

配电网安全导向的分布式资源P2P区块链交易机制研究

许伦¹,王蓓蓓¹,李雅超¹,许洪华²,刘少君²,朱红²

(1. 东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096;2. 国网江苏省电力有限公司 南京供电分公司,江苏 南京 210019)

摘要:配电网中分布式可再生能源的持续增加以及以区块链为代表的分布式记账技术的快速发展,为配电网展开去中心化的点对点(P2P)交易提供了发展动力和技术支持,然而持续增多的分散P2P交易可能导致节点电压越限、系统网损增加等问题。为此提出一种以配电网安全为导向的分布式资源P2P交易机制。首先,基于配电网节点电压和系统网损的线性化推导,提出一种P2P交易对于配电网安全影响的灵敏度模型,从而将传统高低价匹配的交易撮合策略修正为以配电网安全为导向的P2P交易策略;然后,基于以太坊平台运算能力的限制提出具有简单运算特性的去中心化的交易机制,并设计了相关智能合约。算例分析表明,所提出的以配电网安全为导向的P2P交易机制,可以在交易撮合过程中有效反映P2P交易对配电网运行的影响,能够根据电网安全裕度水平优化交易次序,撮合更多有利于配电网安全运行和降低网损的交易达成,并且交易模型复杂度低,可以实现链上求解,不需要链下配置优化软件,避免了隐私泄露。

关键词:配电网安全;P2P;网损;电压越限;智能合约;隐私保护

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202109045

0 引言

实现分布式能源 DERs(Distributed Energy Resources)的有效开发是未来实现“双碳”目标的重要途径,DERs的快速发展使得传统的电力用户成为兼具发电能力的产销者^[1]。因此,积极开发配电系统电力市场,可以优化配电系统内的 DERs 利用效率,缓解配电系统内部 DERs 的消纳压力,解决新形势下 DERs 的高渗透率问题^[2-3]。

事实上,由于信息和通信技术的新进展,区块链以及其他分布式账本技术的出现,为配电系统电力交易提供了一种合适的交易平台及架构,许多学者已将区块链技术视为实现点对点 P2P(Peer-to-Peer)交易的基础。文献[4]针对传统的集中交易模型存在成本高、效率低、透明度低等问题,提出基于区块链技术的 P2P 交易机制。在此基础上,文献[5-6]分别针对 P2P 市场交易模式在微电网、需求响应等方面的应用进行了进一步探索,证明了区块链技术应用于电力系统的可行性。

然而,不同于普通商品交换,在配电系统中开放分散的 P2P 市场缺乏统一调度中心协调的情况下允许用户彼此交易能源,必然会对配电网的运行状态产生影响甚至会危及系统安全运行,因此文献[7]认

为在配电网中进行 P2P 交易需要设置配电网的物理约束。

目前,针对 P2P 交易对配电网安全运行的影响,国内学者大多采用传统的配电系统运营商 DSO(Distribution System Operator)安全校验的方法,需要在交易匹配结束后再进行集中的安全校核过程,违背了 P2P 交易的初衷,降低了 P2P 交易的效率。国外学者虽然针对分布式安全校验进行了研究,但很少基于区块链的运算能力进行建模分析,判断交易安全影响的过程需要对每笔交易进行复杂的计算^[8-9],计算复杂度高,运算时间长,难以通过区块链实现。文献[10]通过 Node.js 模块实现了区块链平台和数值优化平台的联动,将复杂的安全判断和交易撮合计算通过链下平台实现,解决了区块链平台运算能力限制的问题,但带来了隐私泄露的风险。同时,部分学者基于直流模型在配电网中展开研究,使计算模型转变为一个线性化模型,降低了运算难度,但造成了误差^[11-12]。在配电市场开展 P2P 交易,由于配电网的辐射状结构,线路阻塞不再是系统运行的首要约束^[13],节点电压越限成为配电网安全校核的主要对象,但目前的文献主要从阻塞和网损角度进行考虑^[14],对电压质量问题考虑不足。

为此,本文设计了一种以配电网安全为导向的分布式资源 P2P 交易机制,其核心思想是将配电网安全校核过程加入分布式资源 P2P 交易撮合模型中,同时实现交易匹配和安全校核,保证系统安全运行,提高交易完成效率;同时,为了保证交易模型能够部署在区块链上,实现利用区块链有限的运算能力完成交易过程全链上求解,基于配电网的物理和

收稿日期:2021-06-16;**修回日期:**2021-08-21

基金项目:国家电网公司科技项目(泛在物联背景下主动配电网电压控制深度强化学习策略研究)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(Research on Deep Reinforcement Learning Strategy of Active Distribution Network Voltage Control under Ubiquitous Internet of Things)

运行特征进行P2P交易对于配电网安全影响的灵敏度模型推导,基于灵敏度模型对P2P交易过程实现线性化和简化;最后,针对本文提出的P2P交易机制设计了相关智能合约,并在以太坊平台上进行了仿真验证。

1 配电网安全导向的P2P市场交易架构设计

当前在配电网开展的电力交易涉及多种类型的市场机制,至少包含存在DSO的集中式交易机制以及基于分布式的P2P交易机制。考虑到P2P市场运行初期,其交易量和规模均不大,因此配电网的电力交易主要由集中式市场完成,P2P市场更多地是作为集中式交易的补充,本文聚焦于配电网集中式市场完成后,利用集中式市场交易结果的潮流断面信息对配电网安全运行进行评估,指导P2P市场展开以配电网安全为导向的市场出清过程。此时,由于集中式市场完成了配电网绝大多数能源交易,交易规模较小的P2P交易在当前断面下,配电网尚存的可输送能力是一个随P2P交易配对路径变化的线性系统^[15],通过对配电网执行集中交易结果的潮流断面信息可以推导出P2P交易对电网影响的灵敏度模型,用以衡量P2P交易对配电网网损以及节点电压的影响,对应参数分别为网损灵敏系数 C_{LS} 和电压灵敏系数 C_{VS} 。

配电网安全导向的P2P市场交易架构如图1所示,在集中式交易结果的执行过程后,DSO利用潮流断面信息可以计算各个节点的 C_{VS} 和 C_{LS} ,用户P2P交易对电网的影响可以视为关于 C_{VS} 和 C_{LS} 的线性化模型,因此可以利用DSO传输的潮流断面信息开展以配电网安全为导向的P2P交易。

在DSO集中出清之后,用户购、售电的剩余交易意愿可以通过区块链平台支撑的P2P市场完成,通过在P2P交易过程中嵌入 C_{VS} 和 C_{LS} ,简化了交易安全校验过程,使得校验过程融入P2P撮合过程,提升了交易效率,并且支撑P2P交易的区块链平台不再需要接入额外的优化软件,避免了链下求解的隐私泄露问题。因此下文基于以太坊Remix平台搭建配电网安全导向的P2P市场交易平台,同时考虑到平台运算能力的限制,在用户的智能合约中嵌入 C_{VS} 和 C_{LS} ,设计基于区块链技术的P2P交易机制。

