

火电厂区块链能源交易平台设计与实现

陈江龙, 燕震宇, 刘家欣, 陈盼盼
国能山西河曲发电有限公司, 山西 忻州 036500
DOI:10.61369/UAID.2025040011

摘 要 : 随着我国电力系统规模持续扩大, 火电在能源结构中占据主导地位。传统火电交易体系面临煤炭供应链效率低下、碳排放数据管理风险高、交易结算周期长等多重挑战。区块链技术凭借去中心化、不可篡改及智能合约自动执行等特性, 为能源交易提供了创新解决方案。本研究设计并实现了面向火电厂的区块链能源交易平台, 采用分层架构整合数据层、网络层、共识层、合约层与应用层, 通过多链式存储、DAG-BLOCK架构及改进的PBFT共识算法, 实现交易数据的高效处理与安全存储。平台功能模块涵盖用户管理、交易管理、数据管理、智能合约及安全审计, 支持电力挂牌、竞价、撮合及实时结算全流程自动化。技术实现层面, 基于 Hyperledger Fabric 框架构建联盟链网络, 采用 Go 语言开发智能合约, 集成边缘计算与 Modbus 协议实现发电设备数据实时采集, 前端通过 Vue.js 构建可视化界面, 后端利用 Spring Boot 框架提供 API 服务, 确保系统高并发处理能力与低延迟响应。

关 键 词 : 区块链技术; 火电厂能源交易; 分层架构设计; 智能合约

Design and Implementation of Thermal Power Plant Blockchain Energy Trading Platform

Chen Jianglong, Yan Zhenyu, Liu Jiaxin, Chen Panpan
Guoteng Shanxi Hequ Power Generation Co., LTD. Xinzhou, Shanxi 036500

Abstract : With the continuous expansion of China's power system, thermal power plays a dominant role in the energy structure. The traditional thermal power trading system faces multiple challenges such as low efficiency of coal supply chain, high risk of carbon emission data management and long transaction settlement cycle. Blockchain technology provides innovative solutions for energy transactions with its decentralized, immutable and smart contract execution features. This study designs and implements a blockchain energy trading platform for thermal power plants. The layered architecture integrates data layer, network layer, consensus layer, contract layer and application layer, and realizes efficient processing and secure storage of transaction data through multi-chain storage, DAG-BLOCK architecture and improved PBFT consensus algorithm. The functional modules of the platform cover user management, transaction management, data management, smart contract and security audit, and support the automation of the whole process of power listing, bidding, matchmaking and real-time settlement. In terms of technical implementation, the alliance chain network is built on the Hyperledger Fabric framework. Smart contracts are developed using Go language, while edge computing and Modbus protocol integration enable real-time data collection from power generation equipment. The front-end utilizes Vue.js to create a visual interface, while the back-end leverages the Spring Boot framework to provide API services, ensuring high concurrent processing capabilities and low-latency responses.

Keywords : blockchain technology; thermal power plant energy trading; hierarchical architecture design; smart contract

引言

随着我国电力系统规模的持续扩张, 火电作为主要发电形式在能源结构中占据核心地位。全国规模以上工业企业火力发电量数据显示, 2020年至2022年间发电量分别达到53302.48亿千瓦时、58058.68亿千瓦时和58887.95亿千瓦时, 发电装机容量同步增长至2022年的133527万千瓦。这一增长趋势在2024年预计达到63437.7亿千瓦时发电量与144445万千瓦装机容量^[1]。传统火电交易体系面临多重挑战: 煤炭供应链存在运输效率低下、信息孤岛等问题, 导致发电成本难以精准控制; 碳排放数据管理存在人为干预风险, 难以满足碳交易市场对数据真实性的要求。区块链技术凭借其去中心化特性与不可篡改的分布式账本优势, 为能源交易提供了革新路径。通过智能网关直接采集发电设备运行数据并上链, 可有效避免数据在传输过程中出现篡改风险, 解决现有业务系统与区块链间存在的“真空期”问题。其构建的双链结构能够实现碳排放数据全流程溯源, 确保关键指标的保真度。

一、火电厂区块链能源交易平台设计

（一）平台架构设计

火电厂区块链能源交易平台采用分层架构设计，整体包含数据层、网络层、共识层、合约层和应用层五个核心层级。数据层作为平台的基础，采用多链式架构实现数据分片存储与分布式记账功能，通过区块链的防篡改特性保障交易数据的完整性和可追溯性。该层结合 DAG-BLOCK 架构中的有向无环图结构，将交易数据以开放区块形式进行组织，替代传统 Merkel 树结构，显著提升数据处理效率与扩展性。同时，基于双链区块链架构的双链结构设计，将核心交易信息与辅助数据分别存储于主链和次链中，既保证关键数据的权威性，又实现多虚拟电厂（VPP）电力共享的灵活管理。

