



区块链分布式技术在电力需求侧响应管理中的应用

任昊文¹, 杨雅琪²

- (1. 鼎信信息科技有限责任公司, 广东 广州 510623;
2. 广州致讯信息科技有限责任公司, 广东 广州 510032)

摘要: 研究了分散式区块链机制的理论, 提出一种将区块链分布式技术应用于智能电网需求侧响应计划管理的方法。该方法基于区块链防篡改的分布式记账技术, 存储从 IoT 智能计量设备收集的能量消耗信息, 以编程方式定义每个消费者级别的自我执行智能合约, 保障交易的灵活性。区块链分布式技术提供相关奖励或惩罚以平衡能源需求与电网能源生产的规则。基于共识的验证将用于检验需求响应计划, 并为灵活的供应商提供适当的财务结算方式。结果表明, 基于区块链分布式技术的电力需求侧管理可用于智能电网条件下的能源需求和生产匹配, 需求响应信号精确度高, 但收敛所需的灵活性减少。

关键词: 区块链分布式技术; 需求侧响应; 智能电网

中图分类号: TM769

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019066

Application of blockchain technology in the demand response management of power grid

REN Haowen¹, YANG Yaqi²

1. Dingxin Information Technology Co., Ltd., Guangzhou 510623, China
2. Guangzhou Zenithsun Technology Co., Ltd., Guangzhou 510032, China

Abstract: The theory of decentralized blockchain mechanism was studied, and a method of applying distributed block chain technology to manage demand response planning in smart grid environment was proposed. This method was based on the blockchain distributed ledger accounting tamper-proof technology, which stored the energy consumption information collected from the intelligent metering devices of the IoT, and defined the self-executing intelligent contract at each consumer level in a programmatic way to ensure the flexibility of transactions. Blockchain distributed technologies provided incentives or penalties to balance energy demand with grid energy production rules. Consensus-based validation would be used to validate demand response plans and provide appropriate financial settlement for flexible suppliers. The results show that the power demand side management based on blockchain distributed technology can be used to match energy demand and production under the condition of smart grid, with high accuracy of demand response signal, but less flexibility required for convergence.

Key words: distributed blockchain technology, demand response, smart grid



1 引言

随着时代的发展,电网传统的中心化管理方式难以有效地解决分布式能源生产消费一体者(distributed energy prosumer, DEP)的快速增长带来的管控问题,因此,智能电网对于分散式管理方法和架构的需求与日俱增。与此同时,随着可再生能源的大规模网络合并与整合,新能源生产的间歇性和不可预测性更是给电能生产侧增加了一定程度的不确定性^[1]。电网中的电能具有不可存储和实时平衡供需的特性,而电能生产侧难以实现实时和快速地变化,因此电能生产侧产能的快速增减都可能威胁到能源的安全供应。在这种情况下,智能电网中可再生能源生产无法预见的高峰,能源供需将不再平衡,传统的管理方式已经越来越难以满足供需平衡的要求。随着智能电表等物联网技术在电网中普及,需求侧管理将成为解决这些问题的最优方法。需求侧管理旨在通过激励 DEP 减少或转移能源需求来应对峰值负荷期,从而将能源需求与生产相匹配^[2]。

随着我国以通信平台为依托、智能技术为手段的“坚强智能电网”概念和“电力流、信息流、业务流”3个指标高度一体化的要求的提出,智能

电网通信平台的建立能确保电网信息监控、跟踪、记录、回馈、集成、分析和汇总等一系列自动化管理,并维持智能电网需求响应(demand response, DR)项目基础功能的正常实施^[3]。但是在电网智能化的同时,网络安全的需求也日益增长。在电力系统的中心化管理模式无法保证绝对安全的前提下,新的管理方式也成为智能电网发展的一种趋势。区块链技术的去中心化、公平性和公开性与智能电网理念相吻合,区块链分布式总账技术恰好利用了全网公证的方式保障每一笔交易的合法性,即只要保障系统具有绝对的算力优势,就可以保障系统安全,同时还具有良好的可追溯性^[13]。

2 区块链运行机制

2.1 区块链的理论基础

在过去几年中,学术和工业领域对分布式总账和区块链技术及其在分散复杂系统管理方面的潜力进行了广泛研究。分布式分类账^[4]由一组区块(组成区块头链接之前的区块)作为保证整条链的完整性区块主体,存储一组有效的数字资产交易,运行方式如图1所示。prev H: 先前区块头的散列; T_N : 区块中的一笔交易 N ; data: 区块中

