

DOI:10.12158/j.2096-3203.2024.05.007

基于改进共识算法的虚拟电厂主从多链交易匹配机制

王卫南¹, 艾芊², 李晓露¹, 王帝², 陈旻昱²

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200093;

2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要:在未来新型电力系统中,虚拟电厂(virtual power plant, VPP)内部多主体的可信交易和信息安全将更加复杂和具有挑战性。而区块链技术的信息安全、分布决策、智能合约及防篡改等特征,为VPP多元主体可信交易提供新思路。文中聚焦VPP内部多聚合商形成的利益最大化及可信交易匹配效率问题,首先,依据交易主体需求差异,建立区块链技术与多智能体系统融合的一主多从分层互动控制架构;其次,设计一种面向多聚合商对等交易需求下的可信交易匹配机制,引入非合作博弈模型,保证了多聚合商主体的利益;然后,基于区块链的分布式粒子群优化算法提出了改进的委托权威证明机制(delegated proof-of-authority, DPoA)共识算法,提高交易的安全性;最后,通过算例分析验证文中所提策略的合理性和可行性,该策略能有效增强多主体交易的匹配效率和安全性。

关键词:虚拟电厂(VPP);可信交易;区块链技术;分层互动;匹配机制;改进共识算法

中图分类号:TM732

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2024)05-0069-12

0 引言

在中国“双碳”目标和新型电力系统构建背景下^[1-2],大力发展以光伏(photo voltaic, PV)、风电(wind turbine, WT)为代表的新能源,已成为推动能源绿色低碳转型的必由之路。研究表明,到2030年,我国PV、WT发电总装机容量预计超过1 200 GW,成为能源装机主体;到2060年,PV、WT发电量占比将超50%,成为能源电量主体^[3-4]。其大规模接入电网,无疑会对电网的可靠性和稳定性产生影响^[5]。为了应对这一挑战,虚拟电厂(virtual power plant, VPP)技术被提出作为聚合灵活性资源(flexible resources, FRs)的有效管理形式^[6],以先进的计量、通信、控制技术为基础^[7],动态聚合多个分散在多地域、多异质、多层级的FRs利益群体,实现多能互补^[8]和市场交易^[9],降低FRs的运行风险和管理难度,促进FRs消纳,提升电网的稳定性,是新型电力系统在能源供需侧实现互动化、智能化的重要途径。

近年来,VPP示范工程在国内逐步投建,华北电网率先在国内开展了VPP参与辅助服务市场交易,明确VPP可作为第三方独立主体参加华北调峰市场。上海黄浦区示范项目增加VPP调峰交易辅助服务交易品种。江苏电网将聚合储能的综合能源服务商纳入调频资源,建立源网荷互动系统。深圳供电公司构建网地一体VPP平台,该平台部署于

南网调度云,网省两级均可直接调度,为传统“源随荷动”调度模式转变为“源荷互动”新模式提供了解决方案。

但随着智能化技术的发展及FRs高比例接入,在VPP内部FRs存在的并网机组容量小、设备数量大等特性为VPP的市场交易带来了挑战。VPP内部聚合的主体互动依靠网络实现双向通信,各主体之间的出力、需求信息数据易遭到恶意攻击篡改,造成VPP调度运行出错,导致成本增加。而且,VPP利益主体诉求多样与多层级交易协调困难等问题,带来主体互动关系的复杂化、运行决策效率低及安全风险的加剧。同时,在市场交易中,频繁的电能量交易显著增加,使VPP呈现主体身份不明确、交易信息不透明及决策主体缺乏信任等问题。

而区块链技术具有分布式记账、去中心化、协同自治、智能决策、信息公开透明性及不可篡改的特性^[10],可以很好地支撑VPP的建设。国内外学者已将区块链技术应用到VPP中,在电力交易方面,文献[11-12]基于区块链技术设计了VPP商业运营架构,分析了区块链技术应用用于VPP内部电力交易模式,但并未考虑交易主体的报价策略,缺乏对交易主体价值衡量的介绍;文献[13]基于区块链技术构建VPP能源管理平台,以促进VPP内部新能源、储能及灵活性负载之间的电能交易活动,但并未考虑交易存在多方利益最大化问题;文献[14]从VPP特性出发结合区块链技术,考虑信息网络安全的主从博弈优化方法,将VPP作为整体,未考虑VPP内部多主体利益问题。在算法性能方面,文献

收稿日期:2024-03-23;修回日期:2024-05-08

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFB2401203)

[15-16]将区块链引入 VPP 中,提出一种能源区块链网络模型和能源交易方案,有利于提高交易信息的透明化和数据的安全存储,但共识算法运行决策效率有待改进;文献[17]提出了能源区块链网络中的 VPP 运行与调度模式,但调度结果易被篡改;文献[18]将区块链引入 VPP 的调度运行机制中,构建了适用于 VPP 的实用拜占庭容错 (practical Byzantine fault tolerance, PBFT) 算法共识机制以实现基于区块链技术的弱中心的调度模型,但运行决策效率低下。综上所述,现有相关文献大多围绕基于区块链技术与 VPP 整体交易,并未考虑将区块链技术应用到 VPP 内部多 FRs 利益主体存在的广泛交易合作中。如何实现各自利益的最大化和提升交易匹配效率是有待解决的问题。

因此,文中聚焦于 VPP 内部 FRs 利益主体的安全交易匹配,将区块链技术的最新发展映射到 VPP 的互动层次架构和功能节点中。首先,依据交易主体需求差异,建立了区块链技术与多智能体系统 (multi-agent system, MAS) 融合的一主多从弱中心化的分层互动控制架构。其次,以非合作静态博弈模型和节点信誉值为支撑设计了对等交易需求下的连续双边拍卖 (continuous double auction, CDA) 交易匹配机制,旨在提高交易匹配效率和多主体交易的相对公平性。最后,基于区块链-分布式粒子群优化 (blockchain-based distributed particle swarm optimization, BD-PSO) 算法提出了改进的委托权威证明 (delegated proof-of-authority, DPoA) 机制共识算法,提高交易的安全性、降低交易风险。

1 基于区块链技术和多智能体融合的 VPP 交互架构

文中研究 VPP 内部资源交易匹配机制,设计了以 MAS 为基础的交互架构,如图 1 所示。以交易主体需求和市场代理形式为依据,将 VPP 聚合的 FRs 自上而下划分为资源聚合层和分布式资源层。资源聚合层用于协调 VPP 内部源荷储的多代理主体,分布式资源层主要协调分散的小规模 FRs 主体。资源聚合层由各种聚合商 (aggregator, Agg) 组成, Agg 一般分为负荷 Agg、电动汽车 Agg、综合能源服务商^[19]、园区微网等类型 (便于表述统称为 Agg)。分布式资源层由 Agg 所属片区的 FRs 构成, FRs 主要包含 WT、PV、负荷用户 (Load)、分布式储能等资源中的一种或多种。

MAS 作为人工智能的一个分支,是由多个智能体构成的一种分布式自治计算系统^[20],通过协同调

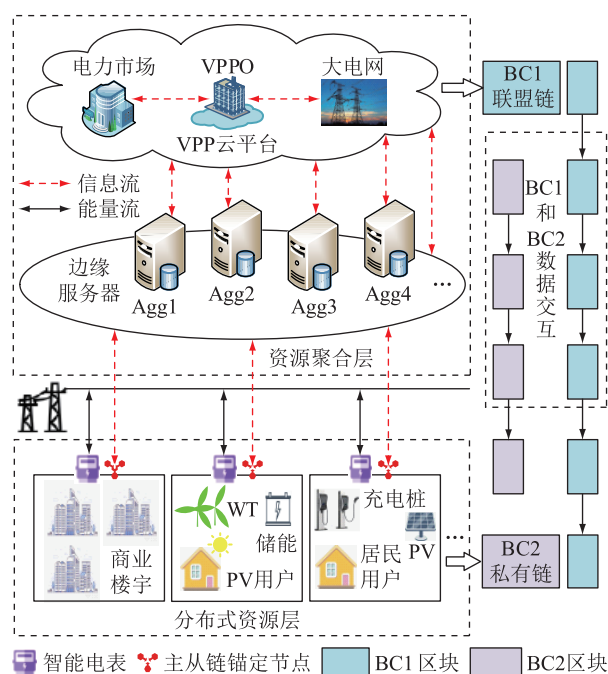


图 1 VPP 主从交互架构

Fig.1 VPP master-slave interaction architecture

控所有智能体很好地解决 FRs 复杂的系统运行调控需求和通信问题。在资源聚合层中,为每个 Agg 设计一个智能体,该智能体除具备通信代理、控制代理等基础运行代理功能外,还具备交易代理功能,进行交易相关的信息采集与互动决策功能,从而形成多代理系统架构。为 VPP 运营商 (virtual power plant operator, VPPO) 部署一个 VPP 智能体,用于执行 VPP 管理代理的部分功能和模拟外部市场环境。电网公司作为监督 VPP 交易过程,提供安全校核服务以及协助 VPPO 进行节点验证工作^[21],其也应部署智能体。

