

跨国电力交易的区块链存证技术

陈爱林*, 田伟, 耿建, 杨争林, 冯树海

(中国电力科学研究院有限公司, 江苏省 南京市 210003)

Blockchain Auditing Technology for Cross-Border Electricity Trading

CHEN Ailin*, TIAN Wei, GENG Jian, YANG Zhenglin, FENG Shuhai

(China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, Jiangsu Province, China)

Abstract: This paper proposes an auditing method for cross-border electricity trading based on blockchain technology. The aim of this method is to ensure that market participants' confidential information such as orders, clearing, and settlement data cannot be falsified, and that the trading procedure can be traced. In this way, power exchangers and supervisory governments can be provided with credible data. The proposed blockchain can trace the flow of energy and financial assets by ledger, confirm the integrity and validity of trading data with verification services, and identify whether the data have been manipulated or not. Taking Northeast Asia as a cross-border electricity trading scenario, the blockchain testing environment was established to verify the feasibility for auditing cross-border electricity trading. The developed method can offer an auditing solution for the registration, orders, clearing and settlement data involved.

Keywords: electricity market; electricity trading; energy Internet; global energy interconnection; blockchain auditing

摘要: 提出基于区块链技术的跨国电力交易的存证方法, 确保市场主体隐私数据和交易申报、交易出清、交易结算等商业秘密数据不可篡改, 交易过程可追溯, 给交易中心、监管部门等提供有公信力的数据; 提供双向账本, 追溯能源和金融资产的流向; 提供数据验证服务, 确认数据的完整性和有效性; 提供数据存证服务, 识别数据被篡改的内容。以东北亚跨国电力交易场景为例, 搭建了区块链案例, 验证了跨国电力交易存证的可行性, 为跨国电力交易所涉及的注册、申报、出清、结算数据存证提供了一种解决方案。

关键词: 电力市场; 电力交易; 能源互联网; 全球能源互联网; 区块链存证

0 引言

能源互联网是以智能电网为基础, 与交通系统、天然气网络、信息网络等其他系统紧密耦合而形成的复杂物理信息系统^[1]。2016年, 中国国家电网公司(国家电网)发起成立了全球能源互联网发展合作组织, 旨在推动构建全球能源互联网, 以清洁和绿色方式满足全球电力需求, 共同应对全球能源、环境和气候挑战^[2-4]。2018年12月, 全球能源互联网发展合作组织与国家电网、韩国电力公社共同签署中韩联网工程合作协议, 三方将在蒙-中-韩-日项目框架下首期推动中韩联网工程^[5]。为了适应新时代发展需要, 2019年国家电网提出“三型两网”战略目标, 建设枢纽型、平台型、共享型的坚强智能电网和泛在电力互联网, 其中区块链技术是关键应用技术之一。

在未来能源互联网和全球能源互联网中, 跨国电力交易将变得普遍。国家与国家之间的电力交易是平等互利的, 要求电能量、数据和金融资产安全流动, 双向的交易存证非常必要, 区块链技术对实现双向交易存证具有显著优势。区块链采用分布式账本、安全认证、共识机制、智能合约等前沿信息技术, 具有去中心化、数据不可篡改、自治自愈的特点, 广泛应用于商品流通领域, 最近几年在电力市场^[6-9]、能源互联网^[10-11]、分布式能源^[12-13]交易中迅速成为热门技术。在数据存证方面, 文献[14]探讨了区块链存证有关数据真实性的问题, 并介绍了在司法审查取证方面的应用。文献[15]介绍了区块链存证在安全系统中的应用, 文献[16]采用区块链技术进行数据完整性校验, 文献[17-18]提出了适用于政府的区块链审计方法。文献[19]则介绍了区块链用于可再生能源证书和碳排放证书交

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0901900); 国家电网公司科技项目“市场机制对新能源消纳的影响研究”。
National Key Research and Development Program of China (2016YFB0901900); Science and Technology Foundation of SGCC “Impact of Market Mechanism to Renewables Consumption”.

