

区块链技术在电力辅助服务领域的应用综述

李彬¹, 曹望璋¹, 祁兵¹, 孙毅¹, 郭乃网², 苏运², 崔高颖³

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206;

2. 国网上海市电力公司 电力科学研究院, 上海市 虹口区 200437;

3. 国网江苏省电力公司 电力科学研究院, 江苏省 南京市 210003)

Overview of Application of Block Chain Technology in Ancillary Service Market

LI Bin¹, CAO Wangzhang¹, QI Bing¹, SUN Yi¹, GUO Naiwang², SU Yun², CUI Gaoying³

(1. School of Electric and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China;

2. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Hongkou District, Shanghai 200437, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: In open electricity retail market, number of participants, entity roles and business types keep continuous increase. In order to cope with transaction security issues in competitive market, this paper presents a solution for blockchain applications in auxiliary service market. It explains basic principle of blockchain technology and key technology for blockchain application in ancillary service market, including workload proof, consensus, intelligent contract, business interaction and key management. Besides, evolution roadmap from centralized ancillary service system to decentralized management is proposed based on requirements of capital regulation and intelligent contract. Finally, the paper analyzes application limitation of blockchain technology in China's electricity market from aspects of commercial model, protocol compatibility, security, information processing and resource consumption, and puts forward some suggestions.

KEY WORDS: ancillary services; automated demand response; blockchain; secured transaction

摘要: 售电市场放开后,参与交易的主体数量、类型、业务类别逐渐增多。为应对完全竞争市场条件下多实体参与的辅助服务市场交易安全可信问题,提出了基于区块链技术的解决方案。首先阐明了区块链技术基本原理,剖析了区块链技术在辅助服务市场中应用的关键性技术,分别从工作量证明、共识记账、智能合约、业务交互、密钥管理等方面提出了具

体实施方案。同时,还结合辅助服务中涉及资金流监管、智能合约业务的应用需求,提出了辅助服务系统从集中式管理向分布式智能管理的发展思路。最后,从商业模式、协议兼容性、安全信息快速处理、资源耗费等方面分析了区块链技术在目前我国电力辅助服务市场中应用的局限性,并提出相应建议。

关键词: 电力辅助服务; 自动需求响应; 区块链; 安全交易

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2016.1179

0 引言

区块链技术对于传统行业的冲击近期引起了人们的关注。区块链技术的发展已经经历了3代:区块链1.0主要涉及货币转移、汇兑和支付系统相关的货币;区块链2.0涉及资产、股权、债券等合约;区块链3.0则表示超越货币、金融以外的其他应用,如科教文卫等诸多领域^[1-2]。目前在我国,已有相关学者开展了区块链技术相关应用研究^[3-6],除金融领域外相对较少。文献[7]还给出了区块链技术在能源互联网中多能源系统协同以及碳排放权认证的应用设想。

在某些电力市场较为成熟的发达国家,已将辅助服务作为一种商品,通过市场竞价的方式进行供给。我国根据电力系统的实际情况,将辅助服务分为基本型辅助服务、有偿型辅助服务,其中基本型辅助服务是所有发电商义务提供的,而对于有偿型辅助服务则可以进行交易。区块链技术采用分布式总账的记账方式,不仅可以解决电力辅助服务市场中的记假账、记错账问题,还可以建立一套完整的可追溯交易体系,为每一笔参与交易的资金(如:专项资金补贴、合同违约罚款等)的结算进行监管。在

基金项目: 国家重点研究发展计划项目(2016YFB0901104); 国家自然科学基金项目(51307051); 教育部中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014ZP03, 2015ZD01); 国家电网公司科技项目(适应我国售电侧放开的自动需求响应仿真技术研究)。

Project Supported by National Key Research and Development Program (2016YFB0901104); National Natural Science Foundation of China (51307051); the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2014ZP03, 2015ZD01); Science and Technology Foundation of SGCC (Research of Automated Demand Response Simulation Technology for the Opened Power Retail Market).

“互联网+智慧能源”时代，若仍然采用完全中心化的集中管控手段，将很难实现低成本、大规模参与用户交互^[8]。在传统的电力市场条件下，辅助服务主要由电力部门的发电侧承担，但近年来关于需求侧资源提供辅助服务的研究成果出现^[9-11]，甚至包括快速响应服务^[12]。根据国外的实施案例，需求侧资源一旦签订辅助服务合同或者投标竞价合同，若执行失败则会受到相应的惩罚^[13-14]。

考虑到商业化辅助服务市场运行过程中涉及到众多交互对象和资金流操作，采用区块链技术恰好可以通过低成本技术保障参与用户的交易合法、安全、有效性，本文提出一种区块链技术在辅助服务中的应用设想，并从共识记账、智能合约、业务交互等方面对区块链技术应用方式进行分析。最后，针对区块链技术及电力辅助服务市场的发展现状，给出目前区块链的应用局限性分析。

1 区块链工作原理

区块链属于互联网时代新兴的信息技术，采用去中心化的协作机制，以通过信用、证据以及交易记录跟踪并分析参与方的行为，保障所有的交易和数据是可信的。区块链概念的提出者中本聪本人已经证明了在非法算力不足 50%时，区块链上的交易信息是不可伪造、不可修改的^[15]。图 1 给出了交易节点作为使用者身份下载及矿工更新公共总账链条的方式，所有参与节点均会参与交易的认证并通过加密算法保障交易真实可信。只要非法用户数不过半，则真实的链条一定是最长的。交易过程中一旦出现有用用户恶意篡改数据，会立即被链条的上下游区块监测到异常，后续所有的交易数据会自动链接到合法的区块上，短链则成为非法链条。