基于区块链构建的内部交易匹配机制包含一条主链 (BC1) 和多条从链 (BC2)。BC1 选取联盟链作为资源聚合层的区块链模型,保证 Agg 互动的隐私安全;其联盟链成员为符合准入条件的 VPP 调度中心节点、各 Agg 代理节点以及电网等监管代理节点;由于电力交易及协同调控离不开电网的宏观指挥,所以将电网公司智能体部署为 BC1 节点,形成弱中心化的交易匹配架构。各 BC2 由 Agg 所属片区 FRs 构建,根据所属 Agg 商业模式或需求采用私有链或联盟链,在 BC2 中均设计锚定节点并以相对应的一个局部计算中心为据点^[22],向其聚合的底层设备展开,形成一主多从的立体扁平式架构。在各 Agg 智能体中均部署边缘服务器,采用雾计算的方式对分布式资源层上传的初始信息进行预处理和过滤,减少上传 BC1 的数据量,降低 VPP 云平台的计算能耗。在 BC1 网络中部署云服务器采用云计

算的方式解决对计算要求较高的任务。

BC2 网络不仅要记录所属内部的交易信息而且备份所属 BC1 交易信息,交易验证时可从 BC1 和 BC2 两处验证^[23],确保交易的可信安全^[24]。BC2 网络备份所属 BC1 节点在资源聚合层发生的交易信息,在空间上划分不同 Agg 降低了认证的复杂度,在时间上交易可以并行使得交易速度理论上不存在上限。各节点共同维护一条 BC1 保证全局的链路信息的可信安全,并且能够实现对 VPP 市场行为的反向监督,BC1、BC2 利用智能体的代理功能形成天然数据壁垒,BC2 网络主体只能获取本 BC2 相关的交易数据,而无法获取其他 BC2 中的交易信息,提升了 VPP 隐私保护等级。

2 基于区块链的 VPP 多 Agg 交易匹配模式

2.1 基于智能合约的多 Agg 交易流程

智能合约作为一种由事件驱动而自动运行在区块链上的协议^[25],能够实现电能交易的自动化,同时保证交易结果的可追溯性和不可篡改性。为了实现 VPP 多 Agg 的可信交易和自动匹配结算,文中设计了基于智能合约的多 Agg 交易流程,包括准备阶段、匹配阶段、合同签订阶段和交割结算阶段,每个阶段所包含功能如图 2 所示。

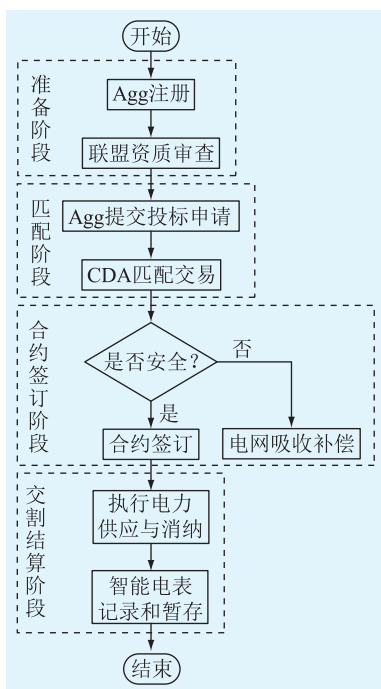


图 2 基于智能合约的交易流程

Fig.2 Transaction flow based on smart contract

(1) 准备阶段: Agg 根据下一时段能源预测结果分别注册为购电 Agg 或售电 Agg,并将其区块链钱包 ID 与智能电表 ID 绑定。

(2) 匹配阶段: Agg 依据自身的竞标策略提交投标申请,并由所在片区 BC2 网络进行广播,在 BC1 内进行匹配交易。VPP 通过调用匹配函数对 VPP 内部市场进行匹配撮合,得到初始拍卖结果。

(3) 合同签订阶段: 初始拍卖结果须进行安全性校核计算,若交易不满足允许超过的最大潮流,则 Agg 由电网吸收补偿。通过安全校核后,参与主体签订合同,将交易证明尽可能的记录到区块链中。

(4) 交割结算阶段: 各 Agg 按照合同签订阶段达成的最终成交结果执行电力供应与消纳,并根据能量交割的执行情况,按照合同约定的结算方法计算收入与支出,并更新 BC2 中所有交易节点的钱包余额。能量交互数据由部署在区块链(包括 BC1 和所有 BC2)多个轻节点处的智能电表进行记录和暂存。

2.2 基于区块链的点对点交易机制

文中采用 CDA 的交易机制进行点对点(peer-to-peer, P2P)交易,考虑多方利益最大化问题。售电 Agg 和购电 Agg 作为一个独立市场主体,利益具有不对等性^[26],为了实现 Agg 之间的有序活跃交易,需要建立一个非合作博弈模型。该模型以 VPP 和电网为博弈主体,售电 Agg 和购电 Agg 作为博弈从体。在该模型中,为了体现区块链的去中心化和降低交易成本的优势,非合作博弈模型须考虑售电 Agg 售电的利益最大化和购电 Agg 购电的成本最小化,博弈模型如图 3 所示。

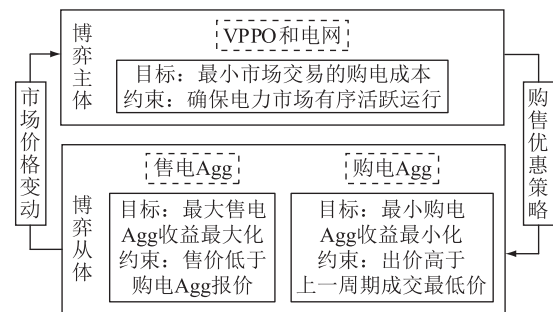


图 3 非合作博弈模型

Fig.3 Non-cooperative game model

博弈主体制定优惠策略激励市场交易,同时,售电 Agg 决定售电量来确保利益最大化,购电 Agg 则决定购电量来确保其成本最小化。博弈主体确保市场交易有序活跃地进行,售电 Agg 售价低于购电 Agg 最高出价,购电 Agg 出价高于上一周期最低报价。基于以上策略和约束条件,若购电最高出价低于售电最低报价,则判断这笔交易无法进行,关闭该条交易路径。该模型基于利益最大化的纳什均衡使每一个博弈参与者都能接受该双边拍卖博