易,跟踪发电到证书所有权交易过程。欧洲跨国电力虽然交易活跃,但是未见公开文献描述区块链存证的应用。

在跨国电力交易存证方面应用区块链技术,主要难点在于电力交易的特殊性,其涉及的市场主体、交易规则、电力系统等都非常复杂。跨国电力交易可以跨时区、跨国家(地区)、跨行业、跨组织机构等维度,为了驾驭庞大电力网络的能量流、信息流和金融资产流,交易平台须满足高性能、分布式、安全可靠和智能化等技术要求。跨国电力交易包含秘密数据,主要有市场主体的私密数据和交易申报、出清、结算等商业秘密数据,这部分数据可称为交易核心数据,它是电力交易存证的内容。跨国电力交易存证为区块链技术提供了很好的应用场景,区块链技术可以满足跨国电力交易的技术要求。

本文针对跨国电力交易业务,采用区块链技术,将交易核心秘密数据写入区块链账本,设计安全可靠的跨国电力交易存证方法,实现区块链数据存证服务。首先研究跨国电力交易的业务场景,应用区块链技术,设计区块链数据存证智能合约,实现有公信力的电力交易数据存证服务,确保交易数据不可篡改,交易过程可追溯,满足电力交易的监管要求。

1 跨国电力交易

跨国电力交易的业务场景是组建区块链网络的依据,其难点在于划分组织架构,目前跨国电力交易尚无固定模式。欧洲互联电网(European network of transmission system operators for electricity, ENTSO-E)物理基础好,电力市场较为成熟^[20-23],市场结算货币单一(欧元),交易中心(power exchange, PX)形式多样,跨国电力市场交易活跃。下面以葡萄牙为例,介绍欧洲电力市场架构,在此基础上提出跨国电力交易的组织架构和交易存证的数据模型。

1.1 欧洲电力市场

葡萄牙电网通过6条400 kV和3条220 kV联络线与西班牙电网相连,是ENTSO-E的一部分。葡萄牙与西班牙电力市场从属于伊比利亚电力市场(Iberian electricity market, MIBEL),市场主体包括发电商、输电商(transmission system operator, TSO)、配电商(distribution system operator, DSO)、用电商、交易中心、能源监管机构、市场监管机构等。伊比利亚电

力市场运营机构有3个分支,即OMIE(OMI西班牙分支)负责日前和日内市场,OMIP(OMI葡萄牙分支)负责期货市场,OMIClear(OMIE和OMIP共有)负责市场出清和结算。葡萄牙国家能源网公司(REN)负责葡萄牙辅助服务市场的运营,包括市场申报、出清和结算。葡萄牙电力市场有:①期货市场,OMIP负责运营,包括期货合约、远期合约、掉期合约、OMIP期货合约、金融输电权(financial transmission rights, FTR);②批发市场,OMIE负责运营,包括双边合约、日前市场、日内市场;③辅助服务市场,REN负责运营,包括一次调频、电压控制、二次调频、系统备用、事故处理、双边合约等。目前,葡萄牙电力市场中日前电力市场交易量最大,每天的电能交易包含1次日前市场交易和6次日内市场交易。葡萄牙只有一个TSO,即REN,欧洲有些国家(例如德国)有多个TSO。ENTSO-E共有43个TSO成员。

欧洲有近30个电力交易中心,这些交易中心是欧洲能源交易协会(Europex)的成员。欧洲交易中心的经营区域可以重叠,多个国家可以联合组建电力交易中心,一个国家可以有多个电力交易中心(例如英国),有的国家单独建立电力交易中心,有的交易中心同时负责天然气交易。

欧洲电力市场仍在不断演进中。2014年,北欧地区、中西欧地区及英国完成耦合,形成西北欧耦合区域,并采用Euphemia算法实现了区域价格耦合(price coupling of regions, PCR),这是欧洲电力市场建设进程中的一个里程碑^[20]。截至2017年2月,欧盟已有24个国家实现了日前市场耦合,剩余4国(塞浦路斯、希腊、爱尔兰、马耳他)正在实施。另外,挪威、塞尔维亚、瑞士也已经实现了日前市场耦合。2018年6月,欧洲跨境日内市场(cross-border intraday, XBID)成功上线,在跨境输电容量可用的情况下,XBID实现了法国、德国、比利时等14个欧洲国家市场主体间的日内电力交易。