由于具有可信可用的前端，在电力辅助服务交易过程中，最为直接的应用就是在费用的支付上。而且，通过简单、低成本的公众监督方式，还可以对专项补贴资金以及合同罚款的使用进行监督。具体监督的过程是通过标准算法将原始记录编码为 64 位的哈希码(该代码与原始记录一一对应且无法反推)，并打上时间戳放入区块链，形成历史证据。表 1 给出了区块链中的区块数据结构。

区块链低成本的技术架构可以规范辅助服务市场的行业发展，公正、客观地保障交易进行且可以追溯历史，同时也可以避免为利益所左右。交易链条创建后，矿工在链条的尾端继续创建新的区块，并更新累计计算难度。只有当交易链中的所有区块与交易均合法，并且从创世区块可达时，该交

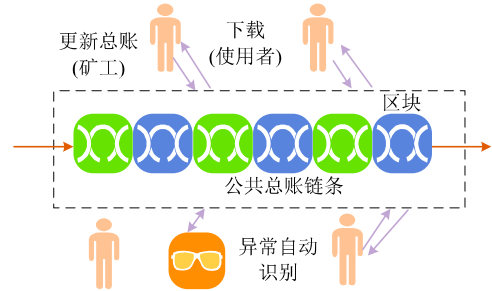


图 1 区块链公共总账管理方式

Fig. 1 Public general ledger management with blockchain

表 1 区块结构说明			
Tab. 1 Illustration for the block structure			
字段名称	字段长度/字节	字段描述	
区块识别号	4	设置为 0xD9B4BEF9	
区块长度	4	用于估计区块大小	
区块头	版本号	4	用于协议升级
	父块 Hash 值	32	引用父区块的哈希值
	本块 Hash 值	32	Merkle 树根哈希值
	时间戳	4	区块产生时间(UTC)
	难度值	4	工作量证明难度目标
	Nonce 计数器	4	工作量证明算法
	交易数	1~9	可变长度整数
交易列表	变长	详细交易清单	

易链才完整有效，否则将成为短链。虽然区块链中任何一个节点到达创世区块的路径是唯一确定的，但是从创世区块出来的路径却不唯一，即使链条末端 2 个块具有很短的创建时间差，区块链也会为其创建分叉区块。当交易客户端选择更长的区块链时，短链中的有效交易块均转移到交易序列池中，从而保障原始有效的交易不受损伤^[16]。

2 电力辅助服务领域的区块链应用关键技术

2.1 辅助服务领域应用需求分析

国内电力市场无论在地域规模、机组数量、负荷分布范围、用户数量均与其他国家有所不同，若采用中心化管理方法不仅耗资巨大，而且不同地域省网在试点和具体实施过程中的市场机制也存在差异，从而为统一规则的制定和监管带来困难。在信任脆弱、主体间关系错综复杂的条件下，区块链作为低成本的无中心化共识方案，可以为辅助服务市场交易进行公证，建立服务购买者、服务供应商之间交易的场外注册机制，达成辅助服务市场中各参与实体之间的分区局部共识，在实现分布式决策的同时兼顾效率。以区块链低成本信任传递为手段，可以实现辅助服务市场中不同能源主体、系统之间的能量流、信息流、资金流的可信管理。

在未来电力市场中，越来越多需求侧资源将参与到电力辅助服务项目中来，对此劳伦斯·伯克利国家实验室(Lawrence Berkeley National Laboratory,

LBNL)也发布了相关系列研究报告^[17-20]。零售商在针对不同类型的消费者提供不同的价格、规避由于电力用户消费模式和批发市场不确定价格所造成的财务风险方面均遇到了较大的困难^[21]。瑞士苏黎世联邦理工学院和美国密歇根大学的一项联合研究将需求侧资源作为可调增预留(up-reserve)、可调减预留(down-reserve)的手段,通过直接控制的方式控制其参与电力辅助服务市场的运行^[22]。以新英格兰辅助服务市场为例,调度软件每5 min清算1次辅助服务的价格。一旦签订双边合同或者投标竞价完成,当出现由于非系统调度机构所引起的偏差时,会对辅助服务供应商进行惩罚并收取罚款,采用区块链技术也可以很好地保障该罚款的合理使用。根据我国电力企业的系统数据使用范围,在实际操作过程中,可以结合不同的业务应用场景采用公链模式、私链模式(无代币区块链)、共同体区块链模式构建。其中,公链模式的安全性完全由工作量证明机制保障,可以为电力企业提供完全去中心化的对外公众服务,所用数据在发布前需要进行抽取、按业务需求组建对应的信息资源池^[23]。私链模式适用于电力信息内网的数据服务,由于所用基础设施大多是与外界完全物理隔离的,可以适当放开数据访问权,交易的规则可以修改得更加灵活,私链模式在成本方面也具有公链模式所不可比拟的优势。共同体区块链模式在电网公司、多级负荷集成商、政府、用户等多参与实体下,可作为安全管理的预选区块链,交易过程受到链条上的多数许可便可进行。该模式在实现过程中实际上属于部分去中心化的过渡模式,在电力市场交易不成熟时可以采用。未来电力零售公司可以将价格与激励等手段并入区块链交易,在实时需求侧管理过程中所面临电量波动风险和电价波动风险,将由售电公司和消费者共同承担并分享相应的收益,通过交易各方参与公证及交易累计过程中,逐步构建能源服务市场的信用体系^[24-25]。在这个全新的信用体系下,区块

