

电力现货市场调度交易若干关键技术探究

张浩^{1,2},何东昊³,王国权³

(1. 国网河南省电力公司 电力科学研究院,郑州 450006;2. 郑州龙华机电工程有限公司,郑州 450001;3. 河南百硕数字科技有限公司,郑州 450052)

摘要:我国正加速推进电力现货市场构建,各试点区域结合现行规则与电力系统实际运行条件,已初步建成适配现阶段需求的
市场运行支持平台,为电力交易市场长期稳定运行奠定良好基础。伴随国家碳中和、碳达峰目标提出及能源结构体系改革不断
深化,高比例新能源接入已经成为电力调度日常,现有技术支撑体系已无法适配未来市场发展需求。结合国内外研究经验及具
体实践,重点针对高比例新能源接入背景下的新型电力系统电力交易市场相关特征与实际困境,从体系模型构建、出清策略、风
险分析、交易机制选择、模拟仿真等多方面开展研究,确定关键技术特点和路线,相当比例技术已被实际证实其合理性和有效
性,可为高比例新能源场景下电力现货市场安全高效运行提供支撑。

关键词:电力交易;调度策略;市场出清;网络风险;区块链

Research on several key technologies of dispatch and transaction in electricity spot market

ZHANG Hao^{1,2}, HE Donghao³, WANG Guoquan³

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450006, China;
2. Zhengzhou Longhua Electromechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China;3. Henan Baishuo
Digital Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450052, China)

Abstract: China's power spot market construction has been accelerated, with market operation support platforms preliminarily established
in pilot regions. These platforms have been tailored to current needs by integrating existing regulations with the actual operational conditions
of the power system, thereby laying a solid foundation for the long-term stable operation of the power trading market. As the national dual-car
bon strategy deepens, the integration of high-proportion renewable energy has become a routine aspect of power dispatching, rendering exist
ing technical support systems inadequate to meet future market development demands. Drawing on domestic and international research expe
riences and practical applications, the characteristics and operational challenges of the power trading market under high-proportion renew
able energy integration have been thoroughly investigated. Comprehensive evaluations have been conducted across multiple aspects—incl
uding system model construction, clearing strategies, risk analysis, trading mechanism selection, and simulation—to identify key technical fe
atures and development pathways. Certain technical approaches have already been proven reliable through practical implementation, provid
ing crucial support for the safe and efficient operation of the power spot market under high-proportion renewable energy scenarios.

Key words: electricity trading; dispatch strategy; market clearing; network risk; blockchain

0 引言

电力交易目前以实时电价为基础,针对日前、日内、实时等时间尺度实现电力资源合理有效配置与优化调度,已成为新型电力市场建设的核心和重点任务。

截至2026年,国内新能源并网装机占比已经突破40%。当前国内多个现货试点已出现新能源消纳

压力上升、现货市场尖峰价格频发等运行问题,现有现货运行技术适应性不足的问题逐步暴露。本文总结国内现货市场建设经验,剖析新型电力系统下的市场运行特点与技术难点,明确核心技术问题的解决方向,以支撑高比例新能源场景下现货市场安全高效运行。

1 电力现货市场交易发展现状

国内区域差异显著,各地市场规则不一,各区域均结合自身实际开展技术探索。甘肃搭建支持

收稿日期:2026-05-08;修回日期:2026-07-04

基金项目:国家电网有限公司科技项目(521700250014-153-ZN);河南省电力公司科技项目(52170225000M)

新能源参与电力交易日内报价与当日出清的技术路线,结合调频与调峰市场联动建设以及不同省份间的现货交易协同,有力保证了本省新能源高比例消纳条件下的合理消纳^[1]。浙江现货交易布局实时发电与备用能源出清联动机制,积极有效提升现货能源的实时出清,调节时间限定到5 min之内^[2]。河南现货市场结合能源交易主体的实际情况,提出分时段阶梯化报价的电力交易模型,实现深度调峰下交易出清^[3]。湖北现货市场给出了联络线建模与计划按阶段分解的联合处置方案,在实时调节下保证交易安全和电网安全可靠^[4]。新型电力系统中新能源比例持续提升,电力现货市场运行特点将发生变化,市场运营技术面临新挑战。

