

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(P2P)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; 电力市场; 点对点交易; 交易机制; 分布式优化; 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电力交易已具备一定的基础。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。现有研究主要侧重经济性角度,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]。一种基于区块链技术的Exergy点对点能源交易平台已投入商业运行^[9],安装在产消用户侧的智能电表将供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。印度新德里启动了P2P太阳能交易项目^[10]。由国家电网有限公司牵头的“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,成为全球最先立项的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能源发电设备,其出力存在一定的波动性和不确定性,需要设计灵活

收稿日期: 2021-06-27; 修回日期: 2021-11-17。

上网日期: 2022-03-08。

国家自然科学基金资助项目(51777193)。

的市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电力交易以广义纳什议价(generalized Nash bargaining)问题建模,并设计了收益分配机制,促进微网间的电力交易。在目前关于P2P交易机制的研究中,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。通过灵敏度法刻画了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

地P2P电力交易市场的启动、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P2P电能交易市场的目的是促进零售能源交易。除了现有的集中型供电服务,这种市场机制将提供额外的能源交易机会,无须全年不间断开放,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:

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

式中: $U_i(p_i, q_i)$ 为购买方效用函数; $C_j(p_j, q_j)$ 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/流出的有功和无功电量; N_b 和 N_s 分别为购买方和售卖方集合。

需要指出的是,目标函数为与无功电能设置相对应的成本函数,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 $U_i(p_i)$ 可以表示为购电、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 $C_j(p_j)$ 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,应计及其相应的无功成本。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

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 $C_i(q_i)$ 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。相较于配电网日常基础供电功率,P2P电力交易的功率相对较小。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: 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。

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:

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

式中: $\text{Re}(\cdot)$ 表示求实部。

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 $\Delta V_i(\mathbf{p}, \mathbf{q})$:

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

式中: \mathbf{p} 和 \mathbf{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, N 为配电网节点总数; $\partial V_i / \partial P$ 和

$\partial V_i / \partial Q$ 为电压灵敏度,分别表示节点*i*由于配电网中各节点注入有功功率 P 、无功功率 Q 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。定义根节点编号为1,子节点的编号大于父节点,则关联矩阵元素如式(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 L_k 的单线示意图。

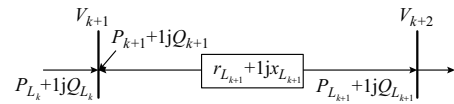


图1 支路单线图

Fig. 1 Single-line diagram of branch

节点*k*与*k+1*组成的支路 L_k 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: $P_{\text{Loss}}^{L_k}$ 和 $Q_{\text{Loss}}^{L_k}$ 分别为支路 L_k 的有功网损和无功网损; 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 求导并代入式(13)至式(16),可得网损灵敏度的递归表达式。以 $\partial P_{\text{Loss}}^{L_k} / \partial P_i$ 为例,可得:

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

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,系统有功、无功网损 P^{Loss} 、 Q^{Loss} 可由网损灵敏度近似表示:

$$P^{\text{Loss}}(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \approx \sum_{i=1}^N \frac{\partial P^{\text{Loss}}}{\partial P_i} p_i + \sum_{i=1}^N \frac{\partial P^{\text{Loss}}}{\partial Q_i} q_i \quad (18)$$

$$Q^{\text{Loss}}(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \approx \sum_{i=1}^N \frac{\partial Q^{\text{Loss}}}{\partial P_i} p_i + \sum_{i=1}^N \frac{\partial Q^{\text{Loss}}}{\partial Q_i} q_i \quad (19)$$

式中: $\partial P^{\text{Loss}}/\partial P_i$ 、 $\partial P^{\text{Loss}}/\partial Q_i$ 、 $\partial Q^{\text{Loss}}/\partial P_i$ 、 $\partial Q^{\text{Loss}}/\partial Q_i$ 为节点 i 的网损灵敏度,分别表示由于注入有功、无功功率而产生的有功、无功网损变化。

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 电力交易市场综合优化模型

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:

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

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; \bar{V}_i 和 \underline{V}_i 分别为电压幅值 V_i 的上、下限; \hat{V}_i 为配电网中节点 i 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:

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

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式(24)。

$$\{p_n^{(t)}, q_n^{(t)}\} := \arg \min_{p_n, q_n} \ell(\mathbf{p}, \mathbf{q}, \bar{\mu}^{(t)}, \underline{\mu}^{(t)}, \lambda_p^{(t)}, \lambda_q^{(t)}) \quad (24)$$

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,直至迭代收敛。

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

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

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

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

式中: $\rho^{(t)}$ 为乘子更新的步长系数; ∇ 表示计算 λ_p 、 λ_q 、 $\bar{\mu}$ 、 $\underline{\mu}$ 的拉格朗日函数 ℓ_{λ_p} 、 ℓ_{λ_q} 、 $\ell_{\bar{\mu}}$ 、 $\ell_{\underline{\mu}}$ 的偏导数;上标“+”为取正符号。