链可以实现电力辅助服务敏捷交易的目标,甚至可以以P2P的方式主动交易、灵活地清算结算。

2.2 工作量证明机制

区块链中的工作量证明机制引入主要是为了应对拒绝服务攻击以及其他被不当使用的经济对策,其基本原理是避免对工作过程的监测而直接进行结果检查,利用正反向运算的不对称性,提高系统被攻击的难度。除非攻击者完成相近的工作量,否则该区块信息是无法被更改的,这其实是参与区块链运算中央处理器(central processing unit, CPU)的投票权问题,工作量证明的难度大多根据区块生成的平均速度来设定,如果区块制造的速度过快,其难度也会随之大幅升高。研究学者已经证明了攻击者的伪造过程满足泊松分布的特征,链条的长短是该交易能否被成功认定的核心要素。若真实交易节点和伪造交易节点产生下一交易的概率分别为 p 和 q ,则攻击者最终能够消除 z 个区块差距的概率 p_z 可以表示为

$$p_z = \begin{cases} 1, & p \leq q \\ \left(\frac{q}{p}\right)^z, & p > q \end{cases} \quad (1)$$

假定正常交易被链接 z 个区块后,伪造交易节点同时启动构造伪造交易链条过程,则伪造交易者链条增长服从泊松分布(期望值 $\lambda=zq/p$ 表示对应于 z 区块正常交易时,伪造交易者潜在进展)。因此,可得伪造交易节点能够成功篡改交易的概率 p_s 为

$$p_s = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \cdot \begin{cases} \left(\frac{q}{p}\right)^{z-k}, & k \leq z \\ 1, & k > z \end{cases} \quad (2)$$

为了准确量化区块链系统的潜在风险,本文在表2中给出了区块链系统的风险评估值,其中红色区域表示系统失效风险高于5%的区域,在实际系统设计时应当尽量避免。可以看出,随着攻击者能力的提升(具有较高的区块伪造能力),系统的安全风险急剧增高,二区块系统在 $q=0.3$ 时失效风险已

表2 区块链交易风险概率评估(q -攻击者成功伪造节点概率)
Tab. 2 Risk probability assessment for blockchain based transaction

z	$q=0.05$	$q=0.10$	$q=0.15$	$q=0.20$	$q=0.25$	$q=0.30$	$q=0.35$	$q=0.40$
2	0.012 646	0.050 978	0.115 041	0.203 929	0.315 440	0.445 717	0.588 811	0.736 403
4	0.002 160	0.003 455	0.017 253	0.052 998	0.123 512	0.239 127	0.402 512	0.603 401
6	0.000 004	0.000 243	0.002 680	0.014 251	0.049 943	0.132 111	0.282 171	0.503 980
8	0.000 000	0.000 017	0.000 422	0.003 885	0.020 468	0.073 924	0.200 079	0.424 782
10	0.000 000	0.000 001	0.000 067	0.001 067	0.008 450	0.041 660	0.142 805	0.359 976
12	0.000 000	0.000 000	0.000 011	0.000 294	0.003 504	0.023 584	0.102 362	0.306 167
14	0.000 000	0.000 000	0.000 002	0.000 081	0.001 458	0.013 392	0.073 593	0.261 083
16	0.000 000	0.000 000	0.000 000	0.000 023	0.000 608	0.007 622	0.053 026	0.223 076
18	0.000 000	0.000 000	0.000 000	0.000 006	0.000 254	0.004 345	0.038 271	0.190 896
20	0.000 000	0.000 000	0.000 000	0.000 002	0.000 106	0.002 480	0.027 659	0.163 560

经接近一半。为了应对攻击者的干扰,区块数量增多可以有效降低攻击者篡改交易的成功率。引入20个交易区块后, $q=0.3$ 的系统失效风险不高于0.3%,而此时伪造成功率在20%以下的攻击者已经不可能攻破系统的交易防护,这也正是区块链技术随着时间流逝逐步增多有效区块后的安全优势所在。

2.3 互联共识记账机制

参与电网辅助服务市场的电力用户资产认证、登记、注册,辅助服务购售交易、专项资金补贴、违约合同罚款等,形成电网辅助服务市场的总账本,通过去中心化的大数据系统核验参与电网交易用户的合法性。大量电网基础设施、用户设备加入电力市场辅助服务中后,由电力企业、能源服务商、负荷集成商、政府以及第3方机构共同记账,所有信息、数据可以追溯,并且无法更改。另外,采用区块链机制所形成的熵压缩非常大,几乎没有做假账的可能。

图2给出了基于区块链技术的电力供需调度框图,所有参与电力辅助服务交易的实体均通过区块链授权进行统一管理,随着用电信息系统以及国网大数据平台建设逐步开展,能源交易中的信用将作为一种虚拟化资源,通过信息通信技术(information communication technology, ICT)连接和管理。任何电力用户通过注册机制,均可以参与区块链的运算。在电力市场中的所有交易都会被网络中的参与节点所记录,并构建关联关系。由于所有的操作、补贴、交易均会被记录和追溯,对于历史数据的修改几乎无法实现,在需求侧资源参与电网互动时能够保障每一笔交易能够正常进行。