2 电力现货市场发展新特征

电力现货交易在新型电力系统背景下面临高比例新能源接入、聚合能源多交易主体、电网结构优化与无功功率调节等新问题,市场在推动交易机制优化、调度风险管控和现货平衡等面临新特征。

2.1 能源结构异质化

伴随“双碳”目标持续推进,能源交易主体积极参与清洁低碳高效能源体系,推动传统以化石能源为主的能源总量占比不断下降,并不断推进产能转化、利用效率提升以及自主可控能源体系建设,深化电力能源交易体制改革^[5]。电力交易目标已经从关注资源优化逐步转向清洁能源替代、保障电网结构安全方向发展,相关工作围绕源网协同发展、调度与交易机制优化展开,重点关注清洁能源并网消纳,持续增强系统调节能力,改进电网调度运行,依托市场机制扩大消纳空间^[6]。

2.2 市场主体多元化

清洁能源接入电力交易体系后,不断推动多品种聚合交易主体参与,电力市场交易的目标已经过渡到平衡发展与现货实时出清,改变以往的发电侧单一化竞争。在发电侧,风电、光伏等新能源机组装机占比持续提升,逐步成为电力电量核心供应方。火电、储能及其他灵活调节资源,主要承担系统调节功能。需求侧参与主体类型多元化,各类新型负荷入市后,行为灵活性显著提升,既扩大了市场规模,也抬高了交易与运行的复杂程度。

2.3 交易品种多样化

多元主体不断参与交易,电力交易调节机制在新型能源体系下平衡发展。除实时交易、日前交易模型外,日内交易市场已经成为平衡当日能源现货

波动、出力平衡以及应急调度的重要手段。针对高比例新能源接入下的系统惯量不足问题,市场结合多主体交易特性形成联动机制与一体化调节,传统能源参与调峰调频交易,利用其稳定调节的优势参与交易,同时推出快速调节模型满足现货市场需求^[7]。下一步结合交易现状,市场将不断探索绿电交易、输电权益路径优化等,结合现货容量实际交易价值、环境评估影响以及输电权益,支撑电网结构优化与能源“双碳”转型。

2.4 市场体系层级化

我国由于经济发展和地缘环境的不平衡,能源资源分布差异化大,同时大规模新能源接入造成电网支撑惯量不足。在新能源占比较高的省际,仅依靠本地传统能源调峰调频能力无法保证能源现货消纳与安全稳定运行,电网结构面临巨大风险挑战,需依托省间、跨区输电通道输送能力,打破省级现货市场运行边界,扩大市场覆盖范围,实现新能源大规模消纳与备用资源共享。

3 电力现货交易技术实际困惑

3.1 大规模聚合能源市场主体接入难题

电力交易市场参与主体不断衍生迭代,其核心是负荷侧用户、新能源场站占比大幅提升^[8]。这要求电力交易需同时兼顾负荷侧用电需求的实时波动以及发电侧出力的不确定性。参与现货市场的负荷侧主体类型多元、异质性强,不同主体运行特征差异显著,角色转换灵活,行为模式与运行规律难以精准把握^[9]。复杂运行环境下,结合实时调度交易模型等技术手段准确描述和定义多类型聚合能源主体的实时响应曲线、物理运行逻辑是目前电力市场交易调节的核心技术难题。

以风电、光伏为代表的新能源装机比例不断提升,传统化石能源空间不断压缩逐渐成为新型电力系统交易的常态,这些都直接对传统电网结构和调度优化提出了新课题,也对实时功率预判和准确评估带来了极大挑战。为保证实时准确交易,将源侧多类型交易主体全部纳入市场参与交易,满足不同调节能力和资源合理分配,保证交易市场发电实时出清平衡,提升电网适应能力和调节性能,是目前现货交易的技术发展方向。

3.2 多交易品种、多元市场主体联合出清难题

现货市场参与交易的品种不断提升,除电能、调频和备用等核心品种外,快速爬坡和惯量支撑等新型品种逐步引入。各交易品种间存在紧密

物理耦合,需要多品种协调运作才能实现系统整体最优。但多品种联合出清会带来大量新增变量与约束条件,大幅抬高出清模型复杂度。平抑新能源波动性和不确定性影响,需进一步缩短日内交易周期,拉长日前市场时间覆盖范围,提升系统运行灵活性与可预测性^[10]。当前基于安全约束机组组合、安全约束经济调度的现货市场出清模型,需兼顾各类复杂约束,在超高维度计算空间内完成优化求解,收敛性面临极大考验。

