易机制与模型[J].电网技术,2020,44(9):3401-3408.
- SHAN Junjia, HU Junjie, WU Jiechen. Peer-to-peer market trading mechanism and model for virtual power plant energy management [J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3401-3408.
- [6] 吴界辰,艾欣,胡俊杰,等.面向智能园区多产消者能量管理的对等模型(P2P)建模与优化运行[J].电网技术,2020,44(1):52-61.
- WU Jiechen, AI Xin, HU Junjie, et al. Peer-to-peer modeling and optimal operation for prosumer energy management in intelligent community[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 52-61.
- [7] 任洪波,吴琼,刘家明.耦合区域售电服务的分布式能源产消者经济优化与能效评估[J].中国电机工程学报,2018,38(13):3756-3766.
- REN Hongbo, WU Qiong, LIU Jiaming. Economic optimization and energy assessment of distributed energy prosumer coupling local electricity retailing services[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3756-3766.
- [8] CLAUDIA P, TUDOR C, MAECEL A, et al. Blockchain based decentralized management of demand response programs in smart energy grids[J]. Sensors, 2018, 18(1): 1-21.
- [9] NGUYEN C. An indie, off-the-grid, blockchain-traded solar power market comes to Brooklyn [EB/OL]. [2021-03-18]. <http://motherboard.vice.com/read/the-plan-to-power-brooklyn-with-a-blockchain-based-microgrid-transactive-solar>.
- [10] Tata power deploys first NB-IoT smart meters in Delhi [EB/OL]. [2021-04-12]. <https://www.smart-energy.com/industry-sectors/smart-meters/tata-power-deploys-first-nb-iot-smart-meters-in-delhi/>.
- [11] 国网电商公司牵头研制的“区块链+碳交易”国际标准获批立项 [EB/OL]. [2021-05-25]. <http://stock.xinhua08.com/a/20210525/1987959.shtml>.
- The "blockchain+carbon trading" international standard developed by the State Grid E-commerce Company was approved [EB/OL]. [2021-05-25]. <http://stock.xinhua08.com/a/20210525/1987959.shtml>.
- [12] ZHANG Z, LI R, LI F. A novel peer-to-peer local electricity market for joint trading of energy and uncertainty [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1205-1215.
- [13] 赵天辉,王建学,陈洋.面向综合能源交易的新型城镇分层市场架构和出清算法[J].电力系统自动化,2021,45(4):73-80.
- ZHAO Tianhui, WANG Jianxue, CHEN Yang. Hierarchical market structure and clearing algorithm for integrated energy trading of new-type towns [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4): 73-80.
- [14] KIM H, LEE J, BAHRAMI S, et al. Direct energy trading of microgrids in distribution energy market [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 6(2): 639-651.
- [15] CHEN T, SU W. Indirect customer-to-customer energy trading with reinforcement learning [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4338-4348.
- [16] SAMADI P, MOHSENIAN-RAD A H, SCHOBBER R, et al. Optimal real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid [C]// First IEEE International Conference on Smart Grid Communications, October 4-6, 2010, Gaithersburg, USA: 415-420.
- [17] JAY D, SWARUP K. Game theoretical approach to novel reactive power ancillary service market mechanism [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 1298-1308.
- [18] YUAN H, LI F, WEI Y, et al. Novel linearized power flow and linearized OPF models for active distribution networks with application in distribution LMP [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1): 438-448.
- [19] SZABO N. Formalizing and securing relationships on public networks [J]. First Monday, 1997, 2(9): 1-21.
- [20] PAUDEL A, SAMPATH L, YANG J, et al. Peer-to-peer energy trading in smart grid considering power losses and network fees [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 4727-4737.
- [21] ALSALEH I, FAN L. Distribution locational marginal pricing (DLMP) for multiphase systems [C]// North American Power Symposium (NAPS), September 9-11, 2018, Fargo, USA: 1-6.