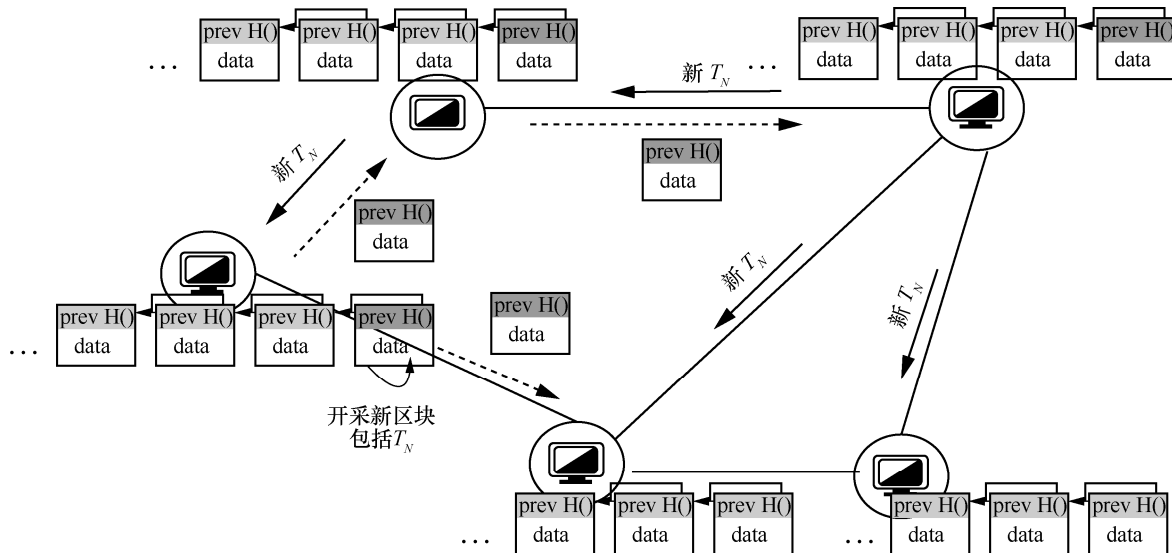


图1 区块链系统的运行方式

存储的数据。

在区块链系统中,每个节点保存整个区块链中的所有数据信息,因此,每个参与节点在整个网络中都有完整的数据备份。在P2P(peer to peer,点对点)网络环境中,整个网络没有集中的硬件和管理组织,既没有中央服务器也没有中央路由器。网络中的每个节点都是点对点的,既可以作为客户端,也可以作为服务器。所有参与者共享、管理和监督每个节点的数据。一方面,每个节点可以随意加入或离开网络,以保证网络的稳定性;另一方面,数据被篡改的可能性较小。区块链系统可以使用整个网络公证的方法来保证每个事务的合法性,同时,只要安全系统具有绝对的计算能力优势,就可以保证系统的安全性。区块链系统还具有良好的可追溯性。交易者信息绑定到区块链中的每个交易记录。交易目标的完整交付路径可以完全记录和跟踪^[7],几乎不会被破坏或篡改,加强交易监管。

2.2 智能合约

区块链技术为智能合约的实施提供支持^[4]。智能合约是实现不同业务规则的代码片段,需要由来自网络的所有节点进行验证和同意。这些智能合约由交易请求触发,进行交易后,每个节点根据其运行智能合约后获得的结果更新自身状态。由于每个节点也在网络的所有节点中复制,因此它们为控制权分散提供了巨大的潜力。在智能合约中,规定了合约中每一方需要履行的义务及执行的判定条件。区块链系统对合约执行条件自动判断,当所有判定条件都满足时,区块链系统将自动强制执行合约条款。智能合约提高了合约执行的效率,确保在没有第三方监督情况下合约的执行。