1.2 跨国电力交易的组织架构

结合欧洲的跨国电力交易和中国“统一市场、两级运作”的情况,图1给出了某个区域跨国电力交易的组织架构图。图中A、B、C、D表示4个国家,由于国家差异,不同国家交易中心之间可能存在网络连接(实线表示),也可能没有建立网络连接(虚线表示)。在欧洲,跨国电力交易由各国的交易中心负责申报和结算,轮流出清,调度机构负责跨国联络线的调度运

行。国家B是两级（国家级和省级）市场的示例，类似中国的省间和省内市场，国家级交易中心负责省间和跨国电力交易，省级交易中心负责省内电力交易。图1只画出了其中一个省级交易机构，各级交易中心与调度中心建立信息交互。

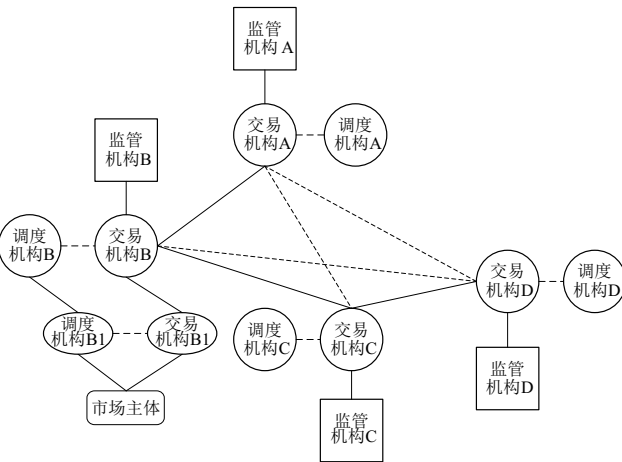


图1 跨国电力交易的组织架构示意图

Fig. 1 Organization structure of cross-border electricity trading

目前，欧洲跨国电力现货交易由交易中心负责，其他国家可能情况有所不同。尽管如此，图1提出的假设仍不失普遍性。

1.3 跨国电力交易存证数据模型

由上述欧洲电力市场和跨国电力交易的组织架构，可以建立跨国电力交易存证区块链所需的业务模型，粗略划分见下表1。

表1 跨国电力交易存证的数据模型

Table 1 Blockchain auditing data model for cross-border electricity trading

序号	维度	划分
1	地域	区域、国家和（或）地区
2	组织	行业、企业、机构等
3	交易流程	注册、申报、出清、结算等
4	市场主体	发电商、输电商、售电商、用电商、交易中心、监管机构等
5	市场类型	期货、中长期、日前、日内和实时等
6	交易标的物	电能、辅助服务、输电权、发电权、绿色证书、碳排放等
7	交易信息	开始时间、结束时间、售电方、输电方、购电方、申报曲线、成交曲线、结算电量、结算电价、结算电费等
8	市场主体信息	名称、别名、描述、市场角色、地址、法人代表、社会识别码、电话、邮箱、银行账户、国家（地区）、组织等

由于跨国电力交易所含的数据量极其庞大，在技术上不可能将所有数据都存入存证区块链账本。经过精简，表1列出了核心的交易信息，由此可以减少区块链账本的存储量，同时可以追溯市场主体间资金和能量的流动方向。

值得指出的是，现阶段跨国电力交易可采用交易中心代理的模式，即各国的市场主体通过所在国的交易中心，进行跨国电力交易。

2 跨国电力交易存证区块链设计

跨国电力交易存证区块链可以由多个国家的交易存证区块链网络互联组成。存证区块链的难点在于区块链网络结构、访问控制规则和智能合约设计。

2.1 存证区块链网络结构设计

跨国电力交易区块链存证网络结构设计，包括组织机构、网络节点和智能合约部署设计。

组织机构划分是跨国电力交易区块链存证网络结构设计的基础，可分为交易机构和监管机构，并参考网络域名来命名。

在组织机构基础上，设计跨国电力交易区块链网络集群节点。集群节点包括计算节点集群、账本数据库集群、认证中心集群和共识集群。

在交易机构计算节点集群的全部节点上，安装和实例化智能合约。智能合约包括市场主体注册、交易申报、交易出清、交易结算和数据存证5个智能合约。前4项智能合约的中间结果不存入账本（上链），只将涉及的市场主体以及电量、电价、电费秘密数据上链。数据存证只将市场主体注册、交易申报、交易出清、交易结算的数字摘要信息上链。

