



电力系统自动化

Automation of Electric Power Systems

ISSN 1000-1026, CN 32-1180/TP

《电力系统自动化》网络首发论文

题目：区块链技术在电力系统中的应用：前景与思路
作者：王胜寒，郭创新，冯斌，张浩，杜振东
收稿日期：2020-01-02
网络首发日期：2020-04-17
引用格式：王胜寒，郭创新，冯斌，张浩，杜振东．区块链技术在电力系统中的应用：前景与思路[J/OL]．电力系统自动化．
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20200416.1709.045.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

区块链技术在电力系统中的应用:前景与思路

王胜寒¹, 郭创新¹, 冯 斌¹, 张 浩², 杜振东²

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. 浙江华云电力工程设计咨询有限公司, 浙江省杭州市 310014)

摘要: 区块链技术因其支撑的比特币系统而在金融领域受到了广泛关注,也在能源电力领域获得了一些应用尝试。介绍了区块链技术的基本原理,归纳了区块链技术的分权化、不变性、可扩展和分布式4项主要特征。根据服务与管理对象的差别,将区块链技术在电力系统环境中的应用划分为物理、金融、社会3种属性和信息安全、监测分析、交易平台、合约执行、智能决策、行为管理6项功能,分析了各项功能的针对问题和技术原理,并各选取一例典型场景进行具体说明。对于电力系统中规模较大的系统应用,提出基于雾计算与侧链结构的智能调度系统和基于公证人机制的碳排放权与绿证交易系统2套区块链架构。最后,总结区块链技术在电力系统环境下应用面临的瓶颈,并提出解决思路。

关键词: 区块链; 共识机制; 智能合约; 电力系统; 雾计算; 智能调度; 碳排放权交易

0 引言

自2008年被Satoshi Nakamoto在《比特币(Bitcoin)白皮书》^[1]中正式提出以来,区块链技术因其具有的区块化、分权化、开放性等特征^[2]而在金融领域(数字货币、跨境支付等)得到了广泛应用。与此同时,物联网(IoT)^[3]、社会学^[4]、医学^[5]、交通运输^[6]、供应链管理^[7]、数据管理^[8]等各领域的研究者也都在不断探索区块链技术在本行业中的应用价值。

在能源电力领域,也有研究者尝试移植和改造区块链技术。文献[9]在电动汽车与电网的互动模式中,利用区块链技术实现车辆之间的端对端(P2P)电力交易。文献[10]将区块链技术与多重签名和匿名信息流技术相结合,提出了一种去中心化的匿名能源交易系统。文献[11]对已有的区块链能源交易设计做出了改进,防止攻击者通过数据挖掘手段窃取用户隐私信息。文献[12]通过在区块链中写入规则的方式进行需求响应的智能采集和结算。文献[13]为实现日内的潮流偏差抵消,设计了一种基于区块链的电能多边交易机制。文献[14]将区块链技术用作交替方向乘子法(ADMM)的协调

器,实现微电网可信的分布式优化计算。文献[15]为抵御针对电力系统的网络攻击,提出了一种区块链数据保护框架。

国内外的能源服务提供商也将区块链技术视为提升服务品质的可能手段。国家电网有限公司正投资开展基于区块链技术的停电险、光伏补贴和共享储能等业务^[16-17]。中国南方电网有限责任公司则已经利用区块链技术在绿证交易和电动汽车电子发票开具等方面取得了一定成果^[17-18]。通用电气公司开发了第一款量子安全的区块链,能实时采集燃气轮机运行数据并执行智能合约^[19]。西门子公司更关注在物联网操作系统上提供区块链应用,希望能将定制物联网传感器上的感知数据直接传送至区块链^[20]。壳牌、埃克森美孚、雪佛龙等多家能源公司组成了区块链财团VAKT,目的是进行区块链技术的概念验证,以探索区块链技术应用于能源行业的优势^[21]。

总体而言,目前电力行业的研究者或投资者对区块链技术的关注范围主要集中在金融领域外延的能源市场、交易结算等方面^[22-27],偶有尝试利用其解决电力系统运行时面对的实际物理问题,更罕有触及电力系统中各主体的人员、资产管理机制。

本文试图以更为全面的视角对区块链在电力系统中的应用前景进行剖析,提出区块链技术映射于电力系统环境中所体现出的不同属性和可实现功能,并对区块链技术应用于电力系统的典型局部应

收稿日期:2020-01-02;修回日期:2020-03-11。

上网日期:

国家重点研发计划资助项目(2017YFB0902600);国家自然科学基金资助项目(51877190)。

用场景和系统应用设计提供实现思路。

1 区块链技术的基本原理

1.1 产生背景

1991年,Stuart Haber和W. Scott Stornetta首次提出了一种由区块构成的密码安全链,目的是实现一个文档时间戳不会被篡改的系统^[28]。随后,Dave Bayer和2位发明者在此基础上引入了默克尔树(Merkle Tree)的结构,使得一个区块中可以容纳多个文档的证书,从而提升了处理效率^[29]。该技术并没有得到重视和大规模使用,直至2008年,Satoshi Nakamoto对此设计做出了改进,在区块封装时采用先前在垃圾邮件过滤中广泛使用的Hashcash算法,建立了工作量证明(PoW)的共识机制^[1]。随着次年以区块链为分布式账本的比特币网络的正式建立,区块链的概念也逐渐获得接受和认可。

区块链技术本质上是将电子交易的基础由参与交易的各主体之间的信任,转变为摒除了人为因素的密码学原理。

1.2 密码学基础

区块链技术建立在密码学的原理之上,主要应用非对称加密和哈希函数(即散列函数,Hash function)2种密码学工具^[30-32]。二者都服务于区块链的安全性,但由于特征的区别而适用于不同的场景。非对称加密主要用于处理后的信息需要复原(即需要解密)的场合,如信息的传播、验证等;哈希函数主要用于处理后的信息不需要复原的场合,如区块封装等。

1.3 区块链结构

区块链的结构如图1所示。每一区块都包含区块头和区块体2个部分,区块头包含有上一区块头哈希值及当前区块的生成时间戳、根散列值和随机数等;区块体包含本区块所封装的有实际意义的信息。

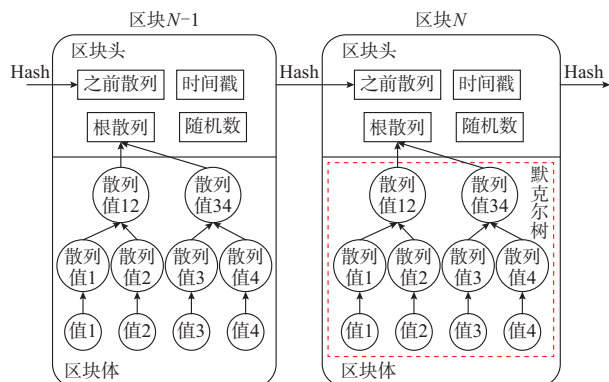


图1 区块链的结构

Fig. 1 Structure of blockchain

各区块依照编号顺序首尾衔接构成链状,篡改一个区块内的值后,其后所有区块的值都会改变,区块之间可以相互印证。这也基本上杜绝了篡改历史数据的可能性。

1.4 运行机制

从某一节点提交信息或发出请求,直至信息被封装至区块中,大致可划分为3个阶段:信息生成、信息验证和区块生成,如图2所示。

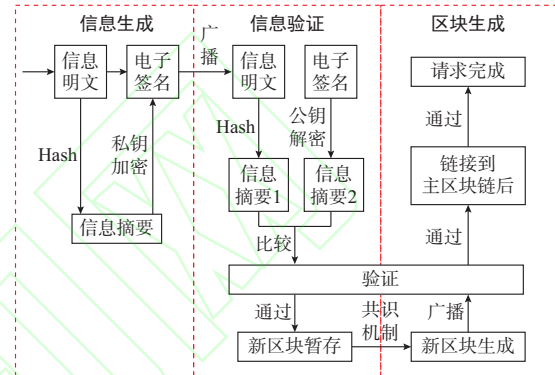


图2 区块链的运行机制

Fig. 2 Operation mechanism of blockchain

1)信息来源节点将信息明文通过公开选定的某一种哈希函数进行映射,生成固定长度的信息摘要。将信息摘要以此节点的私钥进行加密,生成一个电子签名。

2)将信息明文与生成的电子签名共同广播至与其相邻的所有节点,并由受信节点利用之前公开选定的哈希函数和此节点对外发布的公钥,对接收到的信息明文和电子签名分别进行哈希散列和公钥解密,生成2份信息摘要。若2份信息摘要完全相同,则可认为信息传输过程中未被篡改。

