

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.04.017

# 基于云边协同和区块链的分布式能源交易系统设计

马光<sup>1</sup>, 江伟<sup>1</sup>, 李文朝<sup>1</sup>, 聂涌泉<sup>1</sup>, 孙超<sup>2</sup>

(1. 中国南方电网有限责任公司, 广东 广州 510663;

2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:** 分布式能源的广泛发展使其成为电力市场的考虑重点, 而传统的数据交互平台无法满足大规模分布式能源交易高效灵活、安全可靠的需求。为解决高信息处理复杂度与安全快速交易需求之间的矛盾, 文中提出基于云边协同和区块链的分布式能源交易系统架构和整体设计方案。首先设计了云计算与边缘计算协同并结合两层区块链的系统架构, 利用区块链技术实现交易去中心化, 提高了交易的自主高效性, 利用云边协同提升海量数据的处理能力和交易系统的扩展能力。然后基于双向竞价和预测补偿设计了分布式能源的交易机制, 进一步对区块链的核心共识算法进行分析, 并采用改进委托权益证明 (delegated proof of stake, DPoS) 作为交易系统的高效率、高可靠共识算法, 实现大规模分布式能源的高效可靠交易, 促进分布式能源参与电网调节, 提高电网稳定运行水平。最后通过应用实例验证了所提系统对大规模分布式能源交易的适应性和优越性。

**关键词:** 云计算; 边缘计算; 云边协同; 区块链; 分布式能源; 电力交易系统

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)04-0159-08

## 0 引言

能源互联网的不断发展和海量分布式能源主体的接入, 给当前电力市场交易系统带来了新的挑战。一方面分布式能源, 诸如风能、太阳能、储能、微型发电机等, 具有调节灵活、波动性和随机性强等特点, 尽可能利用和适应分布式能源的优势需要分布式能源的详尽模型和运行数据, 由此带来信息数据量的激增和处理复杂度的提升, 而高效可靠地融合分布式能源相关数据是当前交易系统所无法适应的<sup>[1-3]</sup>; 另一方面, 交易数量的大规模增长对交易系统的运行成本和计算时间提出了新的要求<sup>[4-6]</sup>, 传统集中式电力交易系统属于中心化交易系统, 中心节点计算能力有限, 导致其计算延时过大, 无法适应大规模分布式能源的交易需求, 不利于能源的高效配置, 同时单一中心节点易受网络攻击, 不利于交易系统的整体安全。

针对海量信息的存储和计算需求, 应用云及云边计算技术是当前的有效解决方案。文献[7]探索了边缘计算在配电系统中的应用; 文献[8]将云系统用于电力系统分析计算; 文献[9]对云平台的资源配置进行了研究; 文献[10]将云平台技术应用到了仿真分析系统; 文献[11]研究了云平台在电力市场方面的应用。针对区块链在电力市场领域的应

用也有很多研究。文献[12]提出基于区块链建立包含信息交互和决策优化的分布式电力市场; 文献[13]研究了基于区块链的交易系统信任和效率优化系统。以上研究为解决分布式能源交易中面临的问题提供了很好的方案, 但对于将云边协同与区块链的优势进行互补建立电力市场交易系统的研究较少。如何协调两大技术的特色以更好地适应分布式能源交易需求也是当下的研究热点。

针对以上当前分布式能源交易系统面临的问题和研究现状, 文中将云边协同与区块链技术相结合, 提出基于云边协同和区块链的分布式能源交易系统, 以提高分布式能源交易的效率和可靠性。首先介绍基于云边协同和区块链的分布式能源交易系统架构, 然后对分布式能源交易机制和共识机制进行分析和说明, 最后通过应用实例证明所提系统对大规模分布式能源交易有很好的适应性和优越性。

## 1 分布式能源交易系统架构

随着分布式能源接入数量的快速增长, 依靠传统云计算集中处理数据的模式已无法高效处理各种分布式设备产生的数据<sup>[14-16]</sup>, 在云边协同系统中, 云中的部分数据处理可以卸载到边缘集群中<sup>[17-19]</sup>, 依据分布式的服务器结构实现对海量数据的高效处理。边缘计算直接对数据源的海量数据进行处理以分担云端负荷, 调用最近及最优的边缘服务器将会减少计算能耗和云服务的带宽消耗。

收稿日期: 2023-01-08; 修回日期: 2023-03-27

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目“基于云边融合的智能调度运行平台理论、框架、标准体系及平台关键技术研究”(000000KK52200035)

边缘系统从功能上可划分为边缘集群和边缘网关,边缘网关对应分布式能源主体,边缘集群对一系列的边缘网关进行统一管理,并与云进行数据和功能交互。将大量分布式能源个体的监控、信息管理、交易申报、结算等功能从云端系统分离,减轻了云端负荷,极大提高了高频电力交易的效率和可靠性。云平台强大的计算和存储能力同时也是数据处理的重要支撑,因而云边协同系统可以满足大规模分布式能源接入后的电力交易需求。