弈策略。

2.2.1 CDA 机制报价策略及交易电价制定

为规范参与交易的各 Agg 恶意报价行为及确保报价的时效性^[27], VPPO 为每个 Agg 的智能电表内置首次报价策略和保留价格计算程序。首次报价为 Agg 在首轮交易中匹配的依据,若该轮交易不成功则以保留价格进行第二轮匹配,最后由电网吸收补偿 Agg 电量差额。售电 Agg 的保留价格根据发电成本和发电量的关系设定,购电 Agg 的保留价格由购电 Agg 评估能源效用和净负荷之间的关系,根据单位能源利用效益确定。购售电 Agg 首轮报价为:

$$\lambda_i(t) = \lambda_0(t) + \mu \frac{P_i^{\text{load}}(t) - P_i^{\text{pre}}(t)}{P_i^{\text{pre}}(t)} (\lambda_{\text{grid}}(t) - \lambda_0(t)) \quad (1)$$

$$\lambda_j(t) = \lambda_{\text{grid}}(t) - \frac{P_j^{\text{pre}}(t) - P_j^{\text{load}}(t)}{P_j^{\text{pre}}(t)} \times |\lambda_{\text{grid}}(t) - \max\{\lambda_0(t), c_j\}| \quad (2)$$

式中: $\lambda_i(t)$ 、 $\lambda_j(t)$ 分别为购电 Agg i 和售电 Agg j 在 t 时段的报价; $\lambda_{\text{grid}}(t)$ 、 $\lambda_0(t)$ 分别为 t 时段电网的售电价和上网电价; $\mu \in (0, 1)$, 表征购电 Agg 偏好, 文中取 0.5; c_j 为售电 Agg j 的发电成本; $P_i^{\text{load}}(t)$ 、 $P_i^{\text{pre}}(t)$ 分别为购电 Agg i 在 t 时段的负荷值和分布式能源预测出力; $P_j^{\text{load}}(t)$ 、 $P_j^{\text{pre}}(t)$ 分别为售电 Agg j 在 t 时段的负荷值和分布式能源预测出力。

最终的成交价利用购售电 Agg 的交易信誉值, 构建交易质量评价系数, 激励各 Agg 积极参与 VPP 内部交易及确保合约的履行, 交易电价为:

$$\lambda_{i,j}(t) = \xi_{i,j}(t) \lambda_i(t) + (1 - \xi_{i,j}(t)) \lambda_j(t) \quad (3)$$

$$\xi_{i,j}(t) = \frac{R_{E,j}^{\text{sell}}(t)}{R_{E,j}^{\text{sell}}(t) + R_{E,i}^{\text{buy}}(t)} \quad (4)$$

式中: $\lambda_{i,j}(t)$ 为 t 时段的交易成交价; $\xi_{i,j}(t)$ 为 t 时段的交易质量评价系数; $R_{E,j}^{\text{sell}}(t)$ 、 $R_{E,i}^{\text{buy}}(t)$ 分别为 t 时段的售电 Agg j 交易信誉值和 t 时段的购电 Agg i 交易信誉值。

2.2.2 交易信誉制定

由于 FRs 的异构性, 不同资源的能量调节能力和实际功率波动是不同的^[28]。为保证 VPP 整体功率水平稳定, 其内部交易的有序进行, 通过交易完成情况构建交易质量评价系数, 激励其改善交易完成度以获取更大的竞标优势, 表达式如下:

$$a_{\text{agg}}(t) = \begin{cases} 1 & \left| \frac{P_{\text{agg}}^{\text{ac}}(t) - P_{\text{agg}}(t)}{P_{\text{agg}}(t)} \right| \leq \delta \\ \frac{P_{\text{agg}}^{\text{ac}}(t)}{P_{\text{agg}}(t)} & \left| \frac{P_{\text{agg}}^{\text{ac}}(t) - P_{\text{agg}}(t)}{P_{\text{agg}}(t)} \right| > \delta \end{cases} \quad (5)$$

式中: $a_{\text{agg}}(t)$ 为 t 时段的交易评价系数; $P_{\text{agg}}^{\text{ac}}(t)$ 为 t 时段的实际交割值; $P_{\text{agg}}(t)$ 为 t 时段的合约量; δ 为允许出现的偏差, 文中 $\delta = 2\%$ 。

电力交易主体信誉值是长期参与市场交易累积的结果, 以 24 h 为 1 个周期, 1 h 为 1 个时段, 借助交易评价系数 $a_{\text{agg}}(t)$ 更新交易信誉值, 表达式如下:

$$\begin{cases} R_{E,\text{agg}}(t) = R_{E,\text{agg}}(t-1) + \Delta R_{E,\text{agg}}^+(t) \\ a_{\text{agg}}(t) \geq a_{\text{agg}}(t-1) \\ R_{E,\text{agg}}(t) = R_{E,\text{agg}}(t-1) - \Delta R_{E,\text{agg}}^-(t) \\ a_{\text{agg}}(t) < a_{\text{agg}}(t-1) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \Delta R_{E,\text{agg}}^+(t) = (a_{\text{agg}}(t) - a_{\text{agg}}(t-1))^2 \times (1 - R_{E,\text{agg}}(t-1)) \\ \Delta R_{E,\text{agg}}^-(t) = (a_{\text{agg}}(t) - a_{\text{agg}}(t-1))^2 R_{E,\text{agg}}(t-1) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $R_{E,\text{agg}}(t)$ 为 t 时段的交易信誉值; $\Delta R_{E,\text{agg}}^+(t)$ 、 $\Delta R_{E,\text{agg}}^-(t)$ 分别为 t 时段的交易质量评估系数高于上一时段时的交易信誉奖励值和低于上一时段时的惩罚值。

2.2.3 CDA 匹配流程

在多买方和多卖方的市场结构中, CDA 是一种通过简单匹配就能够完成购售电竞拍的方法, 并且能够使买卖双方处于相对平等的地位, 进而保障参与主体的利益^[27]。为保证各 Agg 自主性和利益最大化, 利用区块链的智能合约将拍卖阶段分为 2 个阶段(每个阶段用 s 表示): $s=1$ 阶段, 各 Agg 根据自身利益最大化提交制定的报价策略; $s=2$ 阶段, 未完成匹配的购售双方提交保留价格进行匹配, 最后所有差额电量由电网吸收补偿, 交易匹配流程如图 4 所示。

步骤 1: 区块链系统每收到一份有效报价, 都将按售电报价递增顺序和购电报价递减顺序分别更新售电队列和购电队列, 若报价相同则依据交易信誉值进行排序匹配。

步骤 2: 按照购售队列排序, 将售电队列中的最低报价与购电队列中的最高报价进行对比。若满足条件, 则售电 Agg j 与购电 Agg i 撮合, 成交的电量为两者的最小值。否则, 剩下未撮合成功的买卖双方都进入下一轮交易。

步骤 3: 对撮合成功的交易进行安全校核, 若满足约束, 则匹配成功。否则, 解除撮合。

步骤 4: 判断匹配时间是否截止或是否经过 2 轮匹配, 若是, 则未匹配成功 Agg 由电网进行吸收补偿。

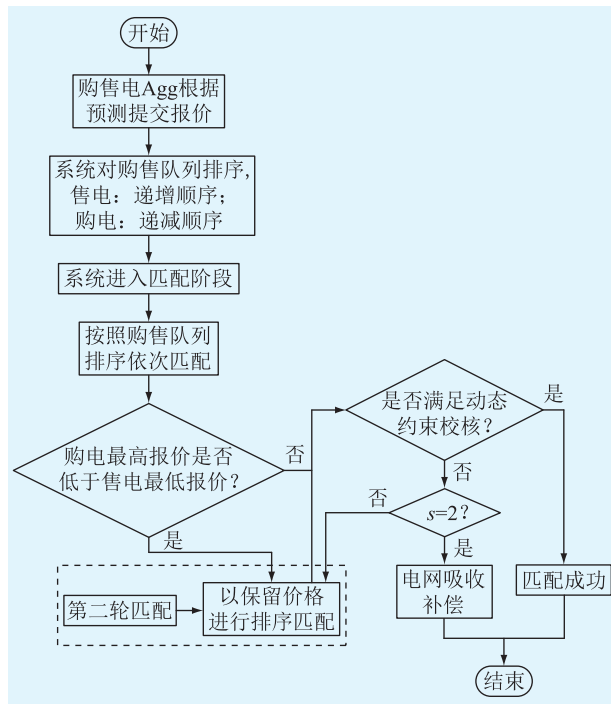


图4 CDA 匹配流程

Fig.4 CDA matching flow

3 分布式共识机制

在区块链系统中,多个节点需要针对同一个操作、指令达成共识,以便系统正常运行。但节点中包含着故障和恶意节点,导致共识过程失败,阻碍系统运行,因此需要采用某种共识算法对该过程进行约束,保证系统的一致性和安全性。