3)将确认后的信息的明文暂存至本地的池内,累积一定数量或经过一定时间后,依照共识机制规定的方式,由所有节点竞争或指定若干节点生成新区块。新区块生成后同样需要对区块内容进行广播、验证,并将确认的区块添加至已有区块链之后。为了应对区块链中的分叉问题,一般要求选择最长的区块链进行新区块的扩展,篇幅所限不加详述^[33]。

1.5 共识机制

共识机制,顾名思义,是为在区块链各节点间取得共识所设立的机制,共识内容即为区块链的账本内容^[34-35]。这一机制为网络中所有节点所采纳和执行。共识机制需要面对的问题有2个:一是部分节点可能因故障宕机;二是部分节点可能被恶意操控

(也被称为拜占庭故障^[36])。

1.5.1 实用拜占庭容错

实用拜占庭容错(PBFT)是通过多轮确认达成多数节点一致的共识机制。区块链网络中各节点轮流充当主节点,其余节点成为备份节点。在算法原理上,PBFT可以容许系统中存在不超过总数1/3的恶意节点,并在其余节点间达成共识^[37-39]。

1.5.2 工作量证明

PoW是以工作量分配记账权的共识机制。所有节点都可参与挖矿(寻找区块中的随机数)过程竞争记账权,并获得一定的激励。相比于PBFT,采用PoW共识机制所须花费的系统成本更高,因为大部分节点的挖矿过程都是对最终的区块没有贡献的,却会耗费大量能源。但是PoW可以抵御PBFT中担忧的女巫攻击^[1,40-41]。

1.5.3 权益证明与委托权益证明

权益证明(PoS)是以节点在系统中拥有财富的多寡来分配记账权的共识机制。PoS的依据在于系统中拥有财富越多的节点,越不容易对系统发起破坏。新区块的记账者随机产生,成为记账者的概率与在系统中拥有的币数正相关^[42-43]。PoS可以在一定程度上节约能源,但会造成财富的过度集中,削弱了区块链去中心化的特性。

PoS拥有众多变种,其中委托权益证明(DPoS)较为典型。DPoS将财富权益与出块过程分离开来,各个节点依照其拥有的财富获得等比例的投票权,选举出若干委托节点,由委托节点轮流出块,极大地提升了出块效率,但也面临着中心化问题^[44-45]。

1.5.4 Paxos算法与Raft算法

Paxos是通过不同角色间的消息往复最终达成一致的共识机制。其中包含提议者、决策者和学习者3类节点,共识过程分为准备、决策和学习3个阶段^[46-48]。Paxos无法处理存在恶意节点的情况,但对于故障宕机的情况,只需半数节点正常工作即可保证系统正常运行,可靠性更强。

Paxos的具体原理从理解到工程实现都存在较大难度,因此随后衍生出了更易于理解和实现的Raft算法^[49]。

1.6 智能合约

智能合约这一概念产生时与区块链没有直接联系,其目的是对传统的纸质协议进行规范化和数字化^[50]。但因为二者的互补性,智能合约逐渐成为了区块链技术不可或缺的组成部分。区块链为智能合约提供信任基础,智能合约为区块链提供功能支持^[51]。

比特币网络中就已经出现了简单形态的智能合约,通过脚本来实现基本的算数和逻辑功能^[52]。以太坊(Ethereum)中首次实现了图灵完备的智能合约,为用户提供了更强的表达能力和扩展能力,智能合约的概念也被扩展为任何种类的计算机程序,不限于传统上指代的商业合约^[53]。

1.7 区块链的类型

根据区块链的开放程度,一般将区块链划分为3种类型:公有链、联盟链和私有链。其本质在于记账权所有者的不同。

公有链面向所有网络节点,其运行、维护、存储的过程均由各节点共同完成,数据也向所有节点开放获取。相比于另外2种类型,其开放性最强,去中心化程度最高,对安全性的要求也最为严格,一般需要采用更为繁复的共识机制,如PoW和PoS。此外,公有链面对的节点数量相对较大,达成共识的时间较长,牺牲了出块效率。

联盟链和私有链的记账权只由得到许可的部分特殊节点拥有,因此也被统称为许可链。联盟链的参与方一般为若干个平等主体,多为银行、保险等行业内联盟。私有链则由单个主体进行管理,功能也可根据需求进行定制,相较另2种类型中心化最强,一般为企业或机构内部使用。特别地,联盟链和私有链的记账权掌握在少数指定节点手中,但其依然可以作为分布式账本对外向未经许可的用户提供服务^[54]。

1.8 区块链的特征与优势

区块链技术的特征主要可以概括为分权化、不变性、可扩展和分布式4个方面,如表1所示。

表1 区块链技术的特征
Table 1 Characteristics of blockchain technology

特征	技术实现	效果
分权化	共识机制	无需中心机构,实现网络自治
不变性	密码学技术	防止数据篡改,全周期可追溯
可扩展	智能合约	削减监管成本,合约自动执行
分布式	分布式分类账	多端数据同步,数据可靠存储

分权化主要依托于区块链中的共识机制。各用户节点都可平等(不同的共识机制下衡量标准不同)地参与区块链的运行和维护过程,一定程度上实现了区块链内的民主化。与激励机制相结合,区块链的用户方可对区块链进行自主管理。

不变性由区块链采用的非对称加密和哈希算法等密码学技术保证。区块链的数据在传输和存储过程中均由密码学工具保护,可有效避免数据错误并

提升篡改难度。区块链首尾相接的链式结构也保证了历史数据的完整性与正确性,可用于日后追溯。

可扩展是区块链中引入智能合约所带来的。区块链使用者可根据需求自行设计智能合约,将传统合约以代码形式写入区块链,既可省去合约执行中的人工成本,也避免了文本不清造成的纠纷,同时无须第三方介入对合约内容进行公证。

分布式是指区块链数据以分布式分类账的形式进行存储。各个节点之间的数据可以保持实时同步,即使某一节点数据受损,也可通过其他节点的账本进行恢复,提升了存储可靠性。

总的来说,区块链技术的底层结构可以看做是多主体、分布式数据库、密码学工具和共识机制等诸多技术与理念的系统化结合。多主体参与是数据获得多方信任的基础,分布式数据库(分类账)起到备份与本地查询作用,密码学工具防护每一个节点的安全并保证传输数据的正确性,共识机制则是保证即便有少数节点宕机或被侵入,系统依然能达成“多数节点的共识”而基本正常运作。而智能合约带来的可扩展性,可以视做是在此基础上的高级功能。

2 区块链技术在电力系统中的功能映射

如上文所述,区块链技术具有众多优良特性,因此研究者们尝试将其引入电力系统的场景之中。文献[55]认为区块链技术可在电力交易、营销、自动化等方面发挥作用,文献[56]将区块链的应用领域划分为供给、输送、消费、交易等几类,文献[57]认为区块链技术可在计量认证、市场交易、协同组织、能源金融等环节发挥作用。现有文献中的归纳方式虽然对于区块链技术在电力领域的应用有不同的划分维度与侧重点,但关注的具体应用场景主要集中在电气信息采集记录、数据监测分析等与电力系统物理过程直接相关的方面,以及电力市场、各类能源交易、合约协议自动执行等与金融和商品交易直接相关的方面,少有文献是针对人员管理、行为管控等与人和人的行为直接相关的方面进行深入探讨。基于此,本文对区块链技术在电力系统不同领域、不同场景中的不同作用对象与应用方式进行了更为明晰的梳理与划分。

2.1 属性体现

区块链技术映射于电力系统的不同环境中,会体现出具有差异化的属性特点。根据服务与管理的对象的差别,区块链技术应用用于电力系统中可体现出3种属性:物理属性、金融属性和社会属性。

物理属性是指区块链技术可实现对电力系统物

理过程和物理对象的更为准确可靠的感知、传送和记录,及其物理特性和内在联系的更为智能高效的挖掘、整合和分析。

金融属性是指区块链技术可为电力市场交易提供一个公开、透明、可信的基础平台,提升市场参与意愿,同时降低合约执行风险和监管成本。

社会属性是指区块链技术可在电力系统及其相关联的社会系统中辅助人的思考与决策,提升对人和人的行为的管理水平。

2.2 功能映射与典型局部应用场景

区块链技术在电力系统领域可实现的功能可概括为6项,并归纳进上文所述的3种属性之中。功能名称与区块链技术在其中体现出的优势如表2所示。

表2 区块链技术在电力系统中的应用功能与优势
Table 2 Application functions and advantages of blockchain technology in power systems