区块链是去中心化、不可篡改、可追溯、多方共同维护的分布式数据库,将传统的仅涉及单体业务的多个孤立数据库进行整合,按照严格的规则和共识进行更新,实现了可信的多方之间的信息共享和监督。针对云边计算系统,需要两层区块链与之对应,边缘集群形成主链节点,边缘集群对应的边缘网关形成子链节点。

综上所述,基于云边协同和区块链的分布式能源交易系统架构如图1所示。

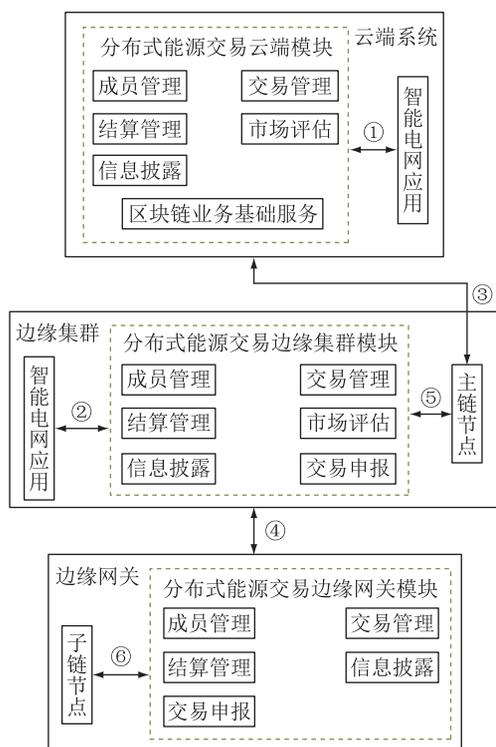


图1 基于云边协同和区块链的分布式能源交易系统架构

Fig.1 Distributed energy trading system architecture based on cloud edge collaboration and blockchain

系统整体架构包括分布式能源交易云端模块、分布式能源交易边缘集群模块和分布式能源交易边缘网关模块。云端模块部署在云端系统业务应用层,具备成员管理、交易管理、结算管理、市场评估、信息披露等功能。边缘集群模块部署在边缘集群业务应用层,数据存储在本地主链节点,具备成

员管理、交易管理、结算管理、市场评估、信息披露、交易申报等功能。边缘网关模块部署在边缘网关应用服务层,数据存储在本地子链节点,具备成员管理、交易管理、结算管理、信息披露、交易申报等功能。其中成员管理包括维护交易主体基本信息、交易资格、交易分区等功能;交易管理包括基于智能合约的交易自动出清、交易结果自动上链、获取发用电数据等电网实际运行数据自动上链的功能;结算管理包括不同的交易分区配置不同结算智能合约、对交易结果进行结算,并将结算数据上链的功能。

分布式能源交易数据流架构包含如图1所示的6个主要部分:

(1) 数据流①,分布式能源交易云端模块向云端系统的智能电网运行类应用提供分布式能源交易曲线。

(2) 数据流②,分布式能源交易边缘集群模块向边缘集群的智能电网运行类应用提供分布式能源交易曲线。

(3) 数据流③,包含分布式能源交易的申报信息、交易结果、结算结果、披露信息等。

(4) 数据流④,包含分布式能源交易的申报信息、交易结果、结算结果、披露信息等。

(5) 数据流⑤,分布式能源交易边缘集群模块与本地主链节点交互的数据。

(6) 数据流⑥,分布式能源交易边缘网关模块与本地子链节点交互的数据。

## 2 分布式能源交易机制

分布式能源参与电网调节的时间尺度较小,其对应电力市场的交易要求快速可靠,能够适应高频率小时间尺度的调度和交易需求。区块链技术通过去中心化共同建立和维护交易数据库,实现双向安全体系<sup>[20-23]</sup>,克服了中心化交易系统中存在的信息不对称、可靠性低的问题。交易竞价撮合可以通过区块链中的智能合约来实现,基于智能合约的分布式能源交易框架如图2所示。

考虑数量庞大的电能产销交易主体不同的电能生产和消耗能力,以及分布式能源具有较大的随机性和波动性,文中设计了双向竞价以及预测补偿的电力交易机制,包括交易流程、价格形成、交易确认等。面向具备分布式发电和用电的所有交易主体,以电力系统日前、日内和实时调度曲线为基础,以新能源优先消纳为原则,通过竞价进行撮合,针对存在的预测功率误差,对差额功率进行补偿清

