

面向高比例可再生能源消纳的电力市场建设及研究进展

成润婷¹, 张勇军^{1*}, 李立涅¹, 丁茂生², 邓文扬¹, 陈皓勇¹, 林靖淳¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广州 510641; 2. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 银川 750002)

摘要: 完善的电力市场可在电力资源配置方面发挥决定性作用, 是保证各类市场主体开展活跃的供需互动、促进可再生能源消纳的关键机制; 针对性开展电力市场中影响可再生能源消纳因素的综合性分析, 也是相关应用研究亟需。本文重点考虑全时间尺度下促进可再生能源消纳相关的交易机制, 概述了国外典型电力市场结构及运行情况, 梳理了相应电力市场结构及机制中促进可再生能源消纳的关键影响因素; 围绕可再生能源消纳的多维关键影响因素, 深入分析了我国各类市场结构和不同机制的建设现状, 归纳出促进可再生能源消纳电力市场建设面临的挑战。从电力市场与碳市场、绿证市场耦合机制, 可再生能源参与的中长期、现货交易及其衔接机制, 面向高比例可再生能源的辅助服务市场, 面向高比例可再生能源消纳的需求侧响应机制等方面, 梳理了我国相关电力市场的学术研究进展。研究建议, 实施多市场协同运作、中长期及现货交易衔接、辅助服务市场建设、需求响应机制建设等重点举措, 支持面向高比例可再生能源消纳的电力市场建设。

关键词: 可再生能源消纳; 绿证市场; 碳市场; 辅助服务市场; 需求侧响应

中图分类号: TM-9 **文献标识码:** A

Construction and Research Progress of Electricity Market for High-Proportion Renewable Energy Consumption

Cheng Runting¹, Zhang Yongjun^{1*}, Li Licheng¹, Ding Maosheng², Deng Wenyang¹,
Chen Haoyong¹, Lin Jingchun¹

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750002, China)

Abstract: A complete electricity market plays a decisive role in the allocation of electricity resources and is key to ensuring active supply-demand interactions between market players and promoting the consumption of renewable energies. Currently, a targeted, comprehensive analysis on factors that affect renewable energy consumption is urgently required. Focusing on trading mechanisms that can promote renewable energy consumption at a full time scale, this study summarizes the structures and mechanisms of typical electricity markets abroad and sorts out the key factors that can promote renewable energy consumption. Based on this, the study explores the current structures and mechanisms of China's electricity market and examines the challenges faced during the electricity

收稿日期: 2022-12-27; 修回日期: 2023-02-10

通讯作者: *张勇军, 华南理工大学电力学院教授, 研究方向为智能电网与能源互联网的规划、运行与控制; E-mail: zhangjun@scut.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“东部产业技术助力宁夏新能源综合示范区高质量发展的策略建议”(2022NXZD3)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

market construction. Moreover, the research progress of China's electricity market for high-proportion renewable energy consumption is reviewed from the aspects of market mechanism, trading mode, and new consumption pattern. Furthermore, we propose that key measures should be taken in terms of multiple-market collaborative cooperation, linking of medium- and long-term spot trading, ancillary services market construction, and establishment of a demand-side response mechanism.

Keywords: renewable energy consumption; green certificate market; carbon market; ancillary services market; demand-side response

一、前言

随着化石燃料短缺、环境污染、能源安全等问题日益突出，加快能源转型成为普遍共识，可再生能源（RE）进入了高速发展期。2021年，世界新增RE装机量接近257 GW，RE装机量约占世界能源总装机量的38%^[1]。在我国，构建以新能源为主体的新型电力系统成为国家要求，未来的RE消费比重将持续增加；以化石能源为主导的电力系统逐步转变为RE主导甚至全部供应的新型电力系统^[2,3]。

电力系统RE消纳作为系统工程，是输电网建设协调规划、市场规则改进、电网运行水平及技术提升等因素共同作用的结果^[4]。从系统条件看，电源调节性能、电网联通能力、负荷规模及峰谷差是影响RE消纳的重要因素^[5]。随着高比例新能源电力系统的转型，RE出力的强随机性、波动性对电力系统的电力电量平衡产生极大影响，电力系统“双峰”特性凸显^[6]。同时，当前我国能源供需逆向分布情况较严重，资源富余地区的RE消纳困难，而重负荷地区传统燃煤机组占比高、RE参与程度低^[7]。为了克服进一步扩大RE消纳、保持电力供应稳定之间的矛盾，需要发电机组灵活配合、供需两侧积极互动，最终表现为电力系统安全、高效运行^[2]。在这一过程中，完善的电力市场可发挥对电力资源配置的决定性作用，为市场主体成员提供中长期交易平台和日前、日内、实时交易平台；合理反映电力在各种时空条件及供需关系下的价值，支持各类市场主体通过公平竞争获利并开展活跃的供需互动。因此，完善的电力市场是促进RE消纳的关键机制。

发达国家和地区的电力市场建设起步较早，以美国宾夕法尼亚-新泽西-马里兰联合电力市场（PJM）、得克萨斯州电力可靠性委员会电力市场（ERCOT）、加利福尼亚州独立系统运营商（CAISO）电力市场、欧洲统一电力市场^[7]为代表，通过互联市场、财政激励、绿证市场等方式促进RE发展并鼓励消纳；也因电源结构、市场目标、电力体制等因素的

差异，各国面向高比例RE的电力市场建设重点不尽相同。相关研究围绕RE在电力市场中的新能源消纳模式及优劣势^[8,9]、RE相关的科学技术^[10]、电力市场促进RE消纳的形势及展望^[11-15]等展开，而促进RE消纳的电力市场改革课题未见涉及。近年来，国内学者在促进RE消纳的电力市场方面完成了一些综述性研究，主要围绕现货交易市场、调峰服务市场等细分方向展开，研究对象呈现模块化特征。例如，总结了现货交易的基本框架、组织流程、市场衔接等机制，侧重讨论跨区域现货交易对RE消纳的影响^[6]；概述了国外成熟现货市场、我国试点省份现货市场的建设特点及促进RE消纳的市场机制，分析了未来我国现货市场建设的主要挑战^[6]；结合我国电力调峰辅助服务市场的发展背景及各地区发展实际，提出了面向高比例RE的消纳调峰辅助服务市场建设设想^[17]；梳理了各国的RE补贴及配额制度，但未开展与RE消纳相关因素的深入分析^[18]。