3.1 基于 DPoA 共识算法的记账权

目前,常见的共识算法有工作量证明 (proof-of-work, PoW) 机制、权益证明 (proof-of-stake, PoS) 机制、委托权益证明 (delegated proof-of-stake, DPoS) 机制及 PBFT 等,其性能对比如表 1 所示,其中,TPS 为每秒交易处理能力,是衡量其交易处理能力的指标。

表 1 共识算法对比

Table 1 Consensus algorithm comparison

共识算法	能耗	确认延时	安全性	TPS
PoW	高	高	1/2 算力	低
PoS	中	中	1/2 股权	中
DPoS	低	中	1/2 票数	高
PBFT	低	低	1/3 恶意节点	高

PoW 算法需要消耗大量的电力来挖矿,大大降低了其在现实交易环境中的实用性。PoS 算法导致最大股权人长期拥有记账权,不利于维护区块链的可靠性。PBFT 性能优越却不适应网络动态变化的

情况^[29]。DPoS 算法选举代理节点的机制会造成权力集中,会削弱共识过程的安全性,给交易带来风险。

因此,为了保证数据的全局一致性,文中采用 PoS 算法的新变体 DPoA 共识算法作为 BC1 网络节点记账权限问题的解决方法。DPoA 共识算法将 BC1 网络节点分为委员会节点和非委员会节点,委员会节点参与共识并随机或轮流记账,非委员会节点只参与交易过程,不生产区块。DPoA 共识算法依据节点共识能力确定委员会节点,是完全客观的评判标准,能够避免部分节点恶意组团造假或篡改的风险,获得更好的公平性和网络效率。

3.2 DPoA 共识算法机制

依据 DPoA 共识算法确定记账权后,针对 VPP 的分布式特性,利用区块链技术提出 BD-PSO 算法改进 DPoA 共识算法过程。将 VPP 内每个 FRs 视作 1 个计算节点,参与到求解运算中来,最大限度利用系统内算力,满足分布式一致性算法的基本要求,算法结构如图 5 所示。

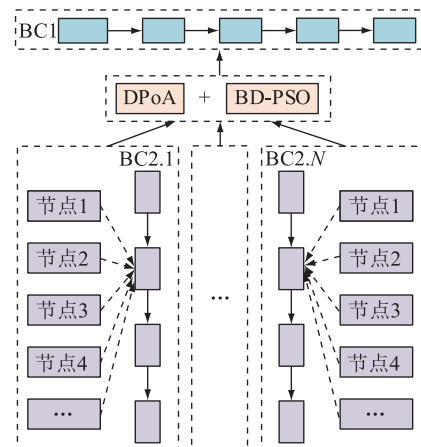


图 5 改进的共识算法结构

Fig.5 Improved consensus algorithm structure

3.2.1 BD-PSO 算法原理

当系统有优化计算任务时,VPP 控制中心将求解问题带入粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法中,将随机产生的初始种群和计算所需数据打包成块,并通过轻节点连接到各 Agg 对应的从链中某一条 (BC2.N) 区块链网络中,作为 BC2 的初始区块。各 Agg 内的所有节点根据初始区块内容在局部计算中心采用线性粒子群优化 (linear-particle swarm optimization, Lin-WPSO) 算法进行独立计算^[30]。而由于粒子群这类智能算法具有结果不确定的特性,各 Agg 内部节点之间产生的结果不可能相同,将导致系统内产生大量不同的计算结果。因此,BD-PSO 算法设定为当 Agg 局部计算中心完成

单次计算后,各 Agg 节点在内部广播计算结果,每个 Agg 内部节点在收到的结果中选择一个最优的,并打包生成区块并行连接到所属的 BC2.N 中。然后,BC2 将多个并行区块逐个尝试链接到 BC1,使用共识算法进行验证,通过验证的区块即为有效区块(包含的信息为最优解),一旦产生有效区块则停止验证,将该区块正式链接到 BC1 中。VPP 控制中心读取 BC1 区块,将 BC1 区块内容更新,进行下一次迭代。

通过上述原理可以发现,将 PSO 算法经分布式计算和主从区块链融合改进,多条 BC2.N 并行计算,产生了比原算法更多的计算结果,且使用区块链技术进行信息验证和传递以确保安全的基础上,进行了更大范围的最优结果比较,防止陷入局部最优,可以在提高算法精确度的同时,减少迭代次数和计算时间,BD-PSO 算法计算速度可表示为:

$$t_{BD} = \frac{t_{Lin}}{n/x} t_d \quad (8)$$

$$t_d = L/S \quad (9)$$

式中: t_{BD} 、 t_{Lin} 分别为 BD-PSO 算法和 Lin-WPSO 算法对于同一个计算任务所需计算时间; n 为节点总数; x 为一个 Agg 包含的节点数量; t_d 为系统网络信息传输延迟系数; L 为长度; S 为链路传输速率。

3.2.2 DPoA 共识机制流程

文中提出一种改进的 DPoA 共识机制算法,在 PBFT 的基础上,利用 BD-PSO 算法对其进行优化,提高共识算法的可用性,共识计算具体流程如图 6 所示。

(1) 当某一节点需要生成新的区块时,首先对接收到的广播信息进行打包,生成 Merkel 根。

(2) 验证环节。当各节点需要验证某一区块是否为有效区块时,首先采用 BD-PSO 算法代替消耗大量算力的 Hash 计算;若区块为 BD-PSO 算法计算产生的结果,则令委员会节点分别对区块包含的结果进行验证(代入 BD-PSO 算法),若该区块信息为指令、发电、负荷预测申报等单纯信息,则将 BD-PSO 算法计算结果默认为 1,直接进行下一步。

(3) 统计优化计算的结果 Z ,对于 BD-PSO 算法计算产生的结果区块,若超过 50% 的委员会节点验算该结果为有效,则该区块通过共识算法验证,为有效区块;对于包含单纯数据内容的区块,则对该区块是否有效进行判断投票,如果具有超过 50% 的节点投票认同该数据时,则该区块通过共识算法验证,为有效区块。

综上,基于 DPoA 共识机制保证了共识能力较

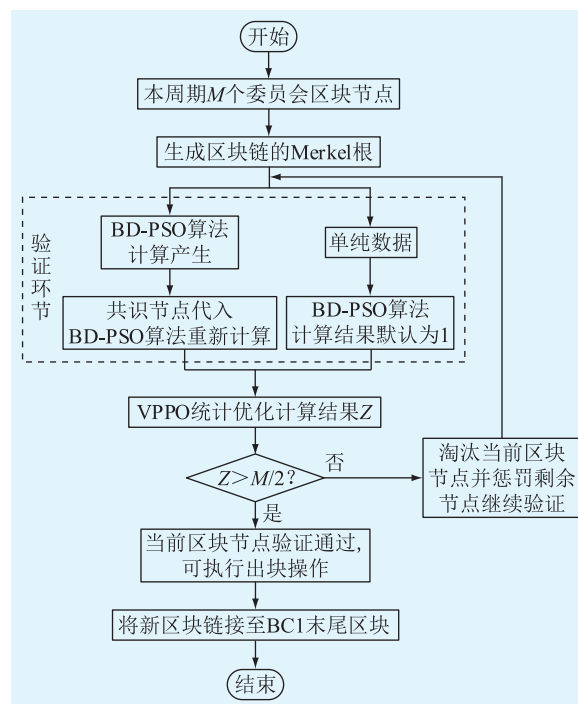


图 6 共识算法流程

Fig.6 Consensus algorithm flow

强的节点有较大的可能性当选,在委员会节点选举阶段降低了恶意节点当选的可能,有效保证参与记账的节点总是有较好的状态或共识能力。参考 PBFT 算法保持副本状态相同的思想,可以抑制节点作恶;并且 BD-PSO 算法能够提高去中心化程度,节约计算运力的同时还能能为电能的物理安全传输奠定基础。DPoA 共识算法每轮动态选择部分满足条件的节点作为委员会节点,使共识机制更加安全、稳定和高效。