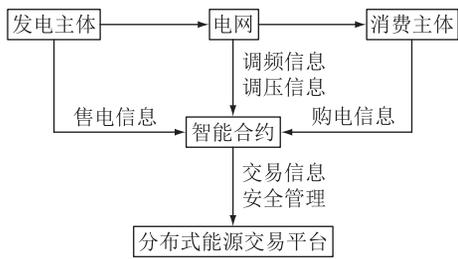


图2 基于智能合约的分布式能源交易框架  
Fig.2 Distributed energy trading framework based on smart contracts

算,交易机制的具体步骤如下。

(1) 交易主体报价及上报平台。电力市场中的电能生产和消费主体根据已有的电力系统不同时间尺度(包括日前、日内和实时)的功率/负荷预测曲线,提出对应时间长度范围内的生产/消费电能及对应的价格,并上报交易平台。

(2) 竞价撮合。新能源发电主体将被优先消纳,发电主体先将新能源发电主体按报价从低到高排列,然后再将传统发电主体报价从低到高排列,共同形成发电竞价序列,电能消费主体则按报价从高到低的顺序形成消费竞价序列,交易平台按2个价格序列进行交易撮合,当发电主体最低报价低于或等于消费主体最高报价时,二者即发生交易,成交电价为二者报价的均价。竞价的撮合首先从调度时间尺度最大的日前调度开始,以日内和实时调度作为实际结算的依据,日内和实时调度需求发布后按照上述方式继续进行竞价撮合。

(3) 预测补偿。发电和消费主体的发电/负荷预测曲线与实际的电能使用总存在一定的偏差。电能生产主体和消费主体需要再次进行交易以应对预测误差,同时大规模分布式能源交易频次较高,因而极大增加了交易的信息处理复杂度。发电和消费主体也应发布较为准确的预测曲线,在正常运行过程中,为消除这种偏差带来的交易秩序影响以及激励各主体参与电网调节,针对预测误差相对交易的占比较小以及电力市场参与主体自主申报价格的特点,设置预测补偿机制。当发电主体实际生产的电能小于电能消费主体发布的电能需求时,电能消费主体需要向电网额外购电,如果额外购电的价格大于电能生产主体提供的价格,发电主体需要对差额进行补偿;当发电主体实际生产的电能大于电能消费主体实际的电能需求时,电能生产主体需要向电网送电,如果送电的价格小于电能生产主体提供的价格,电能消费主体需要对差额进行补偿。通过预测补偿机制消除误差引起额外交易以简化交易次数,维护交易秩序,规范了发电和消费

主体在电力市场中的交易行为,具体的补偿价格可由各交易主体协商或由电网根据运行经验分配决定。

(4) 完成交易及结算。调度周期结束后即进入交易结算过程,在对电能交易主体、价格、电能体量等信息进行校验并经交易主体达成共识后,将电力交易具体信息经加密后存入区块链。

综上,基于双向竞价以及预测补偿的分布式能源交易机制流程如图3所示。

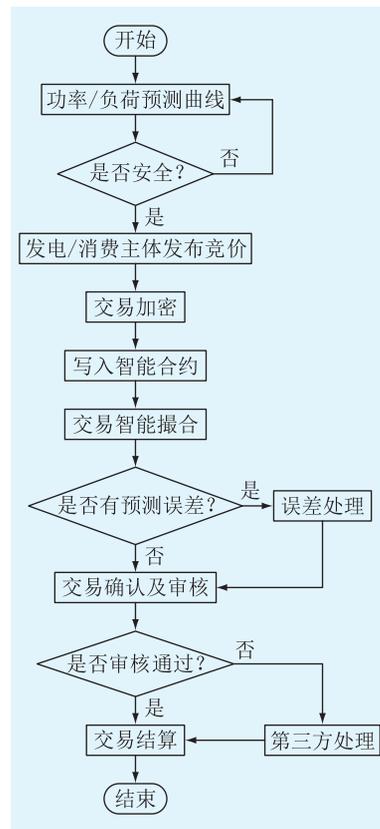


图3 分布式能源交易机制流程  
Fig.3 Flow chart of distributed energy trading mechanism

### 3 分布式能源共识机制

共识机制是区块链的核心,是保障区块链分布式数据库可靠性、可验性的关键,其需要在尽可能短的时间内经过所有参与节点从而实现对交易的验证和确认,目的是保证区块链数据的一致性和准确性。共识机制所面临的主要问题包括抵抗恶意节点以及共识算法对算力等资源的消耗,对于文中所提云边协同系统中的两层区块链,在交易中需要进行两层的区块链共识,共识的效率直接决定了云边协同系统中电力交易的效率。当前主流的共识算法包括工作量证明(proof of work, PoW)、股权证明(proof of stake, PoS)、实用拜占庭容错算法(prac-

tical byzantine fault tolerance, PBFT) 以及委托权益证明 (delegated proof of stake, DPoS)。针对分布式能源交易的高频场景, PoW 和 PoS 的共识效率低且需要较大的算力消耗; PBFT 在面对三分之一恶意节点时存在安全性问题; DPoS 通过选举产生  $n$  个记账节点, 类似董事会制度, 可以将验证和记账节点数量大幅缩减, 共识时间上也可以达到秒级, 相比于其他算法更适用于分布式能源的交易场景<sup>[24-27]</sup>。文中结合云边协同场景下区块链共识需求对 DPoS 算法进行改进, 以进一步提高云边协同场景下的共识效率和可靠性。