在此背景下，梳理国外不同特性市场结构及机制中影响RE消纳的关键因素，分析我国不同电力供需特性的地区市场发展态势，将为电力市场的持续建设及优化提供支持。本文着重考虑全时间尺度下促进RE消纳的交易机制，开展国外案例梳理和关键影响因素提炼，围绕关键影响因素分析国内相关市场的建设现状及面临挑战；立足国情并结合“双碳”战略目标，展望面向高比例RE消纳的电力市场建设要素。

二、国外面向高比例RE消纳的电力市场结构及机制

（一）中长期及现货交易高比例RE电力市场

1. 中长期交易市场

RE发电规模较大的国家都建立了竞争性的电力市场，RE发电可参与场外双边合同、现货市场，通过冗余容量及运行策略参与辅助服务市场。美国的大部分发电商、英国的RE机组可直接参与各类电力中长期交易、现货交易、实时平衡机制，采用

购电协议（场外双边协议）形式承担与其他类型电力供应商同等的责任^[19,20]。在欧洲，RE参与电力交易机制的形式更加多样，与政策机制创新密切相关^[21]，如德国对大型新能源电站实行“直接交易”机制，需要参加电力市场以获得市场溢价补贴^[19]。

2. 现货交易市场

电力现货市场包括日前市场、日内市场、实时市场，多数国家采用3种市场的组合方式。美国电力市场发展的核心在于推动现货市场运行精细化，据此提高系统运行的可靠性和经济性^[22]。大部分系统运营商采用电能-辅助服务（备用）联合出清模型^[22,23]，经由稀缺定价机制向参与调峰企业提供盈利空间；提高出清颗粒度、预测度，提升系统灵活性并促进RE消纳^[3]。在跨区现货市场方面，建立买卖区域之间的不平衡电量市场^[23]，协调多区域电力现货市场融合。

欧洲各国电力资源分布不均衡，现货市场发展的核心在于实现更大范围内的RE优化配置，增强多个国家电力市场的耦合度、大范围的能量互济能力^[22,23]。日前市场采取了跨区传输、跨价格耦合的统一出清模型，日内市场则在各国范围内独立组织电力市场。针对RE的间歇性，一些国家开始采用潮流耦合模型来提高日内市场的滚动频率、增强RE消纳的市场信号，进而刺激市场提供充足的灵活性^[23]。

（二）辅助服务市场及需求侧响应机制

1. 辅助服务市场建设

随着RE并网规模的不断扩大，传统调节手段无法维持具有高比例RE特征的电力系统安全运行。建设辅助服务市场，旨在容纳一系列先进能源技术^[4,24]，激发各类市场主体参与高比例RE系统调节的积极性，从而应对RE的随机性及波动性对电力系统带来的问题，提高RE在系统内的消纳比例。

为了提高辅助服务市场的活跃度、增大应对高比例RE系统的电力备用容量，在以美国PJM为代表的电量竞价现货市场中，发电企业的调峰收益表现在不同时间能量市场的实时电价变化^[25,26]；在现有价格机制方面，英国、北欧国家的市场主要以双边协议、竞价交易的形式，按协议价格、报付价格、出清价格分摊给终端用户^[27,28]。为增强高比例RE系统的电压支撑与调节能力，美国得克萨斯州

电力市场建立了毫秒级响应速度的调频服务、加利福尼亚州积极推动具有灵活性的爬坡产品；北欧国家2011年启动了含快速频率响应的辅助产品类型，包括柔性负荷、可再生分布式电源、储能资源，以数百毫秒级的响应速度来应对高比例RE电力系统的低惯量问题^[27,28]。

2. 需求侧响应机制

在电源侧调节能力以外，规模小、多元化的需求侧解决方案为高比例RE系统提供了灵活调节能力。随着RE占比逐步提高，需求侧资源（如柔性负荷、电动汽车、用户侧分布式电源、储能等分散资源）较多同时参与电能量市场、调频市场、备用市场^[29,30]，再由RE提供系统可调节容量及调节灵活性。依托成熟的电力市场环境，发达国家建立了包含RE需求侧资源参与各细分市场在内的交易规则及机制^[31-33]。2020年，美国联邦能源管理委员会启动了RE分布式资源聚合商参与市场投标（按节点电价结算交易能量^[23]），拓展了需求侧应用空间。欧洲电力市场重在完善信息披露制度、加强零售市场竞争、实施用户数据保护^[23]，促使RE分布式资源用户从消费者转化为产销者；发布相关政策，使自产自销用户无需支付服务运营费用^[23,31]，推动电网侧含RE的分散资源深度参与电力市场。

（三）促进RE消纳的其他机制

1. RE消纳政策

为了鼓励消纳RE，很多国家制定了针对性补贴政策，如固定上网电价机制（英国、北欧国家、澳大利亚）、溢价补贴（德国^[24]）、生产税及投资税抵扣（美国）等，同步实施配额制等强制型消纳RE的机制^[7,9,25]。欧盟鼓励以市场化招投标方式确定RE上网电价，合理降低补贴资金规模。英国要求电力供应商提供一定比例的RE发电量以履行RE义务^[34,35]，美国采用了与绿证市场相结合的RE消纳配额制^[8]。

2. 绿证市场和碳市场

绿证市场以满足发电企业、售电企业、电力用户等市场主体出售、购买、消费绿色电力的需求为建立目标，绿电交易结算结果影响电力用户获得的绿证数量^[36]；作为在电力市场交易以外向RE发电企业提供绿证市场盈利的平台，驱动市场增加绿色电力供应。碳市场旨在通过缴纳碳税、购买碳排放