4 算例分析

4.1 基本设置

为了验证文中所提 VPP 匹配机制的有效性,在 Win10 64 bit 系统中搭建 VPP 分布式交易实验平台,VPP 内部区块链交易系统的开发参考文献 [28],通过将链码发布到 Hyperledger Fabric,并基于 Java SDK 创建本地客户端来实现。

以上海某地区为例分析文中所提交易匹配机制,将系统分解为 6 个 Agg 区域,各 Agg 地理位置位于临近区域,其负荷特性差异显著。设置系统允许的电压偏移范围为 0.95~1.05 p.u.。两区域 Agg 间联络线传输功率极限为 10 MW。Agg1、Agg2 分布式能源包含 PV、WT; Agg3 分布式能源包含 PV; Agg4 分布式能源包含 WT; Agg5、Agg6 分布式能源包含 PV、WT。Agg1、Agg2 的负荷主要为居民负荷; Agg3、Agg4 的负荷主要为商业负荷; Agg5、Agg6 的

负荷为商业负荷和居民负荷,两者负荷相差不大。各 Agg 中的 WT 容量均为 500 kW, Agg1、Agg2 的 PV 容量为 500 kW,其余 Agg 的 PV 容量均为 300 kW,储能系统(energy storage system, ESS)容量为 200 kW。为简化计算,相同类型 FRs 约束条件相同。

PV 输出与太阳光强度、PV 组件面积、光电转换效率有关。研究表明,在一定时间内,光强符合 Bata 分布,因此 PV 输出模型可表示为:

$$f(P) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{P}{Q}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P}{Q}\right)^{\beta-1} \quad (10)$$

$$Q = \gamma_{\max} A \eta_0 \quad (11)$$

式中: P 为 PV 实际输出功率; $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数; α 、 β 为 Bata 分布的 2 个参数; Q 为 PV 最大输出功率; γ_{\max} 为最大光强; A 为 PV 组件的面积; η_0 为光电转换效率。

风力输出与风速密切相关。研究表明,风速的概率分布符合双参数 Weibull^[31], Weibull 的概率密度函数为:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (12)$$

式中: v 为风速; c 、 k 分别为 Weibull 分布的尺度参数和形状参数。

WT 输出模型可表示为:

$$P_w = \begin{cases} 0 & v < v_{ci} \\ \frac{P_r}{v_r - v_{ci}} (v - v_{ci}) & v_{ci} \leq v < v_r \\ P_r & v_r \leq v < v_{co} \\ 0 & v \geq v_{co} \end{cases} \quad (13)$$

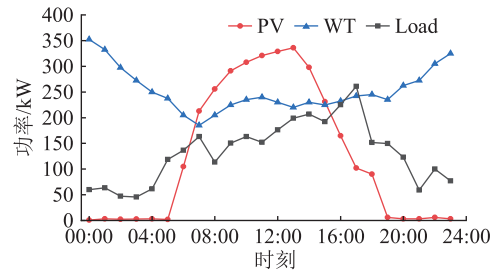
式中: P_w 为 WT 实际输出功率; P_r 为额定功率; v_r 为额定风速; v_{ci} 为切入风速; v_{co} 为切割风速。

为不失一般特性,功率实测值为在日前预测值的基础上叠加符合正态分布的随机预测误差,WT、Load 的误差期望为 0,均方差分别为 5%、3%,预测曲线如图 7—图 9 所示。VPP 可以有效地整合不同区域的分布式能源,实现分布式能源的协调优化控制。因此,文中的 PV 并不局限于同一地点,所以不同 Agg 的 PV 曲线变化规律是不同的。

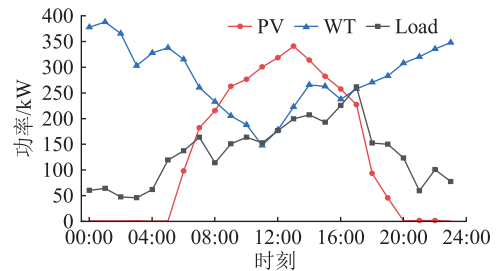
4.2 CDA 匹配模拟及分析

4.2.1 匹配模拟设置

在资源聚合层 BC1 中除 6 个 Agg 以外,还布置 VPP 调度中心节点和电网节点,8 个节点具备协商一致的功能。文中 Agg 间,假设 VPPO 和电网节点在参与记账时均能正确记录,不存在通信延迟等问题。VPP 包含 6 个 Agg,其中 Agg1、Agg2 为生产型;Agg3、Agg4 为消费型;Agg5、Agg6 为产消型,即一天



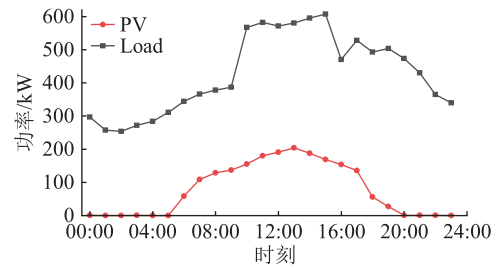
(a) Agg1预测值



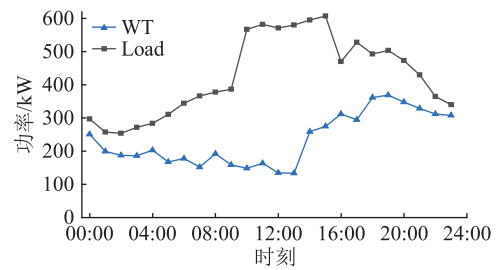
(b) Agg2预测值

图7 Agg1 和 Agg2 预测值

Fig.7 Predicted value of Agg1 and Agg2



(a) Agg3预测值

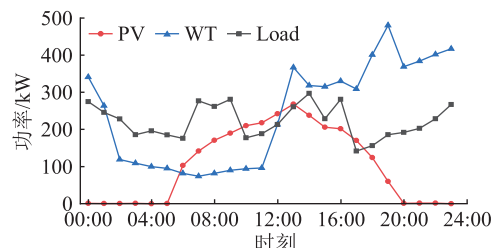


(b) Agg4预测值

图8 Agg3 和 Agg4 预测值

Fig.8 Predicted value of Agg3 and Agg4

内有时为生产型 Agg 有时为消费型 Agg。文中以 01:00—02:00 和 12:00—13:00 2 个时段来验证 VPP 中 BC1 的 CDA 匹配情况。电网分时电价参数见表 2。2 个时段双方报价信息见表 3—表 6。



(a) Agg5预测值

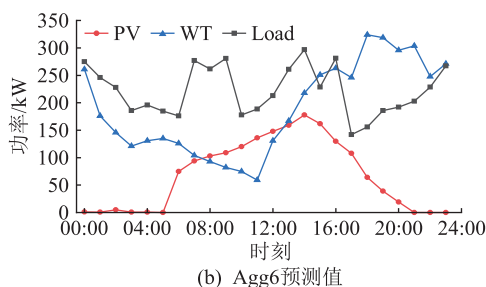


图9 Agg5和Agg6预测值

Fig.9 Predicted value of Agg5 and Agg6

表2 分时电价参数

Table 2 Time-of-use price parameters

时段	售电价格/ [元·(kW·h) ⁻¹]	购电价格/ [元·(kW·h) ⁻¹]
23:00—07:00	0.38	0.24
07:00—11:00、 14:00—18:00	0.57	0.38
11:00—14:00、 18:00—23:00	0.86	0.65

表3 生产者售电信息(01:00—02:00)

Table 3 The electricity sale informations of producers (01:00—02:00)

Agg	报价/ [元·(kW·h) ⁻¹]	保留价格/ [元·(kW·h) ⁻¹]	售电量/ (kW·h)	信誉值
Agg1	0.318	0.300	282.5	0.846
Agg2	0.320	0.315	324.2	0.724