3 基于区块链的智能电网管理

3.1 区块链支撑动态P2P交易

智能电网采用区块链技术的潜在好处是支持

去中心化的P2P能源的直接交易,交易的同时能保证用户的安全。以PriWatt系统为例,介绍去中心化和P2P交易系统,该系统支持用户自建的太阳能发电、充电桩等资产售电并有效监管和督促其执行能源服务商的合同;允许消费者和生产者在基于点对点区块链的网络中交换能量^[5],电能的需求和生产通过配电系统进行匹配;允许动态协商能源价格,在基于动态电能价格的需求响应系统^[6]中提出协商申请。根据基于预测的电能“生产/需求”以及电能交易区内的用户按需提供负载转移的意愿,综合迭代计算出动态电价。参考文献[8]提出了用于转移峰值负载时段能量消耗曲线的复合型算法:采用去中心化的方式实现了自动控制器的算法,该自动控制器负责推断多个设备的待机消耗,然后计算最大的能源减少量。

去中心化的自动控制器算法以分布式方式运行在每个智能设备上,其中每个设备只负责自身的优化,并不具有关于整个系统的概述信息。区块链共识机制用于DR验证和基于从网络的每个设备节点收集关于实际可传输的柔性电能信息得到的近实时DR财务结算。这些信息会全部添加到区块链块中,永久注册并复制到系统所有节点中。它反映了网络的能量状态和成功解决的DR事件。每当由系统中一个设配发起的电力交易在区块链中注册时,该交易会由自我执行的智能合约通过DR事件协议和预期的柔性电能水平进行检查。由于智能合约部署在网络中,因此每个DR事件规则由每个节点强制执行,并且几乎实时地在所有节点上进行验证。

3.2 区块链加密共识机制支撑参与者的互动服务

与其他基于区块链的系统一样,系统的安全性和信任是通过加密和共识机制权益证明(proof of stake, PoS)建立的。不同于其他区块链系统大多采用工作量证明(proof of work, PoW)作为共识机制,基于区块链的供需互动服务采用的是PoS机制, PoW是能耗密集型的机制,因此,当考虑



到能耗效率时，它并不符合电网环保节能的发展理念。而基于 PoS 机制的系统相较于基于 PoW 的系统更加节能，与比特币等 PoW 机制的加密货币相比，采用 PoS 机制的加密货币对硬件基本上没有过高要求，适合在广大用户群中推广。

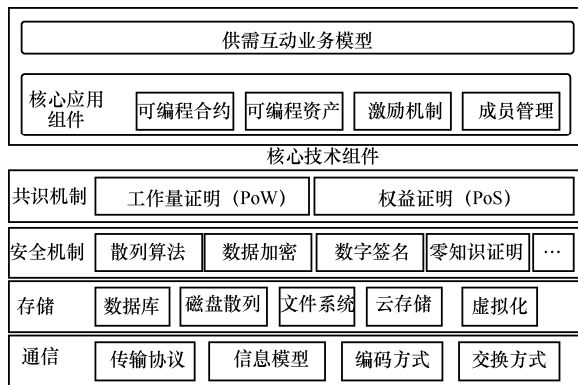


图2 支撑供需互动服务的区块链底层技术框架

在 PoS 机制中，参与者持有股份用于确定网络中的一个节点将在区块链系统中发起下一个电力交易的可能性，同时挖掘和验证 DR 中涉及的所有电力交易以及相关财务结算。用于挖掘下一个有效区块并验证相关联交易/服务的 PoS 算法可以扩展到 DR 的特定情况，以提高 DR 程序和电网操作可靠性。网络的每个设备节点可能扮演电力交易验证者的角色，并且可能是下一个有效区块的矿工。每个验证人应该拥有 DR 电力网络中的一些股份，比如根据用户之前通过响应 DR 管理所得的奖励积分，可用作该区块有效性的保证。为了避免只有持股最多的成员做出决策的情况，应该提供一定程度的随机性。比如可以采用像 PPCoin 加密货币提供的解决方案^[9]，结合了硬币年龄（DR 奖励积分的年龄）的方式来增加系统随机性。基于区块链技术，有效的电力交易和柔性电能的实际份额（即供需偏离值）在近乎实时的短时间内是可以获知的，该 DR 管理方式可以处理任何突发情况。

