

区块链技术在多元融合高弹性电网中的应用初探

周自强^{1,2}, 张靖琛¹, 颜 拥³, 耿光超¹, 江全元¹

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310007;

2. 浙江华云清洁能源有限公司, 浙江 杭州 310008;

3. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要:多元融合高弹性电网通过构建源网荷储全向交互机制,显著提升了电网的互动与自愈能力。区块链技术采用去中心化理念和分布式记账模式,保障数据可信,打破信任壁垒,为电网多端友好互动提供了核心技术支撑。基于现有理论研究与工程实践,区块链的技术特征与高弹性电网的形态架构具有较强的理念契合性和技术互补性,区块链有潜力成为多元融合高弹性电网的重要赋能技术。面向多元融合高弹性电网的建设目标,刻画了区块链技术与高弹性电网深度融合的应用场景,梳理了建设高弹性电网过程中的关键痛点,阐明了区块链之于高弹性电网的技术赋能要素及匹配关系。面向高弹性电网的建设需求,提出了区块链系统的设计原则、评价指标以及设计流程,并以需求响应为例进行系统设计与性能测试,为区块链技术在高弹性电网中的应用提供理论支撑。

关键词:区块链;分布式账本;高弹性电网;评价指标;多元融合

中图分类号:TM73;TP311.13

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202212018

0 引言

在多类因素相互叠加作用下,电力系统主要面临四大问题:①源荷关系问题,传统电网仍是源随荷动,大量需求侧资源处于沉睡状态,源荷间的双向互动迫在眉睫;②冗余度问题,高冗余度造成投资成本过高,制约效率提升,因此需要在保证安全的情况下降低冗余度;③平衡能力问题,拥有调节能力的化石能源发展受限、占比降低,清洁能源占比上升,使调节能力不足的问题逐渐凸显;④安全与效率问题,安全与效率是矛盾的对立面,传统模式必定在提升效率的过程中降低安全裕度,因此安全与效率的共同提升成为一大难点^[1]。

针对电力系统安全稳定运行面临的诸多挑战,为了实现源网储荷的友好互动,降低系统冗余度,在保证电网安全性的同时提升运行效率,建设多元融合高弹性电网成为一种可行性方案。多元融合高弹性电网是能源互联网的核心载体,是海量资源被唤醒、源网荷储全交互、安全与效率双提升的电网,具有高承载、高互动、高自愈、高效能四大核心能力^[1]。因此,中心化管理模式已不能满足需求,区块链技术因具有去中心化的特性,被国内外许多研究机构作为新的解决方案。

目前,区块链技术在电网中的应用场景主要集

中在能源交易、需求响应、电动汽车等方面。在能源交易领域:欧盟的Scanergy项目基于以太坊智能合约平台进行电力交易,完成了对分布式发电的消纳^[2],以太坊为开源区块链平台,通过去中心化虚拟机来运行智能合约;美国的LO3 Energy公司建立了基于区块链的点对点(peer-to-peer, P2P)能源销售网络,安装了屋顶太阳能的家庭可以在没有当地电力公司监督的情况下向同一社区没有安装屋顶太阳能的邻居出售生产的电力^[3];国网山东省电力有限公司设计了基于区块链的微电网分布式能源智能交易平台,实现了微电网内光伏、储能、风电、电网等各主体间的购售电交易^[4]。在需求响应领域,芬兰公司Fortum在区块链技术的支撑下,已初步实现了通过互联网来控制特定设备的启动和停止^[5]。在电动汽车领域:南方电网电动汽车公司在2019年开出了我国首张充电电费区块链电子发票,并将继续开发充电桩出行服务平台^[6];德国区块链公司Slock.it开发了Share&Charge,完成了对电动汽车的身份认证、充电桩充电和虚拟数字货币付款的流程^[7];德国电力公司RWE将区块链技术应用于电动汽车业务,完成了电动汽车自动响应和电池生命周期数据管理^[8];美国电动汽车区块链公司EVAIO利用链上通证实现了充电桩共享结算以及无人驾驶电动汽车的充电结算^[9]。

但上述研究成果仍有部分停留在概念层面,部分落地项目没有达到预期目标,其原因为:区块链的优点被过分夸大,且忽视了区块链技术与实际应用场景的匹配关系。因此,必须明确在建设高弹性电网过程中,诸多痛点是否需要或能否用区块链技术

收稿日期:2022-02-20;修回日期:2022-11-10

在线出版日期:2022-12-26

基金项目:国网浙江省电力有限公司科技项目(B311DS21000H)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Co.,Ltd.(B311DS21000H)

来解决,要明确区块链的技术特性,然后分析这些特性与行业痛点之间的匹配关系,指导区块链系统的设计。

为此,本文梳理了建设高弹性电网的关键痛点,阐明了区块链之于高弹性电网的技术赋能要素及匹配关系;面向高弹性电网的建设需求,提出了区块链系统的设计原则、评价指标以及设计流程,并以需求响应为例进行系统设计与性能测试,为区块链技术在高弹性电网中的应用提供理论支撑。