3.3 多级调度机制中多级市场协调运作难题

现有技术与政策环境下,构建统一电力市场需经过调度规划,即可靠性机组组合阶段,覆盖现货市场出清到最终实施全流程,兼顾电网物理运行限制与实时工况,保障电网安全稳定^[11]。实时市场出清结果先传入实时调度规划环节,经安全校验后形成可执行实时计划,下达至自动发电控制(automatic generation control, AGC)环节执行。流程中任意环节故障,都可能危及电网安全稳定。市场机制与电网安全的协调配合,是需解决的核心问题。

3.4 复杂市场形态下市场风险识别难题

新型电力系统特征逐步凸显,电网安全风险,以及电网、市场、社会深度互动带来的市场运行风险持续加剧。新能源装机占比不断提高、终端用能电气化提速、设备检修、跨省联络线规划等因素对市场的影响不断加深,发用两侧运行性能下降,不确定性显著提升,市场边界条件波动加剧,直接抬高市场运作难度与风险。

4 现货市场运营关键技术

聚合能源主体参与市场资源调节的关键要点如图1所示,由于客观条件限制,当前全国电力现货交易无法实现全国统一报价及调度,所有交易主体无法实现同等条件参与,在区域协同方面仍存在诸多困难和不确定性。在现行体制和交易规则下,需要不断提升省级现货交易与省间现货交易的实时调节能力,推动两个市场有效衔接和良好互动。随着新能源大规模并网参与市场调节消纳,电网对实时能源资源灵活调度的要求不断提升,亟须挖掘负荷侧的柔性资源使其占比不断提高,实现源网荷储资源有效调度。基于以上因素,需不断研究交易出清模型、资源调度协调管控、网络风险防范、可信交易与验证机制等核心关键问题,为构建新型电力系统背景下的交易调节机制奠定基础。

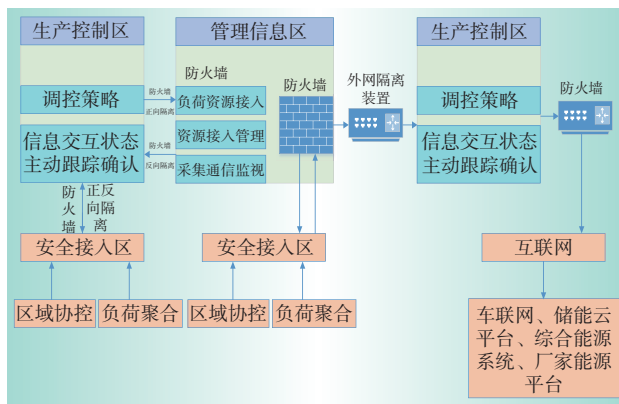


图1 聚合能源主体参与市场资源调节的关键要点

Fig. 1 Key points of aggregated energy entities participating in market resource regulation

4.1 低压侧市场资源自动汇聚建模技术

为适配大量位置分散、规模偏小、属性差异化大的市场主体接入现货市场的需求,在技术层面需要攻克信息聚合、智能负荷全域建模等核心问题。在当前现行监管网络环境下,不同来源、不同性质的聚合能源参与省级电力市场交易仍存在较大的不确定性,结合以往研究成果需设计面向工程实践的负荷侧多类型能源接入聚合差异化模型及实时调度策略,指导具体执行。

4.1.1 低压侧资源信息交互技术

低压侧资源由于条件限制,可采用满足自身信息交换与数据融合的方式参与市场调节,其接入架构如图2所示。低压侧资源通过数据采集平台将数据上传,在网络传输时利用防火墙设置逻辑策略,保证加密传输、身份认证以及网络服务的安全性和不可抵赖性,采用横向隔离、纵向认证的机制有效实现数据内外网隔离,保证公网访问实现全程可靠及可追溯。