表4 消费者购电信息(01:00—02:00)

Table 4 The electricity purchasing informations of consumers (01:00—02:00)

Agg	报价/ [元·(kW·h) ⁻¹]	保留价格/ [元·(kW·h) ⁻¹]	售电量/ (kW·h)	信誉值
Agg3	0.318	0.340	234.22	0.965
Agg4	0.320	0.356	58.34	0.782
Agg5	0.318	0.333	217.60	0.829
Agg6	0.331	0.356	90.40	0.706

4.2.2 匹配结果分析

VPP 内部匹配结果见表7、表8,从时段01:00—

表7 交易匹配结果(01:00—02:00)

Table 7 Transaction matching results (01:00—02:00)

匹配	售电量/ (kW·h)	购电量/ (kW·h)	成交量/ (kW·h)	剩余量/ (kW·h)	双方交易 信誉值	交易 因子	双方交易报价/ [元·(kW·h) ⁻¹]	成交价/ [元·(kW·h) ⁻¹]
Agg1/Agg6	282.50	90.40	90.40	192.10	0.846	0.706	0.318	0.331
Agg1/Agg4	192.10	58.34	58.34	133.76	0.846	0.782	0.318	0.320
Agg1/Agg3	133.76	234.22	133.76	100.46	0.846	0.965	0.318	0.318
Agg2/Agg3	324.20	100.46	100.46	223.74	0.724	0.965	0.320	0.318
Agg2/Agg5	223.74	217.60	217.60	6.14	0.724	0.829	0.320	0.318
Agg2	6.14					0.724		0.240

表5 生产者售电信息(12:00—13:00)

Table 5 The electricity sale informations of producers (12:00—13:00)

Agg	报价/ [元·(kW·h) ⁻¹]	保留价格/ [元·(kW·h) ⁻¹]	售电量/ (kW·h)	信誉值
Agg1	0.720	0.695	318.70	0.823
Agg2	0.733	0.673	319.26	0.755
Agg5	0.720	0.658	75.00	0.763
Agg6	0.755	0.673	31.00	0.657

表6 消费者购电信息(12:00—13:00)

Table 6 The electricity purchasing informations of consumers (12:00—13:00)

Agg	报价/ [元·(kW·h) ⁻¹]	保留价格/ [元·(kW·h) ⁻¹]	售电量/ (kW·h)	信誉值
Agg3	0.713	0.736	285.60	0.922
Agg4	0.760	0.780	421.68	0.753

02:00可以看出,各 Agg 售电量和购电量相近,第一轮匹配之后,除 Agg2 有部分剩余电量,其余所有买家和卖家的需求电量均被拍卖成功,无须进行第二轮匹配。Agg3 和 Agg5 在此时刻均为购电者其报价相同,但 Agg3 交易信誉值较高,所以在匹配排序时 Agg3 报价优于 Agg5。Agg2 在拍卖交易结束后剩余少部分电量,其由电网进行“兜底”,以上网电价向电网售电。从时段 12:00—13:00 可以看出,交易市场形成买方市场,其售电量大于购电量。第一轮匹配结束后,购电者 Agg3 匹配并不成功,因其报价低于售电者 Agg1 和 Agg5 的报价,因此进行第二轮匹配,Agg3 以保留价格进行结算,如表 9 所示。Agg1 和 Agg5 的报价相同,但 Agg1 的信誉值较高,因此 Agg1 优先进行匹配交易。Agg5 剩余电量向电网售电。经过两轮匹配,各 Agg 均达到相应需求。

资源聚合层的 CDA 匹配机制可以实现多主体对等可信交易,并能够实现各自利益的最大化,同时,VPP 内部电价与大电网电价的友好交互,可有效提高 Agg 的发电利润,减少用户的电费支出。

表 8 交易匹配结果(12:00—13:00)

Table 8 Transaction matching results (12:00—13:00)

匹配	售电量/ (kW·h)	购电量/ (kW·h)	成交量/ (kW·h)	剩余量/ (kW·h)	双方交易 信誉值	交易 因子	双方交易报价/ [元·(kW·h) ⁻¹]	成交价/ [元·(kW·h) ⁻¹]		
Agg6/Agg4	31.00	421.68	31.00	390.68	0.657	0.753	0.466	0.755	0.76	0.756
Agg2/Agg4	319.26	390.68	319.26	71.42	0.755	0.753	0.501	0.733	0.76	0.747
Agg1/Agg4	318.70	71.42	71.42	247.28	0.823	0.753	0.522	0.720	0.76	0.741

表 9 第二阶段交易匹配结果(12:00—13:00)

Table 9 Second stage transaction matching results (12:00—13:00)

匹配	售电量/ (kW·h)	购电量/ (kW·h)	成交量/ (kW·h)	剩余量/ (kW·h)	双方交易 信誉值	交易 因子	双方交易报价/ [元·(kW·h) ⁻¹]	成交价/ [元·(kW·h) ⁻¹]		
Agg1/Agg3	247.28	285.60	247.28	38.32	0.823	0.922	0.472	0.72	0.736	0.728
Agg5/Agg3	75.00	38.32	38.32	36.68	0.763	0.922	0.453	0.72	0.736	0.727
Agg5	36.68									0.650

4.3 安全性分析

4.3.1 BD-PSO 算法

文中 VPP 内部多个 Agg 均具备局部计算或服务器可进行计算和控制,而普通 VPP 是控制中心独立计算和控制。由于 VPP 主体的智能设备一般通过路由器接入互联网,并控制相应设备,所以采用 DPoA 共识算法的 VPP 以服务器和路由器被入侵的概率数据进行比较。由于路由器防护性能较差易遭受入侵,而服务器防护较好不容易被攻破,分别取较高 0.8 和较低 0.1 的概率值对服务器防护性能进行比较。Agg 被入侵成功的概率如图 10 所示。

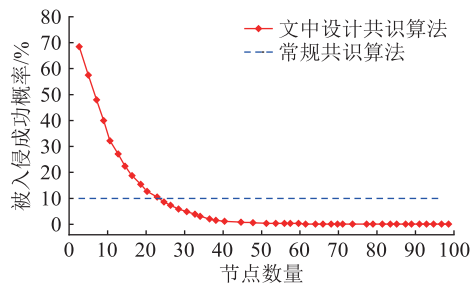


图 10 算法安全对比

Fig.10 Algorithm security comparison

从图 10 中可以发现,随着系统内节点数量的增加,采用改进的 DPoA 共识算法的 Agg 被入侵成功的概率呈指数形式下降,在节点数为 30 时被入侵成功的概率约为 4.9%,在概率统计上可视为不可能事件,若节点再进一步增多,则可能性无限接近于 0。这是因为 DPoA 共识算法具有 50% 节点认同才能生成区块的特性,节点越多入侵需要控制的节点越多,入侵难度就越大,而传统 VPP 由于只通过控制中心的一台计算机或服务器进行计算和控制,系统安全性与节点数量无关,因此一旦该服务器被攻破,整个系统也就被控制。

4.3.2 区块链共识算法对比

文中基于 BD-PSO 算法设计了 DPoA 共识机制,并结合节点的共识能力对 DPoA 动态更新委员会共识节点进行了规范化处理。为验证文中共识机制的安全性及优越性,将 DPoA 与 DPoS 算法进行比较,实验简化了 DPoS 共识算法中的路由计算 Hash 环节,将其简化为一个固定的 Hash 值。

为了验证 DPoA 共识算法在交易过程中具有抑制恶意节点、维护交易安全的作用,在实验中,每个正常节点在每轮交易中有 10% 的几率成为恶意节点,通过计算共识过程中恶意节点占总节点数的比例,对 DPoA 共识算法的安全性进行评价。