属性	功能	优势
物理属性	信息安全	传输可靠,易防难攻
	监测分析	全程留痕,建库待用
金融属性	交易平台	公开透明,简化监管
	合约执行	自动执行,避免推诿
社会属性	智能决策	辅助决策,自动响应
	行为管理	避免纠纷,高效管理

2.2.1 物理属性:信息安全功能

信息安全功能的应用主要针对如下问题展开。

1) 现有电力系统内重要信息的传播和交换途径包含内网和外网,其数据传输过程易受侵入^[58]。

2) 由于采用中心化处理方式,攻击者只须侵入少数节点或中心节点即可对重要数据或指令进行篡改,威胁全网安全^[58-59]。

针对现有电力系统的信息安全问题,可采用区块链技术中的密码学技术和共识机制保证信息的安全可靠。该功能背后的技术原理与产生效果如下。

1) 区块链技术可通过非对称加密与哈希运算保证数据传输过程的安全性,攻击者须付出极大的破解成本才可能对数据做出篡改并通过各节点的验证。

2) 共识机制则可使攻击者侵入少数节点不能操纵全网信息,因为其赋予了各节点投票权利,数据须经大多数节点达成共识方可确认。因此攻击者必须同时攻击多数节点才能够操纵投票结果。

信息安全功能可应用于电力系统状态估计、电力系统信息采集、电力系统信息发布、电网调度与控制等具体场景^[15]。

以电力系统状态估计的场景为例对信息安全功能的应用进行说明。

传统模式下状态估计的数据需要由传感器采集,经过传输通道传送至数据中心,再进行数据处理。采集、传输、接收、存储的各过程都面临受到篡改的风险,如图3(a)所示。

引入区块链技术的状态估计过程,可将区块链视为数据防护屏障。数据的采集、广播、存储等过程都建立在区块链体系之上,传感器节点和原先的数据中心都改造为具有通信与验证功能的分布式账本,更好地防范数据侵入,如图3(b)所示。

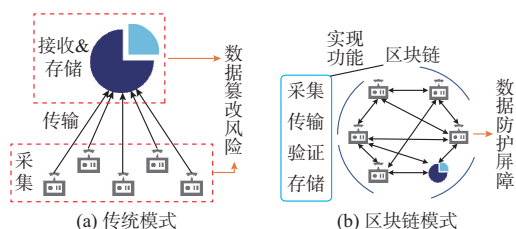


图3 2种模式下电力系统状态估计拓扑对比
Fig. 3 Comparison of state estimation topologies for power system in two modes

2.2.2 物理属性:监测分析功能

监测分析功能的应用主要针对如下问题展开。

1)目前的电力系统量测数据采用集中式存储,中心存储器数据受损会导致数据彻底遗失^[60]。因而传统电力系统对中心存储器及其所连信道可靠性要求很高。

2)电力系统的设备资产数量大、来源广,大量新接入的分布式设备缺乏完善的资产信息管理方式^[61],详细设备信息混杂易丢失,且检修维护时难以确定设备及其内部零件的准确来源与型号信息。

监测分析功能背后的技术原理与产生效果如下。

1)区块链数据采用分布式分类账结构存储,可实现物理信息与过程的完整记录和留存。由于每个节点都存储所有的历史信息,部分存储设备中数据的损坏可被其他节点通过交叉比对弥补,也可抵御攻击者对历史数据的篡改。

2)区块链的链式结构使得链上数据具备可追溯性,可用于设备来源的数据回溯。区块链上所有登记设备的铭牌信息、生产厂家及安装、联结情况均可永久保留,便于日后统计查找。

监测分析功能可应用于用能记录与分析、碳足迹记录、电网运行态势监测、设备溯源等具体场景。

以用能记录与分析的场景为例说明监测分析功

能的应用,如图4所示。

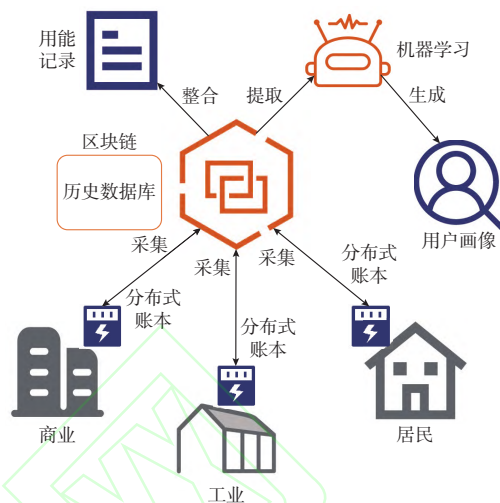


图4 基于区块链技术的用能记录与分析流程
Fig. 4 Energy consumption recording and analysis process based on blockchain technology

传感器采集数据上链,通过分布式账本存储,真实可靠。链上的用电数据完整翔实,可用做用能记录与电费收取凭证,也可视做历史数据库,记录数据以备其后的分析整合,如利用机器学习技术进行用户画像和特性聚合等。

2.2.3 金融属性:交易平台功能

交易平台功能的应用主要针对如下问题。

1)根据现有电力市场的实践和国外成熟电力市场的经验,开放的电力交易参与主体类型众多、数量庞大,出清过程繁琐。

2)因存在滥用市场力的可能,主持交易的第三方机构(平台)和交易双方之间存在信任问题^[62]。不可信交易者的存在会对参与交易的用户及发电厂商造成损失,削弱电力市场的公信力和参与主体的积极性。

3)现有的能源批发市场包含了复杂的第三方中介,且需要对不同类型的能源以及不同来源的信息进行融合,整体而言要对交易进行多次验证和核对,导致用户获取信息不及时,因而产生摩擦成本^[55]。

鉴于上述问题,亟须构建一个基于区块链技术、无须第三方参与的公平、透明、可信的交易平台。该功能背后的技术原理与产生效果如下。

1)交易规则写入区块链智能合约,使交易规则透明化,可实现自动出清,减少结算时间并降低人力成本。

2)交易结算采用集体维护的共识机制,每个参与方皆可直接或间接地参与交易的确认过程,实现交易过程和交易结果的透明化与公开化。

3)多源异构电价电量信息以及交易信息通过区块链技术中的点对点通信广播同步至各节点,可使各参与方获得实时信息并进行报价调整,实现社会效益最大。

交易平台功能可应用于新能源上网、综合能源跨平台交易、碳交易、绿证交易、共享储能等具体场景^[17,22]。

以新能源上网的场景为例说明交易平台功能的应用,如图5所示。

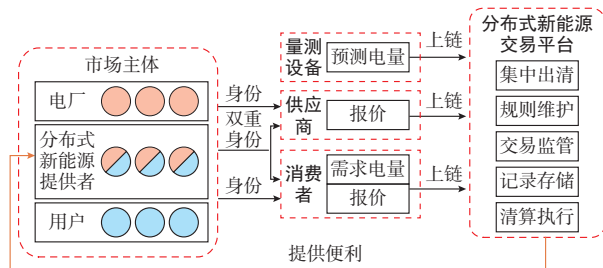


图5 基于区块链技术的新能源上网原理
Fig. 5 Principle of new energy on-grid trading based on blockchain technology

市场主体除了传统的电厂等供应商和售电公司等消费者外,还存在产销一体的分布式能源提供者。供应商提交的供应能力及报价和消费者提交的购买需求及报价等交易信息存储在区块链上,参与主体都可平等获取和发布信息。新能源出力的预测电量也由量测设备采集的历史和实时数据处理得到,作为供应依据在链上共享。

交易行为通过链上设定的机制发生,降低平台维护与交易成本及参与门槛,为小规模参与者(尤其是产销双重身份的分布式新能源供应商)提供便利。

2.2.4 金融属性:合约执行功能

合约执行功能的应用主要针对如下问题展开。

1)合约执行需要双方主动履约,既需要额外执行成本,也潜藏违约风险。一般合约都需要由可信的第三方机构留存并执行,但仍存在篡改的可能性。同时,保存与执行合约的过程将耗费大量人力物力。