网络层构建了支持跨区域节点接入的分布式通信网络，采用主从式分层交互控制架构实现多节点协同。该层引入 DAG-BLOCK 架构中的细分市场结构，将矿工节点按服务区域划分为多个子网络，通过动态路由机制分配交易验证任务，有效降低网络拥堵风险^[9]。在节点间通信过程中，采用物联网数据交易架构的安全方法，通过非对称加密与数字签名技术保障传输数据的机密性和真实性。此外，网络层支持虚拟电厂主从多链交易匹配机制，确保不同层级节点在交易过程中形成对等交互的可信环境。

（二）功能模块设计

本平台功能模块设计以区块链技术为核心，结合电力交易业务场景构建模块化架构，实现去中心化、可信、高效的能源交易支持体系。系统架构包含用户管理、交易管理、数据管理、智能合约、安全审计五大核心模块，各模块间通过标准化接口协同运作，形成完整的业务闭环。在用户管理模块中，采用基于非对称加密的身份认证机制，通过智能合约实现用户权限的动态分级管理，确保交易主体的合法性及操作范围的可控性。该模块支持电厂、售电公司、用户等多类型主体的注册与资质核验，利用零知识证明技术保护用户隐私数据^[9]。交易管理模块包含挂牌、竞价、撮合、结算全流程功能，通过智能合约自动执行交易规则，实现点对点的即时结算。系统采用改进的撮合算法，在保证交易公平性的同时提升撮合效率，支持绿电交易等特定市场场景需求。数据管理模块采用分布式存储结构，通过哈希加密和时间戳技术确保交易数据的不可篡改性，同时建立多级索引机制实现高效的数据检索。为满足监管要求，模块提供标准化 API 接口支持第三方审计查询，并通过跨链技术实现与电力市场运营系统的数据交互。

二、平台实现与测试

（一）平台实现步骤

本研究的平台实现采用模块化开发策略，遵循分阶段迭代的实施路径。首先进行环境部署，基于 Hyperledger Fabric 框架构建联盟链网络，配置四台虚拟机作为核心节点，其中包含一个排序服务节点、两个锚定节点和一个背书节点。采用 Docker 容器技

术实现节点的快速部署，并通过 CouchDB 作为状态数据库，建立区块链与传统数据库的交互通道。在代码开发阶段，使用 Go 语言编写智能合约核心模块，定义能源交易数据结构、交易验证规则及结算逻辑，特别针对火电厂的发电量记录、购电方需求申报、结算周期划分等业务场景设计了专用接口。智能合约包含能量计量校验函数、交易哈希生成算法以及基于时间戳的结算触发机制，通过链码单元测试验证了交易冲突检测、电量配额控制等关键功能的正确性。

系统架构分为数据采集层、区块链层和应用层三部分。数据采集层部署边缘计算节点，通过 Modbus 协议接入火电厂 SCADA 系统，实时获取发电机组的输出功率、机组状态和环境参数，利用 Python 开发数据预处理模块实现异常值过滤和数据标准化。区块链层采用分层式节点架构，核心节点运行 PBFT 共识算法，外围接入节点通过 gRPC 接口与核心网络通信^[9]。应用层采用微服务架构设计，前后端分离开发：前端使用 Vue.js 构建可视化操作界面，包含交易记录查询、合约部署监控和能效分析模块；后端基于 Spring Boot 框架实现 API 网关，通过 RESTful 接口连接区块链节点与 MySQL 数据库，支持交易数据的多维度统计分析。

（二）平台测试与优化

为验证火电厂区块链能源交易平台的功能完整性与系统性能，本研究构建了多维度测试体系，通过功能验证、性能评估与迭代优化形成闭环改进机制。功能测试阶段采用黑盒测试方法，重点验证交易发起、智能合约执行、结算流程及数据上链等核心模块的协同性。针对能源交易场景，设计了包含 30 个标准用例的测试集，涵盖正常交易、异常中断、合约撤销等典型业务场景。测试结果显示，系统在标准负载下交易确认成功率达 99.8%^[9]，智能合约执行逻辑与业务规则匹配度达到 100%，数据上链一致性通过哈希值比对验证，表明系统功能模块能够满足实际运行需求。

性能测试采用分布式压力测试工具模拟多节点并发交易场景，重点评估系统吞吐量、延迟响应及网络负载能力。在 50 个模拟节点环境下，平台最大处理能力达到 1200 TPS，平均交易确认延迟控制在 2.3 秒以内，网络传输效率达到预期设计目标。通过监控系统资源占用发现，当并发请求数超过 800 时，节点 CPU 使用率出现显著波动，这提示需要对共识机制与数据分片策略进行优化。为提升系统稳定性，本研究引入动态资源分配算法，根据实时负载调整节点参与度，优化后在峰值负载下 CPU 利用率波动幅度降低 42%，内存泄漏问题得到有效控制。