权、购买绿证等方式，增加传统化石能源发电厂的生产成本，进而调整电源结构并推动碳减排。从市场运作机理角度看，电力市场、碳市场、绿证市场通过价格和供需关系来深刻影响市场主体的决策及RE消纳情况。

欧盟碳排放权体系采用总量控制与交易模式进行碳排放控制及碳税限制，德国额外就运输、建筑等高排放行业实行碳定价体系。瑞典和挪威在2012年即建立了联合绿色证书市场^[36]。在欧盟范围内，电力市场和碳市场主要通过价格传递、碳排放成本转移的形式，引导市场主体自主决策并驱动实现协同运行，衍生的碳期货、绿色债券丰富了金融市场^[37]。美国加利福尼亚州较为成功地实现了电力市场和碳市场的协同运作，考虑电价引入碳价或将加大末端电力用户成本，对社会投资售电商采取委托拍卖的价格竞争机制，起到了传导碳排放成本和环境价值、维护终端用户价格平衡的双重作用^[38]。梳理的国外促进RE消纳的市场结构及相应机制如表1所示。

三、我国促进RE消纳的电力市场建设进展

(一) 电力市场结构

我国电力市场体系齐备，空间上覆盖省际、省内交易，时间上覆盖年、月、月内等中长期交易及日前、日内现货交易，标的上覆盖电量、辅助服务等交易^[39]，形成了以中长期交易为主、现货交易为辅的交易模式。中长期交易有利于促进清洁能源

大范围消纳、稳定电力市场供需、支持市场主体规避风险；现货交易侧重解决中长期交易与实际运行之间的偏差，可作为RE稳定消纳的重要补充类型^[39]。目前，RE参与电力市场的方式主要有中长期电量市场，日前、实时现货市场，辅助服务市场（见图1）。

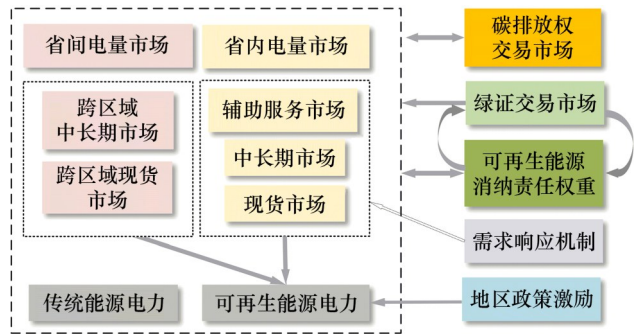


图1 我国电力市场结构及影响RE消纳的因素

(二) 电力市场促进RE消纳机制

1. 中长期交易及现货交易市场

我国电力市场以省间、省内两级运作为框架：先以省间交易满足大范围资源配置要求，再由省内交易保障电力电量供需平衡并进一步优化资源配置^[40]。建立了北京、广州2个电力交易中心协调跨省、跨区交易，发布了跨区、跨省的中长期交易规则（《省间电力现货交易规则（试行）》），推动中长期市场与现货市场的有效衔接、省内富余电力现货交易^[40,41]。跨省、跨区交易以年度、月度为主，

表1 国外促进RE消纳的市场结构及相应机制

机制	美国	英国	北欧国家
中长期交易	双边合同为主	双边合同为主	直接参与市场批发
现货交易	区域间出清方式 电量不平衡市场下的电能-辅助服务联合出清	—	跨区传输、跨价格耦合 统一出清
	区域内出清方式 电能-辅助服务联合出清	按报价支付出清	潮流耦合模型出清
辅助服务市场	配套机制 需求侧响应参与	需求侧响应参与	需求侧响应参与
	运行方式 参与现货市场联合出清	独立竞价投用	独立竞价投用
	交易品种 调频服务、响应备用服务、紧急备用服务、非旋转备用服务、快速频率备用等	频率响应服务、备用服务、无功功率服务、黑启动、动态缓冲、动态抑制	频率控制、电压控制、黑启动、负荷跟踪、快速频率响应等
政策激励	生产、投资税收抵扣	固定上网电价	固定上网电价
新能源消纳机制	配额制	RE义务	—
配套市场	绿证交易市场	绿证交易市场、碳配额制和碳定价体系	绿证市场、碳市场

跨区现货交易仅在国家电网有限公司调管范围内的区域之间开展,暂不支持非区域内的省间开展^[6]。广东、重庆等8个省份已经开展电力现货市场试点,但电力系统调度一定程度上保持着计划管理特点。相比国外市场,国内电力现货市场的成熟度仍有一定差距。

2. 辅助服务市场建设及需求侧响应机制

针对大规模RE发电并网,围绕调峰及部分辅助以调频,逐步开展政府主导框架下的电力辅助服务市场建设。截至2020年,辅助服务市场已在东北、华北、华东、西北等地区启动^[27],全国范围内基本建立了相应机制。入网协议、辅助服务管理细则等规定了由发电企业提供辅助服务,区分了基本辅助服务、有偿辅助服务^[25,26]。辅助服务市场建设达到了提高火电机组参与调峰调频的主动性、降低RE弃电率的目标。

随着代理聚合商、虚拟电厂的出现,智能化电网建设的推进,电网需求侧资源的灵活性显著提升。与国外需求侧响应深度参与电力现货市场不同,国内仅有部分省级市场引入用户侧以“报量不报价”方式参与市场,大部分用户侧可参与需求响应调节、不参与现货市场竞争。这一需求侧响应格局限制了储能、分布式资源聚合商等第三方市场资源的优化配置空间^[23]。

3. RE消纳责任权重制及绿证市场、碳市场

在我国现行政策中,消纳责任主体为电网企业、配售电公司、电力用户、自备电厂企业;以实际消纳量作为消纳责任权的主要完成方式,还可购买超额消纳量、绿证进行补充,调动各方积极性以促进RE消纳^[42]。目前,国家已明确各地2030年前的消纳责任权重,宁夏、安徽等省份发布了RE消纳保障方案,除甘肃、西藏外的所有省份完成了2021年RE电力消纳责任权重。

