电力系统自动化中区块链技术在分布式能源交易结算中的应用研究

张玉红

河南军明电力工程有限公司，河南省新乡市，453000；

摘要：随着全球能源结构的转型和分布式能源的快速发展，电力系统正面临前所未有的挑战与机遇。传统的能源交易结算方式在效率、透明度和安全性方面逐渐显现出不足，尤其是在分布式能源大规模接入的背景下，如何实现高效、可信的交易结算成为亟待解决的问题。区块链技术凭借其去中心化、不可篡改和智能合约等特性，为这一领域的创新提供了全新的解决方案。通过将区块链技术引入电力系统自动化，不仅可以优化分布式能源的交易流程，还能够提升系统的整体可靠性和经济性，为未来能源互联网的建设奠定坚实基础。

关键词：电力系统自动化；区块链技术；分布式能源；交易结算；应用研究

DOI：10.64216/3080-1508.25.08.025

引言

随着信息技术的飞速发展，电力系统自动化正逐步向智能化、数字化方向演进。在这一进程中，分布式能源的广泛接入对传统电力系统的运行模式提出了新的要求。如何在保障交易安全性和透明度的同时，提升结算效率并降低运营成本，成为行业关注的焦点。区块链技术的出现为解决这些问题提供了全新的思路，其独特的技术特性与电力系统自动化的实际需求高度契合，为构建更加高效和可信的能源交易体系创造了可能。

1 电力系统自动化中区块链技术

1.1 区块链技术的核心特性与电力系统自动化的适配性

区块链技术的核心特性并非孤立存在，而是与电力系统自动化的运行需求形成深度耦合。去中心化特性打破了传统电力系统中依赖单一调度中心或结算机构的架构桎梏，通过分布式节点（如变电站、分布式能源用户终端、电网调控节点）共同参与数据验证与账本维护，可避免中心化节点故障导致的整个交易结算系统瘫痪，这与电力系统自动化追求“多源协同、韧性运行”的目标高度一致。不可篡改特性则依托哈希算法与链式存储结构实现——每笔交易数据均会生成唯一的哈希值，并与前一区块的哈希值关联，任何节点对数据的篡改都需重构后续所有区块的哈希值，且需获得超过 51%节点的认可，这恰好适配电力系统自动化对交易数据“不可伪造、可追溯”的要求，尤其在分布式能源交易中，可有效防止发电数据、用电数据的篡改导致的结算纠纷。

1.2 电力系统自动化场景下区块链的技术架构设计

电力系统自动化场景下的区块链技术架构，需在通用架构基础上结合电力系统实时性、安全性与专业性需求优化设计。数据层作为基础，要兼容电力系统多源数据格式，如发电功率、用电负荷、电网运行状态数据等，用加密算法加密存储数据，采用轻量化压缩技术避免账本膨胀，确保数据传输与存储安全。网络层要与电力现有通信网络融合，构建“骨干网+边缘节点”混合网络结构，骨干网节点由核心主体部署，处理关键结算数据与全局账本同步，边缘节点部署在终端，采集交易数据并初步验证，减少传输延迟，适配“近实时结算”需求。共识层是核心，摒弃 PoW 机制，采用适配电力场景的算法，如 PBFT 算法通过可信节点快速共识，或 dBFT 算法结合资质审核，提升共识效率。合约层要开发电力专用智能合约模板，针对不同交易场景设计差异化逻辑，内置相关功能，与计量、调度系统交互，确保准确执行。应用层要开发面向不同主体的终端应用，实现交易发起等功能，与自动化平台无缝衔接，提升操作便捷性。

1.3 区块链技术在电力系统自动化中的核心价值维度

区块链技术在电力系统自动化中的核心价值，并非“技术替代”，而是从数据可信、流程协同、系统韧性三个维度，为其升级提供新支撑。在数据可信维度，电力系统自动化运行依赖海量实时数据准确性，传统数据传输与存储模式易使数据失真或被篡改，如分布式能源用户发电数据传输时可能偏差。区块链技术通过分布式