2.2 存证区块链访问控制规则设计

访问控制规则可以实现不同身份用户对不同区块链上的不同类型数据的访问控制，确保数据访问安全。

跨国电力交易存证区块链权限控制包括身份控制、通道控制和私有数据访问控制。不同身份用户通过数字证书验证身份，加入不同的通道，不同的通道访问不同的区块链账本，同时配置授权的跨链访问权限。通道包括交易通道和存证通道，交易通道访问市场主体注册、交易申报、交易出清、交易结算账本，存证通道访问存证账本。加入交易通道的用户，只能

受限访问与身份匹配的市场主体注册、交易申报、交易出清和交易结算账本数据和服务；加入存证通道的用户，可以访问存证账本的市场主体注册、交易申报、交易出清、交易结算的存证数据和服务。市场主体注册、交易申报、交易出清、交易结算合约采用私有数据（private data）账本设计，确保数据访问安全。

2.3 存证智能合约设计

2.3.1 市场主体注册智能合约

市场主体注册智能合约提供写入市场主体注册信息、读取市场主体注册信息和注销市场主体接口。

1) 写入市场主体注册信息接口接受JSON（JavaScript object notation）结构化参数，参数包括名称、别名、描述、市场角色、法人代表、社会识别码、地址、电话、邮箱、银行账户等，跨链调用写入交易存证接口，返回市场主体哈希；

2) 读取市场主体注册信息接口接受市场主体哈希，或电话、银行账号、识别码、邮箱等参数，返回市场主体注册信息；

3) 注销市场主体接口接受市场主体哈希参数，注销市场主体记录，跨链调用写入交易存证接口，返回注销结果。

2.3.2 交易申报智能合约

交易申报智能合约提供写入申报数据和读取申报数据接口。

1) 写入申报数据接口接受JSON结构化参数，参数包括市场主体哈希、市场类型、交易时间、标的物、申报数据，跨链调用写入交易存证接口，返回存证哈希；

2) 读取申报数据接口接受市场主体哈希参数，返回与身份匹配的交易申报数据结果。

2.3.3 交易出清智能合约

交易出清智能合约提供写入出清数据和读取出清数据接口。

1) 写入出清数据接口接受JSON结构化参数，参数包括市场类型、标的物、购电方哈希、售电方哈希、输电方哈希、交易时段、出清价格、出清电力、成交电量等，跨链调用写入交易存证接口，返回存证哈希；

2) 读取出清数据接口接受市场主体哈希、市场类型、标的物、交易时间等JSON结构化参数，返回与身份匹配的交易出清数据结果。

2.3.4 交易结算智能合约

交易结算智能合约提供写入结算数据和读取结算

数据接口。

1) 写入结算数据接口接受JSON结构化参数，参数包括市场主体哈希、市场类型、标的物、购电方哈希、输电方哈希、售电方哈希、结算时段、结算电量、结算价格、结算费用等，跨链调用写入交易存证接口，返回存证哈希；

2) 读取结算数据接口接受市场主体哈希参数，返回与身份匹配的交易结算数据结果。

2.3.5 交易存证智能合约

交易存证智能合约提供写入交易存证、交易验证、数据甄别和资产追踪接口。

1) 写入交易存证接口接受市场主体注册、交易申报、交易出清或交易结算JSON结构化参数，返回存证哈希；

2) 交易验证接口接受JSON类型参数，参数包括市场主体哈希、交易申报、出清或结算JSON结构化数据，返回验证结果；

3) 交易甄别接口接受JSON类型参数，参数包括市场主体哈希、交易申报、出清或结算JSON结构化数据，返回甄别结果；

4) 资产追踪接口接受JSON类型参数，参数包括市场主体哈希、交易时段，返回资产流向JSON结构化结果。资产流向JSON结构化结果包括交易申报、出清或结算JSON结构化数据。