冯昌森(1990—),男,博士,讲师,硕士生导师,主要研究方向:电力系统优化与控制、人工智能、区块链技术。E-mail: fcs@zjut.edu.cn

谢方锐(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向:区块链技术在电力系统中的应用。E-mail: 2111903068@zjut.edu.cn

胡嘉骅(1992—),男,博士,主要研究方向:电力系统灵活性,电力市场下的需求响应,计及可再生能源的电力市场辅助服务等方面的研究。E-mail: dreaminghu2009@163.com

张有兵(1971—),男,通信作者,教授,博士生导师,主要研究方向:智能电网、分布式发电及新能源优化控制、电动汽车入网、电力系统通信、电能质量监控。E-mail: youbingzhang@zjut.edu.cn

(编辑 王梦岩)

Market Design and Clearing Method of Peer-to-Peer Power Trading in Distribution System

FENG Changsen¹, XIE Fangrui¹, HU Jiahua², WEN Fushuan³, ZHANG Youbing¹

(1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. Economic Research Institute State Grid Zhejiang Electric Power Co., Hangzhou 310008, China;

3. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310007, China)

Abstract: With the ever-increasing penetration of distributed generation, terminal users in a distribution system have gradually changed from traditional consumers to prosumers who can generate electricity as well, which makes it possible for peer-to-peer (P2P) power trading among prosumers or between prosumers and consumers. Due to the uncertainty and fluctuation in output powers of renewable distributed generators, a more flexible market mechanism is urgently needed to address the decentralized peer-to-peer transactions. In this context, we propose an event-driven P2P power trading market mechanism along with its clearing method that effectively considers the operational constraints. At first, the relationship between the P2P market and the existing electricity utility services is discussed, and the event-driven rules and market operation mechanism are established. Secondly, voltage and loss sensitivity models are used to describe the impacts of P2P power trading on the operation of the distribution network, and then the market is cleared in a distributed manner through the Lagrangian multiplier method. Thirdly, a fully decentralized P2P power trading market mechanism is implemented based on the blockchain platform. Finally, the effectiveness of the proposed model and method is demonstrated by case studies.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777193).

Key words: distribution system; peer-to-peer transaction; electricity trading mechanism; distributed optimization; Lagrangian multiplier method; blockchain technology



附录 A

表 A1 市场参与者链上账户地址信息

Table A1 Account address information of market participants on the blockchain

市场参与者	地址 Hash 信息
市场运营(合约)	i8f6a9ae5e89ec9878f7b8d8f16765bb8e343242c
社区运营 P ₁	ibf42fe4600b1b975b56fa30ad57303e038e87901
社区运营 P ₂	ief0e7ff2b5f519c926f55d3d0645eb6f9cf3aace
社区运营 P ₃	i4cbeaa1d1e64243d438b398e7936b614ca14c8fe
社区运营 C ₁	i73fffa0eba338a99875ef3e98efce215eff8a721
社区运营 C ₂	i4d5486759dace29ef8631de7eb272f0817baf0b4

表 A2 市场参与者链上账户公钥信息

Table A2 Account public key information of market participants on the blockchain

市场参与者	公钥 Hash 信息
市场运营(合约)	c645336d564b0caef4c85d6ba1fff0743baa1e661cc5b531fe04fc757f7d778e50284 d5201c05228381fb87005453d27dba9af637f1990729a44beb95db0beb26
社区运营 P ₁	46bfa76771293a5a18291b9c0ef0678b914d62124b9759cf2c38dd827c02c446c546 4382e1e9362ae8f9796ae7e5d9a006918abf84a4c9105e1dd2d4e490c480
社区运营 P ₂	d4d2b017febcb5d3d7df14843768bcc1174458b280448ee0c4ea169ffbc932dd8c30 0221b581eb699a8ae70d40cb16f4de929ae6549e2064acb667bc9a0c4d20
社区运营 P ₃	f3be2d76f681f6135e2380c7deb730d32c5b82ff114057f5de8e2988eabd27712d56 5bfc7fdab6fbbd3fe7ade124748da2715d7c9ca74c3923873a12a1fd40fb
社区运营 C ₁	491eef2b3f9bfb3fca3485fdaa94a47e00a3ad9c0ffce9d6e95056b3a4a09a92fec1a3 7a0c78134e7a4f1d6612da272e11e6ea7d23be2afc8137b80544029277
社区运营 C ₂	7c5847726ea67a32079e5becbcb3dd26883c550500d000fd7141fb2d4377798bfc 33b5f096ab1fd496cbffe5c837b3b7677d69167f475123ce8174a9d4840a5