我国自2021年起正式开展以绿色电力产品为标的物的绿色电力中长期交易试点工作。中国绿色电力证书认购交易平台数据显示,截至2022年11月,风电证书累计核发量为3707.14万张,累计挂牌率为21.97%,累计交易率为6.19%;光伏证书累计核发量为1872.78万张,累计挂牌率为23.51%,累计交易率为23.01%。

我国自2013年起陆续上线了8个试点碳市场,覆盖电力、交通、建筑等高排放行业,近3000家重

点排放单位^[36];主要以免费分配的方式配置碳排放配额,根据不同行业特点采用基准线法、历史强度法等确定分配数量。碳市场分为初始分配市场、自由交易市场,采用挂牌交易、单向竞价等交易形式。梳理的我国促进RE消纳的市场机制如表2所示。

(三) 电力市场建设面临的挑战

1. 协调发展、衔接合理的碳市场和绿证市场尚未建成

在我国相对宽松的RE消纳责任权重约束下,绿证市场尚未成熟运作,基于绿证自愿认购体系的市场反应冷淡、交易规模偏低;参与绿证认购的大量交易主体,与电力市场、碳市场交易主体的重合度不高。与发达国家的市场相比,国内绿证市场与电力市场、碳市场的耦合性不强^[36],碳电价信号难以通过市场衔接传递至电力市场主体,导致资源配置能力有限。电力市场、绿证市场、碳市场仍需充分协调发展,才能活跃绿电交易、促进RE消纳。

2. RE强制消纳下的市场交易存在风险

随着RE快速发展,参与中长期交易的RE交易规模逐步扩大;为了充分保证RE消纳,火电机组逐步退出成为必然趋势。以控制火力发电出力为主的传统调峰方式难以满足电网调峰需求,无法保障中长期交易合约中的RE全部消纳,甚至影响电网的安全运行;由于RE存在强波动性、随机性,与跨区现货交易时段难以匹配,交易主体局限在电网公司调管范围以内。亟待引入RE参与市场的机制,推动日以内短时序的跨省跨区交易,进而改善更大区域内的能源资源优化配置。此外,RE出力的不稳定可能导致现货市场实时价格的剧烈波动^[43],为

表2 我国促进RE消纳的市场机制

市场形式	市场机制
中长期交易	双边协商、集中交易
现货交易	区域间出清方式
	区域内出清方式
	配套机制
辅助服务市场	运行方式
	交易品种
政策激励	部分地区试点需求侧响应参与
新能源消纳	部分参与现货市场联合出清
配套市场	调峰为主、调频为辅
	部分地区固定上网电价配额制
	绿证市场、碳市场

了规避火电缺额、价格波动等风险，还需推进中长期市场与现货市场，中长期及现货市场与辅助服务市场、金融市场的有效衔接。

3. 配套辅助服务市场建设滞后

我国电力辅助服务市场仍处于政府主导、计划色彩浓厚的发展阶段，辅助补偿费用由发电企业承担。该机制无法真实反应辅助产品价格、市场供需关系，发电企业主动参与市场的积极性不高。国外成熟的电力市场，除基本的调峰、调频产品以外，衍生了快速频率响应、紧急备用产品等面向高比例RE电力系统的多元化辅助产品，以完备的辅助市场服务支撑了高比例RE电力系统的稳定运行。相比之下，国内辅助服务产品种类较少，快速响应类产品缺乏，未建立日内短时序的跨省、跨区辅助服务市场，可再生电源参与双调辅助市场容量小、灵活性低；深度调峰的煤电机制面临频繁启停的成本问题，进一步制约了辅助服务市场的活跃度。

4. “源储荷”可调节资源交易环境有待发展

随着电力市场改革、数字电网建设，需求侧资源在新型电力系统中的价值凸显。国内仅有部分地区试点需求侧响应参与现货市场，需求侧资源参与各类细分市场的规划及交易规则不完备，集成“源储荷”资源实现能效管理、能源交易、数据增值服务的多元商业模式也显缺乏。

四、我国面向高比例RE消纳的电力市场研究进展

RE规模持续扩大后将成为支撑电力系统供能的主体部分，发电、购电主体趋于多元化，面向高比例RE消纳的电力市场建设更为复杂。梳理市场机制、交易模式、新型消纳模式等方面的系列研究，有助于把握进一步促进RE消纳、加速新型电力系统转型的主攻方向，为我国面向高比例RE消纳的电力市场建设提供坚实的理论与应用基础。

(一) 促进RE消纳的电力市场与碳市场、绿证市场的耦合机制研究

电力市场、绿证市场、碳市场通过电价和供需关系体现相互影响，在现状电力市场的基础上健全绿证市场、碳市场，实现三者之间的衔接与协同发展，有助于引导绿电消纳、优化用能结构。研究认

为，市场机制可以发现经济减排、RE消纳的优化路径，面向高比例RE电力系统的电力市场、绿证市场、碳市场深度耦合（见图2）将全面推动我国经济社会绿色低碳转型。已有研究集中在电力市场、碳市场、绿证市场的协调运行方面。前期研究多为电力市场与碳市场、电力市场与绿证市场的关系及机制探讨，如发现绿证的市场化交易可在不显著增加责任主体成本的前提下有效提升RE电力消纳量、绿证市场交易额，提出一种绿证市场下政府引导RE机组逐步参与电力现货市场运营的补贴政策^[44]。后期研究则考虑了碳市场、绿证市场的交互影响，如阐明新配额制下电力-绿证-超额消纳量多尺度市场的耦合互动关系^[45]，提出一种绿证、碳排放权联合交易的市场模式（以绿证和碳排放权资源的全局优化配置，激励RE发电并限制化石能源机组的碳排放量^[46]），论证基于区块链技术的绿证和碳交易市场联合激励机制^[47]。