3 东北亚跨国电力交易存证区块链验证案例

以未来东北亚的俄罗斯远东地区、中国华北和东北地区、蒙古、韩国、日本、朝鲜构成的互联电力市场交易为场景，如图2所示，建立跨国电力交易存证区块链验证案例。

基于以上案例，采用Hyperledger Fabric（发行版1.4.2）搭建了跨国电力交易存证区块链验证环境。以中国华北和东北地区为例，假设东北亚跨国电力交易的组织为genenergy.net，存证区块链的机构组织有交易机构（exchangeorg）和监管机构（regulatororg）；通道包括交易通道（tradech）和存证通道（auditch）；交易机构和监管机构加入交易通道，监管机构加入存证通道；集群节点包含6个peer计算节点，6个couchdb账本数据库节点，2个ca认证节点，3个orderer排序节点；共识机制采用raft算法。Fabric区块链节点包括peer和orderer节点，表2给出了跨国电力交易的完整验证环境节点配置。

表 2 交易存证区块链验证环境的完整节点配置示例

Table 2 Example of a complete node configuration for blockchain auditing verification environment

类别	节点	用途
合约计算	peer0.exchangeorg.genergy.net	部署智能合约
	peer1.exchangeorg.genergy.net	
	peer2.exchangeorg.genergy.net	
	peer3.exchangeorg.genergy.net	
	peer0.regulatororg.genergy.net	
	peer1.regulatororg.genergy.net	
排序	orderer0.genergy.net	共识排序
	orderer1.genergy.net	
	orderer2.genergy.net	
分布记账	couchdb0.exchangeorg.genergy.net	部署账本数据库
	couchdb1.exchangeorg.genergy.net	
	couchdb2.exchangeorg.genergy.net	
	couchdb3.exchangeorg.genergy.net	
	couchdb0.regulatororg.genergy.net	
	couchdb1.regulatororg.genergy.net	
认证	ca.exchangeorg.genergy.net	认证服务
	ca.regulatororg.genergy.net	

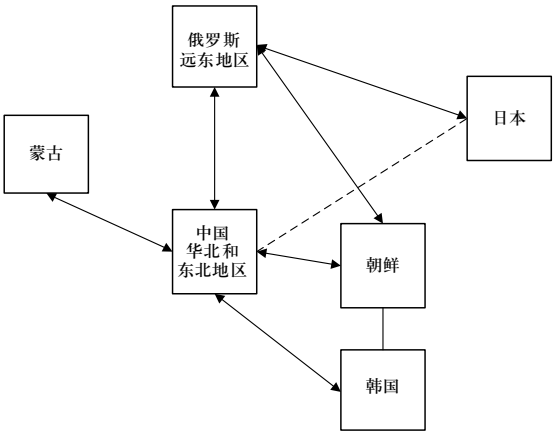


图 2 东北亚跨国电力交易构想图

Fig. 2 Demonstration of cross-border electricity trading in Northeast Asia

交易机构的4个peer节点全部安装和实例化市场主体注册、交易申报、交易出清和交易结算智能合约，监管机构的2个peer节点安装交易存证智能合约，其中peer0节点设为锚定节点（anchor peer），用于机构之间的合约计算集群建立分布式网络互联。为确保交易机构所有市场主体私密数据的安全性，将涉密数据配置为私有数据账本，其他机构不能访问。每个peer节点都有一个单独的couchdb记账数据库节点。排序节

点在交易机构和监管机构之间不分组织机构，体现了去中心化的特征。交易机构和监管机构建立各自独立的认证中心，负责部署在本机构的区块链集群节点、管理员和用户的角色认证和证书发布。

以上是中国场景的跨国电力交易存证区块链的简单实现方式。针对图2所示的东北亚跨国电力交易，至少存在6个这样的交易存证区块链，通过六国对等交易机构的锚定节点，建立东北亚跨国电力交易存证区块链整体网络。

采用go语言编写了5个智能合约，包括注册合约（register_cc）、申报合约（bid_cc）、出清合约（clearing_cc）、结算合约（settle_cc）和存证合约（audit_cc）。通过Node.js接口，编写了run.sh测试脚本，启动和初始化区块链网络，包括通道配置、证书生成、创建创世区块、创建身份、创建通道、加入通道、更新锚点、安装合约、实例化合约，以及test.sh合约接口测试脚本，包括批量写入市场主体注册信息、批量写入交易申报信息、批量写入交易出清信息、批量写入交易结算信息、存证验真、存证甄别、存证追溯等全流程测试。test.sh测试代码建立了中国华北地区电网公司、电力交易中心、发电企业、售电公司、电力用户、监管部门等500多个简化的市场主体，按照表1模拟日前市场的注册、申报、出清、结算等过程。