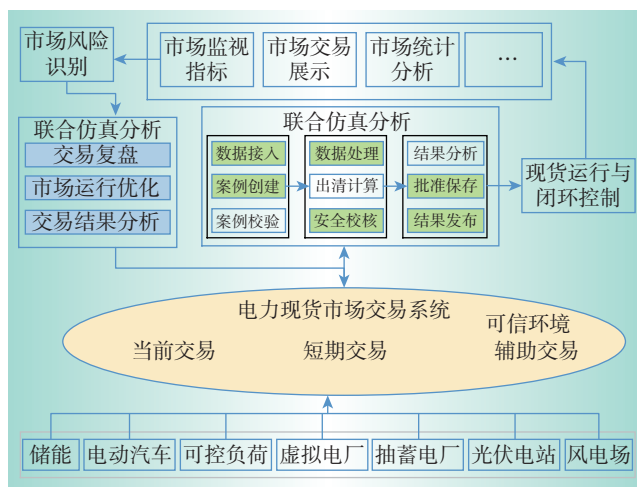


图2 低压侧调节资源接入架构

Fig. 2 Resource access architecture in the low-voltage side market

4.1.2 低压侧资源建模技术

电力交易模型中的低压侧负荷主要从可调节能力、响应能力以及调节性能等多个维度分析不同资源的差异化以及可控能力。调度主站侧针对区域协同调控背景下的非工业空调、储能设备等各类负荷资源采用归一化处置策略,按照全局模型对资源属性和数据类别进行有效辨识。在分层分区的电网运行架构下,从低压侧到高压侧的各层级分别设计包含有效可调资源的实时出清策略以及响应参数在内的模型,支撑调度交易参与市场调峰调频以及应急处置响应,治理局部过载及负荷不平衡问题。

4.2 市场出清模型动态构建与高效求解技术

市场出清模型由于受到交易主体的限制,叠加到多类型多参数控制,在面对“双高”接入背景下的交直流混联大电网,电力交易市场出清机制及模型响应能力建设都遇到极大挑战,需要结合具体实际开展出清策略优化、响应支撑能力动态优化等技术研究。

4.2.1 多主体参与、多品种协同出清技术

结合不同报价主体的具体需求和实际策略构建出清模型,采用内点法满足同一类型报价主体按比例分配资源,针对对偶问题开展退化出清结果优化以及随机波动调整,利用价格模型最优目标求解多价格主体结构,通过灵敏度分析以及梯度调节优化算法精准规避风险因素,同步考虑调节性能和跟随相应速度进行二次价格加权优化,解决多类型主体模型退化造成的价格阻塞问题。

4.2.2 市场出清模型动态构建技术

市场多类型聚合主体的多元化处置策略以及不同省份间面临出清策略的不一致导致省际调节模型构建复杂,当前需要以满足最大比例新能源消纳以及电力电量平衡稳定调节为目标的中长期目标曲线,结合市场调节策略、稳定机制、报价逻辑、交易类型以及环境影响因素等特征,提取模型约束条件与优化目标函数,搭建更为灵活高效的价格出清机制与调度优化策略,适配我国不同地区、不同交易主体的现货调节需求。

4.3 多层级市场与电网全过程闭环协同控制技术

电力交易市场可以看作是短时间内电力系统运行稳定与交易出清深度融合的一种组织体系,采用统一调节策略实现实时交易,生产满足电网安全稳定运行条件的分时段交易电价,针对实时调度策略赋值不同权重,其难点在于需要将全天不同交易背景下生成的出清逻辑与大电网实时安全稳定要求同步兼容,有效避免价格调节市场输出异常或者不合理的出清逻辑导致电网运行出现风险。

4.3.1 高安全、高可靠的实时市场安全运行框架

实时市场出清可以看作是电力交易的核心诉求。由于实时市场与调度控制紧密关联,出清结果往往采用直接转发的模式参与调度执行,其与电网安全稳定运行密切相关。为保证电力实时交易的可靠性和稳定性,需针对实时出清策略及全流程制订有效管控机制和风险预警模型,出清前对市场交易数据进行全流程管控和多重校验,保证数据满足模型计算要求。同时为进一步提升实时市场对电网安全稳定运行的执行能力,在实时市场与具体运行环节之间可以嵌入实时调度交易模型,结合电网实时潮流和模型指令动态分析交易可靠性与风险,输出日内交易执行结果和参数,在实时市场调节失效的情况下保证电网安全稳定运行,其风险识别与处置机制如图3所示。