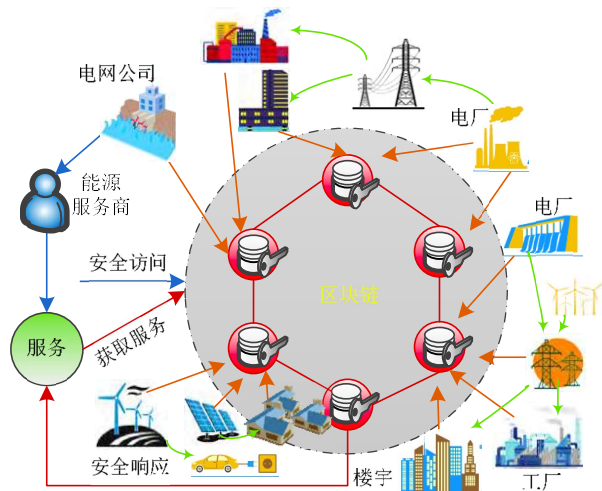


图2 基于区块链的电力供需调度示意图

Fig. 2 Demonstration of blockchain based supply and demand dispatching

2.4 智能合约机制

区块链技术的一个最大创新在于引入了智能合约机制,在执行合约过程中可以通过程序化的脚本进行约定。若仅仅附加私钥地址签名,通过网络广播确认身份合法性,其应用范围将大受限制。在进行交易物的所有权转让过程中,可通过预置程序化的控制策略,如:约定支付的权限、交易周期、失效条件。由于对信任机制的要求较低,在参与实体较多的电力辅助服务市场中,执行自动合约不仅可以降低管理的成本,还可以避免不必要的争议,因为所有的行为在智能合约下能够精确地执行。所谓智能合约,实际上就是部署在可分享的、可复制的账本上的一段程序代码,可以实现辅助服务交易的自动交易逻辑设定。采用全自动化的管理手段,可以降低用户的违约风险,避免由于用户未能够按照约定履行交易的经济损失。区块链所构建的信用体系采用完全去中心化的管理模式,可以有效地应对大量参与终端、参与用户间的互操作风险性问题。参与辅助服务市场的发电机组、需求侧资源、服务商、聚合商之前无需中介的参与,可以实现交易双方的直接交互,从而提高交互的效率。此外,通过区块链技术智能合约机制与电力企业未来的大数据平台平滑对接,亦可以有效避免在市场交易过程中的信息不准确问题,结合电力市场的规划、运行数据,提升与市场化交易相关的数据准确度。可以实现电力辅助服务交易过程中与气象数据、用户行为数据等系统的联动,通过对多系统数据的分析预判电网的运行状态,从而科学准确地发布相关数据并提供部分决策支撑,并以此为据作为电力辅助服务市场的交易参考。

2.5 业务交互机制

利用互联网中的互动化、平等化的机制,构造信用共识体系,也是支撑能源交易的根本渠道。单一用户所需要的数据、所需更新的交易在整个区块链系统中仅仅为一小部分,因此通过区块链支链进行对接即可。随着交易量增多,同一时间所形成的支链需要按照某种规则进行合并,在该过程中可消除无效交易。考虑到电力辅助服务市场所需数据类型不同,本文设计2种用户在从区块链获取数据、交易访问权时的典型方式,见图3。在图3(a)中,用户从负荷集成商获取数据,由负荷集成商接管用户公钥,对用户授权访问后可通过PUSH方式定义更新数据。而这些数据是通过用户公钥加密的,因此也只有享用该服务的用户能够使用。所有操作过

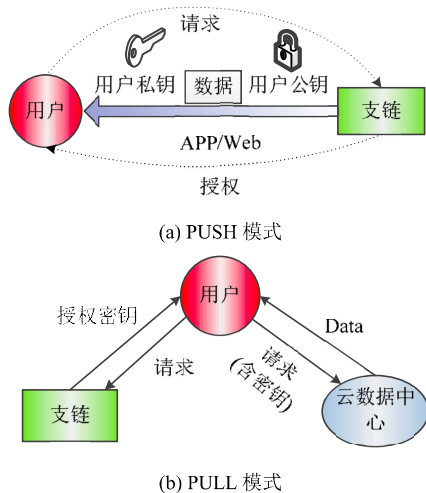


图3 用户从区块链获取数据的不同访问方式

Fig. 3 Different data access approach for blockchain users

程,通过 Web 服务或者 APP 程序即可完全实现^[26]。图 3(b)给出了在 PULL 模式下,用户采用标准的应用编程接口(application program interface, API)从负荷集成商获取所需密钥,数据部分完全由第 3 方提供区块链服务的机构提供。PULL 模式在使用过程中更加灵活,可以根据业务的实际需要获取相关的数据支撑,也即用户仅仅利用了区块链的安全管理机制,而并没有完全采用基于区块链的交易机制。

2.6 密钥管理机制

虽然区块链技术推崇的是完全的去中心化思想,但是在绝大多数领域是无法实现的,电力辅助服务市场中的交易管理是不可能无政府、无电力企业监管的条件下进行。如图 4 所示,交易中每个参与实体对前一次交易以及下一次交易拥有者的公钥进行随机散列数字签名,依次可完成整个交易链条。在任意的交易时刻,每个区块数据采用随机散列加上时间戳,在网络范围内进行广播,该时刻与散列值密切相关。在计算时间散列过程中也需要