在云边协同场景下, 针对云和边缘集群设计了对应的两层区块链, 主链共识的完成依赖于子链共识的完成。考虑应对实时调度的应用场景及两层共识关系, 对共识算法的基本要求就是快速。边缘集群对应的边缘网关也依赖于通信速度的差异进行组合, 边缘网关之间以及边缘集群之间的投票权值由于云边系统的灵活性而很难被准确描述, 在实际应用中需要非常复杂的算法, 不利于缩短共识时间。基于云边协同场景下区块链共识需求, 针对原有 DPoS 算法中存在可能导致共识时间过长或失败的因素, 例如投票不积极、权益分配不均衡、恶意节点侵扰等, 依据通信时间和共识审查设计了具有更快选举速度和更好容错机制的改进 DPoS 算法, 其共识过程分为以下几个步骤:

(1) 分别针对主链和子链统计节点个数, 按照一定比例确定代理及候补节点数量。

(2) 节点按照固定时间更新与其他节点的通信总时间。节点和区块链中的其他节点进行心跳通信, 统计和每个节点发出信号到接到回应的的时间, 将各个节点的通信时间相加并求取平均值。对于没有返回回应信号的节点, 将该节点从统计节点中删除; 以通信平均时间建立各个节点的通信统计表, 并按从小到大进行排序。根据代理和候补节点数量, 从通信时间最小的节点开始, 确定代理和候补节点。

(3) 代理节点将形成的交易记录打包出块并广播至对应的网络范围, 与每个节点的记录进行比较, 并统计记录比对的正确率。将得到区块链网络中半数及以上的节点验证的代理节点视为正常代理节点, 并将其交易记录确定为共识记录; 对于记录短于广播区块的节点, 则对其交易记录进行补足。

(4) 对于没有获得半数以上验证的代理节点, 则视为恶意节点退出代理, 待系统交易平台重新使用用户管理功能进行审核后才能重新进入代理节

点确定进程。

综上所述, 云边协同场景下的两层区块链共识过程如图 4 所示。

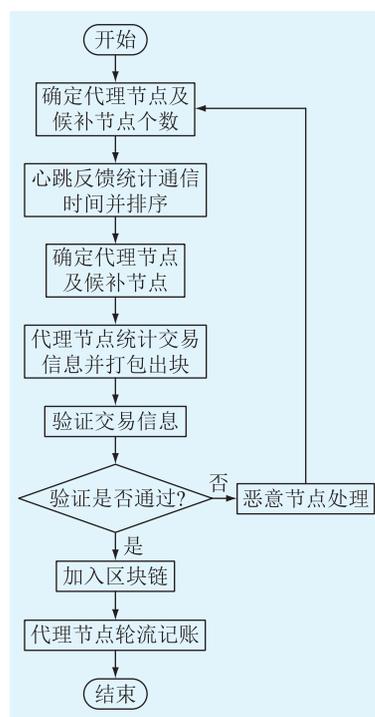


图 4 云边协同下的两层区块链共识过程

Fig.4 Two-tier block chain consensus process in cloud-side collaboration scenario

## 4 实例验证

文中提出的云边协同分布式能源交易系统中的云系统由 4 台服务器组成, 包含 3 个边缘系统, 每个边缘系统设置 1 台服务器。其中每个服务器采用 16 核处理器, 32 GB DDR4 内存。采用某地区真实运行数据, 包括日前功率预测曲线、分布式能源当天出力、负荷曲线等, 模拟采用文中所提基于云边协同和区块链的分布式能源交易系统及其交易机制的运行效果进行对比和分析。从文中所提云边协同系统的现场运行效果来看, 所提分布式能源交易系统的计算和反应速度可以满足大规模交易需求, 实现调度计划的顺利进行。

### 4.1 改进 DPoS 和传统 DPoS 共识算法对比

为验证文中所提改进 DPoS 共识算法的有效性和优越性, 从共识用时和吞吐量 2 个方面, 针对改进 DPoS 和传统 DPoS 在不同节点数目、不同恶意节点比例情况下进行模拟比较。为便于模拟过程的展开, 采用某地区真实数据将分布式能源的装机容量作为传统 DPoS 中的股份依据。