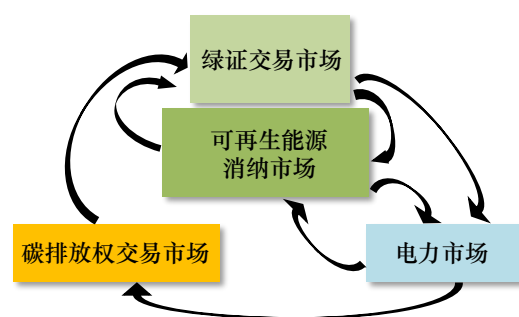


图2 可再生消纳权责下电力市场、碳市场、绿证市场交互关系

(二) RE参与的中长期交易和现货交易以及衔接机制研究

我国面向高比例RE消纳的电力现货市场仍处初级阶段，RE发电稳定参与现货市场是建设难点。中长期市场与现货市场的合理衔接是扩大现货交易规模的重要基础，相应衔接机制是促进RE消纳的重要因素。因此，RE参与的中长期交易、现货交易，其交易框架、定价机制、出清模型、配套市场等具有研究价值。基于电价差刺激市场分摊的方式，提出中长期交易中的不平衡分摊方法，用于拓宽现货交易的发展空间^[48]。构建以跨省区电量交易、富余RE跨省区消纳为主的交易框架，建立支撑RE大规模消纳的跨省区市场交易模型^[49]。提出

一种新能源报价机制，反映新能源边际成本为零、平均成本递减的成本特性以及新能源波动出力特性，针对性发展适应新型电力系统的现货市场和火电容量市场耦合机制^[50]。构建计及期权合约、交易路径的省间优化出清模型，将期权模式引入合约市场交易以规避电价波动风险^[51]。引入最小块概念，构建基于标准能量块合约的中长期市场连续运营方案，适用于衔接现货市场^[52]。

（三）面向高比例RE的辅助服务市场研究

电网的灵活性是促进RE消纳的关键因素，而辅助服务市场是增强电网灵活性的重要手段。当前，适应现货市场的备用辅助服务未能支持形成供需双方均可申报量/价的市场。调频、调峰服务是维持高比例RE电力系统稳定运行的基本手段，高比例RE辅助服务市场建设可从交易品种、激励机制、服务定价等方面着手，促进产品参与竞争市场、提高市场活跃度、盘活可调节资源，进而提高电力系统对RE供应的接纳度。研究提出储能、电动汽车等柔性负荷参与辅助服务市场的基本方式^[53-55]。发展基于备用辅助服务需求申报的现货市场组织方法及出清模型，以“谁产生、谁承担”原则构建备用费用分摊机制^[56]。建议将火电灵活性改造成本分解为发生弃电的RE分摊固定成本、参与现货市场竞争回收的变动成本，以此将调峰市场纳入电能量市场^[57]。论证提出了黑启动、灵活爬坡等新型辅助服务市场产品的设计方案^[58,59]。

（四）面向高比例RE消纳的需求侧响应机制研究

在RE和新型负荷聚合商（如储能、电动汽车、虚拟电厂）大规模接入配/用电侧之后，整合分散的需求侧资源参与电力市场并优化配置相关资源成为构建新型电力系统的关键点。需求侧响应是辅助服务市场的关键组成部分，可据此控制RE参与电力现货市场的不稳定风险，但在电力市场中的深度参与机制有待探索。已有研究较多关注发挥需求侧可调节资源的灵活性，以不同的品种、模式参与电力现货市场。提出一种多级现货市场衔接框架，引导用户侧可调控资源主动参与系统的平衡调节服务，使需求侧基于负荷聚合商引导的终端用户参与多级耦合市场的调度^[49]。针对多样化的交易需求，发展覆盖多元市场主体的交易报价方式，构建多种

灵活能量块的交易出清模型^[60]。论证提出虚拟电厂参与电网调控与市场运营的技术架构^[61,62]，优化控制各类资源的运行状态，为电力系统提供更加灵活的调节能力^[63]。

五、我国面向高比例RE消纳的电力市场发展建议

（一）协同电力市场、绿证市场、碳市场运作

碳排放权和绿证交易可以推动社会共同承担RE消纳带来的增量成本，鼓励市场交易主体自主优化用电结构或用能方式。分析梳理电力市场、绿证市场、碳市场的联动关系，面向产业和资源的实际需求，保持市场机制、政策工具的配套发展和有效衔接。在以可再生消纳权重责任制为促进RE消纳的主要手段，以配额制执行碳排放交易机制的现状条件下，需论证并新建碳排放权的配额与分配机制以及绿证分配机制，根据市场主体能源转型的进度逐步收紧碳排放额度，稳健提高RE消纳量和绿证的市场竞争力。推动建立碳市场、绿证市场、RE消纳市场的互认体系，合理简化电力市场、绿证市场、碳市场、RE消纳市场的交互流程，形成电价信号并传递至“源储荷”环节，鼓励社会主动参与绿能使用。

在考虑可再生消纳权责的电-碳-绿证市场架构（见图3）下，能量市场为用户提供电力供应，电力用户参与辅助服务市场及其他市场。在各类电力用户中，超额消纳责任主体可向超额消纳量市场售卖消纳量，未满足消纳义务的责任主体可购买消纳量；RE发电商通过生产RE电力相应折算的绿色证书来抵消未满足消纳的部分。传统能源发电商、电力用户均受碳排放权的约束，可在碳交易市场上购买核证自愿减排量（CCER）或以绿证抵消超额排放量；CCER和绿证可按《可再生能源发电并网项目的整合基准线方法学》实现互认。据此，电力市场、绿证市场、碳市场、超额消纳量市场实现互联互通，直至绿证市场发展取代超额消纳量市场，最大限度地提高RE在电力系统中的消纳。