显然,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 为:

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

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

式中: $\partial P^{\text{Loss}}/\partial P$ 、 $\partial P^{\text{Loss}}/\partial Q$ 、 $\partial Q^{\text{Loss}}/\partial P$ 、 $\partial Q^{\text{Loss}}/\partial Q$ 为网损灵敏度; $\partial V/\partial P$ 和 $\partial V/\partial Q$ 分别为电压幅值对有

功率与无功功率的灵敏度。

以购买方为例,此时式(24)可等价转化为:

$$\{p_n^{(t)}, q_n^{(t)}\} := \arg \min_{p_n, q_n} (-U_n(p_n, q_n) + \tau_{p,n}^{(t-1)} p_n + \tau_{q,n}^{(t-1)} q_n) \quad (31)$$

式中: $\tau_{p,n}^{(t-1)}$ 和 $\tau_{q,n}^{(t-1)}$ 分别为上一轮迭代中计算获得的节点有功电价与节点无功电价。

式(31)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市场运营者发布的节点电价 $\tau_p^{(t)}$ 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市场运营者。市场运营者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,若市场运营者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,因而本文用智能合约来代替市场运营者的职能,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。

本文编写相应的智能合约,实现市场的开启、运行以及结算,主要包括市场触发合约、市场运行合约与出清结算合约。

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时(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。

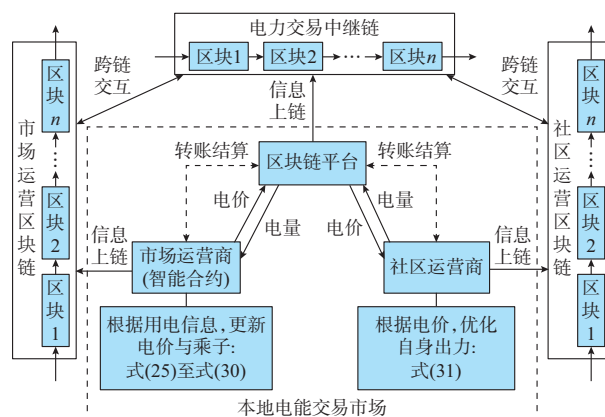


图2 区块链平台上P2P电力交易市场的信息交互
Fig. 2 Information interaction of P2P power trading market on blockchain platform

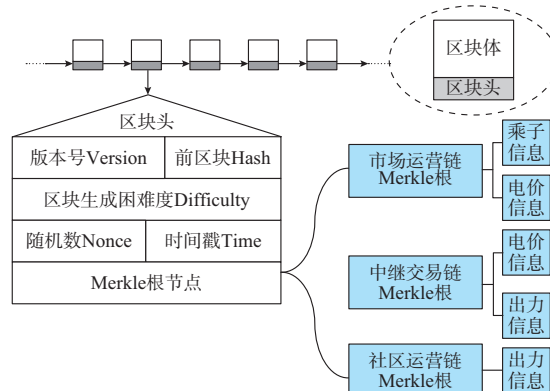


图3 本地P2P市场区块链结构
Fig. 3 Blockchain structure of local P2P market

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 、 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参照文献[20]。无功成本函数系数参考文献[21],设定为有功成本函数系数的 10%,如表 1 和表 2 所示,其中“ $-$ ”和“ $_$ ”分别表示对应变量的上、下限。

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

购买方	$\theta_{p,i}/(\text{美元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h}^2)^{-1})$	$\beta_{p,i}/(\text{美元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$	$\theta_{q,i}/(\text{美元} \cdot (\text{kvar} \cdot \text{h}^2)^{-1})$	\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	$a_{p,j}/(\text{美元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h}^2)^{-1})$	$b_{p,j}/(\text{美元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$	$\theta_{q,j}/(\text{美元} \cdot (\text{kvar} \cdot \text{h}^2)^{-1})$	\bar{p}_j/kW	$\underline{p}_j/\text{kW}$	\bar{q}_j/kvar	$\underline{q}_j/\text{kvar}$
P_1	0.004 0	0.205	0.000 8	30	2	30	-30
P_2	0.003 0	0.330	0.000 6	20	2	20	-20
P_3	0.003 5	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,

表 4 3 种场景的运行数据

Table 4 Operation data of three scenarios

场景	有功功率/kW					无功功率/kvar					电压最低节点编号	最低电压/p.u.
	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 4 可知,场景 3 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 、

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。由表 3 可知,本文所提的灵敏度方法所得电压幅值误差不超过 0.1%,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 P2P 电力交易市场。