1 区块链技术与高弹性电网的需求匹配分析

1.1 高弹性电网的业务痛点

多元融合高弹性电网是智能电网的再升级,是能源互联网的核心载体。在能源互联网形态下的多元融合高弹性电网依托于“四梁八柱”的体系架构。其中:“四梁”是指源、网、荷、储4个电力系统核心环节,是多元融合的物理基础;“八柱”是指为“四梁”赋能的八方面业务功能,包括灵活规划网架坚强、电网引导多能互联、设备挖潜高效运行、安全承载耐受干扰、源网荷储弹性平衡、用户资源唤醒集聚、市场改革机制配套、科技引领树智赋能^[1]。

在建设高弹性电网过程中面临诸多痛点,可以划分为设备层面、市场层面、信息层面这3个层面。设备层面痛点包括电力设备多样化、电力设备数量庞大、监管海量设备会耗费大量的人力资源、关键设备间信息交互的安全性无法保证。市场层面痛点包括交易成本高、过程不透明、数据安全存在隐患、不同能源行业间相对封闭等。信息层面痛点包括数据孤岛问题严重、数据真实性和利用价值低、数据易泄露、通信成本高且安全性难以保证等。

本文选择电力市场交易结算、多主体间合同签订、设备运维管理、电力大数据应用、需求响应五大业务场景,从高弹性电网具体业务场景的角度来梳理归纳业务痛点。各业务场景及其痛点如表1所示。

表1 具体业务场景及其痛点

Table 1 Specific business scenarios and their pain points

具体业务场景	痛点
电力市场交易结算	交易成本高,交易信息安全存在隐患,审计性差,行业壁垒严重 ^[10]
多主体间合同签订	合同信息容易被篡改,难以追溯合同的签订及修改全过程,隐私信息易泄露 ^[11]
设备运维管理	设备信息安全面临挑战,运营维护成本高
电力大数据应用	数据孤岛问题,数据真实性无法保证,隐私泄露问题严重,数据验证流程复杂 ^[12]
需求响应	需求响应各主体的地位不平等,需求响应关键数据透明性低,需求响应数据易遭篡改 ^[13]

1.2 区块链与各业务场景痛点之间的匹配关系

1.2.1 区块链技术特性与电力市场交易结算痛点之间的匹配关系

电力市场交易结算中的诸多痛点与区块链特性适配关系极强,两者间的具体匹配关系如下。

1)区块链去中心化的技术特性可以降低交易成本^[14],数据去中心化存储特性可以降低各主体间信息交换、决策、监管成本。

2)区块链的隐私保护性能保证信息安全,使交易中各主体的隐私不被泄露,提升了交易安全性。不可篡改、可追溯性保证了高审计性,交易信息不可篡改有利于审计核算,时间戳的可追溯性有利于审计全流程溯源,提高了效率,降低了成本。

3)区块链的透明性、共享性打破了行业间的壁垒,确保了信息的双向互动^[15],各主体间通过区块链共享信息,深化各方信任合作关系,从而打破能源行业壁垒。

1.2.2 区块链技术特性与多主体间合同签订痛点之间的匹配关系

多主体间合同签订存在法律有效性、数据安全性问题,与区块链技术的共享自治、全程溯源、隐私保护特性不谋而合,两者间的具体匹配关系如下:

1)区块链的防篡改特性可以有效防止电子合同内容被篡改;

2)区块链的可追溯性可以全程溯源合同签订修改过程,实现全过程实时取证,保证其真实有效;

3)区块链的隐私保护特性避免了电子合同签署人的隐私泄露,提高了隐私数据的安全性。

1.2.3 区块链技术特性与设备运维管理痛点之间的匹配关系

设备运维管理需要借助物联网技术,而目前通信可信性、运维成本高等问题成为海量设备联网的障碍,“区块链+物联网”技术可以更好地解决这一问题,两者间的具体匹配关系如下。

1)区块链的去中心化特性可以为电力设备物联网系统提供P2P互联的可信通信接口^[16],最大限度地提升物联网中分布式设备的存储能力以及计算能力。

2)区块链的共享自治特性可以降低高弹性电网中设备的运维成本。根据设备的运行特性,在智能合约中设定运维规则及自动执行的触发条件^[17],可以使设备具备自我维护功能,从而节省大量设备维护成本。

1.2.4 区块链技术特性与电力大数据应用结算痛点之间的匹配关系

“区块链+大数据”是电力大数据应用的未来发展趋势,两者间的适配关系如下。

1)区块链的去中心化、高度自治特性使多个孤

立的数据系统间建立了数据安全传输通道,打破了各主体间的信息壁垒。

2)区块链的防篡改、可追溯特性改善电力大数据的真实性问题。基于区块链技术进行数据可信采集,由各节点共同存储,各节点均参与数据辨真。由于单节点不能随意对数据进行增减或更改,从而避免了单节点恶意制造无效数据。此外,区块链从源头上提高了数据的真实性,增强了数据的辨真认证能力。