2 P2P交易灵敏度模型推导

区块链平台的运算能力限制使得传统的潮流计算方法难以适用。本文考虑到在P2P交易规模较小的情况下,配电网尚存可输送能力是一个线性系统,因此通过线性化潮流推导,得到评估P2P交易安全影响的灵敏度模型,降低安全校验难度。

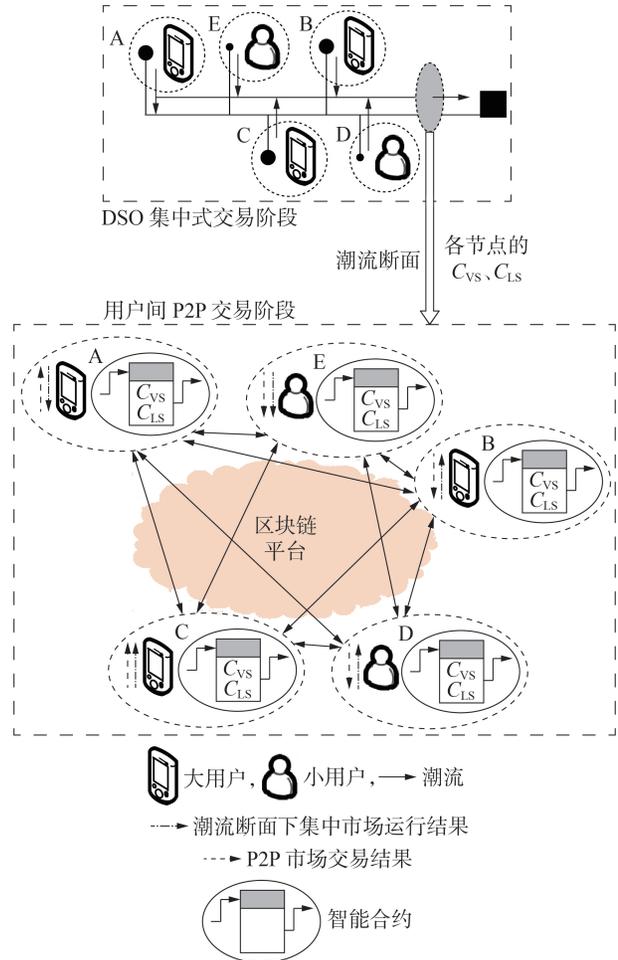


图1 配电网安全导向的P2P市场交易架构

Fig.1 P2P market transaction architecture oriented by distribution network security

2.1 电压灵敏系数模型

本文通过DSO传输的潮流断面信息(节点注入功率、电压)以及配电网公布的系统参数,进行 C_{VS} 的推导,得到可以反映节点负荷功率变化对系统各个节点电压影响的灵敏度模型,假设支路的首、末节点分别为 i, j ,支路首、末节点的电压及其相角分别为 $(V_i, \delta_i), (V_j, \delta_j)$,支路阻抗为 $Z_{ij} = r_{ij} + jx_{ij}$ 。

基于前期工作^[16],已知节点 i 的注入功率可拆分为只与节点电压幅值有关的前项以及只与节点电压相角有关的后项,因此可以写成如下矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} P' \\ Q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B'_2 & B'_1 \\ -B'_1 & B'_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta' \\ V' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B'_2 \\ -B'_1 \end{bmatrix} \delta_1 + \begin{bmatrix} B'_1 \\ B'_2 \end{bmatrix} V_1 = B_E \begin{bmatrix} \delta' \\ V' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B'_2 \\ -B'_1 \end{bmatrix} \delta_1 + \begin{bmatrix} B'_1 \\ B'_2 \end{bmatrix} V_1 \quad (1)$$

式中: P', Q', δ', V' 分别为不包含根节点的有功功率、无功功率、电压相角、电压幅值的向量; B'_1, B'_2 分别为矩阵 B_1, B_2 去除第一行和第一列后的矩阵; B'_1, B'_2 分别为矩阵 B_1, B_2 的第一列元素去除第一行后的向量; B_E 为由 B_1, B_2 组成的矩阵; V_1, δ_1 分别为根节点

的电压幅值、相角。

B_1 、 B_2 的元素可以表示为:

$$B_1(i, j) = \begin{cases} \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} & i \neq j \\ \sum_{j=1, j \neq i}^{N_B} \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} & i = j \end{cases} \quad (2)$$

$$B_2(i, j) = \begin{cases} \frac{x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} & i \neq j \\ \sum_{j=1, j \neq i}^{N_B} \frac{x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} & i = j \end{cases}$$

式中: N_B 为系统节点数目。

因此,当配电系统节点负荷发生变化时,其对配电网各个节点电压的影响可以进行量化,即 C_{VS} :

$$C_{VS}(i, j) = \frac{\partial V_i}{\partial P_j^D} = -\frac{\partial V_i}{\partial P_j} = -B_E^{-1}(N_B + j - 2, i - 1) \quad (3)$$

式中: P_j^D 为节点 j 的负荷。

2.2 网损灵敏系数模型

假定线路功率的正方向为父节点流向子节点,流过支路 L_k 的潮流可以表示为:

$$\begin{cases} P_{L_k} = \sum_{j=k+1}^{N_B} S(k+1, j) P_j^D + \sum_{j=k+2}^{N_B} S(k+1, j) P_{Loss}^{L_{j-1}} \\ Q_{L_k} = \sum_{j=k+1}^{N_B} S(k+1, j) Q_j^D + \sum_{j=k+2}^{N_B} S(k+1, j) Q_{Loss}^{L_{j-1}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_{L_k} 、 Q_{L_k} 分别为流过支路 L_k 的有功、无功功率; P_j^D 、 Q_j^D 分别为节点 j 接入的有功负荷、无功负荷; $P_{Loss}^{L_{j-1}}$ 、 $Q_{Loss}^{L_{j-1}}$ 分别为节点 j 到其父节点支路 L_{j-1} 的有功、无功网损; $S(k+1, j)$ 为表示支路 L_k 的尾节点 $k+1$ 与下游节点 j 之间父子节点关系的二元变量。

同时,节点 i 负荷有功变化对支路 L_k 有功网损的影响可以表示为:

$$\frac{\partial P_{Loss}^{L_k}}{\partial P_i^D} = \frac{\partial \left(\frac{P_{L_k}^2 + Q_{L_k}^2}{V_{k+1}^2} r_{L_k} \right)}{\partial P_i^D} = \left(2P_{L_k} \frac{\partial P_{L_k}}{\partial P_i^D} + 2Q_{L_k} \frac{\partial Q_{L_k}}{\partial P_i^D} \right) \frac{r_{L_k}}{V_{k+1}^2} \quad (5)$$