如图 11 所示,DPoS 算法初始的恶意节点比例明显高于改进的共识算法,而且在后续交易的共识过程中,DPoS 算法的恶意节点占比不断提高,而改进的共识算法则表现更好,没有一次恶意节点比例超过 50%。由此表明,改进的共识算法安全性更高。因此,文中设计的 DPoA 共识机制在继承了 PBFT 算法的低耗能、高效率特点的同时,还适应了文中设计的同构多链 VPP 架构。DPoA 与 BD-PSO 算法相配合,可以提高系统的计算速度和运行效率,具有抑制恶意节点、维护交易安全的作用,为区块链 VPP 安全运行奠定基础。

4.3.3 改进共识算法与其他算法性能分析

为验证文中采用 BD-PSO 算法改进共识机制的良好性能,分析对比 Lin-WPSO 算法、鲸鱼优化算法 (whale optimization algorithm, WOA) 和文中采用 BD-PSO 算法在计算精度和速度方面的差异。算法惯性权重最大值和最小值分别为 0.9 和 0.4。

采用的 BD-PSO 算法和 Lin-WPSO 算法(易陷入局部最优)经过多次实验证明,BD-PSO 算法种群个数及迭代次数取 400 和 1 000、Lin-WPSO 算法种

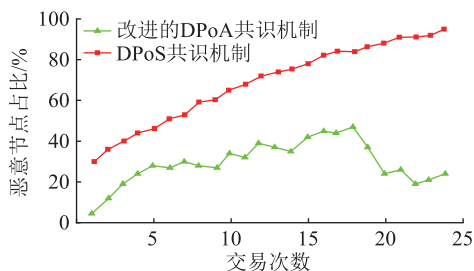


图 11 改进 DPoA 共识机制与 DPoS 共识机制对比
Fig.11 Comparison between improved DPoA consensus mechanism and DPoS consensus mechanism

群个数及迭代次数取 90 和 1 000 时效果最佳,学习因子 $c_1=c_2=2.05$ 。WOA 种群个数为 400,迭代次数为 1 000,初始游动因子为 2,螺旋系数为 3。寻优变量为购电量、售电量、向电网购售电量。以 4.2 节匹配模拟结果为依据,算法各求解 10 次,取平均值后的结果如表 10 所示。

表 10 算法性能对比

Table 10 Algorithm performance comparison

参数	Lin-WPSO 算法	WOA	BD-PSO 算法
最优值收敛次数	883	875	927
计算时间/s	67.19	58.62	31.54

从表 10 中可以得出,文中所提改进的 BD-PSO 算法在计算速度和最优值收敛次数均具有明显优势。BD-PSO 算法由于采用了分布式计算,计算时间大幅减少,相比 Lin-WPSO 算法、WOA 分别下降了 53.06%、46.20%。可以发现,虽然 Lin-WPSO 算法、WOA 的最优值迭代次数更少,但其最优值却远不如 BD-PSO 算法,究其原因可能是其过早陷入了局部最优,而 BD-PSO 算法一直保持较强的寻优能力。

5 结语

文中针对 VPP 内部多利益主体交易在新形式下面临的主体身份不明确、交易信息不透明、运行决策效率低及交易安全风险增大等问题,首先,基于区块链技术并融合 MAS,针对 VPP 内部多 Agg 建立了一主多从链分层互动架构。然后,基于非合作静态博弈模型设计了一种适用于 VPP 内部多 Agg 的弱中心化电能 CDA 匹配机制,以实现 VPP 内部的多 Agg 可信交易。最后,基于 BD-PSO 算法提出了改进的 DPoA 共识算法,以期统筹解决 VPP 交易安全,降低交易风险。

通过算例分析,搭建 VPP 分布式交易平台,分析了 CDA 匹配交易流程,可以实现多主体对等可信交易,并能够实现各自利益的最大化;同时,对分布式交易平台安全性分析,基于 BD-PSO 算法改进的

DPoA 共识算法,能够降低恶意节点入侵成功的概率。通过共识算法对比以及算法性能分析表明,文中改进共识机制具有抑制恶意节点、维护交易安全的作用,在计算速率方面具有明显优势,可以有效提升 VPP 交易安全性。

参考文献:

[1] 国家发展改革委,国家能源局. 关于印发《“十四五”现代能源体系规划》的通知[EB/OL]. [2022-03-24]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/content_5680759.htm. National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice on issuing the "14th five-year plan" development plan for the "modern energy system planning" [EB/OL]. [2022-03-24]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/content_5680759.htm.

[2] 彭道刚,税纪钧,王丹豪,等. “双碳”背景下虚拟电厂研究综述[J]. 发电技术,2023,44(5):602-615. PENG Daogang, SHUI Jijun, WANG Danhao, et al. Review of virtual power plant under the background of "dual carbon"[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(5):602-615.

[3] 徐非非,冯华,覃洪培,等. 计及不确定性的配电网分布式光伏承载能力区间分析方法[J]. 浙江电力,2023,42(11):86-95. XU Feifei, FENG Hua, QIN Hongpei, et al. An analysis method of DPV hosting capacity interval in distribution networks under uncertainties [J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(11):86-95.

[4] 康俊杰,赵春阳,周国鹏,等. 风光水火储多能互补示范项目发展现状 & 实施路径研究[J]. 发电技术,2023,44(3):407-416. KANG Junjie, ZHAO Chunyang, ZHOU Guopeng, et al. Research on development status and implementation path of wind-solar-water-thermal-energy storage multi-energy complementary demonstration project[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(3):407-416.

[5] 卫璇,潘昭光,王彬,等. 云管边端架构下虚拟电厂资源集群与协同调控研究综述及展望[J]. 全球能源互联网,2020,3(6):537-551. WEI Xuan, PAN Zhaoguang, WANG Bin, et al. Review on virtual power plant resource aggregation and collaborative regulation using cloud-tube-edge-end architecture [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(6):537-551.

[6] 王宣元,高洪超,张浩,等. 面向新型电力系统的灵活资源聚合技术应用场景分析及建设启示[J]. 电力需求侧管理,2022,24(1):73-80. WANG Xuanyuan, GAO Hongchao, ZHANG Hao, et al. Analysis and enlightenment of aggregation technology application scenarios of flexible distributed energy resources oriented to new power system [J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(1):73-80.

[7] 刘方,徐耀杰,杨秀,等. 考虑电能交互共享的虚拟电厂集群多时间尺度协调运行策略[J]. 电网技术,2022,46(2):