3)区块链的隐私保护特性可以防范隐私泄露问题。区块链中任意节点上传数据都需经过全网验证,任何数据窃取都是无意义的。因为数据都经过加密形成密文,而私钥能对密文进行解密,私钥由账户创建者保存,密文泄露不会对系统的安全造成威胁。

1.2.5 区块链技术特性与需求响应痛点之间的匹配关系

需求响应面临的公平性问题、开放性问题 and 安全性问题可以由区块链技术解决,具体方案如下。

1)区块链的去中心化特性能保证节点间的地位平等^[18]。一方面提高了各市场主体的积极性,另一方面能监督电网公司,需求响应的结算机制、竞价模式都可由市场参与者协商决定,使响应流程更加公平。

2)区块链的透明性、共享性能提高了数据透明程度,有利于建立长效监管机制。需求响应的电量数据、交易数据在一定程度上公开共享,一方面保证了监管力度,另一方面保证了市场公平性,实现可信审计。

3)区块链的防篡改特性能保证需求响应的关键信息防篡改。需求响应涉及多主体参与,在响应中会产生海量的数据,区块链技术能保证数据的安全性、真实性,以便在各主体间达成信任机制。

2 面向高弹性电网的区块链系统设计原则、评价指标及设计流程

2.1 区块链在高弹性电网中的顶层设计原则

区块链作为一种分布式数据库,受到布鲁尔定理制约,即一致性、可用性、分区容忍性不可兼得^[19]。因此,本文提出了区块链在高弹性电网中的设计优先性准则,以此作为整个系统的设计原则。

2.1.1 安全优先原则

在高弹性电网中,信息系统的设计要将安全性放在首位,系统安全是第一要务。

2.1.2 效率匹配原则

效率匹配是指数据处理效率和系统业务需求相匹配。吞吐量关乎系统的信息处理效率,所以数据处理速度不能过慢。提升效率意味着会牺牲安全性

能,因此效率提升应该是在安全性有所保证的前提下进行的,保证运行效率与当前的数据吞吐量匹配即可,应避免过度追求效率。

2.1.3 适当去中心化原则

区块链在高弹性电网中的应用场景依赖去中心化特性,但去中心化程度是相对的。区块链技术目前只能解决“交易”和“信任”的去中心化^[20],但“基础设施建设”和“能源服务”是无法去中心化的,电能质量管理、电能安全服务、设备运维保养服务都需要由专业机构或政府部门提供。

2.2 区块链在高弹性电网中的评价指标

2.2.1 数据加密安全性指标

在设计阶段,数据加密安全性与选择的加密算法以及每一种加密算法的密钥长度有关。一般情况下,加密算法的密钥长度值越大,其安全性越高^[21]。

每秒百万指令(million instructions per second, MIPS)指的是:在已经确定中央处理器运算速度的情况下,记录暴力破解加密算法的时间,将该时间作为衡量系统数据加密安全性的指标。随着密钥长度增大,该指标值也会增大,数据加密安全性也随之提升。

2.2.2 共识机制的安全性评价指标

检验共识算法的安全性要从网络层面考虑,网络安全通过安全临界百分比进行评估。当网络中的部分节点被攻克或部分代币被控制时,网络将沦陷,被攻克节点数量占总节点数量的百分比以及被控制代币数量占总代币数量的百分比就是安全临界百分比。例如:在权益证明(proof of stake, POS)共识机制中,破坏共识需投入50%以上代币,则网络安全临界百分比为50%;在实用拜占庭容错(practical byzantine fault tolerance, PBFT)共识机制中,故障节点超过33.3%时系统将被攻克,则安全临界百分比为33.3%。

2.2.3 数据吞吐量指标

数据处理速度对系统的运行效率至关重要。衡量区块链交易性能的关键指标是每秒事务量(transaction per second, TPS),即每秒系统处理的交易或者其他种类的信息数量。TPS越高,则系统的数据处理速度越快,但在实际应用中过高的TPS必然会牺牲其他性能。

2.2.4 去中心化程度评价指标

去中心化程度只是定性的概念,还没有公开的定量指标。本文提出了用于评估去中心化程度的定量指标——共识节点百分比,其含义为:参与共识的节点数量占总节点数量的百分比。该指标值越高,去中心化程度越高,即参与记账权竞争的节点数量越多,则去中心化程度越高。

2.3 区块链在高弹性电网中的具体设计流程

2.3.1 步骤1:确定高弹性电网业务场景中数据的存储和加密技术

1)数据存储空间。

区块链技术的底层数据存储结构分为事务、区块、链3个层级。事务是指原子级数据单元,在高弹性电网中事务指电量数据、交易数据等形成的摘要。1个区块就是一段时间内产生的高弹性电网中某一场景的上链数据集合。海量分析决策过程需要调用不同类型的数据,例如气象数据、电量数据、价格数据等。这些数据中部分是由计量设备采集的数据,部分是由第三方机构提供的数据。保证数据的真实性和准确性是区块链应用需要解决的难题。在电力计量方面,计量信息的准确性由物联网技术保证,而第三方机构的数据真实性则主要依赖其信誉。在建设高弹性电网的过程中应与监管部门协商,明确上链数据类型,防止涉密信息泄露。