式中: $P_{Loss}^{L_k}$ 为支路 L_k 的有功网损; r_{L_k} 为支路 L_k 的电阻; V_{k+1} 为支路 L_k 的下游节点电压。

$\frac{\partial P_{L_k}}{\partial P_i^D}$ 以及 $\frac{\partial Q_{L_k}}{\partial P_i^D}$ 可以进一步表示为:

$$\begin{cases} \frac{\partial P_{L_k}}{\partial P_i^D} = S(k+1, i) + \sum_{j=k+2}^{N_B} S(k+1, j) \frac{P_{Loss}^{L_{j-1}}}{\partial P_i^D} \\ \frac{\partial Q_{L_k}}{\partial P_i^D} = \sum_{j=k+2}^{N_B} S(k+1, j) \frac{Q_{Loss}^{L_{j-1}}}{\partial P_i^D} \end{cases} \quad (6)$$

因此,对于DSO传输的潮流数据,通过式(4)—

(6)的前推回代,可以推导出节点 i 负荷有功变化对于系统网损的影响,即 C_{LS} :

$$C_{LS}(i) = \frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_i^D} = \sum_{k=1}^{N_L} \frac{\partial P_{Loss}^{L_k}}{\partial P_i^D} \quad (7)$$

式中: N_L 为系统支路数。

由式(3)及式(7)可以看出,对于特定的潮流断面,各个节点负荷的单位变化对系统各个节点的电压及系统总网损的影响是线性的,且灵敏系数可以通过集中式交易的潮流断面得到。

3 基于灵敏系数的P2P市场交易机制设计

为了实现在去中心化的区块链平台上进行P2P交易,本文利用 C_{VS} 、 C_{LS} 量化P2P交易对系统安全运行的影响从而调整交易的报价排序,实现在P2P交易撮合过程融入交易的安全校核,使得有利于系统运行的交易优先被撮合,危及系统安全运行的交易不被撮合。主要步骤分为:价格调整;交易匹配;出清和结算。

3.1 价格调整过程

本文交易次序的优化体现在价格的调整,具体过程如下:

1) DSO根据配电网物理参数以及潮流断面数据,通过式(3)和式(7)确定参与交易的各个节点的 C_{VS} 、 C_{LS} ,并下载到P2P交易区块链平台;

2) 区块链平台内嵌的智能合约依据各个购电用户、售电商的报价和报量以及购电用户、售电商所在节点的 C_{VS} 和 C_{LS} ,对报价进行调整以优化各个交易方的优先级。

以节点 m 处的售电商为例,在智能合约中的报价调整过程如下。

假设节点 m 处的售电商通过智能合约申报出售功率 ΔP_m ,根据节点 m 的 C_{VS} 可以计算得到节点 m 的功率变化引起节点 i 的电压变化量 ΔV_i 为:

$$\Delta V_i = C_{VS}(i, m) (-\Delta P_m) \quad (8)$$

因此,智能合约更新节点 i 的电压 V_i 为:

$$V_i = V_i^* + \Delta V_i \quad (9)$$

式中: V_i^* 为P2P交易开展前DSO公布的节点 i 的电压。

若电压越限,则记录越限量为 d_i ,节点 m 处的售电商导致的电压越限总量与其出售功率的比值记为电压灵敏度因子 η_m^V ,即:

$$\eta_m^V = \frac{\sum_{i \in N_{dv}} d_i}{\Delta P_m} \quad (10)$$

式中: N_{dv} 为电压越限节点集合。

同时,智能合约通过 ΔP_m 以及节点 m 的网损灵敏系数模型,可以计算得到节点 m 处的售电商出售功率引起的系统总网损变化量 ΔP_{Loss} 为:

$$\Delta P_{\text{Loss}} = C_{\text{LS}}(m)(-\Delta P_m) \quad (11)$$

节点 m 处的售电商导致的网损增量与其出售功率的比值记为网损灵敏度因子 η_m^{Loss} , 即:

$$\eta_m^{\text{Loss}} = \frac{\Delta P_{\text{Loss}}}{\Delta P_m} \quad (12)$$

为了对所有参与 P2P 交易的交易方的优先级进行调整, 智能合约对各灵敏度因子进行标准化计算, 即:

$$\hat{\eta}_m^{\text{V}} = \frac{\eta_m^{\text{V}} - \bar{\eta}^{\text{V}}}{\sqrt{\frac{1}{N^{\text{sell}} - 1} \sum_{m=1}^{N^{\text{sell}}} (\eta_m^{\text{V}} - \bar{\eta}^{\text{V}})^2}} \quad (13)$$

$$\hat{\eta}_m^{\text{Loss}} = \frac{\eta_m^{\text{Loss}} - \bar{\eta}^{\text{Loss}}}{\sqrt{\frac{1}{N^{\text{sell}} - 1} \sum_{m=1}^{N^{\text{sell}}} (\eta_m^{\text{Loss}} - \bar{\eta}^{\text{Loss}})^2}} \quad (14)$$

式中: $\bar{\eta}^{\text{V}}$ 为 $\eta_m^{\text{V}} (m=1, 2, \dots, N^{\text{sell}})$ 的平均值; $\bar{\eta}^{\text{Loss}}$ 为 $\eta_m^{\text{Loss}} (m=1, 2, \dots, N^{\text{sell}})$ 的平均值; N^{sell} 为售电商数目。

因此, 在匹配合约中, 对节点 m 处售电商的报价进行调整, 公式如下:

$$\hat{\lambda}_m^{\text{sell}} = \lambda_m^{\text{sell}} + \alpha \hat{\eta}_m^{\text{Loss}} + \beta \hat{\eta}_m^{\text{V}} \quad (15)$$

式中: λ_m^{sell} 为节点 m 处的售电商的报价; $\hat{\lambda}_m^{\text{sell}}$ 为智能合约调整后节点 m 处的售电商报价; α 、 β 为调整步长, 在智能合约内部可以根据配电网运行安全性要求、P2P 交易规模以及历史调整效果进行确定和调整。

3.2 交易匹配过程

由于智能合约调整后的报价包含了配电网安全约束部分, 因此通过报价的高低匹配可以同时表示交易的撮合过程和安全校验过程。本文假定 P2P 交易匹配的目标设置为调整后价格的社会福利最大化, 即:

$$\max \left\{ \sum_{i=1}^{N^{\text{buy}}} \hat{\lambda}_i^{\text{buy}} q_i^{\text{buy}} - \sum_{j=1}^{N^{\text{sell}}} \hat{\lambda}_j^{\text{sell}} q_j^{\text{sell}} \right\} \quad (16)$$