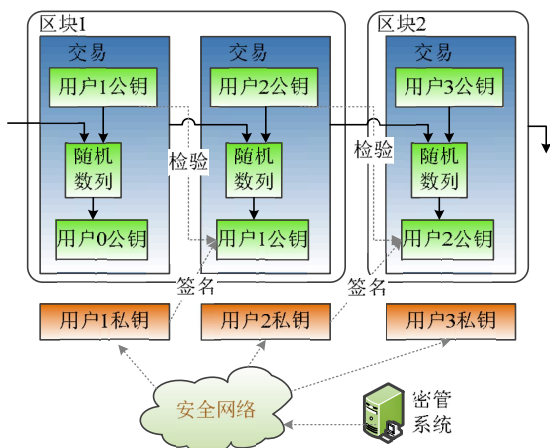


图4 分区块、多用户间的安全交易

Fig. 4 Secured transactions between multiple users and blocks partitions

将前一个交易的时间信息纳入散列序列,从而保障后续的操作会对前面的时间戳增强,从而形成时间上的链条。

通过内嵌可编程逻辑,预先设定不同环节的核算方法,在每次交易完成时除进行安全性管理外,还同时生成不同实体所关注的服务清单,供不同参与实体实时查询。此外,为了提升系统的安全防护级别,在辅助服务市场应用时,可以将资产、账单等隐私数据进行分割,在多个独立的区块上分别进行编码,在需要访问数据的时候再进行合并和解码,通过数据的量子级别管理完成系统无缝、自动化的执行逻辑。

3 区块链应用局限性分析

3.1 商业模式与数据维护

根据电力辅助服务市场以及区块链基本运行机制,本文将电力区块链的业务功能分解为 4 层模型,包括通信网络层、信息管理层、业务逻辑层、业务应用层,如图 5 所示。

美国通用电气计划 2016 年完成其 7 MW 的光伏配套储能基础设施,作为加拿大安大略省系统运营机构(Ontario's Independent Electricity System Operator, IESO)的辅助服务系统,提供包括:电压控制、无功调节、频率调整以及缓变率控制等服务,此外该系统还将提供高峰时调峰、负载转移等业务。我国也已经完成了《并网发电厂辅助服务管理实施细则》修订工作,正在逐步探索促进风电、光伏等新能源多发满发并提供辅助服务的业务模式。互联网金融与以光伏电力为代表的绿色实体经济相

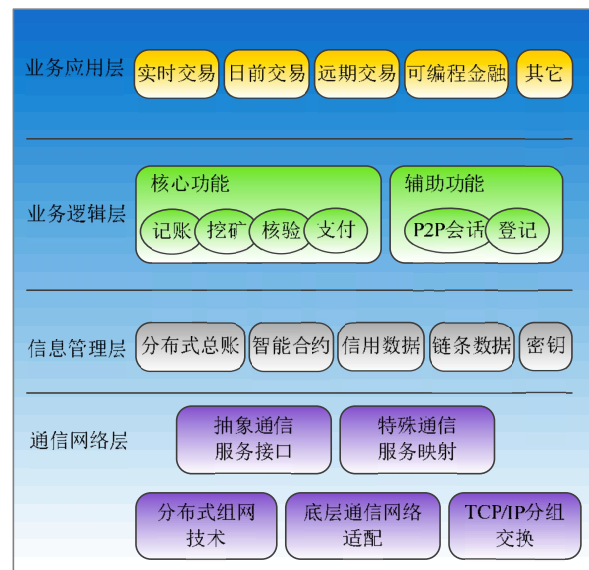


图5 电力区块链的垂直逻辑分层架构

Fig. 5 Hierarchy logic architecture of the electricity blockchain

结合,通过众筹模式向公众募集资金共同开发光伏电站,也是区块链技术进行去中心化改造的典型适用场景^[27-28]。目前电力能源经济的发展刚刚起步,随着售电侧市场的放开,中心化的监管将无法快速满足快速发展的电力市场需要,通过区块链打造的去中心化的应用市场可以避免监管权归属以及权益保障等法律问题。考虑到参与电力辅助服务交易的对象除了电力调度运行机构外,还包括需求侧分布式电源、储能、负荷等,其市场化运营必须分阶段进行。同时在资产管理方面,还可以通过私钥转移的方式实现资产出售行为,利用区块链控制资产的所有权更替,而所有的操作均可通过无需信任的去中心化系统完成。

3.2 与现有协议的兼容性

区块链是一种信息化的技术架构,处于开放系统互联(open system interconnection, OSI)模型第7层,因此在具体实施过程中对底层的交互协议几乎没有影响。中关村区块链产业联盟在2016年2月正式成立后,将其层次划分为高级应用、中间层、底层技术3层架构。参与电力辅助服务市场交易的所有各方实体均可以作为全功能节点存在,也即支持区块链的完整功能,独立完成区块链信息记录(B)、支付(P)、挖矿(M)、路由(R)。然而,在系统实际实现过程中,要求所有节点均同时具有上述功能并不现实,特别是在需求侧参与的设备可能是仅具有简单控制逻辑的控制器,无法记录区块链上的完整交易。考虑到系统实现的复杂度,可以在满足区块链交易安全性的前提下,仅采用部分节点参与区块链完整信息维护,而性能较低的设备仅实现部分功能。

为了详细说明区块链对现有协议的影响,本文针对需求侧资源参与辅助服务市场业务为例进行说明。在OpenADR 1.0版本中详细的规定了与需求响应业务相关的交互逻辑及通信规约^[29-30],由于该规范在国际化推广过程中遇到了较大的阻力,于是将该规范通过OASIS进行改版,依托于EI 1.0^[31]、EMIX 1.0^[32]、WS-Calendar 1.0^[33]、oBIX 1.1^[34],共同形成了OpenADR2.0规范^[35-36]。为了与需求侧现有的控制协议兼容,参与实体可以采用OpenADR协议中定义的基本服务实现区块链的管理和维护,如图6所示。