2)非对称加密算法。

区块链中的数据加密算法主要是非对称加密算法,其原理见附录A图A1。主要的非对称加密算法包括RSA算法(由罗纳德·李维斯特(Ron Rivest)、阿迪·萨莫尔(Adi Shamir)和伦纳德·阿德曼(Leonard Adleman)一起提出)和椭圆曲线加密(elliptic curve cryptography, ECC)算法。RSA算法的原理简单,在工程应用中易于实现,但其安全强度相对较低。ECC算法的数学原理复杂,在工程应用中实现困难,但其安全强度较高^[22]。选择加密算法后,根据安全等级确定密钥长度。

2.3.2 步骤2:确定高弹性电网业务场景中P2P网络节点之间的传播验证机制

1)确定高弹性电网中各应用场景的去中心化程度。

根据去中心化程度可以将区块链分为公有链、联盟链、私有链。公有链、联盟链、私有链是在安全性、可扩展性、去中心化程度之间存在的3种平衡点。公有链的去中心化程度最高,运行过程中向所有节点开放,由所有节点共同维护账本,所有节点平等拥有记账权,防篡改属性最强,但其短板为公有链节点数量庞大,共识机制繁复,导致验证时间长、响应速度慢。联盟链被称为许可链,其记账权只由得到许可的部分节点拥有,其他节点只能存储和查询数据。在建设高弹性电网的过程中,联盟链被用于跨区域多部门间的交易结算和信息传递。私有链由单主体进行管理,记账权更集中,参与资格受到严格限制,因此中心化程度最高,交易速度更快,交易成本更低,适用于电网内部具有调控性质的场景。

2)确定区块链系统的通信协议。

区块链网络采用P2P通信机制实现节点之间的通信。本文以比特币、以太坊和Hyperledger Fabric为例,归纳可供选择的通信协议。比特币节点类型包括全功能节点(具有钱包、挖矿、校验、转发区块等功能)、基础全节点(具有转发区块、交易等功能)、简易支付验证(simplified payment verification, SPV)节点(具有校验区块、交易等功能)等,利用Zero MQ实现节点通信机制^[22]。Hyperledger Fabric采用gRPC库与Gossip消息协议构建P2P通信机制。以太坊使用基于递归长度前缀编码(recursive length prefix, RLP)及认证的加密P2P协议。在高弹性电网的应用场景中,需要选择安全性与高效性兼备的通信协议来完成P2P网络层级设计,通过设计网络拓扑结构来实现信息的有效传播和本地同步。

2.3.3 步骤3:确定高弹性电网业务场景中采用的共识机制

1)常见共识机制。

常见共识机制包括工作量证明(proof of work, POW)共识机制、POS共识机制、权益委托证明(delegated proof of stake, DPOS)共识机制、PBFT共识机制。

2)共识机制的选择。

高弹性电网的应用场景多样,大多处于去中心化与中心化的中间状态,对于共识机制的选择,应该结合应用场景中的具体需求,通过对安全性指标、数据吞吐量指标以及去中心化程度指标的综合分析确定共识机制,且需要参考实际的开发经验以及相关政策。

2.3.4 步骤4:确定高弹性电网业务场景中采用的激励机制

只有每个参与维护分布式账本的主体都获得相应的奖励,才能维护系统良好稳定运行,这就是在高弹性电网背景下的区块链激励机制。具体设计方案如下。

1)基于金融型通证的激励机制。

基于金融型通证的激励机制适用于高弹性电网中的能源及其衍生品交易,将能源类代币作为维护分布式账本的奖励以及流动性虚拟资产。由监管部门控制其发行、流通、分配以及价值锚定,鼓励各主体协同共治,减少交易摩擦。

2)基于积分型的激励机制。

基于积分型的激励机制适用于高弹性电网中实现需求侧海量资源精准响应的场景,将链上积分与用户行为挂钩,然后分配奖励。该方案更适合有关部门监管,促进第三方主体间的良性竞争,符合相关的现行政策,但是也会使激励机制的设计执行更为复杂。

2.3.5 步骤 5: 确定高弹性电网业务场景中采用的智能合约形式

1) 智能合约的概念。

区块链智能合约是指受预设条件触发后自动强制执行计算机程序。以太坊的智能合约由 Solidity 语言编写,在以太坊虚拟机(ethereum virtual machine, EVM)上运行;在 Hyperledger Fabric 中,智能合约被称为链码,虚拟机底层基于沙箱技术进行封装,确保智能合约无法与外网或其他文件系统直接交互。

2) 确定智能合约形式。

在高弹性电网中,市场结算清算包含电子合同签订、补贴发放、审计等操作环节,这些都可以被设计成智能合约中的成员函数来执行。当智能合约被部署后,除非触发预设条件,否则任何人都无法干扰程序的正常执行,从而确保了其高效安全运行。但智能合约的逻辑漏洞也会引发安全问题,例如以太坊去中心化自治组织(decentralized autonomous organization, DAO)事件中由于存在递归漏洞,最终导致资金被盗。因此,在高弹性电网中使用智能合约应借鉴成熟的智能合约平台,避免由智能合约漏洞造成的安全事故。