#### 4.1.1 共识时间比较

由于设置了 3 个边缘系统, 因此主链设置为 4

个节点,主链和子链均采用相同的共识算法。对每个主链对应的子链的交易节点数设置为 50 情况下共识次数为 100、200、300、350,以及共识次数为 200 情况下交易节点为 50、100、150,采用改进 DPoS 和传统 DPoS 情况下共识次数的共识时间进行对比,模拟对比结果如图 5 和图 6 所示。进一步,对含有 10% 和 15% 恶意节点情况下 50 节点、200 共识次数下 2 种共识算法的共识时间进行对比,结果见图 7。

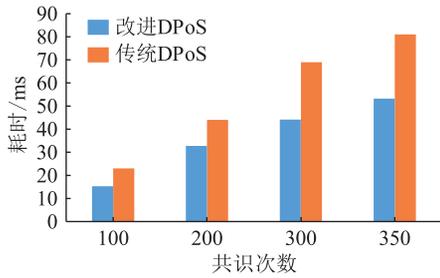


图 5 不同共识次数下的共识用时

Fig.5 Consensus time under different consensus numbers

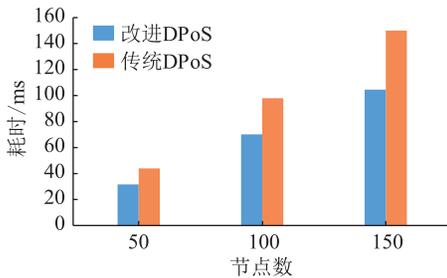


图 6 不同节点数下的共识用时

Fig.6 Consensus time under different number of nodes

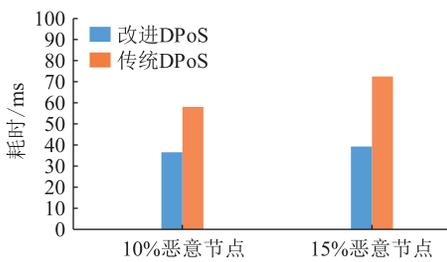


图 7 含有恶意节点下的共识用时

Fig.7 Consensus time with malicious nodes

由以上模拟对比可以看出,改进 DPoS 共识算法具有更少的处理时间,传统 DPoS 共识算法中对恶意节点的处理置于选举过程中,其选举和共识的过程随着恶意节点的出现而变长,同时文中没有模拟消极节点的工况,在有消极节点参与的情况下,其共识的用时将会更长。改进 DPoS 共识算法显然更符合分布式能源的高频快速交易场景。

#### 4.1.2 吞吐量比较

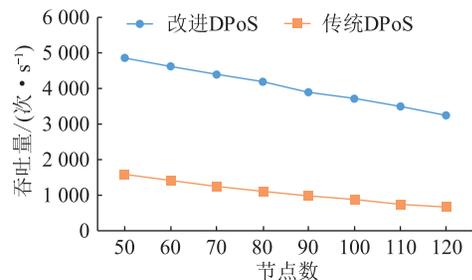
吞吐量是共识机制的关键指标,文中设计的吞

吐量测试方法是所有子链节点相同交易次数,交易过程包括交易记账到共识出块,计算系统单位时间内对节点交易请求的处理能力。吞吐量的计算如式(1)所示。

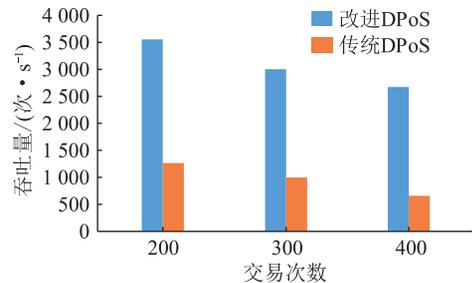
$$T = \frac{N_{\text{trans}}}{t_0} \quad (1)$$

式中: $T$  为吞吐量; $N_{\text{trans}}$  为共识过程的交易总量; $t_0$  为统计时间。

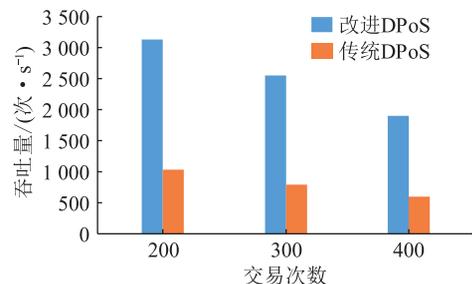
模拟交易次数 200,节点数从 50 增加到 120(步长为 10),采用改进 DPoS 和传统 DPoS 情况下的吞吐量对比结果如图 8(a)所示。在 50 节点下模拟不同交易次数(200、300、400)、不同比例恶意节点数(10%、15%)情况下,采用改进 DPoS 和传统 DPoS 的吞吐量对比结果如图 8(b)、(c)所示。