（二）完善RE参与现货市场及其他市场的衔接机制

RE大规模接入带来了随机性和波动性，要求现货市场建立跨区、跨省的模型，以更小的颗粒度

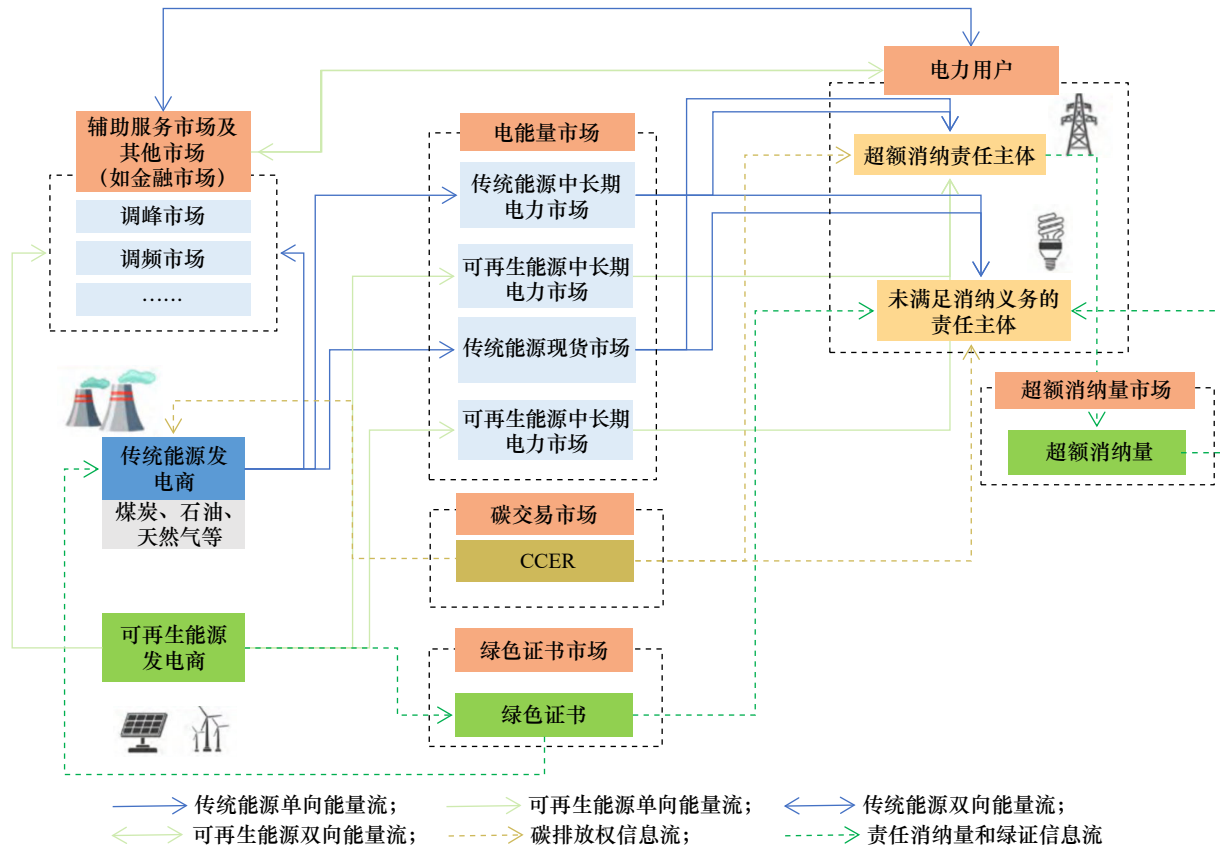


图3 可再生消纳权责下的电-碳-绿证市场架构

出清。完善不同尺度的定价、交易机制，合理衔接中长期与日前、日内、实时交易，扩大RE交易的地域范围和多级市场的跨度。为两级运作过渡至省间统一报价乃至全国量价耦合以统一出清的机制作铺垫，提高RE电力的价格竞争力。衔接容量市场、辅助服务市场，兼顾电力稳定供应、综合电力成本降低，从而协调RE电力与传统火电更替，逐步扩大RE供能占比。经由金融市场指导市场价格并规避价格波动风险，协调多级电力市场发展，引导RE在电力系统中以市场化方式扩大消纳比例。

（三）健全辅助服务市场的价格体系与服务品种

在辅助服务市场的服务价格方面，着力推动辅助服务交易参与市场竞争。细分辅助服务提供主体的类型，根据发电侧以及用电侧（如负荷聚合商、虚拟电厂、储能等）不同主体的调节容量、速率、可靠性、RE利用率等指标，降低高比例RE电力的辅助服务提供主体参与竞争市场的准入条件和分摊成本。以差异化的价格机制体现多维价值，按照“谁提供、谁获利，谁受益、谁承担”的原则，逐

步建立电力用户参与分担服务成本的共享机制；运用市场化手段释放多元高比例RE主体的灵活调节潜力、激发辅助服务的活跃度，为扩大RE消纳创造空间。

在辅助服务市场的交易品种方面，重在结合负荷灵活特性及电网需求，充分挖掘需求响应潜力。待电力市场运行成熟、价格信号趋于完善后，由实时市场逐步取代以辅助现货交易为主要目的调峰产品。丰富备用、调频等辅助服务产品，新增快速频率响应、快速爬坡等辅助服务产品，积极应对高比例RE电力系统低惯性及无功支撑能力下降带来的系统不稳定性。

（四）推动需求响应深度参与面向高比例RE消纳的电力市场

巨量的RE并网将颠覆传统电力系统的“源荷”特性并贯穿到低压配电网^[53]。随着数字电网的建设与应用、用户侧储能及电动汽车等多元新型柔性负荷的增加，低压居民用户、负荷聚合商形成的负荷资源具有极大的调用潜力。

在市场机制方面,推动需求侧响应参与市场竞争,再逐步拓宽参与辅助服务、现货市场、中长期市场的程度。细分需求侧资源类型、为不同市场类型提供的差异化服务,如工业负荷、空调负荷等可中断负荷参与中长期市场交易,高比例RE电力快速响应负荷(如电动汽车、用户侧储能等,具有秒级控制能力)可作为辅助服务市场的灵活资源参与现货交易市场。进一步发展综合需求响应,参与能源互联网中的冷-热-电-气相互转化,增加响应维度并充分利用参与需求响应的RE电力。