2.3.6 步骤 6: 确定高弹性电网业务场景中采用的扩容机制

当高弹性电网中某一个应用场景进入实际运行后,随着节点数量、数据容量的增加,系统的数据处理速度会减慢。因此,在系统运行过程中会出现扩容问题。目前的主流扩容方案可以分为侧链、分片、有向无环图(directed acyclic graph, DAG)技术 3 类。

1) 侧链。

侧链技术通过在主链外设置辅链或侧链来转移主链的数据验证压力。在高弹性电网中,通过在多场景中设置“一主多从”的网络结构,实现多业务间的数据安全隔离,主链与侧链通过跨链技术实现信息可信交互。

2) 分片。

分片是指将现有区块链网络划分为多个子网络,并确定子网络之间的数据同步方式。每个子网络内的数据验证保持同步,但子网络之间通过异步方式进行数据验证。分片技术分为网络分片和状态分片。网络分片后,每个子网络中的节点只保存该网络中的数据,这样可以减少不同子网络之间的数据交互难度。状态分片是指每个节点只存储其处理过的数据集,这样虽然可以减少节点的存储和运算压力,但增加了节点之间互通信息的难度。

3) DAG。

DAG 是一种图结构,由若干顶点、线段组成,能保证从一个顶点沿任意线段前进,最终不能回到原

点。在 DAG 扩容方案中,上传 1 条记录前需要对网络中已存在的 2 条记录验证其合法性,然后进行微量 POW 运算,将三者绑定后广播到网络中,后续提交信息以相同的方式进行验证。同一条数据在经过大量节点验证后能增强可信性,其基本原理见附录 A 图 A2。

在高弹性电网应用场景中选择具体的扩容方案时,需要根据技术实现复杂性以及当前对系统的吞吐量要求来综合确定。总体设计流程见图 1。

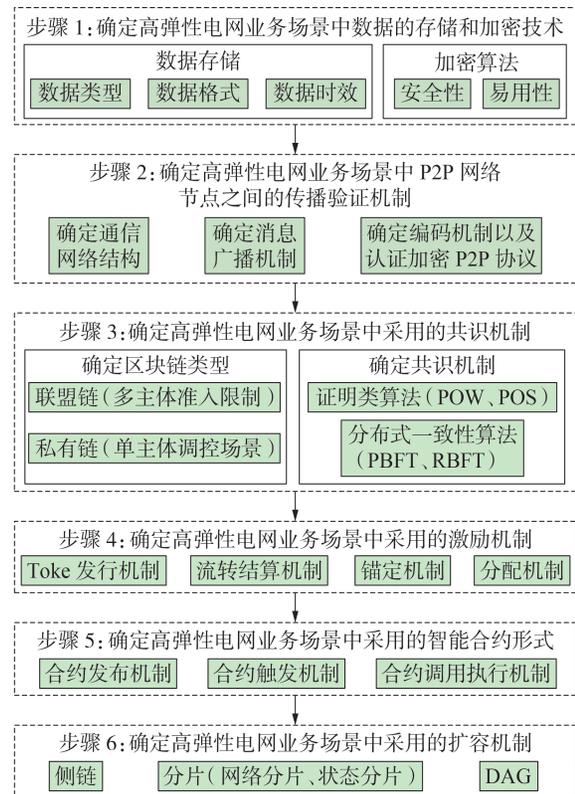


图 1 总体设计流程

Fig.1 Overall design process

3 系统设计与性能测试: 以需求响应为例

高弹性电网具有安全高效、互动开放、清洁低碳、活力智慧的特征,对海量需求侧资源的灵活深度调节是建设高弹性电网的重要任务之一。需求响应旨在利用市场机制实现负荷柔性调节,深度挖掘电网的灵活调节能力,降低负荷的波动性。随着负荷聚合商、虚拟电厂等第三方新主体的出现,多方互动中的信任问题成为需求响应大规模开展和应用落地的瓶颈。需求响应涉及的市场主体包括监管部门、第三方主体(资源整合商)、普通用户(包括居民用户、商业用户和工业用户)。新兴第三方主体具有整合分散资源的能力,然而多主体间缺乏统一专用通信网络及信息传递机制,导致信息透明度低、市场监管难度大,由于信息孤岛的存在,第三方监守自盗、数据作假现象屡见不鲜。而区块链技术可以打破信

任壁垒,构建非可信环境下的安全信息通道,实现数据高效安全交互。

将区块链应用于需求响应,多节点协同能力、区块数据承载能力、智能合约共享自治能力等方面性能受到挑战。在此背景下,打造适用于需求响应的区块链系统成为应用落地的关键。由于需求响应涉及多主体之间的竞争与合作,既要求记账权分散,使网络呈现去中心化,又要求全流程监管及节点身份验证,因此适合采用联盟链。将多主体抽象为联盟对象,由监管部门持有根证书进行身份验证,将网络节点分为共识节点、非共识节点、轻节点。