式中: N^{buy} 为购电用户数目; $\hat{\lambda}_i^{\text{buy}}$ 、 $\hat{\lambda}_j^{\text{sell}}$ 分别为购电用户、售电商调整后的报价, 两者的计算过程一致; q_i^{buy} 、 q_j^{sell} 分别为购电用户、售电商的申报量。

因为配电网安全校验过程已经在价格调整过程中进行了建模, 因此交易只需要满足如下功率平衡约束:

$$\sum_{i=1}^{N^{\text{buy}}} q_i^{\text{buy}} = \sum_{j=1}^{N^{\text{sell}}} q_j^{\text{sell}} \quad (17)$$

通过平衡约束将最优匹配的寻优过程等效为将购电用户调整后的报价按从高到低进行排序, 将售电商调整后的报价按从低到高进行排序, 并寻找相交点(出清点)的过程, 简化了交易的复杂程度。

3.3 出清和结算过程

考虑到 P2P 市场中各个购电用户、售电商的交

易意愿, 以及现有的 Uplift 成本分摊机制^[17], 在出清过程中智能合约按照匹配结果中各个购电用户、售电商的初始报价进行出清, 在结算过程中智能合约按照 Uplift 机制进行网络维护成本的分摊。

由于在交易匹配过程是考虑配电网安全物理约束后的匹配结果, 而实际出清过程中按原有的报价进行出清, 可能会出现社会福利的损失, 如图 2 所示。图中, $\lambda_{\text{end}}^{\text{buy}}$ 、 $\lambda_{\text{end}}^{\text{sell}}$ 分别为出清点附近的购电用户、售电商报价。

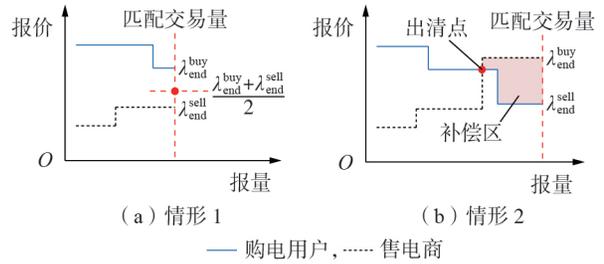


图2 P2P 出清机制

Fig.2 Clearing mechanism for P2P transaction

因此, 智能合约需要对如下 2 种情形进行判断。

1) 情形 1: 负成本, 即所有的 P2P 交易对电网的影响都是正面的, 社会福利反而得到增大。出清结果如图 2(a) 所示, 此时智能合约按照边际购电价格的平均值进行市场出清和结算。

2) 情形 2: 正成本, 即存在部分交易对电网的影响是负面的。出清结果如图 2(b) 所示, 此区域的售电投标价格已经高于购电投标价格, 执行此区域交易无疑会增加交易的经济成本, 因此规定 P2P 市场按出清点进行出清, 同时智能合约需要判断补偿区的结算成本是否满足小于执行补偿区匹配交易后网损及电压优化的经济收益, 若满足, 则按照 Uplift 机制, 智能合约向全网购电用户收取系统维护成本, 并执行补偿区的匹配结果。

补偿区结算成本 $C_{\text{up}}^{\text{sum}}$ 为:

$$C_{\text{up}}^{\text{sum}} = \sum_{j=1}^{N_{\text{right}}^{\text{sell}}} \lambda_{\text{right}, j}^{\text{sell}} q_{\text{right}, j}^{\text{sell}} - \sum_{i=1}^{N_{\text{right}}^{\text{buy}}} \lambda_{\text{right}, i}^{\text{buy}} q_{\text{right}, i}^{\text{buy}} \quad (18)$$

式中: $N_{\text{right}}^{\text{sell}}$ 、 $\lambda_{\text{right}, j}^{\text{sell}}$ 和 $q_{\text{right}, j}^{\text{sell}}$ 分别为图 2(b) 中补偿区边际售电商的数量、实际报价和报量; $N_{\text{right}}^{\text{buy}}$ 、 $\lambda_{\text{right}, i}^{\text{buy}}$ 和 $q_{\text{right}, i}^{\text{buy}}$ 分别为图 2(b) 中补偿区边际购电用户的数量、实际报价和报量。

智能合约向各个购电用户收取的维护成本为:

$$C_{\text{Up}} = \begin{cases} \frac{1}{N_{\text{right}}^{\text{buy}}} C_{\text{up}}^{\text{sum}} & C_{\text{up}}^{\text{sum}} \leq E_{\text{co}} \\ 0 & C_{\text{up}}^{\text{sum}} > E_{\text{co}} \end{cases} \quad (19)$$

式中: C_{Up} 为需要各个购电用户承担的维护成本; E_{co} 为执行补偿区匹配交易后配电网网损及节点电压优化得到的经济收益。

4 基于以太坊智能合约的交易机制设计

4.1 智能合约设计

通过式(3)和式(7)得到的 C_{VS} 、 C_{LS} ,可以在 P2P 交易撮合机制中考虑配电网的安全校验过程,依据第 3 节的机制设计,实现利用区块链有限的运算能力完成交易过程全链上求解,规避区块链平台无法实现高复杂度的计算的难题^[18-19]。本文设计了以下智能合约以支撑配电网安全导向的 P2P 交易。

1)申报合约:各交易方需要在区块链平台上提交报价、报量信息以及节点地址。

2)匹配合约:根据申报合约上传至链上的信息以及交易节点对应的 C_{VS} 、 C_{LS} 信息,考虑配电网安全物理约束的成本,对报价进行调整,确定交易的优先级,同时依据式(16)得到优化求解结果,将允许交易的各个交易方以及匹配交易量上传至链上。