2)合约条款存在模糊性,对文字叙述的理解可能产生分歧,留下争议空间^[50]。

合约执行功能能够自动执行、避免推诿,从而有效解决上述问题,其背后的技术原理与产生效果如下。

1)将合约条款以智能合约形式写入区块链中,一旦条件触发,合约中写定的行为即自动执行。无须付出第三方监管成本与双方事后沟通成本。

2)合约内容以代码形式储存于分布式账本,保证了合约的内容真实性和理解唯一性。合约内容所有节点的背书,不可抵赖亦不可篡改。

合约执行功能可应用于费用结算、罚款收缴、充电桩自动缴费、购电套餐执行、交易合约结算等具体场景^[18]。

以费用结算的场景为例说明费用合约执行的应用,如图6所示。

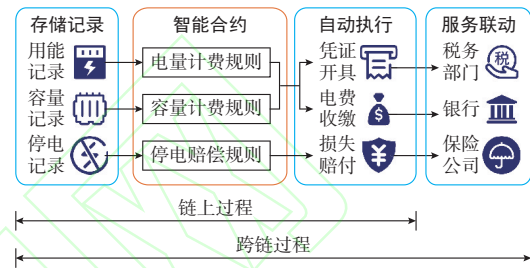


图6 基于区块链技术的费用结算流程
Fig. 6 Fee settlement process based on blockchain technology

用户的用能记录、容量记录等作为收费凭证上链存储,电网公司通过链上指定的计费规则自动进行费用扣缴,并开具链上凭证。电网公司的停电事故也记录于链上,并依此对用户停电损失自动进行赔偿。

除了存储于电网侧搭建的区块链,链上数据还可与税务、银行、保险等第三方的区块链进行同步,交互相关数据,提升整体自动化水平。

2.2.5 社会属性:智能决策功能

智能决策功能的应用主要针对如下问题展开。

1)决策过程需要人工参与,易受主观因素影响且决策过程耗时较长,导致决策结果较为粗略并相比事件发生存在滞后,长期看来会造成可观的经济损失。

2)决策系统的部分内容需要调用一些模型或算法,而这些辅助工具本身即可能受到侵入。故存在攻击者侵入决策系统造成重大决策错误的风险。

智能决策功能背后的技术原理与产生效果如下。

1)依托图灵完备的智能合约,对于复杂度可接受的决策问题,如“if-then”类型的条件判断、选择等,可以将决策逻辑直接写入区块链中并线上执行决策(代码),直接求出最优决策值,并迅速下发至终端节点执行,达到决策实时响应的效果。

2)对于复杂度过高、区块链节点凭借算力难以求解的决策问题,则可依靠区块链加密技术与分布

式分类账提供的安全性保证,将模型的核心参数写入区块链,并线下执行具体运算,提供可信建议。

智能决策功能可应用于家居需求响应、微电网自动调度决策、报价策略实时生成、故障就地处置等具体场景^[63]。

以家居需求响应的场景为例说明智能决策功能的应用,如图7所示。

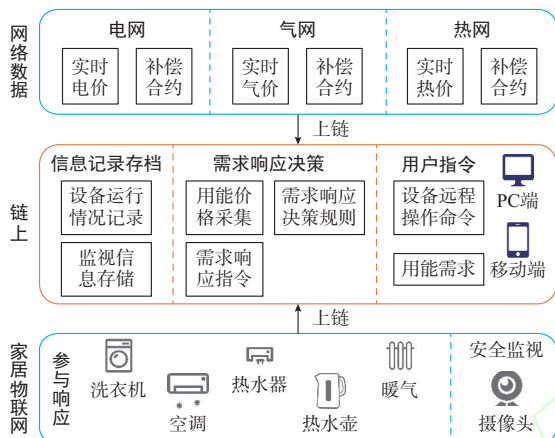


图7 基于区块链技术的家居需求响应原理
Fig. 7 Principle of home demand response based on blockchain technology

家居需求响应的区块链涵盖某一用户的所有可控家居设备。链上存储的信息(实现的功能)包含3个部分:信息记录存档、需求响应决策和用户指令获取。

需求响应决策部分与各类能源供应商网络交互,获取实时能源价格,并读取用户与其签订的补偿合约内容;根据事先设定的决策规则进行自动决策,生成对设备的响应指令。

信息记录存档部分与物联网技术相结合,将家电运行情况、摄像头监视信息等数据上链留存并同步至移动端,同时智能家居也受到链上需求响应决策指令的调配。

用户指令获取部分允许用户输入用能要求与偏好,或直接从客户端发送控制指令至链上,对家居设备进行远程操控,实现个性化需求响应与家居控制。

2.2.6 社会属性:行为管理功能

行为管理功能的应用主要针对如下问题展开。

1)电力系统资产数字化程度不高、可追溯性不强。对电气设备的安装、缺陷记录、检修、更换零部件等过程记录不完整、信息化程度不高,难以回溯历史信息,对设备的运行维护造成一定困难^[61]。

2)人工操作与决策历史记录分散、查询繁琐且易被篡改,不利于管控人员行为及追查事故责任。

行为管理功能背后的技术原理与产生效果如下。

1)链上信息具有可追溯性,对所有下达的指令与发生的行为进行记录,可实现对人员的行为管控和责任回溯。

2)人员行为记录采用分布式账本结构存储,可实现身份识别、链上审核与记录留存,对历史行为归档备案,便于日后查询与调用。

行为管理功能可应用于故障人因追溯、危险行为告警、事故定责、操作票审批等具体场景。

以故障人因追溯的场景为例说明行为管理功能的应用,如图8所示。

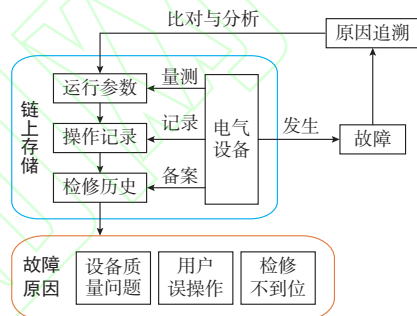


图8 基于区块链技术的故障人因追溯流程
Fig. 8 Fault traceability process of human factor based on blockchain technology

在链上存储一台或若干台电气设备生命周期内全部运行、操作和检修过程的参数及日志信息。一旦发生设备故障损坏事件,可以通过对链上完整记录的比对与分析辨识出故障原因(设备质量问题、用户误操作或检修不到位),从而划定设备损失责任的归属。

3 区块链技术应用于电力系统的系统设计

上文基于不同功能点提出的局部典型应用场景虽然有时会涉及与其他功能的协作,或以其他功能的输出结果作为核心功能的基础,但主要还是体现某一项功能。本章将以2个规模更大的应用系统为例,提出针对各系统的区块链技术解决设计方案。各功能会构成系统设计中的不同切面,集中体现区块链技术应用于电力系统的优势与前景。

3.1 智能调度系统

3.1.1 雾计算与侧链技术

传统的调度模式需要将调度所需的各类信息由传感器分别收集并统一上报,再由调度中心汇集并处理。虽然在理想情况下这种方式可以获取最准确的信息并做出最佳决策,但随着现代电力系统规模

的扩大和量测节点数量的增加,量测数据全部上传在实际系统中难以做到,并且大规模的数据反而会拖慢调度中心的决策速度。现有的电力调度模式中,调度指令由调度中心做出,不能有效接受外界监管,相关利益方(电厂和用户)也无法获知准确信息;一旦发生调度操作失误,追责方式亦不够可靠,操作记录易被篡改。

而区块链技术给电力系统数据传输增加安全保障的同时,也带来了额外的数据验证环节。除了增加信道建设成本,也进一步将大量数据的上传过程复杂化。

针对这些问题,本文尝试在智能调度系统中引入雾计算和侧链技术,后者用于搭建区块链底层框架,前者在侧链内执行局部数据处理与小规模计算。

雾计算是针对云计算的概念提出的,可以视为更靠近地面(底层设备)的云计算。雾计算具有以下一些优良特征,因此已被应用于智能电网、智慧城市等领域^[23,64-65]。

1)低时延:雾计算的计算节点在网络拓扑中更靠近底层设备,并且其所处理的数据量仅限于少量设备上传的数据,故时效性更高。

2)异构性:雾计算的设备可以针对其所覆盖的部分终端进行定制与改造,并将计算结果以统一格式上传至调度中心,可实现输入异构而输出同构。

侧链技术最先提出时是为解决比特币交易网络扩展性差的问题。最早出现的侧链是由以太坊基金会和区块链公司 ConsenSys 共同开发的 BTC-Relay,它允许以太坊上的智能合约在没有任何中介的情况下安全地验证比特币交易,连通了比特币和以太坊两大区块链网络^[66]。