3.3 通过交易不变性确保数据安全

基于区块链分布式技术的智能能源网络管理

系统为传统的中心式管理方式中存在的许多问题提供了解决方案，比如对于传统中心化的智能电网控制方式，设备参与需求响应管理的主要障碍之一是数据隐私和安全性。尽管已经投入大量工作来建设保护隐私的智能电表，但如何防止篡改电力交易记录仍然是中心化管理方法中的一个亟待解决的问题。过去的研究工作主要集中在如何使用 OpenADR 等协议在产销者和配电系统之间提供可信的双向连接，但管理系统的中心化是一个不可避免的设计缺陷，因此数据安全成为一个相当敏感的问题^[10]。而基于区块链技术的智能电网管理（含需求响应管理）技术有效地解决了这一问题。在区块链系统中，利用设备的数字身份将能量相关数据注册并存储在区块链中，然后复制并共享给所有网络设备以进行验证。去中心化系统中的设备倾向于将数据保留在本地而不是在数据集中的“孤岛”里^[10]。

基于区块链分布式技术的智能电网管理系统带来的另一个好处是交易不变性，该系统能确保区块链中注册的任何能源数据在验证后保持不变。因为区块由散列链表链接回来，所以随着该区块链中区块总量的增加，网络攻击者更改区块中的数值变得更难。从技术上讲，作为区块中的交易存储的所有信息都是公开的，因此，为了确保隐私保护，系统需采用的加密方法（如零知识证明），允许验证方去检查证明方是否有秘密信息，并无需担忧信息被证明方泄露。区块链中与安全相关的能源数据属性是身份、可靠性和授权。公钥的加密在确保交易的所有权和安全性方面起着至关重要的作用。设备使用他们的私钥来签署他们自己的交易，这些交易可以通过公钥在区块链网络上寻址。基于数学函数可以很容易地计算公钥，但是通过公钥推导出私钥是不可行的，能量交易的加密签名确保了区块链系统的不可否认性。为了确保所有权，每个注册的能源数据通过交易链接到设备的数字身份，每个设备节点必须

拥有至少一对公钥—私钥。

3.4 智能电网需求侧管理中的优势

除了需求响应管理外,基于区块链分布式的智能电网管理系统还具有如下优势,见表1。区块链技术的采用会让智能电网转变为不再过于依赖于中枢机构的管理与决策,而是通过电网的每个设备节点自行执行智能合约来做出决策。此外,传统智能电网中心化的管理方式一旦出现故障漏洞,会使电力服务受到大范围的影响,而采用分散式管理方法后所有的数据、统计、交易、控制服务和支付结算均由网络中每个节点通过分布式来计算和验证。

表1 基于区块链分布式技术的智能电网管理系统与传统智能电网管理系统对比

问题	传统方法	区块链方法
单点故障	是	否
能源概况匿名	否	是
支付系统	中心化	点对点销售/消费系统
付款结算	通过中心 60天以内	通过全部节点的共识 近乎实时
能源概况整合和聚合	通过中心	通过分布式总账和 所有节点的共识
需求响应	通过中心	通过节点合作和智能 合约实现自主信令
能源协议验证	通过中心	通过全部节点的共识

在优化传统智能电网的过程中,可以积累大量的交易数据和运营数据,进一步探索对用户的能源行为、负荷使用规则和用户信用指数等数字资产的管理,提高应用水平,促进电力金融经济的发展^[11]。应用区块链技术来构建自动交易网络需要量化和统一交易资源,而在实时报价系统中,可以根据外部环境变化和预设的阈值条件自动执行报价,也可以进行价格限制和程序化交易。根据对现有电力卖方改革政策和需求响应技术发展的趋势分析,建设发电侧、输配电侧和电力侧需求的总体框架平台已完成。随着电力交易中涉及的需求方资源的数量和类型不断增加,迫切需要

建立一个共同的基础信息交互架构,侧重信息的监控、收集、输入和统计,以确保电网公司、能源集成商和能源服务提供商等业务用户组之间的交互。作为信息领域的革命性技术,区块链技术可以有效地支持电力企业实现跨越式发展^[12]。

4 仍存在的问题

根据中国电力行业的实际情况,需要提高与需求响应相匹配的现行价格和激励政策。如果电力市场和相应的机制足够成熟,灾难恢复业务将会大规模扩展,并将面临极其复杂的交易规则和补贴处理。如何有效地为准实时需求响应系统传输、存储和处理大量数据以有效地控制DR是非常具有挑战性的,对系统的可靠性和计算能力都提出了很高的要求。在区块链技术发展的早期阶段,当参与实体数量较少时,超过51%的计算能力容易被网络攻击者所满足,因此仍有可能进行风险交易。而且,由于目前电力公司的信息系统大多与外界隔离,在实际的行业应用和推广中很难让其他企业短时间内开发系统使用权。同时,除了技术问题外,在参与电网辅助服务时,需求方受到很大限制。DR将受到实际运营中的许多其他因素的影响,例如提供DR服务的高成本和低利润的矛盾,该系统很难支持个人用户的参与。