根据OpenADR目前的规范,其底层传输的方式可以采用XMPP^[37-39]、HTTP^[40-41]亦或者是由用户自行定义的传输规约。目前的安全性机制主要包括采用安全传输层协议(transport layer security,

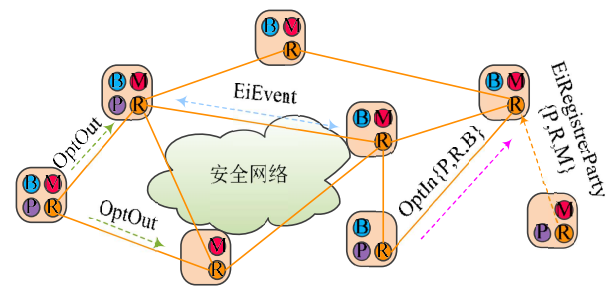


图6 基于区块链的电力辅助服务交易节点组网

Fig. 6 Networking for blockchain based ancillary service transaction node

TLS)和可扩展标记语言(extensible markup language, XML)签名的方式。为了支撑区块链应用,可以在区块链OP_RETURN消息中进行OpenADR签名编码的扩展实现安全性校验。

3.3 交易信息快速安全处理

电力辅助服务市场中的服务类型包括两类:分别为基本辅助服务(一次调频、基本调峰、基本无功调节)、有偿辅助服务(AGC、AVC、有偿调峰、有偿无功调节、旋转备用、黑启动)等,其触发条件与补偿方式各不相同,在对基本辅助服务考核或者对有偿辅助服务补贴结算时,主要参照电力调度指令、能量管理系统(energy management system, EMS)、发电机组调节系统运行工况、WAMS实时数据、电能量采集计费系统的电量数据等。为了保障系统的稳定性,即使是目前最为成功的比特币应用,其交易速率也仅仅被限定在7 tps,相比VISA的2000 tps速率(峰值可达10 000 tps)还有很大提升空间。同时为确保更强的安全性,对于大额交易的计算时间代价更高,主要是为防止双花攻击^[42-43]。信息的安全性与区块的规模密切相关,而且与处理速度是相互矛盾的^[44]。虽然从理论上讲,在超过51%恶意的记账矿工时,区块链的技术可能会不安全,欺诈行为可能会发生。然而我国电网结构庞大,可将我国电力信息系统作为大型矿池,集中全国范围内的所有服务器,足以构建具有超强算力的电力专用服务器集群,如果破解如此规模区块链所构建的安全体系,攻击者需要掌握超过全国电力信息服务系统51%的算力,这几乎是毫无可能实现的。系统再结合地区能源金融中心的监管^[45]、行政手段的监督,可以确保数据的绝对安全。而且,对于区块链技术的开发者而言,系统的安全问题也可以通过程序化控制解决,通过强大的网络效应与网络基础设施构建全新的电力区块链,通过智能合约手段,自动为参与电力辅助服务的用户、发电机组授权,自动匹配最恰当的辅助服务项目。

3.4 资源耗费问题

在区块链构建的体系中，资源浪费问题也是一个备受争议的话题，网络上众多机构的大部分操作除了挖矿外，并没有产生过多的益处。针对某些特定的应用场景，也可以设计算力需求更低、速度更快的工作量证明机制，甚至可以采用无需挖矿的Hyperledger工作量证明方法^[46]。根据微观经济学的技术原理，用户的电能消费与其他商品一样，电力用户的电力需求会持续增长，直到所实现的边际收益达到所需支付的市场价格为止^[47-48]。通过公用总账的形式，在电力市场相关机制还不完善时，保障参与交易的各方利益及市场环境的公平性。对于零售商而言，其职能也不仅仅是买入卖出赚取差价利润，还可以通过掌控负荷群构建有效的能源缓冲池，减少需求侧电能价格波动对用户的影响。然而，为了保障零售商能够盈利，其必须通过技术手段获取准确的电力需求预测信息，在电力市场低价购买电能，再按照相对稳定的价格出售给零售用户，其盈利模式恰恰在于可以通过区块链的概率分析，在各类市场上购买所匹配的电能，从而形成电能差价利润。

4 结论

区块链技术的出现使得传统领域在互联网时代需要技术、管理上的革新。本文提出了区块链技术在电力辅助服务市场的应用设想，并对其前景进行了分析。通过区块链技术，传统的监管者可在无中心化的网络中发挥适当的监管职能，并且能很好地支撑未来的电力绿币交易或者碳税交易^[49-53]。此外，区块链技术采用完全分布式的方法达到市场的均衡点，可有效支撑电力现货市场、远期市场的安全、高效交易与运营。