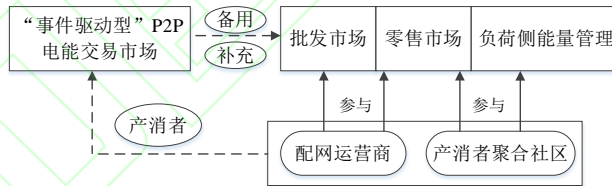


图 A1 P2P 电力交易市场与现有电力市场服务的关系
Fig. A1 The relationship between the P2P power trading market and the existing utility services

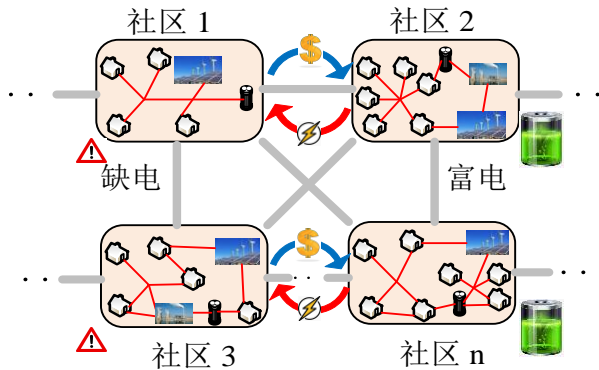


图 A2 P2P 电力交易示意图
Fig. A2 The schematic diagram of P2P power trading

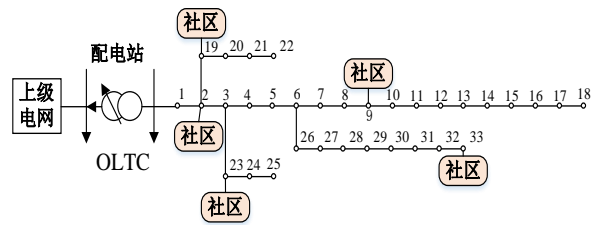


图 A3 IEEE 33 节点配电系统
Fig. A3 IEEE 33-bus distribution network

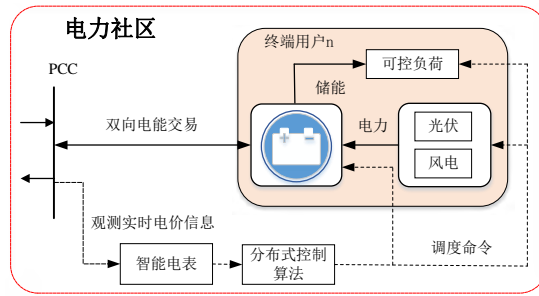


图 A4 电力社区内部结构
Fig. A4 Community structure

全部交易	
TxHash	交易时间
833e0741cf3513ae4e8c5fb88939ade15c0d429df8a80c1664c1a2e882feb763	2021-06-10 12:19:17
af0fd90f0daf3035fa90300cb9da746685995c9d00269485bfee53c2e20acaa	2021-06-10 12:19:00
a69f77409b03a06f6383e86102b423901460293ae6536a9a716d49d36eacefbf	2021-06-10 12:18:37
cbb9747028567a2096295d4604c743831c229eed4f5ed275a65bda3bc7493c1c	2021-06-10 12:18:25
c18c741632922a67d7d96e0c6d3ef164687f5aff6df0a4dd2f0cab631794a888	2021-06-10 12:18:11

图 A5 交易总记录信息
Fig. A5 Transaction record information

资产凭证名称	总额
C1	5.6176
C2	4.5624
Operator	89.8265
ZIG	99999994967.86

图 A6 市场运营商交易后账户信息
Fig. A6 Ex-post account information of market operator



图 A7 P2P 电力交易转账信息
Fig. A7 Transfer information in P2P power transaction