3)出清合约:根据匹配合约上传至链上的信息,按各个交易方的真实报价进行出清,同时根据图 2 确定具体的出清策略。

4)结算合约:根据出清合约上传的信息,依据不同的出清策略执行不同的结算方式。

5)执行合约:执行市场结算结果。

4.2 交易流程

依据上文提出的交易模型以及制定的智能合约,可以在以太坊平台按照如图 3 所示的交易流程部署配电网 P2P 交易平台。

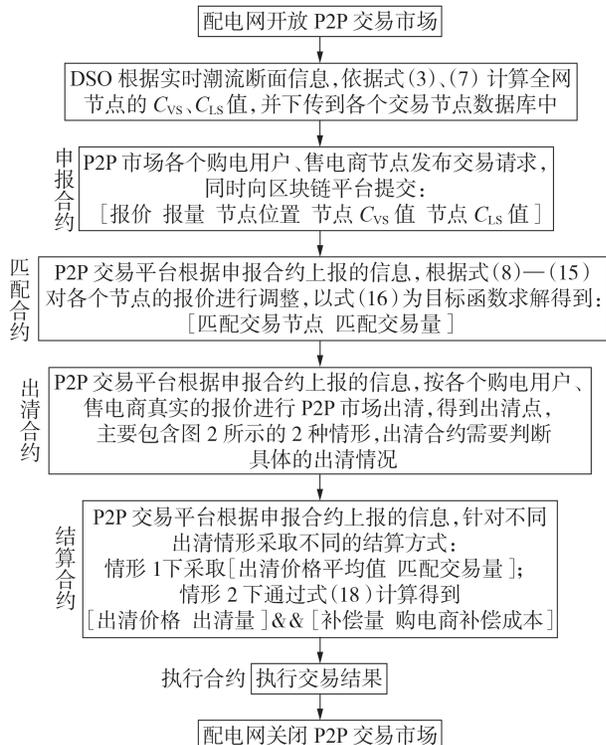


图 3 基于以太坊的 P2P 交易流程图

Fig.3 Flowchart of P2P transaction based on Ethereum

5 算例分析

本文在如图 4 所示的 IEEE 33 节点系统中进行仿真,假设系统包括 8 个购电用户和 8 个售电商,其申报信息如附录 A 表 A1、A2 所示。

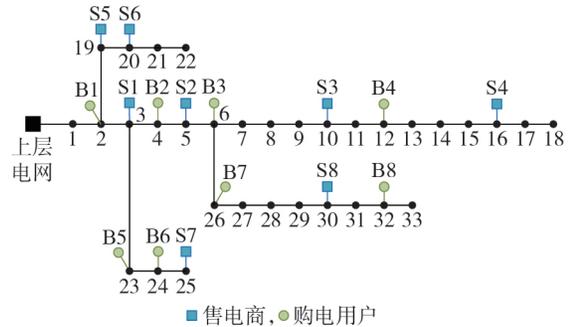


图 4 IEEE 33 节点系统拓扑

Fig.4 Topology of IEEE 33-bus system

5.1 系统运行结果

将第 4 节设计的智能合约发布至以太坊 Remix 平台上,以验证考虑系统运行状态的 P2P 市场交易机制的有效性,各个智能合约在 Remix 平台的输出结果如附录 B 表 B1—B3 所示。本文以购电用户 B1 为例,分析各个智能合约的执行效果,结果见图 5。

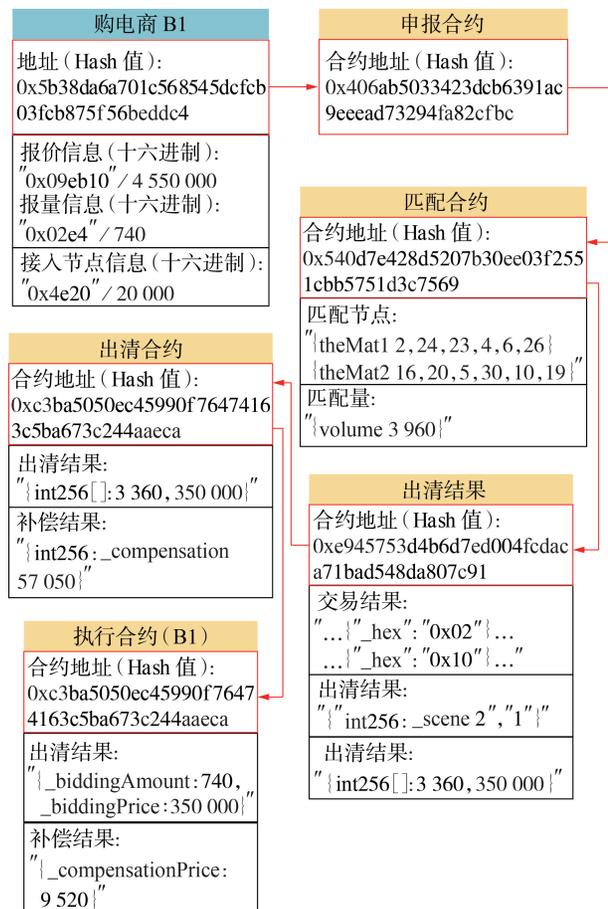


图 5 智能合约执行结果

Fig.5 Execution result of intelligent contract

由于Remix平台不支持浮点数计算,因此本文将各个数据放大10000倍,可以看出,各个智能合约通过合约地址实现了交互数据,由虚拟匹配合约和出清合约的计算结果可以看出B1(节点2)得到了出清,由执行合约可以得到,B1(节点2)的出清量为0.074 MW,出清价格为350元/MW,补偿成本总量为0.095元。

同时为了进行对比分析,本文在同样的环境下验证了高低价匹配的撮合结果,具体如表1、图6所示(图中电压为标么值)。

表1 P2P交易后系统运行状态

情景	电压越限节点	系统网损/kW	购电用户盈余/元	售电商盈余/元
高低价匹配	12	35.837	32.01	24.44
配电网安全导向	无	25.173	18.73	15.71

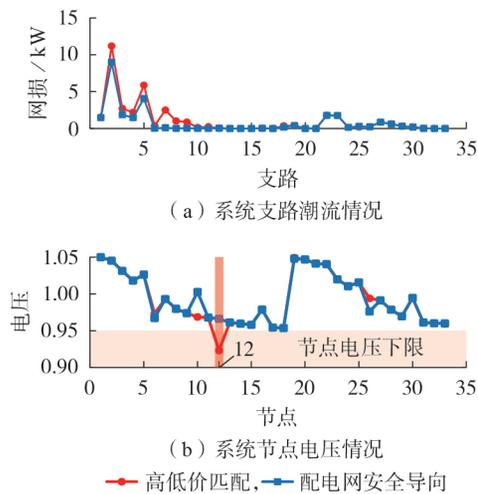


图6 系统运行结果

Fig.6 Operation result of system

通过表1、图6中的对比可以发现,相比本文提出的配电网安全导向的模型,以高低价匹配的方式进行P2P市场的出清,对系统网损和节点电压偏移有很大的负面影响,节点12出现了严重电压越限(0.9232 p.u.),系统网损增加了10.664 kW。

5.2 P2P交易优先级调整

为了进一步分析P2P交易结果对系统运行状态的影响,本文计算各个购、售电节点单位功率变化对配电网运行成本的影响,并与各个交易节点的初始报价进行对比,如图7所示。

通过图7中节点各个购、售电节点单位功率变化对配电网运行成本的影响以及各个购、售电节点的初始报价的对比可以发现,节点12处的负荷增加对系统的负面影响最大,但节点12处的购电用户报价要高于节点6、26处的购电用户报价,可以通