侧链技术相比于传统的单一区块链(只存在主链),具有一定优势^[67]。

1)风险隔离:侧链和主链之间通过一定的协议进行信息交互,但其信息验证、存储等主要过程是在各自链上完成,即使侧链受到攻击和破解,也不会直接威胁到主链的安全性。

2)工作量分摊:所有终端数据可以在各条侧链上经过预处理,以精简后的形式传输到主链上,减轻主链数据处理压力,控制主链上的数据总量。

3.1.2 系统架构与技术原理

基于雾计算与侧链结构的区块链智能调度系统架构如图9所示。

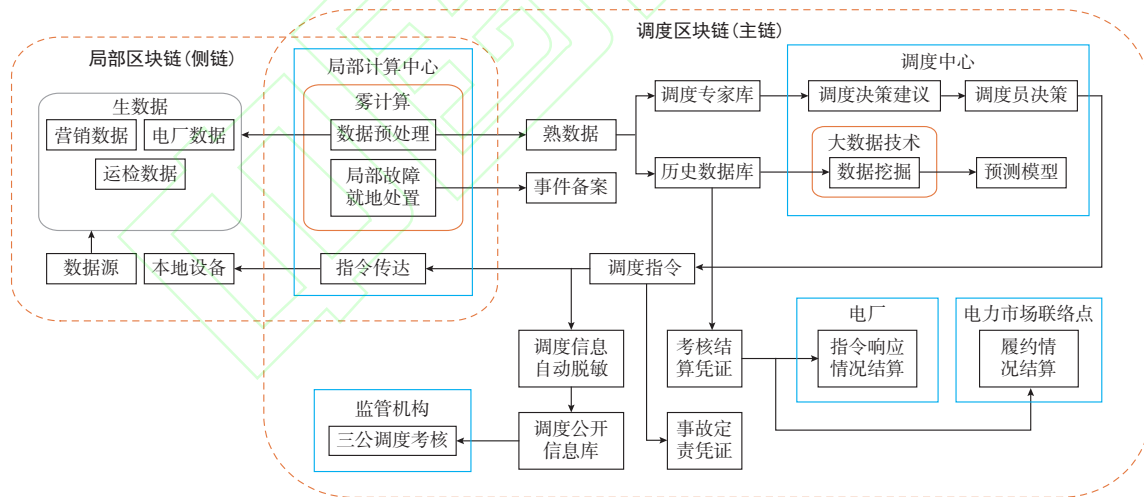


图9 基于区块链技术的电力系统智能调度系统架构

Fig. 9 Architecture of intelligent dispatching system for power system based on blockchain technology

区块链系统中包含一条调度区块链(主链)和若干局部区块链(侧链)(简明起见,图中只绘制出一条侧链)。主链依托于调度中心节点及其他与调度中心直接往来的节点(包括各局部计算中心节点、监管机构节点、电厂节点和与电力市场进行信息交互的联络点),每条侧链则以相对应的一个局部计算中心为据点,向其覆盖的底层设备铺开。

对其具体原理的说明从以下2个方面展开。

1)局部区块链(侧链)

在靠近终端处设置若干分布式的局部计算中心,作为主链与侧链的接口。在局部计算中心对传感器或人工录入的营销数据、电厂数据、运检数据等生数据进行预处理(筛查过滤、简单计算),只将事先约定的少量必要数据(熟数据)上传,减少传送至主链的数据量,提升主链的处理效率。

发生故障时,由底层传感器上报实时感知信息

至侧链,并同步至局部计算中心,进行自动判别与决策。对于局部故障就地处理,并于其后上报至主链,在主链上的调度中心进行备案,减少响应延迟。

局部计算中心还负责从主链上同步调度指令并传送至侧链,从而传达至本地设备在区块链中接入的节点,同时通过反馈机制监督本地设备执行。

特别地,若各终端设备可以进行改造,成为具有一定计算能力的智能终端,则局部计算中心的概念为虚设,指代纳入对应侧链的设备集群,即与侧链的范围重合;可在集群中选取一个或若干个设备成为主链节点,与主链进行交互。否则,应在区域内单独设置一局部计算中心,作为与各终端平等的节点参与侧链的运行,并将获取的数据在链下或通过链上的智能合约进行预处理,再以主链节点的身份上传数据至主链上。

2) 调度区块链(主链)

在主链上利用智能合约建立调度决策的专家库,保证专家库中的规则真实可靠、未被篡改。将采集上链的数据经过专家库的筛查转化为专家经验的调度决策建议提供给调度中心节点,辅助调度员进行决策。调度员提交决策指令至主链,由主链将相关指令同步至各局部计算中心节点。

侧链上传的量测数据写入主链上的历史数据库,作为电厂响应指标和电力市场合约履行情况的年度/季度考核依据。调度中心也可利用大数据技术对所述历史数据库进行数据挖掘,优化新能源和负荷的预测模型。

所有调度指令将在链上完整留存,便于日后追溯。一旦出现因调度决策错误导致的生产事故,可随时调取调度指令历史,查看调度指令申报、审批、执行的全过程记录,辅助定责。调度信息脱敏后在主链上公开发布,电力监管机构和所有电厂都可作为主链节点同步获取真实调度信息,在技术上更好地落实“三公”调度的要求。

3.2 碳排放权与绿证交易系统

3.2.1 碳排放权交易机制

从国内碳交易参与主体的视角出发,可将现有的碳排放权交易市场分为国际碳交易市场和国内碳交易市场2种类型,如图10所示。

各国为了履行《京都议定书》中规定的减排义务,需要进行碳排放额交易,因而产生了国际碳交易市场。《京都议定书》中规定了3类减排机制,分别为清洁发展机制(CDM)、联合履行(JI)和排放交易(ET)^[68]。其中,CDM是一种《联合国气候框架变化公约》^[69]附件一中规定的国家(部分发达国家)与非

附件一中规定的国家之间的减排合作机制。CDM允许发达国家通过帮助发展中国家建设减排项目来获取核证减排量(CER)以满足《京都议定书》对其减排指标的要求,或将CER转入碳交易市场进行出售。

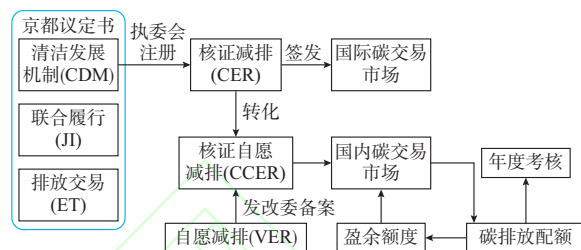


图10 碳排放权交易机制
Fig. 10 Trading mechanism of carbon emission

国内碳交易市场的交易对象主要为核证自愿减排量(CCER)和碳排放权配额2类。碳排放配额由各地政府根据一定规则分配给各企业,排放额度有盈余的企业可以将自身所获额度的一部分参与碳交易市场的流通过程,赚取收益。CCER与国际碳交易市场的CER类似,由可再生能源、农林碳汇等减排项目产生。产生的自愿减排量(VER)经国家发改委备案,即转化为CCER。

由于近年来国际碳交易市场陷入低潮,中国允许已经在联合国机制下注册为CER,但尚未签发进入国际碳交易市场的减排量以CCER的形式转入国内市场,参与国内碳市场的交易流通。

3.2.2 绿证交易机制

绿证交易是可再生能源配额制的衍生物。为促进可再生能源的消纳,一些国家设立了可再生能源配额制度,强制要求售电公司或电力消费者使用的电力中有一定比例的“绿电”。由于电力网络的传输特性,电力来源无法从物理层面进行标记追踪,因此引入可再生能源证书(绿证)的概念以表示绿色能源的使用量。

可再生能源供应商可根据新能源上网电量申请政府部门核发相应数量的绿证,电力中间商或消费者则需要获取绿证以满足配额要求。目前,纳入强制配额的企业一般有以下3种方式获取绿证。

1) 参与绿证交易市场,从新能源发电企业手中购买新能源发电产生的绿证。

2) 自身配备新能源电厂,将新能源电厂所获绿证用于售电业务的配额抵消。

3) 与独立的新能源电厂签订购电协议,并约定所购电量产生的绿证归属于买方。

在强制配额的需求之外,即使不受到配额要求,一些企业或个人也会为履行社会责任自愿认购绿证,因此绿证交易市场也向可再生能源配额制以外的社会主体开放。

在国外一些成熟的绿证交易市场中,绿证带来的收益取代了对新能源的额外补贴。本质上看来,可再生能源配额制就是一种对新能源发电的变相补贴,因此其应与火电、水电等传统能源平价上网。中国的绿证交易还在发展阶段,绿证收益与电价补贴共存,但一般要求新能源发电商在二者之中选择其一。

3.2.3 公证人机制

多个区块链之间的跨链技术除了上文介绍的侧链技术外,还有一种被称为“公证人机制”的方式。单个或多个公证人节点同时位于多个区块链之中,可主动(自动监听并发送)或被动(被询问时采集并发送)地传送一条链上的消息至另一条链^[70]。公证人机制最典型的应用是Ripple公司开发的一套可实现跨链交易的开放式框架Interledger,其开放式体系结构和最小化协议实现了任何价值转移系统的互操作性^[71]。