经过近两年的技术跟踪，测试内容还包括区块链版本升级（v1.0到v1.4.2）、证书管理、切换共识算法（kafka到raft）、节点宕机自愈能力等。在本地虚拟机环境下的测试结果表明，raft共识算法相对于kafka算法，性能大幅提升，全流程测试的时间分别为890 s和1930 s。采用缺省配置，raft共识算法每秒能记录8个存证，效率较慢。若采用实用拜占庭共识算法（practical Byzantine fault tolerance, PBFT），每秒能记录1000多个存证，基本满足实用性需要，但是v1.4.2目前不支持PBFT共识算法，已列入开发计划。测试节点发生宕机后，能够从其他节点自动获取历史区块，节点具备自愈能力，未发生存证数据丢失现象，实际存证可靠性为100%。增加节点的实例个数能够提高自愈能力，但是会降低共识效率。采用容器编排工具Kubernetes或Swarm，区块链网络能够实现自治，从而满足智能化要求。以上测试结果表明，改进共识算法以后，存证区块链能够满足吞吐高效、分布式计算、安全可靠和智能化等技术要求，可以为跨国电力交易存证提供一种解决方案。

4 结语

本文通过研究欧洲跨国电力市场交易,提出跨国电力交易业务的组织架构和交易存证的数据模型,提供了跨国电力交易存证区块链的一种设计方案,并完成了东北亚跨国电力交易场景的验证。针对跨国电力交易业务,设计存证区块链网络,将交易核心数据及其存证写入区块链账本,使得跨国电力交易市场主体间的资金流和能量流不可篡改且可追溯,具有重要的应用价值。本文目前只是技术验证,可以拓展到天然气等其他能源行业,但是不同能源行业的交易存证模型、组织架构不尽相同,需要开展针对性研究。目前Hyperledger Fabric 1.4.2尚不支持PBFT共识算法,现有的raft共识算法效率较低,需要改进并提出跨国电力交易专用的共识算法,以适应跨国电力交易实时性和并发性的高要求。

参考文献

- [1] 刘凡, 别朝红, 刘诗雨, 等. 能源互联网市场体系设计、交易机制和关键问题[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 108-117.
LIU Fan, BIE Zhaohong, LIU Shiyu, et al. Framework design, transaction mechanism and key issues of energy Internet market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 108-117(in Chinese).
- [2] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015: 57-64.
- [3] 刘振亚. 全球能源互联网跨国跨洲互联研究及展望[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5103-5110, 5391.
LIU Zhenya. Research of global clean energy resource and power grid interconnection[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5103-5110, 5391(in Chinese).
- [4] 孙伟卿, 田坤鹏, 谈一鸣, 等. 全球能源互联网关键技术与研究展望[J]. 自动化仪表, 2017, 38(1): 1-6.
SUN Weiqing, TIAN Kunpeng, TAN Yiming, et al. Key technologies and research prospects of global energy Internet[J]. Process Automation Instrumentation, 2017, 38(1): 1-6(in Chinese).
- [5] 曹阳, 丁涛, 侯云婷, 等. 全球能源互联网背景下跨国电力市场长期交易模式的设计与仿真[J]. 全球能源互联网, 2018(增刊1): 242-248.
CAO Yang, DING Tao, HOU Yunting, et al. Design and simulation for long-term transnational power transaction model in global energy interconnection[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018(Supplement1): 242-248(in Chinese).
- [6] 衡星辰, 董灿, 林克全, 等. 基于区块链技术的电力竞价交易研究[J/OL]. 计算机工程, <https://doi.org/10.19678/j.issn.1000-3428.0054838>.
HENG Xingchen, DONG Can, LIN Kequan, et al. Research on competitive price power transaction based on blockchain technique[J/OL]. Computer Engineering, <https://doi.org/10.19678/j.issn.1000-3428.0054838>.
- [7] 鲁静, 宋斌, 向万红, 等. 基于区块链的电力市场交易结算智能合约[J]. 计算机系统应用, 2017, 26(12): 43-50.
LU Jing, SONG Bin, XIANG Wanhong, et al. Smart contract for electricity transaction and charge settlement based on blockchain[J]. Computer Systems & Applications, 2017, 26(12): 43-50(in Chinese).
- [8] 欧阳旭, 朱向前, 叶伦, 等. 区块链技术在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(in Chinese).
- [9] 李彬, 曹望璋, 祁兵, 等. 区块链技术在电力辅助服务领域的应用综述[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 736-744.
LI Bin, CAO Wangzhang, QI Bing, et al. Overview of application of block chain technology in ancillary service market[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 736-744(in Chinese).
- [10] 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(in Chinese).
- [11] 吕诗宁, 颜拥, 丁麒, 等. 能源互联网中的区块链应用: 优势、场景与案例[J]. 浙江电力, 2017, 36(3): 1-4, 23.
LYU Shining, YAN Yong, DING Qi, et al. Application of blockchain in energy Internet: advantage, scenario and case[J]. Zhejiang Electric Power, 2017, 36(3): 1-4, 23(in Chinese).
- [12] 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/OL]. 中国电机工程学报, <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.181888>.
PING Jian, YAN Zheng, CHEN Sijie, et al. Credit risk management in distributed energy resource transactions based on blockchain[J/OL]. Proceedings of the CSEE, <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.181888>.
- [13] ALAM A, ISLAM M T, FERDOUS A. Towards blockchain-based electricity trading system and cyber resilient microgrids[C]//2019 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE), February 7-9, 2019. Cox's Bazar, Bangladesh. New York, USA: IEEE, 2019.
- [14] 李静或, 李兆森. 基于区块链存证的电子数据真实性探讨[J]. 软件, 2018, 39(6): 109-112.
LI Jingyu, LI Zhaosen. Research on authenticity of electronic data stored on blocks based on blockchain[J]. Computer Engineering & Software, 2018, 39(6): 109-112(in Chinese).
- [15] CHA S C, YE H K H. An ISO/IEC 15408-2 compliant security