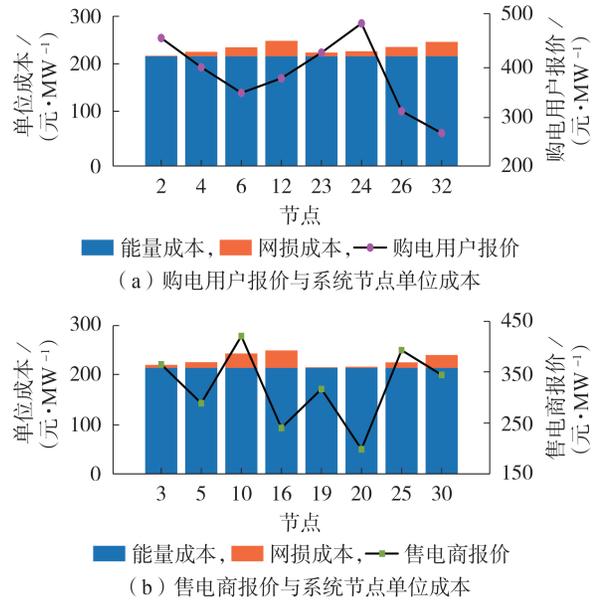


图7 交易方初始报价

Fig.7 Initial quotation of transaction party

过高于节点6、26的优先级进行成交,使系统为了维持运行付出更高的成本;同理,节点10处的分布式电源出力对系统运行的积极影响仅低于节点16,但节点10处的售电商报价最高,优先级最低,在P2P市场中容易因为较高的报价流标。这表明单纯以高低价匹配进行交易而忽略配电网安全的物理约束,会使得配电网为了维持安全运行付出高昂的运行成本,甚至威胁系统安全稳定运行。

针对以上情况,本文通过线性化推导得到反映P2P交易对系统安全运行影响的灵敏系数,即 C_{VS} 和 C_{IS} 。在匹配合约中,通过式(8)~(15)对各个交易方的报价进行调整,优化各个交易的优先次序,结果如图8所示。

图8(a)中,对比节点12与节点24可以发现,由于节点12处的负荷增加会显著增加系统的网损和节点电压越限的趋势,因此 C_{VS} 、 C_{IS} 调整部分都对节点12处购电用户的报价进行了下调,降低了交易的优先级,同时,由于节点24负荷增加对系统网损和节点电压的影响较小, C_{VS} 、 C_{IS} 调整部分上调节点24的报价以提高交易优先级。图8(b)中,对比节点16与节点19可以发现,由于本文售电商出力对配电网节点电压主要起到支撑作用,因此 C_{VS} 调整部分都下调了节点16与节点19处售电商的报价以增加交易优先级,但节点16处售电商的出力可以有效降低系统网损, C_{IS} 调整部分通过降低其报价以提高交易优先级,节点19处售电商的出力对系统网损降低的作用很小, C_{IS} 调整部分通过提高其报价来降低交易优先级,最终通过报价的调整,节点16处售电商的交易优先级要高于节点19。

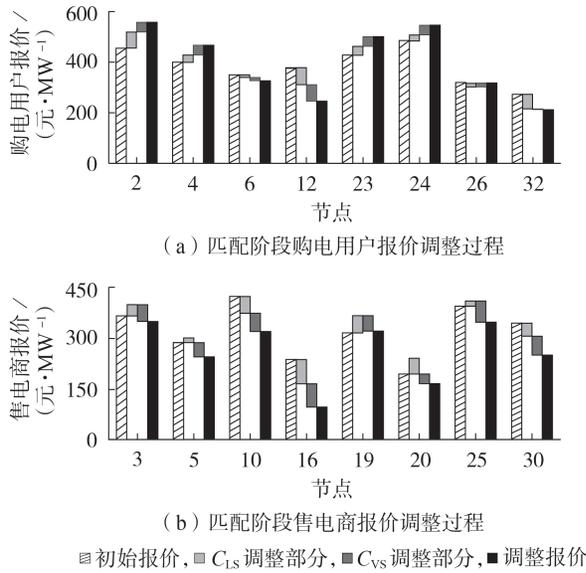


图8 价格调整过程

Fig.8 Price adjustment process

5.3 P2P交易出清结算

按照第3节设计的交易机制,在匹配阶段得到交易方的匹配结果和出清量,通过出清合约和结算合约对匹配结果按照各个交易方的实际报价进行出清结算,可得结算过程的出清点为[0.336 MW, 350元/MW],结算过程存在的补偿成本 C_{mp}^{sum} 为5.705元,由于交易次序的优化使得系统网损下降10.664 kW,节点12电压越限被消除,按照购电用户平均购电价格对网损优化进行计算,按照越限负荷成本为0.07元/kW对电压优化进行计算,经济收益 E_{co} 为9.22元,因此对补偿区匹配的交易进行出清,且补偿成本由全网购电用户共同承担, C_{mp} 为0.952元,各个购电用户、售电商的中标情况分别如附录C表C1、C2所示。

同时,为了分析出清结果的优化情况,对高低价匹配的出清结果以及本文配电网安全导向的出清结果进行仿真,结果如图9所示。

由图9可知,通过本文模型对P2P交易优先级的调整,节点12处购电用户的中标量由节点6处购电用户取代,节点19处售电商的部分中标量由节点30处的售电商取代,同时由图7可以发现,节点12处的负荷对系统运行的单位成本高于节点6,节点30处的分布式电源出力对系统运行的单位收益高于节点19。这证明了本文模型对P2P交易匹配的调整符合配电网安全运行导向。

5.4 效益分析

为了说明P2P交易模型对配电系统运行的影响,设置如式(20)~(22)所示的3个指标,得到P2P交易对系统节点电压的影响、P2P交易中购电节点对交易量的有效消纳、系统对P2P出清量的有效消

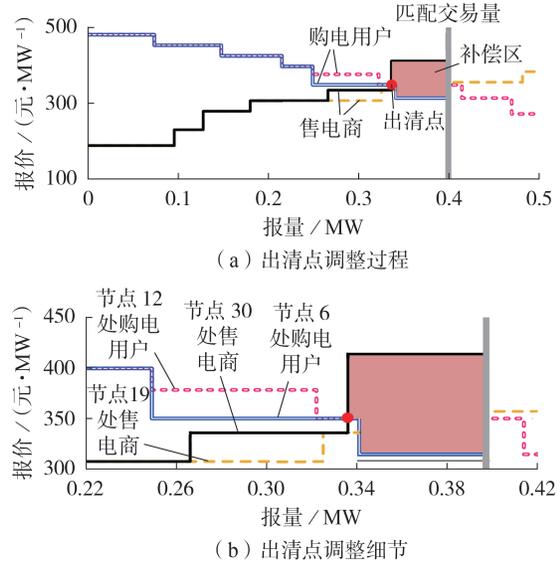


图9 P2P交易出清结果

Fig.9 Clearing result of P2P transaction

纳,同时将本文模型与高低价匹配的P2P模型进行对比。

1) 累计电压偏移量。

$$\Delta U = \sum_{i=1}^N \frac{|U_i - U^{spec}|}{U^{spec}} \quad (20)$$

式中: ΔU 为配电系统节点电压的累计偏移量; U_i 为节点 i 的电压; U^{spec} 为节点期望电压; N 为除松弛节点以外的节点个数。

2) 购电节点最低有效消纳率。

$$M_1 = \min \left(\frac{P_i^{buy} - P_i^{Loss}}{P_i^{buy}} \right) \quad (21)$$

式中: M_1 为购电量中除去网损部分后的有效消纳值的最小值; P_i^{buy} 、 P_i^{Loss} 分别为购电节点 i 处的购电量和网损部分。

3) 系统等效消纳率。

$$M_2 = \frac{\sum_{i=1}^{N_{buy}} P_i^{buy} + \Delta P_{Loss}^{buy}}{\sum_{i=1}^{N_{buy}} P_i^{buy}} \quad (22)$$