侧链的结构中侧链需要作为主链的节点参与进主链的运作中,但主链并不了解侧链的内部数据结构。而公证人机制中,公证人充当多个区块链间的中介,可以确保数据跨链传输过程中的安全性,区块链之间并不具有主从关系,可平行运作。

绿证与碳排放权交易系统具有相似的目标,打通2套执行系统有助于减少重复工作、打开全局视角。但二者执行过程中都有可再生能源电量的参与,部分可再生能源项目同时满足绿证核发和碳排放权中CCER的标准,故目前存在绿证与CCER重复计算的情形。

3.2.4 系统架构与技术原理

基于公证人机制的区块链碳排放权与绿证交易系统包括绿证模块、碳排放权模块和公证人模块,3个模块内部独立运作、边界存在交互,其架构如图11所示。

对其具体原理的说明从以下3个方面展开。

1) 绿证模块(区块链)

绿证区块链可准确记录下传感器感知并上传的可再生能源上网电量,根据链上内置规则(每兆瓦时非水可再生能源等同于一个绿证)自动审批并核发绿证。

绿证区块链可与电力交易平台(区块链)交互,若购电用户与新能源供应商签订的协议为绿电-绿

证打包合约(规定新能源电量及其产生的绿证同时归属于购电方),则绿证平台自动将绿证转移至购电方账户,充当购电用户的绿电消费凭证。

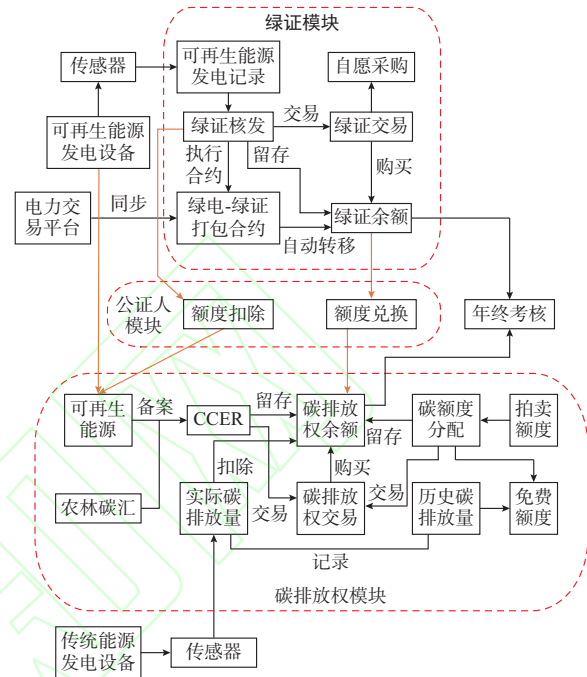


图11 碳排放权与绿证交易系统架构
Fig. 11 System architecture of carbon emission and green certificate trading

证交易的采购方可能是未有强制配额要求(未注册)的企业或个体,因此区块链平台由少数节点维护,但向所有节点开放注册与交易。所有绿证交易均在链上完成,保证交易可靠性,简化监管过程。

2) 碳排放权模块(区块链)

对于传统能源发电设备发电量进行监测与记录,并在碳排放权区块链上换算为实际碳排放量,在已有排放额度中进行自动扣除,实现企业减排量申报的自动审核,安全高效。

流入碳排放权模块的有碳排放量配额和CCER这2类。碳配额由政府分配的免费额度和拍卖额度共同组成,其中免费额度根据链上记录的历史碳排放量按一定规则(行业基准法或历史强度法)自动生成与分发,保证了额度分配过程的公开透明;拍卖额度在区块链上进行报价拍卖,各参与方实时获取各节点发布的信息,有效减少了信息不完全带来的社会效益损失。CCER则由核证的可再生能源与农林碳汇等减排项目上链备案生成。

3) 公证人模块

设计可再生能源配额制的目的是推进可再生能

源发展,而碳排放权的限定是为了减少二氧化碳排放,二者有目标重合之处;且碳排放权主要针对发电侧,而绿证数量是对中间商和用户侧的要求,故原则上可推动2个系统的交叉并行。从减排效果出发,绿证可在一定情况下经过公证人换算为碳交易系统碳排放额度减免量,实现跨链记录。

公证人节点由绿证和碳排放权2个系统共同认可的若干独立节点(可以来自外部,也可2个系统各出一定数量)充当,这些节点以多签名或分布式签名的方式同时参与绿证和碳排放权区块链的运作,并将绿证模块的审批信息实时同步至碳排放权模块,与碳排放权模块中的CCER额度申请信息相对比,若有重复申请绿证和碳排放权额度者,则在碳排放权交易模块予以扣除,避免重复计算。

同一参与主体(企业)若有需求将绿证额度与碳排放权额度之间进行转换,则在其中一个模块中提出申请,并通过公证人模块进行额度的转移,兑换比例依照政策规定而设置。公证人模块保证一个模块的额度扣除与另一个模块的额度增加同时进行,避免两模块信息不同步导致的遗失或冒领额度的事件发生。

4 区块链技术在电力系统中的应用瓶颈

本文列举了3类属性及6项具体功能分类下,区块链技术在电力系统中的可能应用场景。但区块链技术本身具有一些特性局限,并且其应用于电力系统环境时面临问题。

4.1 主要瓶颈

存在的主要瓶颈如下。

1)响应速度受限:以比特币为代表的区块链应用场景主要面对陌生和不确定的人群,因此其对于安全性的要求极高,设计了一系列复杂的共识机制以确保大规模的不可信节点之间可达成共识,使网络正常运作。但这会极大地限制区块链的出块速度,难以适应电力系统中对实时性要求较高的场景。

2)合约漏洞风险:区块链的智能合约可以极大提升区块链的可扩展性,也适合于电力系统的丰富化业务要求。然而智能合约写入链中,在防止合约本身受到篡改的同时,也会为合约修改与更新增加障碍。一旦智能合约代码写入时出现错误或合约逻辑存在漏洞,则需要付出更大的经济与时间代价才能对合约进行弥补。

3)建设成本高昂:区块链的运作要求节点具备存储分布式账本和生成、验证区块的能力,同时还要求节点之间具有通信线路实现节点的两两连接。但

现有电力系统内部的通信网络一般都只在相邻层级的设备之间建立连接,并且底层设备不一定具备扩展潜力。进行全面更新改造则需要耗费巨大成本,造成严重的资源浪费。

4.2 解决思路

1)对于响应速度的问题,考虑到电网内部运行的通信线路相对封闭,可采用联盟链或私有链的方式搭建区块链,以部分算力较强的计算设备作为区块链的支撑节点,其他节点只作为跟随者同步备份账本信息。虽然在一定程度上削弱了去中心化,降低了安全裕度,但可保证计算速度满足网络要求。也可采用上文介绍的侧链技术,与雾计算、边缘计算相结合,分摊系统核心设备与主链的工作压力,对上链数据进行有效分流。

2)对于可能存在的合约漏洞,最佳的解决方案是在部署到链上之前进行充分的测试,避免出现问题。倘若确实担忧合约存在漏洞或无法满足现实要求的情形发生,则可采用在合约中设置外部调用接口等方式。这类方案本质上是对合约内容留有后门,会在机制上降低合约的可信度。但由于电网公司本身具有较高的信誉度担保能力,因此一定程度上可以接受这类方案。

3)为控制建设改造成本,可以考虑引入侧链技术,减少每个节点所连接的相邻节点数量,从而控制线路总数;对于要求全网节点共同认证的情形,可采用节点中继的方式,某一节点接收并验证信息之后再转发给下一层节点;也可根据需要设置若干中心节点或局部中心节点,承担区块链维护责任。对于存储空间要求高的问题,可引入合适的内存释放机制,定期转移账本备份并清理过分冗余信息。

5 结语

区块链技术自提出以来,在各行业都受到了广泛重视,也有大量应用尝试。本文根据服务与管理的对象的差别,总结出区块链技术应用于电力系统中可体现出的3种属性和6项功能。

1)物理属性主要针对电力系统物理过程和物理对象,具体包含有信息安全和监测分析这2项功能,可实现可靠的传输和存储过程,为数据的进一步处理打下基础。

2)金融属性主要面向电力市场交易环节,其中涵盖的交易平台功能可以促进交易的公开透明,合约执行功能则可提升交易的自动化程度。

3)社会属性主要针对人和人的行为,包含智能决策和行为管理2项功能,帮助实现电力系统的辅

助决策和高效管理。

本文对电力系统一些典型的局部和系统场景中区块链技术的应用方式提供了思路,设想了区块链技术应用于这些场景时对传统模式的改变和塑造作用。

纵观本文中对区块链技术在电力系统中取得应用的局部场景尝试与系统设计探索,区块链技术可基于电力系统已有设备与平台,结合大数据、物联网、移动应用、人工智能、云计算等外界技术和侧链、公证人机制等内在改良,提升在电力行业应用的广度与深度。