三、研究结果与分析

（一）平台运行效果

本研究通过为期六个月的平台试运行及数据采集，系统评估了区块链能源交易平台的实际应用效果。在交易规模方面，平台上线后累计完成能源交易量达 1.2 亿千瓦时，季度环比增长率达 45%，其中电力直接交易占比从传统模式的 32% 提升至 68%（图 3-1）。参与主体数量从初始的 17 家发电企业、9 家售电公司扩展至涵盖 28 家发电企业、15 家售电公司及 7 家第三方机构的多元

化市场生态，平台用户活跃度达到92%的日均登录率。在交易效率维度，基于智能合约的自动撮合机制将传统能源交易的平均处理时间从4.2小时压缩至8分钟，交易确认延迟降低至3秒以内，交易失败率由12%降至1.8%^[6]。系统吞吐量实测达到每秒处理28笔交易，满足省级电网的高频交易需求，TPS峰值达设计目标的115%。

安全性指标方面，采用零知识证明技术实现了交易数据的隐私保护，经渗透测试验证平台抵御常见网络攻击的成功率达99.7%。区块链账本累计记录交易数据28,650条，未发生数据篡改事件，哈希碰撞概率低于 10^{-32} 。在经济性分析中，通过去除中间代理环节使交易成本降低22%，其中发电企业单笔交易手续费从传统模式的0.8%降至0.3%，售电公司结算周期从7天缩短至实时清算。平台智能合约执行准确率经第三方审计达99.9%，能源计量误差控制在 $\pm 0.5\%$ 的行业标准以内^[7]。

（二）平台应用价值分析

本研究设计的区块链能源交易平台通过技术创新和架构优化，在火电厂能源交易场景中展现了显著的应用价值。首先，在交易成本方面，平台采用智能合约技术实现交易自动化执行，有效减少了传统能源交易中人工审核、纸质合同签署以及中间商协调等环节的开支。实验数据显示，基于区块链的自动结算机制使单笔交易成本降低约18%–25%，尤其在高频次、小批量的能源交易场景中优势更为突出。平台通过预设的算法模型实现供需匹配与价格协商，进一步降低了火电厂参与市场的边际成本，为发电企业提供更灵活的运营策略空间。

平台在提升交易透明度方面具有突破性作用。分布式账本技术确保所有交易数据实时同步至网络节点，交易方、监管机构及第三方审计机构可同步访问不可篡改的交易记录。这种全链路透明化特性有效遏制了暗箱操作和数据篡改风险，研究案例表明平台运行后合同纠纷发生率下降40%以上。区块链的时间戳功能为每一笔交易建立了精确的溯源路径，当发生电量计量争议时，可快速定位问题环节并追溯原始数据，显著提高了争议解决效率。

四、结论

本研究针对传统火电厂能源交易中存在的信息不透明、结算效率低下及信任成本高等问题，基于区块链技术构建了面向火电厂的能源交易平台。通过系统设计与工程实践，平台在技术架构、功能实现及应用验证等方面取得了显著成果。首先，平台采用分层架构设计，整合了智能合约、分布式账本和隐私保护等核心技术，构建了支持多节点协同的能源交易网络。通过Hyperledger Fabric框架的模块化设计，实现了交易撮合、合约执行、结算审计等核心功能的链上自动化处理，有效解决了传统中心化平台的数据篡改风险和人工干预问题^[8]。特别是在智能合约层面，开发了基于负载预测的动态定价算法，结合火电厂发电曲线与市场供需数据，实现了能源交易价格的实时动态调整，显著提升了市场响应效率。

参考文献

- [1] 文亚凤, 汪鹏, 孙毅, 虞思城, 李凌雁. 具有双链结构的火电厂碳排放数据保真区块链架构 [J]. 安徽大学学报 (自然科学版), 2023, 47 (04): 42–48.
- [2] 张莉, 李国朋, 曾阳. 区块链技术在火电厂能耗数据管理中的应用 [J]. 自动化应用, 2024, 65 (10): 50–52.
- [3] 于运涛, 张大松, 姜洪朝, 吴文. 基于区块链的网络安全系统关键数据存储处理系统设计 [J]. 电子技术应用, 2023, 49 (04): 78–82.
- [4] 郑志远. 基于区块链技术的分布式能源交易模式研究 [D]. 重庆理工大学, 2025.
- [5] 张子昊, 叶萌, 潘世贤, 马力, 包涛, 于琪. 基于区块链的分布式合同电量转让 [J]. 计算机与现代化, 2025, (02): 13–18.
- [6] 王帝, 艾芊, 余涛, 左娟, 鲁意, 李嘉媚. 虚拟电厂可信交易的技术难点与解决方案 [J]. 电力系统自动化, 1–18.
- [7] 刘甲林, 高琳, 李静. 基于区块链的虚拟电厂交易安全优化调度研究 [J]. 信息记录材料, 2024, 25 (08): 213–216.
- [8] 张硕, 肖阳明, 李英姿, 张家源, 徐振皓, 曾鸣. 新型电力系统电-碳-绿证市场协同运行的区块链关键技术 [J]. 电力建设, 2023, 44 (11): 1–12.