- auditing system with blockchain technology[C]//2018 IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS), May 30-June 1, 2018. Beijing. New York, USA: IEEE, 2018.
- [16] KALIS R, BELLOUM A. Validating data integrity with blockchain[C]//2018 IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom), December 10-13, 2018. Nicosia. New York, USA: IEEE, 2018.
- [17] ABREU P W, APARICIO M, COSTA C J. Blockchain technology in the auditing environment[C]//2018 13th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), June 13-16, 2018. Caceres. New York, USA: IEEE, 2018.
- [18] ANTIPOVA T. Using blockchain technology for government auditing[C]//2018 13th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), June 13-16, 2018. Caceres. New York, USA: IEEE, 2018.
- [19] ASHLEY M J, JOHNSON M S. Establishing a secure, transparent, and autonomous Blockchain of custody for renewable energy credits and carbon credits[J]. IEEE Engineering Management Review, 2018, 46(4): 100-102.
- [20] 李竹, 庞博, 李国栋, 等. 欧洲统一电力市场建设及对中国电力市场模式的启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 2-9.
LI Zhu, PANG Bo, LI Guodong, et al. Development of unified European electricity market and its implications for China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 2-9(in Chinese).
- [21] 马莉, 范孟华, 郭磊, 等. 国外电力市场最新发展动向及其启示[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 1-9.
MA Li, FAN Menghua, GUO Lei, et al. Latest development trends of international electricity markets and their enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13):1-9.
- [22] 雷晓蒙, 刘舫, 周剑, 等. 欧盟国家统一电力市场化改革分析[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 431-439.
LEI Xiaomeng, LIU Fang, ZHOU Jian, et al. Analysis on the internal electricity market reform of EU countries[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 431-439(in Chinese).
- [23] 马莉, 范孟华. 欧盟的电力市场化改革历程[J]. 国家电网, 2014(5): 68-71.

收稿日期：2019-08-08；修回日期：2019-10-21。



陈爱林

作者简介：

陈爱林（1973），男，博士，研究员级高级工程师，主要研究方向为电力系统自动化。通信作者，E-mail: chenailin@epri.sgcc.com.cn。

田伟（1985），女，高级工程师，主要研究方向为电力系统自动化。

耿建（1971），男，博士，研究员级高级工程师，研究方向为电力市场、电力系统优化调度等。

（责任编辑 张宇）