账本与不可篡改特性，将电力数据实时同步至所有节点，每个节点有完整副本，数据上链无法修改，为数据采集、分析与决策提供“可信数据底座”，确保自动化调控与交易结算准确。在流程协同维度，电力系统自动化涉及多主体、多环节协同运作，传统模式下各主体信息交互依赖中心化平台，存在信息壁垒与协同延迟，如分布式能源交易结算多环节衔接易损耗效率。区块链技术采用去中心化协同架构，各主体直接参与数据验证与流程执行，无需第三方中介，通过智能合约自动化执行协同规则，如余电上网电量达约定值可自动触发流程，大幅提升多环节协同效率，在分布式能源交易结算场景中更显著。在系统韧性维度，电力系统自动化对系统抗故障能力要求高，传统中心化架构核心节点故障会严重影响系统运行。区块链技术的去中心化架构无单一故障点，部分节点故障不影响其他节点运行及账本完整性，确保交易结算流程不中断。

2 分布式能源交易结算的问题

2.1 传统中心化结算架构下的信任壁垒与效率瓶颈

传统分布式能源交易结算采用“中心化机构主导”架构，以电网公司或交易中心为核心中介，负责数据汇总、规则执行与资金清算。这种架构下，信任关系依赖中心化机构公信力，形成信任壁垒，分布式能源用户无法自主验证交易数据真实性，出现数据偏差或结算纠纷时缺乏维权途径，限制了用户参与积极性。同时，中心化机构处理海量交易数据依赖人工或半自动化，流程繁琐耗时，如余电上网交易结算周期需 1-2 个月，无法满足“实时结算”需求，效率瓶颈明显。而且，随着分布式能源渗透率提升、交易规模扩大，中心化机构需不断投入资源升级系统，导致结算成本攀升，可能转嫁给用户，降低交易经济性。

2.2 交易数据确权与追溯机制的缺失

分布式能源交易结算核心依据是交易数据（含发电、用电、交易价格、电量核对数据等），但当前电力系统缺乏完善的交易数据确权与追溯机制，制约结算公平性。在数据确权上，分布式能源交易数据产生涉及多主体，如发电设备生成发电数据、智能电表采集用电数据、交易平台记录交易价格数据，但现有机制未明确数据所有权归属。例如用户发电数据被电网公司采集用于交易结算等，用户是否有使用权与收益权、数据篡改致结算误差时责任主体如何界定等问题模糊，这使分布式能源用户权益受损时难维权，也降低其对交易数据的信任度。

在数据追溯方面，传统电力系统数据存储采用“分散式+层级化”模式，发电、用电、交易数据分别存储于用户端设备、电网公司数据库、交易中心服务器，各主体数据存储系统独立，缺乏统一追溯路径。出现结算纠纷时，需从多系统调取数据核对，流程繁琐、耗时久，还可能因数据格式、存储时间不一致致追溯失败。而且传统数据存储系统缺乏防篡改机制，数据传输与存储中可能被篡改且难发现追溯，加剧结算纠纷处理难度。

2.3 多主体参与下的结算规则适配性不足

分布式能源交易结算参与主体多元化，涵盖分布式发电用户、负荷用户等，不同主体交易需求、风险偏好、操作能力差异显著，使传统集中式能源交易结算规则在分布式能源场景适配性不足。从交易类型看，分布式能源交易有 P2P 直购电、余电上网等多种模式，不同模式交易流程、电量计量和价格形成机制有别，如 P2P 直购电自主协商价格，余电上网按标杆电价结算，但传统规则“一刀切”，未制定差异化结算流程与费用计算方式，致使部分交易模式结算复杂、成本高，难以推广。从交易特性看，分布式能源交易“小额、高频、碎片化”，如个人光伏用户余电上网电量少、金额低且每日结算，而传统规则针对集中式能源交易设计，结算需人工审核，小额高频交易单位成本大幅上升，丧失经济性。

3 电力系统自动化中区块链技术在分布式能源交易结算中的应用研究

3.1 基于区块链智能合约的交易结算规则自动化执行

区块链智能合约为分布式能源交易结算规则自动化执行提供技术载体，核心是将结算规则从“人工解读执行”转为“代码自动执行”，实现去人工化与高效化。在电力系统自动化场景下，智能合约设计需结合交易规则，先经需求分析明确结算规则核心要素，如电量计量标准、电价计算方式、资金清算时限、违约赔付条款等，再将要素转化为代码，形成标准化模板。

合约部署时，将其上传至区块链网络，与实时计量系统、资金清算系统对接，确保数据实时获取、资金自动划转。交易发生时，智能合约实时监测触发条件，如发电电量达约定值、双方确认交易完成，条件满足则自动执行结算流程：调取实时数据核算金额，验证账户状态，确认资金充足后完成清算，划转款项，生成结算凭证并上链存储，通知交易双方。这种自动化模式避免传