(a) 节点数增加



(b) 10% 恶意节点



(c) 15% 恶意节点

图 8 吞吐量对比结果

Fig.8 Comparison results of transactions per second

通过对比可以看出,文中的改进算法由于在共识时间上有优势,进而在吞吐量上也有一定的优势,并且随着节点数的不断增加,其优势愈发明显。边缘集群及边缘网关减轻了云系统的处理负荷,通过区块链方式实现了无中心化交易,保证了边缘集群及边缘网关对交易处理的及时性和可靠性,文中

提出的改进 DPoS 共识算法在共识时间、吞吐量方面的提升,可以提高基于区块链的分布式能源交易的效率和可靠性。

### 4.2 传统方案与云边协同方案对比

文中所提基于云边协同架构的分布式能源交易系统与传统电网中基于本地架构服务器系统的对比如表 1 所示。云边协同架构加大了对网络通信的依靠,并实现了对计算、存储等资源的灵活利用,相比传统方式更适应大规模分布式能源的交易需求。

表 1 传统系统与文中系统的对比  
Table 1 Comparison of traditional system and proposed system

比较项	传统系统	文中系统
部署方式	每个交易中心单独部署	在调控云部署一套系统及边缘集群若干
硬件资源	较多	较少,集群程度高则需要服务器更少
使用方式	安装客户端,限于本地局域网	Web 访问
便利性	所有服务器软件更新	只更新容器镜像
可靠性	主要依赖本地服务器自身及本地服务器备用	依赖于云平台,可靠性较高,备用机制性价比高
扩展性	无法横向扩展	服务并发处理数据能力强

扩展能力是云边协同系统相比集中式服务器系统的关键优势。传统模式基于本地服务器,整个体系中的多个服务器资源无法联动调度,而云边协同系统通过容器实现了云边服务器系统资源的统一调度。同时由于容器本身是轻量化的应用系统,相同的服务器资源可以支持更多的容器应用,在文中采用系统与 3 台本地服务器系统情况下,云边协同系统与传统方式的并发能力对比如图 9 所示。

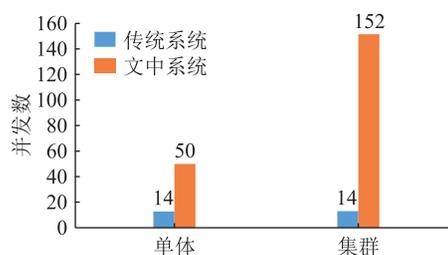


图 9 并发实例数对比

Fig.9 Comparison of number of concurrent instances

可以明显看出,云边协同系统实现了对资源的精细化调度,其集群并发实例数可以接近传统方案的 10 倍,在云边协同系统服务器增加的情况下,由于容器的特性,相比传统本地服务器的方案优势将会更大。文中所提交易机制基于区块链应用特点

进行设计,使得电力交易的相关计算可以灵活在云边协同系统服务器中通过容器形式进行分配,提高了交易过程的计算效率以及云边系统资源利用率,与大规模分布式能源交易的海量数据快速、高效处理需求相适应。

综合以上实例对云边协同及区块链优势的对比,可以看出文中所提基于云边协同和区块链的分布式能源交易系统相比传统电力市场平台,通过去中心化的方式,交易及结算的处理效率更高,云边协同系统也具有高度扩展性,两者特点的结合可以很好地适应大规模分布式能源的交易需求。

## 5 结语

针对大规模分布式能源交易中存在中心式节点计算能力有限、交易处理效率低的情况,文中提出了基于云边协同和区块链的分布式能源交易系统。将云边协同系统强大的数据存储和处理能力与分布式能源的区块链交易相结合,边缘集群和边缘网关与两层区块链相对应,并通过云端进行统一管理;进一步对交易系统的整体架构、功能、关键数据流进行了说明,并对其中的关键环节——交易机制和共识算法进行了详细分析和说明,通过适当的共识算法极大提高了交易的安全性和可查性。最后通过应用实例对所提系统在区块链共识、云边协同资源利用方面的优势进行了对比,体现了所提系统对大规模分布式能源交易需求的适应性和优越性,支持电网参与者快速、及时、可靠地进行多边交易,极大提高了电网各种调节资源的快速响应能力以及电网安全运行的可靠性和灵活度。

### 参考文献:

[1] 沈泽宇,陈思捷,严正,等. 基于区块链的分布式能源交易技术[J]. 中国电机工程学报,2021,41(11):3841-3851.  
SHEN Zeyu, CHEN Sijie, YAN Zheng, et al. Distributed energy trading technology based on blockchain[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(11): 3841-3851.