本文以浙江某大厦为例,用户持有客户端证书,大厦为持有共识节点证书的负荷聚合商,电网等监管部门持有根证书。在CentOS7系统上部署Hyperchain集群,搭建联盟链进行系统设计及性能分析。

在共识层,弹性共识机制是以联盟链为基础的需求响应管理系统的核心。共识算法决定联盟链的性能及安全性,TPS及可扩展性是制约联盟链发展的重要瓶颈,可插拔弹性共识算法成为目前解决上述问题的新思路。弹性共识算法根据需求响应系统中网络节点的实际拓扑情况,能够处理多节点物理宕机及拜占庭错误。本文采用高鲁棒拜占庭容错(robust byzantine fault tolerance, RBFT)弹性共识机制,构建线程池模拟海量用户参与响应,对系统区块延时及包含交易体数量进行统计分析,结果分别见图2和图3。图中level_1—level_7分别表示TPS为6 587、12 375、16 459、22 785、28 945、31 876、36 875。由图可知,随着用户响应请求数量增加,区块包含交易体平均数量从10增加到65,最高TPS从6 587增加到36 875,平均区块延时最高为50 ms,性能可以满足需求响应的实际应用需求。

在数据层,基于联盟链的需求响应系统需要确保响应主体只能访问对应权限的数据,并要求电网企业可以作为监管方访问系统的全局数据。在数据

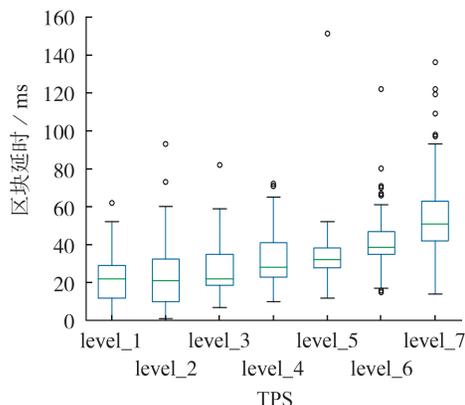


图2 区块延时统计分析结果

Fig.2 Statistical analysis results of block time-delay

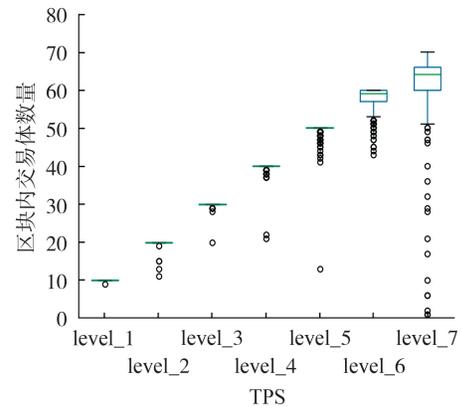


图3 区块包含交易体数量统计分析结果

Fig.3 Statistical analysis results of number of trading entities contained by block

查询时,根据响应用户所持公钥确定其联盟身份,控制查询权限。分布式账本中的持久化数据通过国密算法进行加密存储,确保加密安全性,同时保证所有用户未经授权无法获取明文。需求响应产生的数据类型包括传感器采集的负荷侧数据(功率、电压等)、用户账户信息(公钥、账户余额等)、响应合约信息(包括日前邀约容量及出清价格、日内履约情况及补贴结算信息)等。多类型数据根据交易粒度进行隐私保护,关联方需要在发送交易时指定,由关联方存储交易明细,交易哈希值在共识验证后由全网存储,这样既保护了隐私数据,又验证了交易真实性。

在合约层设置智能合约网关处理响应用户请求、海量边缘设备数据交互请求、交易请求等。负荷侧边缘设备在联盟链中就近选择联盟节点进行P2P通信,同时对接入设备进行身份验证,保障边缘设备的合法性与安全性。在涉及响应用户敏感数据时,利用智能合约控制数据访问权限,避免权限越界造成隐私泄露。通过在联盟链中设置智能网关,能实现用户隐私偏好的去中心化管理,基于联盟链数据的不可篡改特性记录用户隐私偏好,解决边缘设备与云端网络之间的响应用户数据归属权纠纷,从根本上解决信任问题。

综上,针对需求响应中的信任问题、隐私保护问题、可扩展性问题和边缘设备与云端网络协同问题,本文采用RBFT共识机制、数据权限控制和智能合约网关进行解决,推动了需求响应中区块链技术的应用落地。

4 结论

基于区块链技术的高弹性电网贯彻了“节约的能源是最清洁的能源”“节省的投资是最高效的投资”“唤醒的资源是最优质的资源”这3个理念,通过高互动来提升电网弹性,促进电网的转型。本文通过确定区块链技术与高弹性电网相融合的应用场