式中: M_2 为系统等效消纳率; $\sum_{i=1}^{N_{buy}} P_i^{buy}$ 为所有购电节点的购电总量; ΔP_{Loss}^{buy} 为由于P2P交易导致的网损增量。

表2给出了P2P交易效益分析。可以看出,高低价匹配的P2P交易撮合模型中购电用户的盈余要高于本文模型,但是由此带来的对配电系统的负面影响十分显著,与无P2P交易时的情况相比,网损增加了41.3%,累计电压偏移增加了1.11%,并出现了节点电压越限,购电节点的最低有效消纳率只有85.9%,系统对出清电量的等效消纳率为97.36%。

表2 P2P交易效益分析

Table 2 Benefit analysis of P2P transaction

参数	参数值		
	无P2P交易	高低价匹配的P2P交易模型	本文P2P交易模型
网损/kW	25.364	35.837 (41.3%)	25.173 (-0.75%)
出清量/MW	—	0.395	0.396
购电用户盈余/元	—	32.01	18.73
售电商盈余/元	—	3.492	3.928
ΔU	0.9794	0.9903 (1.11%)	0.9409 (-3.93%)
M_1	—	85.9%	91.5%
M_2	—	97.36%	100.05%

相比之下,本文配电网安全导向的交易撮合模型考虑了P2P交易对系统安全运行的影响,可以利用P2P交易正面效益促进配电系统经济、安全运行,系统网损与无P2P交易时的情况相比下降了0.75%,累计电压偏移下降了3.93%,同时消除了节点电压越限;与高低价匹配的P2P交易模型对比,购电节点的最低有效消纳率从85.9%上升到91.5%,配电系统对出清电量的等效消纳率从97.36%上升到100.05%。这表明了本文模型对出清电量具备高效消纳的能力。

6 结论

考虑到“双碳”目标下未来配电系统的发展,本文提出一种配电网安全导向的分布式资源P2P交易机制,通过将配电网安全运行约束加入P2P交易撮合模型中,在配电网进行P2P交易的过程中保证了系统运行的安全性;同时通过区块链平台部署本文交易机制,以降低P2P交易的执行成本,考虑到区块链平台运算能力的限制,本文设计了具有简单计算特性的P2P交易智能合约,通过配电网潮流断面的线性化推导出灵敏度模型,用以衡量P2P交易对配电网网损和节点电压的影响,在此基础上通过匹配阶段的价格调整实现了P2P交易撮合的优化调整。

本文模型适用于P2P交易初期、交易规模较小的场景,随着交易规模的增大,局部的配电网安全线性化约束将被打破,后续拟针对交易规模较大的场景展开研究,考虑较大规模的P2P交易情景下,针对配电网物理安全约束的非线性化场景,引入线路容量、节点电压偏移裕度的极限水平的概念,寻找非线性场景的边界变化条件,对边际条件外的约束进行分步线性化,同时在较大规模的P2P交易场景中通过博弈理论分析交易主体报价策略对交易结果的影响,得到考虑交易主体报价行为和配电网安全约束的撮合模型。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] ZUBO R, MOKRYANI G. Active distribution network operation: a market-based approach[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(1): 1405-1416.
- [2] YANG Jiajia, ZHAO Yangdong, WEN Fushuan, et al. A penalty scheme for mitigating uninstructed deviation of generation outputs from variable renewables in a distribution market[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(5): 4056-4069.
- [3] 祖文静, 李勇, 谭益, 等. 高渗透率可再生能源配电网测试系统建模与有效性分析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(7): 45-50. ZU Wenjing, LI Yong, TAN Yi, et al. Modeling and effectiveness analysis on test system for distribution networks with high penetration of renewable resource[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 45-50.
- [4] 龚钢军, 王慧娟, 张桐, 等. 基于区块链的电力现货交易市场研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6955-6966, 7129. GONG Gangjun, WANG Huijuan, ZHANG Tong, et al. Research on electricity market about spot trading based on blockchain [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6955-6966, 7129.
- [5] 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.
- [6] 贾乾罡, 陈思捷, 严正, 等. 基于区块链的空调负荷用电权分配: 模式与方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3393-3402. JIA Qiangang, CHEN Sijie, YAN Zheng, et al. Blockchain-enabled power usage quotas allocation method for air conditioning loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3393-3402.
- [7] GUERRERO J, CHAPMAN A, VERBIC G. A study of energy trading in a low-voltage network: centralised and distributed approaches[C]// Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC). Melbourne, Australia: IEEE, 2017: 1-6.
- [8] RAO B, ARUN S, SELVAN M. Framework of locality electricity trading system for profitable peer-to-peer power transaction in locality electricity market[J]. IET Smart Grid, 2020, 3(3): 318-330.
- [9] 杨杉, 同向前. 考虑分布式电源限流作用的主动配电网连续潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10): 57-62. YANG Shan, TONG Xiangqian. Continuous power flow calculation for active distribution network with consideration of current limitation of distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 57-62.
- [10] WANG S, TAHA A F, WANG J, et al. Energy crowdsourcing and peer-to-peer energy trading in blockchain-enabled smart grids[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 2019, 49(8): 1612-1623.
- [11] 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.
- [12] KHORASANY M, MISHRA Y, LEDWICH G. A decentralized bilateral energy trading system for peer-to-peer electricity markets[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(6): 4646-4657.
- [13] SOTKIEWICZ P M, VIGNOLO J M. Nodal pricing for distribution networks: efficient pricing for efficiency enhancing DG [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 1013-1014.
- [14] DI SILVESTRE M L, GALLO P, IPPOLITO M G, et al. A

- technical approach to the energy blockchain in microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(11): 4792-4803.
- [15] JENSEN T V, KAZEMPOUR J, PINSON P. Cost-optimal ATCs in zonal electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 3624-3633.
- [16] WANG Beibei, TANG Ni, BO Rui, et al. Three-phase DLMP model based on linearized power flow for distribution with application to DER benefit studies[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 130(1): 1-13.
- [17] WANG F, CHEN Y. Uplift allocation of voltage and local reliability constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 4972-4981.
- [18] MERLINDA A, VALENTIN R, DAVID F, et al. Blockchain technology in the energy sector: a systematic review of challenges and opportunities[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 100: 143-174.
- [19] WANG Beibei, ZHAO Shennan, LI Yachao, et al. Design of a

privacy-preserving decentralized energy trading scheme in blockchain network environment[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 125(1): 1-13.