在建设进程方面,初期可完善分时电价、有序充电、上网补贴等激励政策,推动提高需求侧资源的利用水平。随着电力市场完善程度的提高,逐步将需求侧用户或聚合商作为市场主体,同步规范各市场主体的准入标准和技术认证;为高比例RE电力的响应服务主体提供优惠政策,采用市场化方式调动需求侧资源深度参与电力市场甚至能源互联网中的多级耦合市场,为高比例RE电力系统提供充分的灵活性资源。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: December 27, 2022; **Revised date:** February 10, 2023

Corresponding author: Zhang Yongjun is a professor from the School of Electric Power Engineering of South China University of Technology. His major research field is planning, operation and control of smart grid and energy Internet. E-mail: zhangjun@scut.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Suggestions for the High-quality Development of Ningxia New Energy Comprehensive Demonstration Zone by Eastern Industrial Technology” (2022NXZD3)

参考文献

- [1] International Renewable Energy Agency. Renewable capacity statistics 2022 [R]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2022.
- [2] 肖云鹏,王锡凡,王秀丽,等.面向高比例可再生能源的电力市场研究综述[J].中国电机工程学报,2018,38(3):663-674.
Xiao Y P, Wang X F, Wang X L, et al. Review on electricity market towards high proportion of renewable energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 663-674.
- [3] 张勇军,羿应棋,李立涅,等.双碳目标驱动的新型低压配电系统技术展望[J].电力系统自动化,2022,46(22):1-12.
Zhang Y J, Yi Y Q, Li L C, et al. Prospect of new low-voltage distribution system technology driven by carbon emission peak and carbon neutrality targets [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 1-12.
- [4] 谢开.美国电力市场运行与监管实例分析[M].北京:中国电力出版社,2017.
Xie K. Electricity market, operation and regulation: US practice [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2017.
- [5] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等.新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1):1-9.
Shu Y B, Zhang Z G, Guo J B, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-9.
- [6] 孙大雁,关立,黄国栋,等.跨区域省间富余可再生能源电力现货交易的实践和思考[J].电力系统自动化,2022,46(5):1-10.
Sun D Y, Guan L, Huan G D, et al. Practice and reflection on trans-regional and cross-provincial electricity spot trading for surplus renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(5): 1-10.
- [7] 丁一,谢开,庞博,等.中国特色、全国统一的电力市场关键问题研究(1):国外市场启示、比对与建议[J].电网技术,2020,44(7):2401-2410.
Ding Y, Xie K, Pang B, et al. Key issues of national unified electricity market with Chinese characteristics (1): Enlightenment, comparison and suggestions from foreign countries [J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2401-2410.
- [8] Stekli J, Bai L Q, Cali U, et al. Distributed energy resource participation in electricity markets: A review of approaches, modeling, and enabling information and communication technologies [J]. Energy Strategy Reviews, 2022, 43: 100940.
- [9] Gunarathna C L, Yang R J, Jayasuriya S, et al. Reviewing global peer-to-peer distributed renewable energy trading projects [J]. Energy Research & Social Science, 2022, 89: 102655.
- [10] Ang T Z, Salem M, Kamarol M, et al. A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions [J]. Energy Strategy Reviews, 2022, 43: 100939.
- [11] González D M L, Rendon J G. Opportunities and challenges of mainstreaming distributed energy resources towards the transition to more efficient and resilient energy markets [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 157: 112018.
- [12] Azarpour A, Mohammadzadeh O, Rezaei N, et al. Current status and future prospects of renewable and sustainable energy in North America: Progress and challenges [J]. Energy Conversion and Management, 2022, 269: 115945.
- [13] Dey S, Sreenivasulu A, Veerendra G T N, et al. Renewable energy present status and future potentials in India: An overview [J]. Innovation and Green Development, 2022, 1(1): 100006.
- [14] Aboagye B, Gyamfi S, Ofose E A, et al. Status of renewable energy resources for electricity supply in Ghana [J]. Scientific African, 2021, 11: e00660.
- [15] Liu J Q, Wang J H, Cardinal J. Evolution and reform of UK electricity market [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 161: 112317.
- [16] 樊宇琦,丁涛,孙瑜歌,等.国内外促进可再生能源消纳的电力现货市场发展综述与思考[J].中国电机工程学报,2021,41(5):1729-1752.
Fan Y Q, Ding T, Sun Y G, et al. Review and cogitation for worldwide spot market development to promote renewable energy accommodation [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1729-1752.
- [17] 孙莹,李晓鹏,蔡文斌,等.面向新能源消纳的调峰辅助服务市