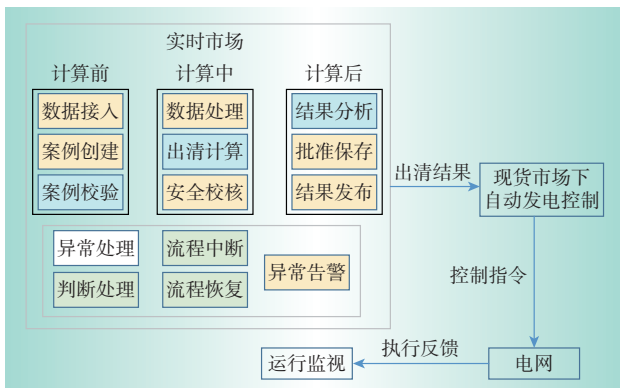


图3 实时市场风险辨识与处置机制

Fig. 3 Real-time market risk identification and disposal mechanism

4.3.2 多主体参与的市场AGC运行技术

AGC作为现货交易市场具体执行的环节,往往采用实时市场与调频市场的出清结果作为基准有效值,同时AGC参与区域控制偏差计算与优化,结合两者数据设置合理调节逻辑与优化权重将最终计算结果下发给电源侧机组。在整个闭环出清执行过程中,综合采用AGC动态优先级调整优化与出清策略自适应调节动态优化逻辑,保证AGC控制和在正常电网运行环境中与极端电网故障风险环境中都具备良好调节能力和优化空间,最终实现电网安全稳定运行与交易市场实时出清有效兼容。

4.4 基于区块链安全的电力交易构建技术

当前电力市场正逐步吸纳各类新型主体参与现货交易,发输用全链路相关主体之间亟须建立互信机制。融合加密机制与共识机制的区块链技术,逐步成为电力交易场景下构建互信体系的核心支撑技术。

4.4.1 基于区块链的电力交易风险评估技术

对于电力交易市场环境中的信息融合、出清机

制、电量采集等全流程业务逻辑进行有效管理和实时动态追踪成为研究热点。利用区块链技术可以实现核心数据的加密认证、有效流转溯源,有效匹配电力交易环境中对数据有效性和兼容性的需求,保证整体业务逻辑下数据安全可靠,其整体架构如图4所示。

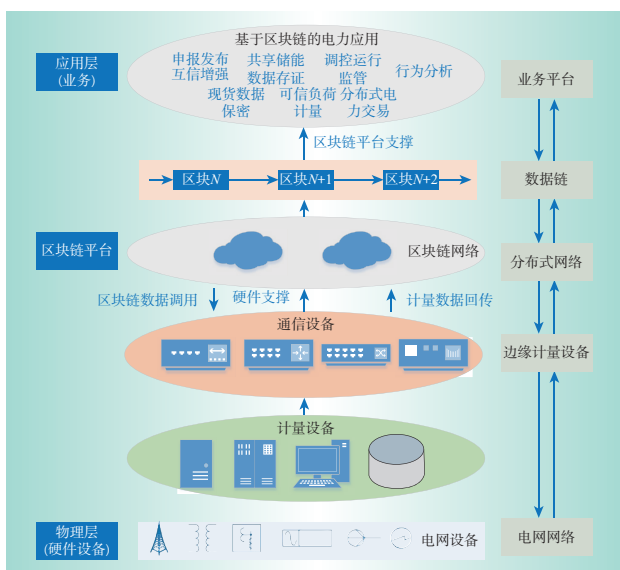


图4 基于区块链的电力交易系统架构

Fig. 4 Blockchain-based electricity trading system architecture

结合区块链技术实现现货系统升级,可以有效覆盖物理层、平台层和应用层3层物理布局,不同层级之间的信息通过有效数据交互接口实现与区块链平台的对接交互,满足同层链路数据安全性要求。物理层看作是为底层系统硬件提供建模,作为电力现货交易安全可信环境保证与数据基础;平台层是满足各类电力现货交易主体参与市场的逻辑通道和平台模块,为各类型主体参与交易提供定制化功能服务;业务层看作是结合区块链技术确定交易阶段与权限逻辑,搭建市场交易安全稳定可信系统。