场景 2:不考虑网损约束的 P2P 电力交易市场。

场景 3:本文设计的 P2P 电力交易市场(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。

C_2 在 P2P 市场中消耗的有功功率分别为 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 p.u.,低于配电网电压安全运行下限(本文设为0.910 0 p.u.),出现了线路末端电压过低情况。而场景3中,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,不考虑网损约束时(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。

通过拉格朗日乘子计算节点电价,所得结果如表5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,可以很好地反映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功率,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功率,各节点均获得一定收益,这与无功成本建模一致。而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处电压越下限),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·(kW·h) ⁻¹)	无功电价/ (美元·(kvar·h) ⁻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。

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

场景3中各市场参与方的有功与无功功率迭代过程如图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。

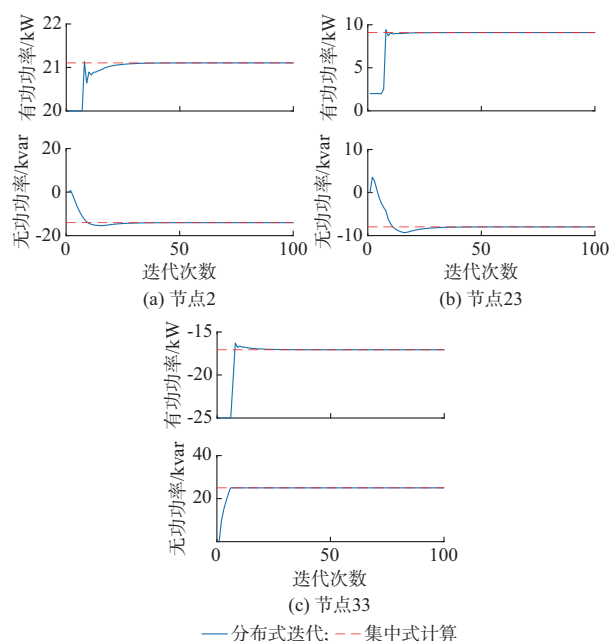


图4 场景3的部分节点出力
Fig. 4 Output of partial buses in scenario 3

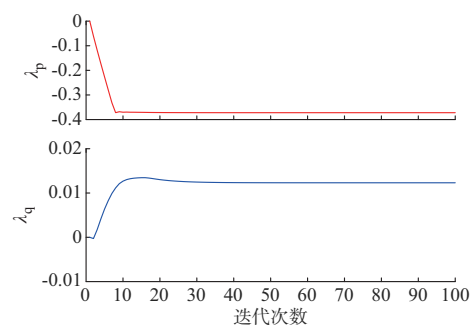


图5 场景3的乘子迭代情况
Fig. 5 Iteration process of multipliers in scenario 3

4.4 区块链平台的运行分析

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。

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 6 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。市场运行合约得到加密信息后, 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、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 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	001076859f0a936c1f30ec3b5e901fc2	Trade-1, Operator_to_P1, 21.105, -14.042, USD, 8.047 7
5	0045edae6bccc002075f44050dde73c5	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。全部交易如图 A5 所示, 交易后市场运营账户信息如图 A6 所示。图 A7 所示为 3 笔有效的链上交易的具体信息。这 3 笔交易的内容分别为: 社区运营商 P_1 向市场运营商出售有功电能, 并消纳无功电能获得收益, 市场运营向 P_1 转账 5.633 4 Token, 约折合为 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, 约折合为 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 4.562 4 Token, 约折合为 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]. [2021-03-09]. 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]. [2021-03-09]. http://www.gov.cn/xinwen/2015-03/09/content_2831228.htm.

- [3] 国家发展改革委,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].[2021-02-24].
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]. [2021-02-24]. 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, SCHOBER R, et al. Optimal real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid [C]// 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。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 for 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 of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310008, China;

3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: With the continuous grid connection of intelligent devices on the user side in distribution systems and the promotion of electricity market reform, more and more power users have changed from traditional consumers to prosumers who can generate electricity, making the peer-to-peer (P2P) power trading between end users possible. In this context, an event-driven P2P power trading market mechanism and its clearing method are proposed, which can effectively consider the operation constraints of distribution systems. Firstly, the relationship between the P2P market and the current power market is discussed, and the event-driven rules and market operation mechanism are preliminarily established. Secondly, the sensitivity is used to describe the influence of P2P trading on the power system operation. Then, the market clearing optimization model is established, and the Lagrange multiplier method is used for distributed clearing. Thirdly, a fully decentralized P2P power trading market mechanism is realized based on the blockchain platform. Finally, an example is given to verify that the proposed model can deal with the demand of P2P power trading between power communities in distribution systems quickly and effectively on the premise of protecting the safe operation of distribution networks.

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

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