景,明确在建设高弹性电网过程中面临的痛点,提出了区块链技术与这些痛点相适配的匹配关系。提出了区块链在高弹性电网中的顶层设计原则、量化评价指标及具体设计流程,并以需求响应为例进行系统设计与性能测试,为区块链在高弹性电网中的应用夯实理论基础。在未来应该开发“区块链+物联网”的物理信息融合系统,进一步提升设备信息的准确性,还应在不同的机构或部门间设置基于区块链技术的“验证器”来进一步提升数据的真实性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 尹积军,夏清. 能源互联网形态下多元融合高弹性电网的概念设计与探索[J]. 中国电机工程学报,2021,41(2):486-497.
YIN Jijun, XIA Qing. Conceptual design and exploration of multi-factor integrated high-elastic power grid in energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(2):486-497.
- [2] 杨德昌,赵肖余,徐梓潇,等. 区块链在能源互联网中应用现状分析和前景展望[J]. 中国电机工程学报,2017,37(13):3664-3671.
YANG Dechang, ZHAO Xiaoyu, XU Zixiao, et al. Developing status and prospect analysis of blockchain in energy Internet [J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(13):3664-3671.
- [3] 张宁,王毅,康重庆,等. 能源互联网中的区块链技术:研究框架与典型应用初探[J]. 中国电机工程学报,2016,36(15):4011-4023.
ZHANG Ning, WANG Yi, KANG Chongqing, et al. Blockchain technique in the energy Internet: preliminary research framework and typical applications [J]. Proceedings of the CSEE, 2016,36(15):4011-4023.
- [4] 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.
- [5] GHORBANIAN M, DOLATABADI S H, SIANO P, et al. Methods for flexible management of blockchain-based cryptocurrencies in electricity markets and smart grids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020,11(5):4227-4235.
- [6] 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):1278-1290.
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):1278-1290.
- [7] 赵曰浩,彭克,徐丙垠,等. 能源区块链应用工程现状与展望 [J]. 电力系统自动化,2019,43(7):14-22,58.
ZHAO Yuehao, PENG Ke, XU Bingyin, et al. Status and prospect of pilot project of energy blockchain [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019,43(7):14-22,58.
- [8] 徐嘉辉,马立新. 区块链技术在分布式能源交易中的应用[J]. 电力自动化设备,2020,40(8):17-22,30.
XU Jiahui, MA Lixin. Application of blockchain technology in distributed energy transaction [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020,40(8):17-22,30.
- [9] 许伦,王蓓蓓,李雅超,等. 配电网安全导向的分布式资源P2P区块链交易机制研究[J]. 电力自动化设备,2021,41(9):215-223.
XU Lun, WANG Beibei, LI Yachao, et al. Research on P2P blockchain transaction mechanism of distributed resources oriented by distribution network security [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021,41(9):215-223.
- [10] 沈翔宇,陈思捷,严正,等. 区块链在能源领域的价值、应用场景与适用性分析[J]. 电力系统自动化,2021,45(5):18-29.
SHEN Xiangyu, CHEN Sijie, YAN Zheng, et al. Analysis on value, application scenarios and applicability of blockchain in energy industry [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021,45(5):18-29.
- [11] 谢开,张显,张圣楠,等. 区块链技术在电力交易中的应用与展望[J]. 电力系统自动化,2020,44(19):19-28.
XIE Kai, ZHANG Xian, ZHANG Shengnan, et al. Application and prospect of blockchain technology in electricity trading [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44 (19) : 19-28.
- [12] 韦涛,周治平. 基于区块链的用能数据完整性保护框架[J]. 电力自动化设备,2021,41(12):102-107.
WEI Tao, ZHOU Zhiping. Integrity protection framework for energy consumption data based on blockchain [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021,41(12):102-107.
- [13] 李彬,卢超,曹望璋,等. 基于区块链技术的自动需求响应系统应用初探[J]. 中国电机工程学报,2017,37(13):3691-3702.
LI Bin, LU Chao, CAO Wangzhang, et al. A preliminary study of block chain based automated demand response system [J]. Proceedings of the CSEE, 2017,37(13):3691-3702.
- [14] 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.
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.
- [15] 邵雪,孙宏斌,郭庆来. 能源互联网中基于区块链的电力交易和阻塞管理方法[J]. 电网技术,2016,40(12):3630-3638.
TAI Xue, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Electricity transactions and congestion management based on blockchain in energy internet [J]. Power System Technology, 2016,40(12):3630-3638.
- [16] 江秀臣,罗林根,余钟民,等. 区块链在电力设备泛在物联网应用的关键技术及方案[J]. 高电压技术,2019,45(11):3393-3400.
JIANG Xiuchen, LUO Lingen, YU Zhongmin, et al. Technologies and solutions of blockchain application in power equipment ubiquitous Internet of Things [J]. High Voltage Engineering, 2019,45(11):3393-3400.
- [17] ABDELLA J, TARI Z, ANWAR A, et al. An architecture and performance evaluation of blockchain-based peer-to-peer energy trading [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12 (4) : 3364-3378.
- [18] DANG C, ZHANG J F, KWONG C P, et al. Demand side load management for big industrial energy users under blockchain-based peer-to-peer electricity market [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019,10(6):6426-6435.
- [19] HAMOUDA M R, NASSAR M E, SALAMA M M A. A novel energy trading framework using adapted blockchain technology [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12 (3) : 2165-2175.
- [20] LUO F, DONG Z Y, LIANG G, et al. A distributed electricity trading system in active distribution networks based on multi-agent coalition and blockchain [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019,34(5):4097-4108.