因此,在短期内,可以通过“公链+私链”的共同运营模式,通过内部大量的集群算力保障网络的绝对计算优势,适当引入公链参与。当形成规模化网络后,同时相关政策与环境相对成熟后,再逐步放开。

5 结束语

本文提出了一种分散式解决方法,用于在智能电网环境中管理需求响应计划。通过将电网元素与区块链架构和相关的智能合约相结合,以确保预期能源灵活性水平的程序化定义、DR协议的验证以及能源需求和能源生产之间的平衡。



区块链技术有很大可能为电网电力交易提供颠覆性的创新方法,为基于安全加密技术的智能能源网络分散管理奠定了基础。

参考文献:

- [1] KARAVAS C S, ARVANITIS K, PAPADAKIS G. A game theory approach to multi-agent decentralized energy management of autonomous polygeneration microgrids[J]. *Energies*, 2017(10): 1756.
- [2] KYRIAKAKOS G, PIROMALIS D D, DOUNIS A I, et al. Intelligent demand side energy management system for autonomous polygeneration microgrids[J]. *Applied Energy*, 2013, 103(1): 39-51.
- [3] 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 W D. Energy 4.0: constructing the economic structure, internet technology and smart energy[J]. *Engineering Science*, 2015, 17(3): 4-9.
- [4] KARTHIKEYAN B, DELIGNAT L A, FOURNET C, et al. Formal verification of smart contracts: short paper[C]//ACM Workshop on Programming Languages and Analysis for Security, Oct 24, Vienna, Austria. New York: ACM Press, 2016: 91-96.
- [5] AITZHAN N Z, SVETINVIC D. Security and privacy in decentralized energy trading through multi-signatures, blockchain and anonymous messaging streams[J]. *IEEE Transactions on Dependable & Secure Computing*, 2016(99): 11.
- [6] LIU N, YU X, WANG C, et al. An energy sharing model with price-based demand response for microgrids of peer-to-peer prosumers[J]. *IEEE Transactions on Power System*, 2017, 32(5): 3569-3583.
- [7] 刘伟荣, 真虹. 基于区块链的集装箱共享模式研究[J]. *中国流通经济*, 2018, 5(5): 5.
LIU W R, ZHEN H. Research on container sharing model based on blockchain[J]. *China Business and Market*, 2018, 5(5): 5.
- [8] SIEBERT L C, FERREIRA L R, YAMAKAWA E K, et al. Centralized and decentralized approaches to demand response using smart plugs[C]//T&D Conference and Exposition, April 14-17, 2014, Chicago, USA. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-5.
- [9] KING S, NADAL S. PPCoin: peer-to-peer crypto-currency with proof-of-stake[Z]. 2018.
- [10] Opower. The value of the engaged energy consumer, quantifying the value of strong customer relationships for European Utilities[R]. 2014.
- [11] 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 J L, ZHANG H W. Study on demand response and reserved market in ancillary service market[J]. *Water Resources and Power*, 2010, 28(2): 158-161.
- [12] 李彬, 张洁, 祁兵, 等. 区块链: 需求侧资源参与电网互动的支撑技术[J]. *电力建设*, 2017, 38(3): 1-8.
LI B, ZHANG J, QI B, et al. Blockchain: supporting technology of demand side resources participating in grid interaction[J]. *Electric Power Construction*, 2017, 38(3): 1-8.
- [13] 张建强, 张高毓. 区块链技术在物联网中的应用分析[J]. *电信科学*, 2018, 34(S1): 104-110.
ZHANG J Q, ZHANG G Y. Analysis application of blockchain technology in internet of things[J]. *Telecommunications Science*, 2018, 34(S1): 104-110.

[作者简介]



任昊文(1993—), 男, 现就职于鼎信信息科技有限公司, 主要研究方向为电力系统配电网络的智能化与信息化。



杨雅琪(1993—), 女, 现就职于广州致讯信息科技有限公司, 主要研究方向为区块链未来在各领域的应用。