参考文献

- [1] Peters G W, Panayi E. Understanding modern banking ledgers through blockchain technologies: future of transaction processing and smart contracts on the internet of money[M]. Berlin, Germany: Springer International Publishing, 2016: 1-30.
- [2] Swan M. Blockchain thinking: the brain as a decentralized autonomous corporation[J]. IEEE Technology and Society Magazine, 2015, 34(4): 41-52.
- [3] 丁未. 基于区块链技术的仪器数据管理创新系统[J]. 中国仪器仪表, 2015(10): 15-17.
Ding Wei. Block chain based instrument data management system[J]. China Instrumentation, 2015(10): 15-17(in Chinese).
- [4] 赵赫, 李晓风, 占礼葵. 基于区块链技术的采样机器人数据保护方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 216-219.
Zhao He, Li Xiaofeng, Zhan Likui. Data integrity protection method for microorganism sampling robots based on blockchain technology [J]. J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 43(1): 216-219(in Chinese).
- [5] Kishigami J, Fujimura S, Watanabe H, et al. The blockchain-based digital content distribution system[C]//2015 IEEE Fifth International Conference on Big Data and Cloud Computing (BD Cloud). Dalian: IEEE, 2015: 187-190.
- [6] Watanabe H, Fujimura Shigeru, Nakadaira, et al. Blockchain contract: a complete consensus using blockchain[C]//2015 IEEE 4 th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE). Osaka, Japan: IEEE, 2015: 577-578.
- [7] 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(in Chinese).
- [8] 顾为东. 能源 4.0: 重塑经济结构—互联网技术与智慧能源[J]. 中国工程科学, 2015, 17(3): 4-9.
Gu Weidong. Energy 4.0: constructing the economic structure, internet technology and smart energy[J]. Engineer Science, 2015, 17(3): 4-9(in Chinese).
- [9] Hao H, Sanandaji B M, Poolla K, et al. A generalized battery model of a collection of thermostatically controlled loads for providing ancillary service[C]//51st Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing. Allerton House, UIUC: IEEE, 2013: 551 - 558.
- [10] Meyn S P, Barooah P, Busic A, et al. Ancillary service to the grid using intelligent deferrable loads[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 60(11): 2847-2862.
- [11] Pavlak G S, Henze G P, Cushing V J. Optimizing commercial building participation in energy and ancillary service markets[J]. Energy & Buildings, 2014(81): 115-126.
- [12] Ma O, Alkadi N, Cappers P, et al. Demand response for ancillary services[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 1988-1995.
- [13] 陈家良, 张宏伟. 需求响应及新型辅助服务市场中的备用市场研究[J]. 水电能源科学, 2010, 28(2): 158-161.
Chen Jialiang, Zhang Hongwei. Study on demand response and reserved market in ancillary service market[J]. Water Resource and Power, 2010, 28(2): 158-161(in Chinese).
- [14] US Department of Energy. Load participation in ancillary services [EB/OL]. Houston: DOE, 2011[2016-02-01]. http://www.eere.energy.gov/analysis/load_participation_workshop.html.
- [15] Nakamoto S. Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system[J]. Consulted, 2009, 75(8): 1042-1048.
- [16] 梅兰妮·斯万. 区块链——新经济蓝图及导读[M]. 北京: 新星出版社, 2016: 90-93.
- [17] Sila K, Pamela S, Imran S, et al. Integrating renewable resources in California and the role of automated demand response[R]. Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2010.
- [18] Sila K, Phil P, Mary A P, et al. Field testing of automated demand response for integration of renewable resources in California's ancillary services market for regulation products[R]. Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2010.
- [19] Francis M R, Li Xiaolei, David S. Using dimmable lighting for