- [21] 杨洪明,阳泽峰,漆敏,等. 双链式区块链架构设计及其点对点交易优化决策实现[J]. 电力系统自动化,2021,45(9):19-27.
YANG Hongming, YANG Zefeng, QI Min, et al. Design of double-chain blockchain architecture and its implementation of peer-to-peer transaction optimization decision [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9):19-27.
- [22] 平健,陈思捷,严正. 适用于电力系统凸优化场景的能源区块链底层技术[J]. 中国电机工程学报,2020,40(1):108-116,378.
PING Jian, CHEN Sijie, YAN Zheng. A novel energy blockchain technology for convex optimization scenarios in power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1):108-116, 378.

作者简介:

周自强(1971—),男,教授级高级工程师,博士,主要研



周自强

究方向为输变电技术和信息技术(E-mail: jx_zzq@sina.com);

张靖琛(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为区块链在需求响应中的应用(E-mail: jingchenzhang@zju.edu.cn);

颜 拥(1986—),男,高级工程师,博士,主要研究方向为区块链、人工智能、物联技术等能源互联网中的应用(E-mail: 55682381@qq.com);

耿光超(1985—),男,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力传感与电力物联网、电力系统人工智能、储能在电力系统中的应用(E-mail: ggc@zju.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Preliminary study on applications of blockchain technology in multi-factor integrated high-elastic power grid

ZHOU Ziqiang^{1,2}, ZHANG Jingchen¹, YAN Yong³, GENG Guangchao¹, JIANG Quanyuan¹

(1. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310007, China;

2. Zhejiang Huayun Clean Energy Co., Ltd., Hangzhou 310008, China;

3. Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310014, China)

Abstract: By constructing the omni-directional interaction mechanism of source, network, load and storage, the multi-factor integrated high-elastic power grid significantly improves the power grid interaction and self-healing abilities. The blockchain technology adopts the decentralized concept and distributed accounting mode to ensure the credibility of data, break the trust barrier and provide core technical support for the multi-terminal friendly interaction of power grid. Based on the existing theoretical research and engineering practice, the technical characteristics of blockchain and the morphological structure of high-elastic power grid have strong conceptual fit and technical complementarity, and the blockchain has the potential to become an important enabling technology for multi-factor integrated high-elastic power grid. Aiming at the construction goal of multi-factor integrated high-elastic power grid, the application scenarios of deep integration of blockchain technology and high-elastic power grid are described, the key pain points in the construction process of high-elastic power grid are sorted out, and the technical enabling factors and matching relationship of blockchain to high-elastic power grid are expounded. To meet the construction requirements of high-elastic power grid, the design principle, evaluation indexes and design process of blockchain system are proposed. Taking demand response as an example, the system design and performance test are carried out to provide theoretical support for the application of blockchain technology in the high-elastic power grid.

Key words: blockchain; distributed ledger; high-elastic power grid; evaluation index; multi-factor integration

附录 A

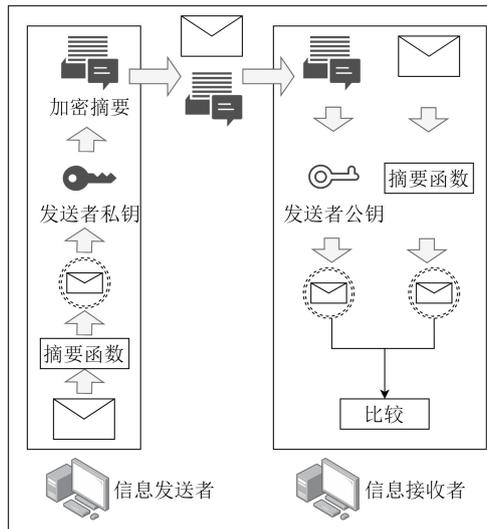


图 A1 非对称加密算法原理

Fig.A1 Principle of asymmetric encryption algorithm

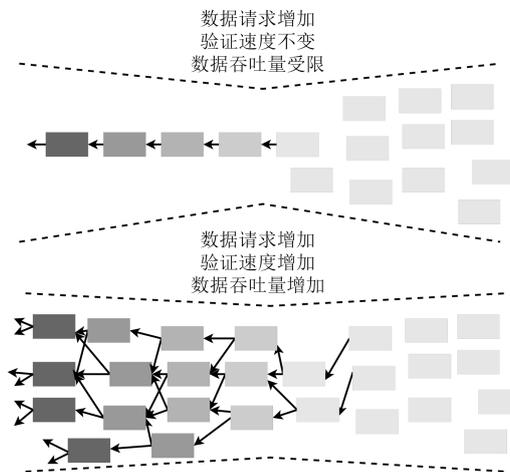


图 A2 DAG 技术原理

Fig.A2 Principle of DAG technology