参考文献

- [1] NAKAMOTO S. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system [R/OL]. (2008-10-31) [2019-11-29]. <https://bitcoin.org/en/bitcoin-paper>.
- [2] THE ECONOMIST. The great chain of being sure about things, the great chain of being sure about things[J/OL]. The Economist [2019 - 12 - 12]. <https://www.economist.com/briefing/2015/10/31/the-great-chain-of-being-sure-about-things>.
- [3] CHRISTIDIS K, DEVETSIKIOTIS M. Blockchains and smart contracts for the internet of things[J]. IEEE Access, 2016, 4: 2292-2303.
- [4] ZYSKIND G, NATHAN O, PENTLAND A. Decentralizing privacy: using blockchain to protect personal data [C]//2015 IEEE Security and Privacy Workshops, May 21-22, 2015, San Jose, USA: 180-184.
- [5] AZARIA A, EKBLAW A, VIEIRA T, et al. MedRec: using blockchain for medical data access and permission management [C]//2016 2nd International Conference on Open and Big Data (OBD), August 22-24, 2016, Vienna, Austria: 25-30.
- [6] KANG J, YU R, HUANG X, et al. Blockchain for secure and efficient data sharing in vehicular edge computing and networks [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(3): 4660-4670.
- [7] SABERI S, KOUHIZADEH M, SARKIS J, et al. Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management[J]. International Journal of Production Research, 2019, 57(7): 2117-2135.
- [8] ZHU L, WU Y, GAI K, et al. Controllable and trustworthy blockchain-based cloud data management[J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 91: 527-535.
- [9] KANG J, YU R, HUANG X, et al. Enabling localized peer-to-peer electricity trading among plug-in hybrid electric vehicles using consortium blockchains [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(6): 3154-3164.
- [10] AITZHAN N Z, SVETINOVIC D. Security and privacy in decentralized energy trading through multi-signatures, blockchain and anonymous messaging streams [J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2018, 15(5): 840-852.
- [11] GAI K, WU Y, ZHU L, et al. Privacy-preserving energy trading using consortium blockchain in smart grid [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(6): 3548-3558.
- [12] POP C, CIOARA T, ANTAL M, et al. Blockchain based decentralized management of demand response programs in smart energy grids[J]. Sensors, 2018, 18(2): 162.
- [13] 平健,陈思捷,张宁,等.基于智能合约的配电网去中心化交易机制[J].中国电机工程学报,2017,37(13):3682-3690. PING Jian, CHEN Sijie, ZHANG Ning, et al. Decentralized transactive mechanism in distribution network based on smart contract [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3682-3690.
- [14] MÜNSING E, MATHER J, MOURA S. Blockchains for decentralized optimization of energy resources in microgrid networks [C]// 2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), August 27-30, 2017, Mauna Lani, USA: 2164-2171.
- [15] LIANG G, WELLER S R, LUO F, et al. Distributed blockchain-based data protection framework for modern power systems against cyber attacks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 3162-3173.
- [16] 国家电网.区块链技术助力泛在电力物联网建设[EB/OL]. (2019-12-04) [2019-12-12]. http://www.sgcc.com.cn/html/sgcc_mobile/col2019042502/2019-12/0420191204101504543540587_1.shtml. STATE GRID. Blockchain technology helps the construction of ubiquitous electric power IoT [EB/OL]. (2019-12-04) [2019-12-12]. http://www.sgcc.com.cn/html/sgcc_mobile/col2019042502/2019-12/04/20191204101504543540587_1.shtml.
- [17] LIU Y. Energy firms betting on blockchain for industry development[N/OL]. China Daily, 2019-05-30 [2019-12-12]. <https://www.chinadaily.com.cn/a/201911/20/WS5dd4a867a310cf3e35578a3c.html>.
- [18] 南方电网公司.南方电网公司积极探索区块链技术应用[EB/OL] (2019-10-28) [2019-12-12]. http://www.csg.cn/xwzx/nygc/201910/t20191029_305529.html. China Southern Power Grid. China Southern Power Grid Corporation actively explores blockchain technology applications [EB/OL] (2019-10-28) [2019-12-12]. http://www.csg.cn/xwzx/nygc/201910/t20191029_305529.html.
- [19] GE. Blockchain GE research[EB/OL]. [2019-12-12]. <https://www.ge.com/research/project/blockchain>.
- [20] SIEMENS. Trusted traceability with blockchain [EB/OL]. [2019-12-12]. <https://new.siemens.com/global/en/markets/food-beverage/exclusive-area/blockchain-iot.html>.
- [21] VAKT. Vakt global[EB/OL]. [2019-12-12]. <https://www.vakt.com/>.
- [22] 王蓓蓓,李雅超,赵盛楠,等.基于区块链的分布式能源交易关键技术[J].电力系统自动化,2019,43(14):53-64. WANG Beibei, LI Yachao, ZHAO Shengnan, et al. Key technologies on blockchain based distributed energy transaction [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 53-64.
- [23] 李彬,曹望璋,张洁,等.基于异构区块链的多能系统交易体系

- 及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 183-193.
- LI Bin, CAO Wangzhang, ZHANG Jie, et al. Transaction system and key technologies of multi-energy system based on heterogeneous blockchain [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 183-193.
- [24] MENGELKAMP E, NOTHEISEN B, BEER C, et al. A blockchain-based smart grid: towards sustainable local energy markets [J]. Computer Science: Research and Development, 2018, 33(1): 207-214.
- [25] 欧阳旭, 朱向前, 叶伦, 等. 区块链技术在大用户直购电中的应用初探[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3737-3745.
- OUYANG Xu, ZHU Xiangqian, YE Lun, et al. Preliminary applications of blockchain technique in large consumers direct power trading [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3737-3745.
- [26] 王健, 周念成, 王强钢, 等. 基于区块链和连续双向拍卖机制的微电网直接交易模式及策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 5072-5084.
- WANG Jian, ZHOU Niancheng, WANG Qianggang, et al. Electricity direct transaction mode and strategy in microgrid based on blockchain and continuous double auction mechanism [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 5072-5084.
- [27] WANG J, WANG Q, ZHOU N, et al. A novel electricity transaction mode of microgrids based on blockchain and continuous double auction [J]. Energies, 2017, 10(12): 1971.
- [28] HABER S, STORNETTA W S. How to time-stamp a digital document [J]. Journal of Cryptology, 1991, 3(2): 99-111.
- [29] BAYER D, HABER S, STORNETTA W S. Improving the efficiency and reliability of digital time-stamping [M]// CAPOCELLI R, DESANTIS A, VACCARO U. Sequences II: Methods in Communication, Security, and Computer Science. New York: Springer, 1993: 329-334.
- [30] 袁勇, 王飞跃. 区块链技术发展现状与展望[J]. 自动化学报, 2016, 42(4): 481-494.
- YUAN Yong, WANG Feiyue. Blockchain: the state of the art and future trends [J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(4): 481-494.
- [31] STALLINGS W. Cryptography and network security: principles and practice [M]. 7th ed. Harlow, UK: Pearson Upper Saddle River, 2016.
- [32] AL-KUWARI S, DAVENPORT J H, BRADFORD R J. Cryptographic hash functions: recent design trends and security notions [C]// Proceedings of 6th China International Conference on Information Security and Cryptology, October 20-24, 2010, Shanghai, China: 133-150.
- [33] BIAIS B, BISIERE C, BOUVARD M, et al. The blockchain folk theorem [J]. Review of Financial Studies, 2019, 32(5): 1662-1715.
- [34] ZHENG Z, XIE S, DAI H, et al. An overview of blockchain technology: architecture, consensus, and future trends [C]// 2017 IEEE International Congress on Big Data (BigData Congress), June 25-30, 2017, Honolulu, USA: 557-564.
- [35] 刘懿中, 刘建伟, 张宗洋, 等. 区块链共识机制研究综述[J]. 密码学报, 2019, 6(4): 395-432.
- LIU Yizhong, LIU Jianwei, ZHANG Zongyang, et al. Overview on blockchain consensus mechanisms [J]. Journal of Cryptologic Research, 2019, 6(4): 395-432.
- [36] LAMPORT L, SHOSTAK R, PEASE M. The byzantine generals problem [J]. ACM Transactions on Programming Languages and Systems, 1982, 4(3): 382-401.
- [37] CASTRO M, LISKOV B. Practical byzantine fault tolerance and proactive recovery [J]. ACM Transactions on Computer Systems, 2002, 20(4): 398-461.
- [38] 王德文, 王莉鑫. 基于实用拜占庭容错算法的多能源交互主体共识机制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 41-52.
- WANG Dewen, WANG Lixin. Consensus mechanism of multi-energy interactive subject based on practical byzantine fault tolerance algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 41-52.
- [39] ANDROULAKI E, BARGER A, BORTNIKOV V, et al. Hyperledger fabric: a distributed operating system for permissioned blockchains [C]// Proceedings of the Thirteenth EuroSys Conference, April 23-26, 2018, New York, USA: 1-15.
- [40] DWORK C, NAOR M. Pricing via processing or combatting junk mail [C]// 12th Annual International Cryptology Conference, August 16-20, 1993, Santa Barbara, USA: 139-147.
- [41] JAKOBSSON M, JUELS A. Proofs of work and bread pudding protocols [C]// Proceedings of the IFIP TC6/TC11 Joint Working Conference on Secure Information Networks: Communications and Multimedia Security, September 20-21, 1999, Leuven, Belgium: 258-272.
- [42] KIAYIAS A, RUSSELL A, DAVID B, et al. Ouroboros: a provably secure proof-of-stake blockchain protocol [C]// 37th Annual International Cryptology Conference, August 20-24, 2017, Santa Barbara, USA: 357-388.
- [43] KING S, NADAL S. PPcoin: Peer-to-peer crypto-currency with proof-of-stake [R/OL]. (2012-08-19) [2019-12-21]. <https://www.peercoin.net/resources#whitepaper>.
- [44] BITSHARES. Delegated proof-of-stake consensus [EB/OL]. [2019-12-21]. <https://bitshares.org/>.
- [45] BITSHARES BLOCKCHAIN FOUNDATION. The BitShares blockchain [R/OL]. (2018-09-06) [2020-03-31]. <https://github.com/bitshares-foundation/bitshares.foundation/tree/master/download/articles>.
- [46] LAMPORT L. The part-time parliament [J]. ACM Transactions on Computer Systems, 1998, 16(2): 133-169.
- [47] LAMPORT L. Paxos made simple [J]. ACM Sigact News, 2001, 32(4): 18-25.
- [48] BURROWS M. The chubby lock service for loosely-coupled distributed systems [C]// Proceedings of the 7th Symposium on Operating Systems Design and Implementation, December 21, 2019, Berkeley, USA.
- [49] ETCD. Etcd [EB/OL]. [2019-12-21]. <https://etcd.io/>.
- [50] SZABO N. Formalizing and securing relationships on public networks [J/OL]. First Monday [2019-12-23]. <https://firstmonday.org/ojs/index.php/fm/article/view/548>.