- 642-656.
- LIU Fang, XU Yaojie, YANG Xiu, et al. Multi-time scale coordinated operation strategy of virtual power plant clusters considering power interactive sharing [J]. *Power System Technology*, 2022, 46(2): 642-656.
- [8] 麻秀范, 余思雨, 朱思嘉, 等. 基于多因素改进 Shapley 的虚拟电厂利润分配[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(S2): 585-595.
- MA Xiufan, YU Siyu, ZHU Sijia, et al. Profit allocation to virtual power plant members based on improved multifactor Shapley value method [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(S2): 585-595.
- [9] 李嘉媚, 艾芊, 殷爽睿. 虚拟电厂参与调峰调频服务的市场机制与国外经验借鉴[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(1): 37-56.
- LI Jiamei, AI Qian, YIN Shuangrui. Market mechanism and foreign experience of virtual power plant participating in peak-regulation and frequency-regulation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(1): 37-56.
- [10] 龚钢军, 张桐, 魏沛芳, 等. 基于区块链的能源互联网智能交易与协同调度体系研究[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(5): 1278-1289.
- GONG Gangjun, ZHANG Tong, WEI Peifang, et al. Research on intelligent trading and cooperative scheduling system of energy Internet based on blockchain [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(5): 1278-1289.
- [11] 周洪益, 余爽, 柏晶晶, 等. 基于区块链技术的虚拟电厂交易管理模式研究[J]. *电力需求侧管理*, 2021, 23(1): 72-76.
- ZHOU Hongyi, YU Shuang, BAI Jingjing, et al. Research on trading pattern of virtual power plant based on blockchain technology [J]. *Power Demand Side Management*, 2021, 23(1): 72-76.
- [12] LI B, YANG F, QI B, et al. Research on key technologies of P2P transaction in virtual power plant based on blockchain [J]. *IET Smart Grid*, 2022, 5(4): 223-233.
- [13] YANG Q, WANG H, WANG T T, et al. Blockchain-based decentralized energy management platform for residential distributed energy resources in a virtual power plant [J]. *Applied Energy*, 2021, 294: 117026.
- [14] 周步祥, 张越, 臧天磊, 等. 基于区块链的多虚拟电厂主从博弈优化运行[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(1): 155-163.
- ZHOU Buxiang, ZHANG Yue, ZANG Tianlei, et al. Blockchain-based stackelberg game optimal operation of multiple virtual power plants [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(1): 155-163.
- [15] SEVEN S, YAO G, SORAN A, et al. Peer-to-peer energy trading in virtual power plant based on blockchain smart contracts [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 175713-175726.
- [16] 余维, 胡跃, 杨晓宇, 等. 基于能源区块链网络的虚拟电厂运行与调度模型[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(13): 3729-3736.
- SHE Wei, HU Yue, YANG Xiaoyu, et al. Virtual power plant operation and scheduling model based on energy blockchain network [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(13): 3729-3736.
- [17] 陈凯玲, 顾闻, 王海群. 能源区块链网络中的虚拟电厂运行与调度模式[J]. *系统管理学报*, 2022, 31(1): 143-149.
- CHEN Kailing, GU Wen, WANG Haiqun. Mode of virtual power plant operation and dispatching in energy blockchain network [J]. *Journal of Systems & Management*, 2022, 31(1): 143-149.
- [18] 任建文, 张青青. 基于能源区块链的虚拟电厂两阶段鲁棒优化调度[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(8): 23-30.
- REN Jianwen, ZHANG Qingqing. Two-stage robust optimal scheduling of virtual power plant based on energy blockchain [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(8): 23-30.
- [19] 冯丽, 李俊, 刘波. 清洁能源消纳背景下的重庆电网需求响应实践[J]. *华电技术*, 2021, 43(1): 71-75.
- FENG Li, LI Jun, LIU Bo. Demand response of Chongqing power grid integrated with clean energy consumption [J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(1): 71-75.
- [20] 窦春霞, 罗维, 岳东, 等. 基于多智能体的微网群内电力市场交易策略[J]. *电网技术*, 2019, 43(5): 1735-1744.
- DOU Chunxia, LUO Wei, YUE Dong, et al. Multi-agent system based electricity market trading strategy within microgrid groups [J]. *Power System Technology*, 2019, 43(5): 1735-1744.
- [21] 刘思源, 艾芊, 郑建平, 等. 多时间尺度的多虚拟电厂双层协调机制与运行策略[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(3): 753-761.
- LIU Siyuan, AI Qian, ZHENG Jianping, et al. Bi-level coordination mechanism and operation strategy of multi-time scale multiple virtual power plants [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(3): 753-761.
- [22] 王胜寒, 郭创新, 冯斌, 等. 区块链技术在电力系统中的应用: 前景与思路[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(11): 10-24.
- WANG Shenghan, GUO Chuangxin, FENG Bin, et al. Application of blockchain technology in power systems: prospects and ideas [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(11): 10-24.
- [23] 玄佳兴, 柳旭, 李国民, 等. 基于多链协同区块链的分布式能源交易[J]. *电力建设*, 2021, 42(11): 34-43.
- XUAN Jiaying, LIU Xu, LI Guomin, et al. Distributed energy transaction based on multi-chain collaborative blockchain [J]. *Electric Power Construction*, 2021, 42(11): 34-43.
- [24] 殷爽睿, 艾芊, 宋平, 等. 虚拟电厂分层互动模式与可信交易框架研究与展望[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(18): 118-128.
- YIN Shuangrui, AI Qian, SONG Ping, et al. Research and prospect of hierarchical interaction mode and trusted transaction framework for virtual power plant [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(18): 118-128.
- [25] 朱廷虎, 刘洋, 许立雄, 等. 基于区块链技术的微电网群分布式电能交易模式[J]. *电力建设*, 2022, 43(6): 12-23.

- ZHU Tinghu, LIU Yang, XU Lixiong, et al. Research on distributed electricity transaction mode of microgrid cluster applying blockchain technology[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(6):12-23.
- [26] 李彬, 覃秋悦, 祁兵, 等. 基于区块链的分布式能源交易方案设计综述[J]. 电网技术, 2019, 43(3):961-972.
- LI Bin, QIN Qiuyue, QI Bing, et al. Design of distributed energy trading scheme based on blockchain[J]. Power System Technology, 2019, 43(3):961-972.
- [27] 马腾, 刘洋, 许立雄, 等. 基于区块链的配电侧多微电网电能去中心化交易模型[J]. 电网技术, 2021, 45(6):2237-2247.
- MA Teng, LIU Yang, XU Lixiong, et al. Energy decentralized transaction model of multi-microgrid in distribution side based on blockchain[J]. Power System Technology, 2021, 45(6):2237-2247.
- [28] YIN S R, AI Q, LI J M, et al. Trading mode design for a virtual power plant based on main-side consortium blockchains[J]. Applied Energy, 2022, 325:119932.
- [29] 徐剑利, 赵勇, 连义成. 基于区块链的分布式电能交易系统技术研究[J]. 电气技术, 2020, 21(10):7-14.
- XU Jianli, ZHAO Yong, LIAN Yicheng. Research on the technology of distributed energy trading system based on blockchain[J]. Electrical Engineering, 2020, 21(10):7-14.
- [30] 刘雨佳, 樊艳芳, 白雪岩, 等. 基于优化计算型区块链系统的虚拟电厂模型与调度策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(15):4178-4191.
- LIU Yujia, FAN Yanfang, BAI Xueyan, et al. Virtual power plant model and scheduling strategy based on optimized computing block-chain system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(15):4178-4191.
- [31] 付文杰, 杨伯青, 黄莉, 等. 考虑风光出力不确定性与相关性的混合电价机制设计[J]. 南方电网技术, 2021, 15(9):85-92.
- FU Wenjie, YANG Boqing, HUANG Li, et al. Hybrid electricity pricing mechanism design considering uncertainty and correlation of wind and photovoltaic power output[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(9):85-92.

作者简介:



王卫南

王卫南(1998),男,硕士在读,研究方向为区块链技术与虚拟电厂(E-mail:504139889@qq.com);

艾芊(1969),男,博士,教授,研究方向为虚拟电厂调度及市场运行、能源互联网、区块链技术;

李晓露(1971),女,博士,教授,研究方向为电力企业信息集成、电力调度自动化、配电自动化、综合能源系统。

Virtual power plant master-slave multi-chain transaction matching mechanism based on improved consensus algorithm

WANG Weinan¹, AI Qian², LI Xiaolu¹, WANG Di², CHEN Minyu²

(1. Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200093, China;

2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In the future new power system, the multi-agent trusted transaction and information security in the virtual power plant (VPP) will be complex and challenging. The features of blockchain technology, such as information security, distribution decision, smart contract and tamper-proof, provide a new idea for VPP multi-subject trusted transaction. This paper focuses on the benefits maximization formed by multi-aggregator inside VPPs and the efficiency of trusted transaction matching. Firstly, according to the different demands of transaction subjects, a master and multi-slave hierarchical interactive control architecture is established to integrate blockchain technology with multi-agent system. Secondly, a credible transaction matching mechanism is designed under the demand of multi-aggregator peer to peer transaction, and non-cooperative game model is introduced to ensure the interests of multi-aggregator subjects. Then, the blockchain-based distributed particle swarm optimization algorithm proposes a consensus algorithm improved by delegated proof-of-authority (DPoA) to improve the security of the transaction. Finally, the rationality and feasibility of the strategy proposed in this paper are verified by an example analysis, which effectively enhances the matching efficiency and security of multi-agent transactions.

Keywords: virtual power plant (VPP); trusted transaction; blockchain technology; hierarchical interaction; matching mechanism; improved consensus algorithm

(编辑 吴昊)