- regulation capacity and non-spinning reserves in the ancillary services market[R]. Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2010.
- [20] Han J, Mary A P. Solutions for summer electric power shortages: demand response and its application in air conditioning and refrigerating systems[R]. Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2010.
- [21] Ron D, Shamir A. Quantitative analysis of the full bitcoin transaction graph[M]. Berlin, Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 6-24.
- [22] Haring T W, Mathieu J L, Andersson G. Comparing centralized and decentralized contract design enabling direct load control for reserves[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 2044-2054.
- [23] 姚明涛, 胡兆光, 张宁, 等. 工业负荷提供辅助服务的多智能体响应模拟[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4219-4226.
Yao Mingtao, Hu Zhaoguang, Zhang Ning. Multi-agent response simulation of industrial loads for ancillary services[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4219-4226(in Chinese).
- [24] 赵豫, 于尔铿. 电力零售市场研究(一)充满竞争的电力零售市场[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(9): 20-23.
Zhao Yu, Yu Erkeng. Study on retail electricity market. part one: competitive retail electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(9): 20-23(in Chinese).
- [25] 赵豫, 于尔铿. 电力零售市场研究(二)电力零售市场的组成[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(10): 35-38.
Zhao Yu, Yu Erkeng. Study on retail electricity market. part two: participants of the retail electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 35-38(in Chinese).
- [26] 祁兵, 张荣, 李彬, 等. 自动需求响应信息交换接口设计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5590-5596.
Qi Bing, Zhang Rong, Li Bin, et al. Design of automated demand response information exchange interface[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5590-5596(in Chinese).
- [27] 刘宏志, 刘璐, 曾鸣. 分布式发电商业投资风险分析及保障机制研究[J]. 电力建设, 2014, 35(7): 46-50.
Liu Hongzhi, Liu Lu, Zeng Ming. Business investment risk analysis and guarantee mechanism of distributed generation investment[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(7): 46-50(in Chinese).
- [28] 刘宏志. 我国分布式电源商业化投资机制及效益分析模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [29] OpenADR Alliance. Open automated demand response communications specification (version 1.0)[EB/OL]. Morgan Hill: California Energy Commission, 2009[2015-12-06]. <https://drcc.lbl.gov/openadr>.
- [30] 高赐威, 梁甜甜, 李扬. 自动需求响应的理论与实践综述[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 352-359.
Gao Ciwei, Liang Tiantian, Li Yang. A survey on theory and practice of automated demand response[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 352-359.
- [31] OASIS. Energy Interoperation (EI) Version 1.0[EB/OL]. Burlington: OASIS Committee, 2014[2016-02-05]. <http://docs.oasis-open.org/energyinterop/ei/v1.0/cs03/energyinterop-v1.0-cs03.html>.
- [32] OASIS. Energy Market Information Exchange (EMIX) Version 1.0[EB/OL]. Burlington: OASIS Committee, 2012[2016-01-05]. <http://docs.oasis-open.org/emix/emix/v1.0/cs02/emix-v1.0-cs02.pdf>.
- [33] OASIS. WS-calendar version 1.0[EB/OL]. Burlington: OASIS Committee, 2011[2016-01-08]. <http://docs.oasis-open.org/ws-calendar/ws-calendar-spec/v1.0/cs01/ws-calendar-spec-v1.0-cs01.pdf>.
- [34] OASIS. OBIX version 1.1[EB/OL]. Burlington: OASIS Committee, 2013[2016-02-18]. <http://docs.oasis-open.org/obix/obix/v1.1/csprd02/obix-v1.1-csprd02.pdf>.
- [35] OpenADR Alliance. OpenADR 2.0 profile specification a profile [EB/OL]. Morgan Hill: California Energy Commission, 2011-12 [2015-11-02]. https://openadr.memberclicks.net/assets/DoNotChange/openadr%202%20a%20profile%20specification_v1.0.zip.
- [36] OpenADR Alliance. OpenADR 2.0 profile specification b profile [EB/OL]. Morgan Hill: California Energy Commission, 2013-07 [2015-12-21]. https://openadr.memberclicks.net/assets/DoNotChange/openadr_2_0b_profile_specification_v1.1_package_public.zip.
- [37] IETF RFC 6120. Extensible messaging and presence protocol (XMPP): Core[S]. Mar., 2011.
- [38] IETF RFC 6122. Extensible messaging and presence protocol (XMPP): address format[S]. 2011.
- [39] IETF RFC 7590. Use of transport layer security (TLS) in the extensible messaging and presence protocol (XMPP)[S]. 2015.
- [40] IETF RFC 7469. Public key pinning extension for HTTP[S]. 2015.
- [41] IETF RFC 7480. HTTP usage in the registration data access protocol (RDAP)[S]. 2015.
- [42] Karame G O, Androulaki E, Capkun S. Double-spending fast payments in Bitcoin[C]//Proceedings of the 2012 ACM conference on Computer and communications security. Raleigh, NC: ACM Press, 2012: 906-917.
- [43] Osipkov I, Vasserman E Y, Hopper N, et al. Combating double-spending using cooperative P2P systems[C]//International Conference on Distributed Computing Systems. Toronto, Canada: IEEE, 2007: 41-41.
- [44] Bradbury D. The problem with bitcoin[J]. Computer Fraud & Security, 2013(11): 5-8.
- [45] 张莹梅. 陕西区域性能源金融中心建设对策研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2015.
- [46] Huls J C. A scenario planning for interbank payments and Decentralized Ledger Platforms[D]. Enschede, Dutch: University of Twente, 2015.
- [47] 陈启鑫, 刘敦楠, 林今, 等. 能源互联网的商业模式与市场机制(一)[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3050-3056.
Chen Qixin, Liu Dunnan, Lin Jin, et al. Business models and market mechanisms of energy internet (I)[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3050-3056(in Chinese).
- [48] 刘敦楠, 曾鸣, 黄仁乐, 等. 能源互联网的商业模式与市场机制(二)[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3057-3063.
Liu Dunnan, Zeng Ming, Huang Renle, et al. Business models and market mechanisms of E-Net(2)[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3057-3063(in Chinese).
- [49] 钟宇峰, 黄民翔, 文福拴, 等. 计及绿色证书交易机制的大用户直购电市场均衡分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 144-150.
Zhong Yufeng, Huang Minxiang, Wen Fuquan, et al. Equilibrium analysis of direct electricity purchase with green certificate mechanism[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 144-150(in Chinese).
- [50] 赵新刚, 王晓永. 基于双边拍卖的可再生能源配额制的绿色证书交易机制设计[J]. 可再生能源, 2015, 33(2), 275-282.

Zhao Xingang, Wang Xiaoyong. The design of green certificate trading mechanism based on double auction under the renewable energy quota system[J]. Renewable Energy System, 2015, 33(2), 275-282(in Chinese).

- [51] 余顺坤, 周黎莎, 李晨. 基于可再生能源配额制的绿色证书交易SD模型设计[J]. 华东电力, 2013, 41(2): 281-285.
- Yu Shunkun, Zhou Lisha, Li Chen. System dynamic model design for green certificate trading based on renewable portfolio standard [J]. East China Electric Power, 2013, 41(2): 281-285(in Chinese).
- [52] 娄素华, 胡斌, 吴耀武, 等. 碳交易环境下含大规模光伏电源的电力系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 91-97.
- Lou Suhua, Hu Bin, Wu Yaowu, et al. Optimal dispatch of power system integrated with large scale photovoltaic generation under carbon trading environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 91-97(in Chinese).
- [53] 魏阳. 碳交易机制下可再生能源发电项目的技术经济评价研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.



李彬

收稿日期: 2016-05-23。

作者简介:

李彬(1983), 男, 博士, 副教授, 主要从事智能电网信息通信、电力自动需求响应等电气信息技术研究, E-mail: direfish@163.com;

曹望璋(1993), 男, 硕士研究生, 主要从事需求侧管理等相关技术研究;

祁兵(1965), 男, 教授, 主要从事电力节能、自动需求响应相关技术研究;

孙毅(1972), 男, 教授, 主要从事电力大数据与电网能效节能相关技术研究;

郭乃网(1984), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力信息通信相关研究;

苏运(1987), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统仿真及配电网分析;

崔高颖(1980), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究电力信息化和智能用电技术。

(责任编辑 王金芝)