[2] 康重庆. 能源互联网促进实现“双碳”目标[J]. 全球能源互联网,2021,4(3):205-206.  
KANG Chongqing. Energy Internet promotes the achievement of carbon peak and neutrality targets[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(3): 205-206.

[3] 王悦,李源,刘丽娟,等. 日本和新加坡电力零售市场对我国电力市场建设的启示[J]. 电力工程技术,2021,40(3):193-199.  
WANG Yue, LI Yuan, LIU Lijuan, et al. The enlightenment of Japan and Singapore electricity retail market for the construction of electricity market in China[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(3): 193-199.

[4] JADHAV A M, PATNE N R, GUERRERO J M. A novel approach

- ch to neighborhood fair energy trading in a distribution network of multiple microgrid clusters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1520-1531.
- [5] 王毅,陈启鑫,张宁,等. 5G 通信与泛在电力物联网的融合:应用分析与研究展望[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1575-1585.  
WANG Yi, CHEN Qixin, ZHANG Ning, et al. Fusion of the 5G communication and the ubiquitous electric Internet of Things: application analysis and research prospects[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1575-1585.
- [6] 李小娟,臧义华,吴楫捷. 基于区块链的边缘服务安全机制研究[J]. 信息安全研究, 2022, 8(6): 613-621.  
LI Xiaojuan, ZANG Yihua, WU Jijie. Research on security mechanism of edge service based on blockchain[J]. Journal of Information Security Research, 2022, 8(6): 613-621.
- [7] 聂峥,章坚民,傅华涓. 配变终端边缘节点化及容器化的关键技术和应用场景设计[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 154-161.  
NIE Zheng, ZHANG Jianmin, FU Huawei. Key technologies and application scenario design for making distribution transformer terminal unit being a containerized edge node[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 154-161.
- [8] 刘洋,赵瑞锋,李波,等. 基于 Docker 技术的静态安全分析云计算应用[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(4): 181-187.  
LIU Yang, ZHAO Ruifeng, LI Bo, et al. Application research of static security analysis cloud computing based on Docker technology[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(4): 181-187.
- [9] 何伊妮,曹伟,韦昌福,等. 基于膜计算和蚁群算法的电网云平台资源配置方法[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 103-109.  
HE Yini, CAO Wei, WEI Changfu, et al. Resource allocation method of power grid cloud platform based on membrane computing and ant colony algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 103-109.
- [10] 周洪益,钱苇航,柏晶晶,等. 能源区块链的典型应用场景分析及项目实践[J]. 电力建设, 2020, 41(2): 11-20.  
ZHOU Hongyi, QIAN Weihang, BAI Jingjing, et al. Typical application scenarios and project review of energy blockchain[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(2): 11-20.
- [11] 刘永辉,张显,谢开,等. 能源互联网背景下的新一代电力交易平台设计探讨[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(7): 104-115.  
LIU Yonghui, ZHANG Xian, XIE Kai, et al. Discussion on design of new-generation electricity trading platform in background of energy Internet[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(7): 104-115.
- [12] 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.
- [13] 张显,冯景丽,常新,等. 基于区块链技术的绿色电力交易系统设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(9): 1-10.  
ZHANG Xian, FENG Jingli, CHANG Xin, et al. Design and application of green power trading system based on blockchain technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9): 1-10.
- [14] 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, 5304.  
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, 5304.
- [15] 马天男,彭丽霖,杜英,等. 区块链技术下局部多微电网市场竞争博弈模型及求解算法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 191-203.  
MA Tiannan, PENG Lilin, DU Ying, et al. Competition game model for local multi-microgrid market based on block chain technology and its solution algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 191-203.
- [16] 孙恒一,赵伟华,陈然,等. 基于区块链和市场机制的新能源消纳优化调度策略[J]. 智慧电力, 2022, 50(7): 52-57.  
SUN Hengyi, ZHAO Weihua, CHEN Ran, et al. Optimal scheduling strategy of renewable energy consumption based on blockchain and market mechanism[J]. Smart Power, 2022, 50(7): 52-57.
- [17] 孙浩洋,张冀川,王鹏,等. 面向配电物联网的边缘计算技术[J]. 电网技术, 2019, 43(12): 4314-4321.  
SUN Haoyang, ZHANG Jichuan, WANG Peng, et al. Edge computation technology based on distribution Internet of Things[J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4314-4321.
- [18] 许洪强,蔡宇,万雄,等. 电网调控大数据平台体系架构及关键技术[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4798-4807.  
XU Hongqiang, CAI Yu, WAN Xiong, et al. Architecture and key technologies for big data platform in power grid[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4798-4807.
- [19] 吉斌,昌力,陈振寰,等. 基于区块链技术的电力碳排放权交易市场机制设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(12): 1-10.  
JI Bin, CHANG Li, CHEN Zhenhuan, et al. Blockchain technology based design and application of market mechanism for power carbon emission allowance trading[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(12): 1-10.
- [20] 李军祥,王宇倩,何建佳,等. 基于区块链的微电网电力市场电价与电量动态博弈[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(17): 11-19.  
LI Junxiang, WANG Yuqian, HE Jianjia, et al. Blockchain-based dynamic game of electricity price and power for micro-grid electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(17): 11-19.