- [51] 欧阳丽炜,王帅,袁勇,等.智能合约:架构及进展[J].自动化学报,2019,45(3):445-457.
OUYANG Liwei, WANG Shuai, YUAN Yong, et al. Smart contracts: architecture and research progresses [J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(3): 445-457.
- [52] BRAKMIĆ H. Bitcoin and lightning network on raspberry Pi: running nodes on Pi3, Pi4 and Pi zero [M/OL]. Berkeley, USA: Apress, 2019: 201-224[2019-12-24]. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-5522-3_7.
- [53] WOOD G. Ethereum: a secure decentralised generalised transaction ledger[J]. Ethereum Project Yellow Paper, 2014, 151: 1-32.
- [54] GUO Y, LIANG C. Blockchain application and outlook in the banking industry[J]. Financial Innovation, 2016, 2(1): 24.
- [55] ANDONI M, ROBU V, FLYNN D, 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.
- [56] 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.
- [57] 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):4011-4022.
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): 4011-4022.
- [58] 汤奕,陈倩,李梦雅,等.电力信息物理融合系统环境中的网络攻击研究综述[J].电力系统自动化,2016,40(17):59-69.
TANG Yi, CHEN Qian, LI Mengya, et al. Overview on cyber-attacks against cyber physical power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17): 59-69.
- [59] 童晓阳,王晓茹.乌克兰停电事件引起的网络攻击与电网信息安全防范思考[J].电力系统自动化,2016,40(7):144-148.
TONG Xiaoyang, WANG Xiaoru. Inference and countermeasure presupposition of network attack in incident on Ukrainian power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 144-148.
- [60] 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 thing [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3393-3400.
- [61] 张俊,高文忠,张应晨,等.运行于区块链上的智能分布式电力能源系统:需求、概念、方法以及展望[J].自动化学报,2017,43(9):1544-1554.
ZHANG Jun, GAO Wenzhong, ZHANG Yingchen, et al. Blockchain based intelligent distributed electrical energy systems: needs, concepts, approaches and vision [J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(9): 1544-1554.
- [62] 舒畅,钟海旺,夏清.基于优化理论市场化的日前电力市场机制设计[J].电力系统自动化,2016,40(2):55-62.
SHU Chang, ZHONG Haiwang, XIA Qing. Day-ahead electricity market design based on market interpretation of optimization theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2): 55-62.
- [63] MATTILA J, SEPPÄLÄ T, NAUCLER C, et al. Industrial blockchain platforms: an exercise in use case development in the energy industry [R]. Helsinki: Research Institute of the Finnish Economy (ETLA), 2016.
- [64] BONOMI F, MILITO R, ZHU J, et al. Fog computing and its role in the internet of things [C]// Proceedings of the First Edition of the MCC Workshop on Mobile Cloud Computing, December 28, 2019, New York, USA.
- [65] STOJIMENOVIC I, WEN S. The fog computing paradigm: scenarios and security issues [C]// 2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, September 7-10, 2014, Warsaw, Poland: 1-8.
- [66] BTC RELAY. BTC relay [EB/OL]. [2019-12-29]. <http://btcrelay.org/>.
- [67] BACK A, CORALLO M, DASHJR L, et al. Enabling blockchain innovations with pegged sidechains [R/OL]. (2014-10-22)[2019-12-29]. <https://blockstream.com/whitepapers/>.
- [68] UN. A Kyoto Protocol to the united nations framework convention on climate change [EB/OL]. (1997-12-11)[2019-12-29]. https://treaties.un.org/pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-7-a&chapter=27&clang=_en.
- [69] UN. United nations framework convention on climate change [EB/OL]. (1992-05-09)[2019-12-29]. https://treaties.un.org/pages/ViewDetailsIII.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-7&chapter=27&Temp=mtdsg3&clang=_en.
- [70] BUTERIN V. Chain interoperability [R/OL]. (2016-09-09)[2019-12-29]. <https://www.r3.com/reports/chain-interoperability/>.
- [71] RIPPLE. Interledger [EB/OL]. [2019-12-29]. <https://interledger.org/>.
- 王胜寒(1996—),男,博士研究生,主要研究方向:综合能源系统规划设计、区块链技术。E-mail: wangshenghan@zju.edu.cn
- 郭创新(1969—),男,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:综合能源系统规划运行、智能电网风险评估与调度决策。E-mail: guochuangxin@zju.edu.cn
- 冯斌(1997—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统风险调度、机器学习。E-mail: fengbinhz@zju.edu.cn

(编辑 孔丽蓓)

WANG Shenghan¹, GUO Chuangxin¹, FENG Bin¹, ZHANG Hao², DU Zhendong²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Zhejiang Huayun Electric Power Engineering Design & Consultation Co., Ltd., Hangzhou 310014, China)

Abstract: Blockchain technology has received extensive attention in the financial field due to the bitcoin system it supports. It has also gained some applications in the field of energy and electricity. This paper introduces the basic principle of blockchain, and four main characteristics of decentralization, immutability, scalability and distribution of blockchain technology are summarized. According to the difference between the served and managed objects, the application of blockchain technology in the power system environment is divided into three attributes: physical, financial, and social, and six functions: information security, monitoring and analysis, trading platforms, contract execution, intelligent decision-making, and behavior management. The problems and technical principles of various functions are analyzed, and a typical scenario is selected for each of the six functions to specify. For large-scale system applications in the power system, two sets of blockchain architectures are proposed: intelligent dispatching system based on fog computing and side-chain structure, and carbon emission and green certificate trading system based on notary mechanism. Finally, this paper summarizes the bottlenecks faced by blockchain technology to be applied in the power system, and comes up with some solutions.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2017YFB0902600) and National Natural Science Foundation of China (No. 51877190).

Key words: blockchain; consensus mechanisms; smart contracts; power systems; fog computing; intelligent dispatching; carbon emission trading