作者简介:



许伦

许伦(1993—),男,江苏镇江人,博士研究生,主要研究方向为电力市场P2P交易机制与区块链技术(**E-mail**: 2694909131@qq.com);

王蓓蓓(1979—),女,江苏南京人,副教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要从事电力市场和需求侧管理方面的研究和教学工作(**E-mail**: wangbeibei@seu.edu.cn);

李雅超(1995—),女,江苏淮安人,硕士生,研究方向为可再生能源电力消纳与区块链技术(**E-mail**: zqmjanyhow@163.com)。

(编辑 李莉)

Research on P2P blockchain transaction mechanism of distributed resources oriented by distribution network security

XU Lun¹, WANG Beibei¹, LI Yachao¹, XU Honghua², LIU Shaojun², ZHU Hong²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Nanjing Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

Abstract: The continuous increase of distributed renewable energy resources in distribution network and the rapid development of distributed accounting technology represented by blockchain provide development motivation and technical support for the decentralized P2P (Peer-to-Peer) transactions in distribution network. However, the continuous increase of P2P transactions in distribution network may lead to the problems such as the overlimit of node voltage and the increase of network loss. In view of this, the P2P transaction mechanism of distributed resources oriented by distribution network security is proposed. Firstly, based on the linearization derivation of the node voltage and network loss of distribution system, a sensitivity model of the influence of P2P transactions on distribution network security is proposed, and thus the traditional high- and low-price matching strategy is modified to the P2P transaction strategy oriented by distribution network security. Then, based on the computing limitation of the Ethereum platform, a decentralized transaction mechanism with simple computing characteristics is proposed, and the relevant intelligent contracts are designed. The example analysis shows that, the proposed P2P transaction mechanism oriented by distribution network security can effectively reflect the influence of P2P transactions on the operation of distribution network in the matching process, and optimize the transaction order according to the level of power network security margin. It makes more transactions matched, which is conducive to the safe operation of the distribution network and reduce the network loss. The transaction model has low complexity and can be solved on the chain, without configuring optimization software under the chain to avoid privacy disclosure.

Key words: distribution network security; peer-to-peer; network loss; voltage overlimit; intelligent contract; privacy protection

附录 A（本文算例中购电用户和售电商在 P2P 交易平台上的交易信息）

表 A1 购电用户申报信息

Table A1 Declaration information of purchasing users

购电用户	节点位置	交易量/MW	交易单价/元/MW
B1	2	0.074	455
B2	4	0.034	399
B3	6	0.092	350
B4	12	0.073	378
B5	23	0.067	427
B6	24	0.074	483
B7	26	0.055	336
B8	32	0.046	273

表 A2 售电商申报信息

Table A2 Declaration information of e-commerce seller

售电商	节点位置	交易量/MW	交易单价/元/MW
S1	3	0.086	357
S2	5	0.052	280
S3	10	0.060	413
S4	16	0.032	231
S5	19	0.145	308
S6	20	0.096	189
S7	25	0.082	385
S8	30	0.070	336

附录 B（本文算例在 Remix 平台部署的各个智能合约的输出结果）

合约执行情况

status	0x1 Transaction mined and execution succeed 成功执行
transaction hash	0x9f040fc0b923fc9c144e927c0768477b5a4f1a6ba05fa88a0d851a8de5c083ff
from	0x5b38da6a701c568545dcfcb03fcb875f56bedd4 购电商B1 信息地址
to	electricityTransdeclare(uint256,uint256,uint256,uint256,int256[]) 0x406ab5033423deb6391ac9eeead73294fa82cfbc
gas	3000000 gas 发布交易函数
transaction cost	92866 gas
execution cost	554 gas
hash	0x9f040fc0b923fc9c144e927c0768477b5a4f1a6ba05fa88a0d851a8de5c083ff
input	0x93a... fefd4
decoded input	{ "uint256 location": { "_hex": "0x4e20" }, 购电商B1 系统接入节点信息 "uint256 price": { "_hex": "0x456d70" }, 购电商B1 报价信息 "uint256 amount": { "_hex": "0x02e4" }, 购电商B1 报量信息 "uint256 LSC": { "_hex": "0x30" }, DSO嵌入的Cvs灵敏度系数 DSO嵌入的Cvs灵敏度系数
decoded output	{}
logs	[]
value	10000000000wei

图 B1 申报合约运行情况

Fig.B1 Operation status of declaring contract

hash	0x12c4591b2e17caa1ba78420920bb8046b8a8cafd9861c0a48616f430f4054e59
input	0x48e...40225 申报合约地址，需要调用申报合约输出结果
decoded input	{ "address theDeclare": "0x583031D1113aD414F02576BD6afaBfb302140225" }
decoded output	{ "0": "int256[: theMat1 2,24,23,4,6,26", "1": "int256[: theMat2 16,20,5,30,10,19", "2": "int256: volume 3960" }
logs	[] 匹配交易节点以及匹配交易量

图 B2 匹配合约运行情况

Fig.B2 Operation status of matching contract

hash	0x4311b8a058f15201f1edd8c8d4a358390b82ad7fb7c1395e1f1f66017322ad9
input	0xaba..4d2db 出清地址，需要调用出清合约输出结果
decoded input	{ "address theclearing": "0x4B0897b0513fdC7C541B6d9D7E929C4e5364D2dB" }
decoded output	{ "0": "int256 _clearPrice336", "1": "int256 _clearAmount350000", "2": "int256 _compensation57050" }
logs	[] 出清价格，出清量，补偿量

图 B3 出清合约运行情况

Fig.B3 Operation status of clearing contract

附录 C（本文算例中购电用户和售电商在 P2P 交易平台上的中标结果）

表 C1 购电用户中标情况

Table C1 Bidding status of power purchasing users

购电用户	节点位置	中标量/MW
B1	2	0.074
B6	24	0.074
B5	23	0.067
B2	4	0.034
B3	6	0.092
B7	26	0.550

表 C2 售电商中标情况

Table C2 Bidding status of e-commerce seller

售电商	节点位置	交易量/MW
S4	16	0.032
S6	20	0.096
S2	5	0.052
S8	30	0.070
S3	10	0.060
S5	19	0.086