- [21] 朱天博,邢劲,韦仲康,等. 区块链下计及用户价格响应的电力市场定价机制[J]. 科学技术与工程,2021,21(14):5796-5803.  
ZHU Tianbo, XING Jin, WEI Zhongkang, et al. An auction-based price-making mechanism in electricity market secured by blockchains[J]. Science Technology and Engineering,2021,21(14):5796-5803.
- [22] SUN Y Y, YAN B W, YAO Y, et al. DT-DPoS: a delegated proof of stake consensus algorithm with dynamic trust[J]. Procedia Computer Science,2021,187:371-376.
- [23] LIU J, XIE M Y, CHEN S Y, et al. An improved DPoS consensus mechanism in blockchain based on PLTS for the smart autonomous multi-robot system[J]. Information Sciences,2021,575:528-541.
- [24] 邸剑,臧齐,王桂兰,等. 基于区块链和梯度修正法的分布式经济调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(21):99-107.  
DI Jian, ZANG Qiqi, WANG Guilan, et al. A distributed economic scheduling strategy based on blockchain and gradient correction method[J]. Power System Protection and Control,2022,50(21):99-107.
- [25] 平健,严正,陈思捷,等. 基于区块链的分布式能源交易市场信用风险管理方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(24):7137-7145,7487.  
PING Jian, YAN Zheng, CHEN Sijie, et al. Credit risk management in distributed energy resource transactions based on blockchain[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(24):7137-7145,7487.
- [26] 袁晓鹏,申少辉,张光明,等. 区块链技术在电力零售市场管理中的应用研究[J]. 电力信息与通信技术,2020,18(6):54-61.  
YUAN Xiaopeng, SHEN Shaohui, ZHANG Guangming, et al. Research on application of blockchain technology in retail electricity market management[J]. Electric Power Information and Communication Technology,2020,18(6):54-61.
- [27] 田雨扬,卢锦玲,赵洪山,等. 基于联盟区块链的直购电交易模型[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(8):139-149.  
TIAN Yuyang, LU Jinling, ZHAO Hongshan, et al. Direct purchase electricity transaction model based on a consortium chain[J]. Power System Protection and Control,2022,50(8):139-149.

作者简介:



马光

马光(1995),男,硕士,工程师,从事电力系统自动化系统、电力系统风险评估相关工作(E-mail:maguang@csg.cn);

江伟(1983),男,硕士,高级工程师,从事电力系统调度自动化及数字电网相关工作;

李文朝(1981),男,硕士,高级工程师,从事调度自动化相关工作。

### Design of distributed energy trading system based on cloud edge collaboration and blockchain

MA Guang<sup>1</sup>, JIANG Wei<sup>1</sup>, LI Wenchao<sup>1</sup>, NIE Yongquan<sup>1</sup>, SUN Chao<sup>2</sup>

(1. China Southern Power Grid Co.,Ltd.,Guangzhou 510663,China;

2. NR Electric Co.,Ltd.,Nanjing 211102,China)

**Abstract:** The wide distributed energy has been the focus of power market. However, the traditional power trading platform cannot meet the high efficiency, flexibility, security and reliability requirements of the large-scale distributed energy transactions. To resolve the contradiction between high information processing complexity and the requirements of safe and fast transactions, a distributed energy trading system architecture and its overall design scheme based on cloud-edge collaboration and block chain is proposed. First of all, the system architecture of cloud computing and edge computing collaboration combined with two-layer blockchain is designed to realize transaction decentralization by using blockchain technology. It improves the autonomy and efficiency of transactions, and enhances the processing capacity of massive data and the expansion capacity of the transaction system by using cloud edge collaboration. Then, a distributed energy trading mechanism is designed based on two-way bidding and prediction compensation, and the core consensus algorithm of blockchain is further analyzed. The delegated proof of stake (DPoS) is used as a highly efficient and reliable consensus algorithm of the trading system to realize efficient and reliable transactions of large-scale distributed energy, thus promoting distributed energy to participate in power grid regulation and improving the stable operation level of power grid. Finally, the applicability and superiority of the proposed system to large-scale distributed energy trading are verified by application example.

**Keywords:** cloud computing; edge calculation; cloud-edge collaboration; block chain; distributed energy; power trading system

(编辑 钱悦)