统结算人工操作的效率损耗，将结算周期从 1-2 个月缩短至小时级甚至分钟级，消除人工误差，确保结果准确。同时，智能合约不可篡改，避免规则解释纠纷，保障交易公平。

3.2 区块链去中心化架构对交易结算信任机制的重构

区块链的去中心化架构打破传统分布式能源交易结算对中心化机构的信任依赖，以“多节点共同验证”机制重构信任关系，实现“信任从机构向技术”的转移。在电力系统自动化场景下，分布式能源交易结算各参与主体（发电用户、负荷用户等）作为节点接入区块链网络，各节点有完整交易账本副本，无单一核心信任节点。

交易发起时，交易数据（发电电量等）实时同步至所有节点，各节点按预设规则（核对发电数据等）独立验证。超预设比例（如 2/3 以上）节点验证通过，交易才记录到区块链账本，形成不可篡改记录。结算时，各节点可查阅交易数据与结算凭证，自主验证结果，无需依赖中心化机构“单向告知”。例如，发电用户可查用电数据等确认结算金额；电网企业可查实时数据确保交易符合要求；监管机构可实时监管，发现违规行为。这种去中心化信任机制，降低了信任成本，无需为中心化机构公信力支付额外费用，还提升了信任可靠性。传统中心化机构有信用风险，而区块链信任基于数学算法与分布式架构，只要超半数节点正常运行且遵循规则，信任机制就有效。

3.3 区块链时间戳与哈希算法在交易数据追溯与确权中的应用

数据追溯方面，时间戳为每笔上链的分布式能源交易数据（含发电、用电数据等）打唯一时间标记，基于区块链统一时间基准且无法篡改伪造。哈希算法对交易数据加密生成唯一、不可逆的哈希值，数据改动哈希值显著变化且无法反推原始数据。区块链账本中，每个区块含当前交易数据、哈希值、时间戳及前一区块哈希值，形成链式存储。追溯时，用户可通过交易编号或时间戳定位区块，验证哈希值确认数据是否篡改。所有节点持完整账本副本，受损可恢复确保追溯完整。如交易结算纠纷时，双方可通过平台调取数据验证真实性与完整性，为纠纷处理提供依据。

数据确权方面，区块链按“谁生成、谁上链、谁拥有初始权益”原则明确数据所有权。发电数据生成后，用户终端节点签名认证再上传，时间戳与数字签名作所有权证明，避免权属纠纷。同时，支持数据使用权授权管理，用户通过智能合约授权特定主体，明确期限与范围，授权记录上链确保使用可追溯。这种确权机制保护用户数据权益，为数据共享应用提供规范路径，促进电力系统自动化数据价值最大化利用。

3.4 区块链跨节点数据同步在多主体结算协同中的实现

分布式能源交易结算需多主体协同操作，传统模式因信息不对称和数据不同步，协同效率低下。区块链跨节点数据同步技术，以“实时共享、共同维护”账本机制，实现多主体结算数据无缝协同，打破信息壁垒。在电力系统自动化场景下，区块链网络中各参与主体（发电用户、负荷用户、售电公司、电网企业、银行）为独立节点，通过 P2P 网络协议建连，形成去中心化通信网络。当某节点发起交易或更新结算数据（如发电用户传发电数据、银行完成清算），会打包数据成交易提案广播至全网。其他节点接收到提案后，按预设规则（如验证发电数据真实性、核对交易价格合规性）验证，验证通过则记录至本地账本并继续广播，不通过则拒绝记录并反馈原因。通过“广播-验证-记录”流程，交易数据短时间（几秒至几十秒）同步至所有节点，确保各主体账本数据一致，实现“数据一次生成，多节点共享”。如分布式能源用户余电上网交易完成后，发电数据、交易价格、结算金额等信息实时同步至电网企业、银行、监管等节点，各节点无需等中心化机构转发数据，即可同步开展后续操作，大幅缩短协同周期。

4 结语

区块链技术在分布式能源交易结算中的应用具有广阔的前景。未来，随着技术的不断成熟和市场的逐步成熟，区块链技术有望成为推动电力系统自动化发展的重要力量。我们应进一步加强对区块链技术的研究和应用，为我国能源市场的发展贡献力量。

参考文献

[1]张晓光.基于区块链的分布式能源交易模式研究[J].电网技术，2024，43（10）：24-29.
[2]刘畅.区块链技术在分布式能源交易中的应用探讨[J].电力系统自动化，2024，42（5）：1-6.
[3]陈晨.区块链技术在能源交易中的应用研究[J].电网技术，2024，42（12）：1-5