4.4.2 融合区块链的电力现货交易关键技术

商用密码技术。区块链作为电力交易的核心数据交互关键,可用安全管控技术包含单向传输下的哈希计算、基于椭圆曲线公钥密码算法的非对称加密签名等。单向传输下的哈希计算可以针对电力现货交易价格、实时交易电量、整体运行逻辑等关键信息进行加密脱敏,生成不可逆操作的哈希字符串进行传递并结合区块链进行封存,后续在数据验签和溯源阶段将带查询的相关敏感信息安全算法规则进行解密,与区块链上封存的原始字符串进行比对,从根源上防止数据交易在明文传输环节被篡改。

分布式证书存储技术。结合分布式广播网络协议在电力交易模型各主体之间建立点对点通信及组播业务,依托不同节点之间的信息同步和数据交互保证所有参与现货交易的主体所处理的数据相一致,结合通用国密算法完成对业务数据的有效管控和合理认定,结合公钥及私钥密钥对实现交易过程的完整性保护与真实性鉴别,自动识别分布式广播网络环节实现不同节点间数据的同步,构建多业务逻辑中心的数字证书网络。

4.5 基于人工智能的市场风险管控与全景监视技术

面对“双高”接入背景下的新型电力系统,电力现货交易主体正面临日新月异的变化,其交易主体的多元化、交易品种的复杂程度都对现行体制下的交易市场提出了更高的技术要求,因此需要结合实际需求构建覆盖风险管控与自动预警的新型精准交易体系,全面提升电力现货交易市场的监管能力。

4.5.1 大模型预警机制下的市场风险识别技术

由于源侧主体经营需求,目前对于电力交易市场更为关注的是现货价格,其在运行机制上受到价格波动频次、市场供求状况、边界机组延伸效应以及外部环境影响等多重制约,因此需要对现货交易价格构建中长期预测和风险管控体系。在具体执行层面,电力现货价格往往参照历史同期水平,结合天气、供需状况综合判定。对于海量市场交易数据,挖掘其中存在的运行规律和风险管控逻辑,搭建深度学习预警模型成为后续研究的重点。市场风险管控优化逻辑示意图如图5所示。

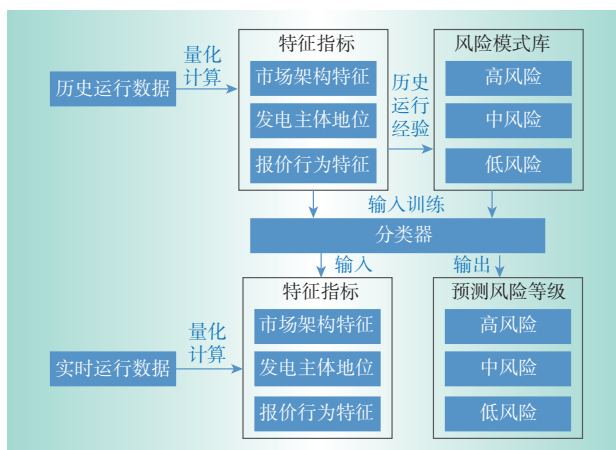


图5 市场风险管控优化逻辑

Fig. 5 Optimization logic for market risk control

4.5.2 人工智能背景下的交易数据监视技术

电力现货交易市场存在大量运营数据,其预处理、清洗、聚类与权重优化全流程监视成为重点研究的方向,通过一体化监视平台实现数据处理算法与评估指标的动态调整,采用差异化评价策略对不

同条件、不同电网体系下的数据进行分析可以保证市场多维度结果一致性。结合大数据分析模型,对现货市场数据进行横向对比,也可以反过来对省级市场交易策略与风险模型进行优化评估。

5 结束语

电力系统在电网、电源及用户侧行为衍生出多类型运营主体,其复杂形态和调度机制的不确定性给电网安全稳定运行带来了巨大挑战。结合前期实践及前沿研究,梳理分析当前电力交易市场运行关键技术和处置策略,结合多业态交互的新型电力系统实际难题给出研究方向。D

参考文献:

- [1] 何翔路,娄素华,吴耀武,等.双结算模式下风储一体化电站两阶段市场投标调度策略[J].电力系统自动化,2022,46(4):47-55.
HE Xianglu, LOU Suhua, WU Yaowu, et al. Two-stage market bidding and scheduling strategy of integrated wind power and energy storage station in dual-settlement mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4):47-55.
- [2] 旷恺宁,莫峻.北美电力市场风电预测和不平衡结算机制研究及启示[J].南方电网技术,2020,14(7):90-98.
KUANG Kaining, MO Jun. Research and enlightenment of wind power forecasting mechanism and imbalance settlement mechanism in North American electricity market [J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(7): 90-98.
- [3] 陈启鑫,吕睿可,唐庆虎,等.从澳大利亚现货市场暂停事件看电力市场紧急状态应对[J].电力系统自动化,2022,46(16):214-223.
CHEN Qixin, LYU Ruike, TANG Qinghu, et al. Emergency response of electricity market from perspectives of suspension of spot market in Australia [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16):214-223.
- [4] 刘映尚,马骞,王子强,等.新型电力系统电力电量平衡调度问题的思考[J].中国电机工程学报,2023,43(5):1 694-1 706.
LIU Yingshang, MA Qian, WANG Ziqiang, et al. Thoughts on the problem of power and electricity balance dispatching in new power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5):1 694-1 706.
- [5] 邹鹏,丁强,任远,等.山西省融合调峰辅助服务的电力现货市场建设路径演化探析[J].电网技术,2022,46(4):1 279-1 288.
ZOU Peng, DING Qiang, REN Yuan, et al. Analysis on construction path evolution of electricity spot market integrating load and renewables following ancillary services in Shanxi Province [J]. Power System Technology, 2022, 46(4):1 279-1 288.
- [6] 杨春祥,张天宇,张晓斌,等.适应高比例新能源电网的甘肃双边现货市场机制设计与运行分析[J].电网技术,2022,46(1):63-69.
YANG Chunxiang, ZHANG Tianyu, ZHANG Xiaobin, et al. Mechanism design and operation analysis of bilateral spot market in Gansu Province under high renewable energy integration [J]. Power System Technology, 2022, 46(1):63-69.
- [7] 陈振寰,张天宇,杨春祥,等.基于改进二次规划算法的新能源同质报价现货市场出清模型[J].电力系统自动化,2021,45(13):117-124.
CHEN Zhenhuan, ZHANG Tianyu, YANG Chunxiang, et al. Clearing model of homogeneous quotation for renewable energy in spot market based on improved quadratic planning algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(13):117-124.
- [8] 高志远,张晶,庄卫金,等.关于新型电力系统部分特点的思考[J].电力自动化设备,2023,43(6):137-143.
GAO Zhiyuan, ZHANG Jing, ZHUANG Weijin, et al. Thoughts on some characteristics of new style power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(6):137-143.
- [9] 舒印彪,赵勇,赵良,等.“双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J].中国电机工程学报,2023,43(5):1 663-1 672.
SHU Yinbiao, ZHAO Yong, ZHAO Liang, et al. Study on low carbon energy transition path toward carbon peak and carbon neutrality [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5):1 663-1 672.
- [10] 张粒子,高勇,胡朝阳,等.欧洲跨境输电容量分配机制及对我国的启示[J].电网技术,2021,45(10):3 972-3 980.
ZHANG Lizi, GAO Yong, HU Zhaoyang, et al. European cross-border capacity allocation mechanism and its implications for China [J]. Power System Technology, 2021, 45(10):3 972-3 980.
- [11] 王睿琛,蔡娜,高航,等.面向新型电力系统的电力市场主体统一身份模型设计及应用[J].电网技术,2022,46(11):4 160-4 168.
WANG Ruichen, CAI Na, GAO Hang, et al. Design and application of unified identity model for power market subjects of novel power systems [J]. Power System Technology, 2022, 46(11):4 160-4 168.

作者简介:

张浩(1985),男,河南郑州人,硕士,工程师,研究方向为电力系统继电保护、调度自动化。

(责任编辑 水 鸽 安 然)