- 场研究综述 [J]. 现代电力, 2022, 39(6): 668–676.
- Sun Y, Li X P, Cai W B, et al. A research overview on ancillary services market of peak regulation [J]. *Modern Electric Power*, 2022, 39(6): 668–676.
- [18] 丁峰, 李晓刚, 梁泽琪, 等. 国外可再生能源发展经验及其对我国相关扶持政策的启示 [J]. 电力建设, 2022, 43(9): 1–11.
- Ding F, Li X G, Liang Z Q, et al. Review of foreign experience in promoting renewable energy development and inspiration to China [J]. *Electric Power Construction*, 2022, 43(9): 1–11.
- [19] 赵勇强. 新能源电力市场化交易的国际经验与中国实施路径探讨 [J]. 价格理论与实践, 2019 (10): 9–13.
- Zhao Y Q. Discussion on international experience of new energy electricity marketization and China's implementation path [J]. *Price: Theory & Practice*, 2019 (10): 9–13.
- [20] Hafner M, Tagliapietra S. The geopolitics of the global energy transition [M]. Cham: Springer, 2020.
- [21] Fatras N, Ma X, Duan H B, et al. A systematic review of electricity market liberalisation and its alignment with industrial consumer participation: A comparison between the Nordics and China [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 167: 112793.
- [22] 包铭磊, 丁一, 邵常政, 等. 北欧电力市场评述及对我国的经验借鉴 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 4881–4892.
- Bao M L, Ding Y, Shao C Z, et al. Review of nordic electricity market and its suggestions for China [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(17): 4881–4892.
- [23] 陈启鑫, 房曦晨, 郭鸿业, 等. 电力现货市场建设进展与关键问题 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(6): 1–15.
- Chen Q X, Fan X C, Guo H Y, et al. Progress and key issues for construction of electricity spot market [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(6): 1–15.
- [24] Rancilio G, Rossi A, Falabretti D, et al. Ancillary services markets in Europe: Evolution and regulatory trade-offs [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 154: 111850.
- [25] 袁家海, 席星璇. 我国电力辅助服务市场建设的现状与问题 [J]. 中国电力企业管理, 2020 (7): 34–38.
- Yuan J H, Xi X X. Current situation and problem of Chinese electric power auxiliary service market construction [J]. *China Power Enterprise Management*, 2020 (7): 34–38.
- [26] 孙莹, 李晓鹏, 蔡文斌, 等. 面向新能源消纳的调峰辅助服务市场研究综述 [J]. 现代电力, 2022, 39(6): 668–676.
- Sun Y, Li X P, Cai W B, et al. A research overview on ancillary services market of peak regulation oriented to accommodation of new energy [J]. *Modern Electric Power*, 2022, 39(6): 668–676.
- [27] 吴珊, 边晓燕, 张菁娟, 等. 面向新型电力系统灵活性提升的国内外辅助服务市场研究综述 [EB/OL]. (2021-10-29)[2022-03-08]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.211730>.
- Wu S, Bian X Y, Zhang J X, et al. A review of domestic and foreign ancillary services market for improving flexibility of new power system [EB/OL]. (2021-10-29)[2022-03-08]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.211730>.
- [28] 叶文圣, 荆朝霞, 禚宗衡. 英国频率响应服务市场及对我国调频市场建设的启示 [J]. 中国电力, 2023, 56(1): 77–86.
- Ye W S, Jing Z X, Xuan Z H. UK frequency response service markets and their implications for China's frequency regulation market construction [J]. *China Power*, 2023, 56(1): 77–86.
- [29] 代心芸, 陈皓勇, 肖东亮, 等. 电力市场环境下工业需求响应技术的应用与研究综述 [J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4169–4186.
- Dai X Y, Chen H Y, Xiao D L, et al. Review of applications and researches of industrial demand response technology under electricity market environment [J]. *Power System Technology*, 2022, 46(11): 4169–4186.
- [30] Abedrabboh K, Al-Fagih L. Applications of mechanism design in market-based demand-side management: A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 171: 113016.
- [31] 王彩霞, 时智勇, 梁志峰, 等. 新能源为主体电力系统的需求侧资源利用关键技术及展望 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 37–48.
- Wang C X, Shi Z Y, Liang Z F, et al. Key technologies and prospects of demand-side resource utilization for power systems dominated by renewable energy [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(16): 37–48.
- [32] Shang N, Ding Y, Cui W Q. Review of market power assessment and mitigation in reshaping of power systems [J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2022, 10(5): 1067–1084.
- [33] Buchholz W, Dippl L, Eichenseer M. Subsidizing renewables as part of taking leadership in international climate policy: The German case [J]. *Energy Policy*, 2019, 129: 765–773.
- [34] Ogunrinde O, Shittu E, Dhanda K. Investing in renewable energy: Reconciling regional policy with renewable energy growth [J]. *IEEE Engineering Management Review*, 2018, 46(4): 103–111.
- [35] Valenzuela J M, Rhys J. In plain sight: The rise of state coordination and fall of liberalised markets in the United Kingdom power sector [J]. *Energy Research & Social Science*, 2022, 94: 102882.
- [36] 尚楠, 陈政, 卢治霖, 等. 电力市场、碳市场及绿证市场互动机理及协调机制 [J]. 电网技术, 2023, 47(1): 142–154.
- Shang N, Chen Z, Lu Z L, et al. Interaction principle and cohesive mechanism of electricity market, carbon market and green power certificate market [J]. *Power System Technology*, 2023, 47(1): 142–154.
- [37] Zhang F, Li Y, Li F L, et al. Decision-making behavior of power suppliers in the green certificate market: A system dynamics analysis [J]. *Energy Policy*, 2022, 171: 113296.
- [38] Rannou Y, Boutabba M A, Barneto P. Are green bond and carbon markets in Europe complements or substitutes? Insights from the activity of power firms [J]. *Energy Economics*, 2021, 104: 105651.
- [39] 张显, 史连军. 中国电力市场未来研究方向及关键技术 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(16): 1–11.
- Zhang X, Shi L J. Future research areas and key technologies of electricity market in China [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(16): 1–11.
- [40] 刘昊, 郭焯, 孙宏斌. 中国跨区跨省电力交易综述及展望 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15): 187–199.
- Liu H, Guo Y, Sun H B. Review and prospect of inter-regional and inter-provincial power trading in China [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(15): 187–199.
- [41] 孙大雁, 关立, 胡晨旭, 等. 省间电力现货交易机制设计与探索 [J]. 电网技术, 2022, 46(2): 421–428.
- Sun D Y, Guan L, Hu C X, et al. Design and exploration of inter-provincial power spot trading mechanism [J]. *Power System Technology*, 2022, 46(2): 421–429.
- [42] Hu B, Zhou P. Can the renewable power consumption guarantee mechanism help activate China's power trading market [J]. *Energy*, 2022, 253: 124182.
- [43] 王小昂, 邹鹏, 任远, 等. 山西电力现货市场中长期与现货衔接问题及对策 [J]. 电网技术, 2022, 46(1): 20–27.
- Wang X A, Zou P, Ren Y, et al. Problems and solutions of me-

- dium & long-term trading connected with electricity spot market in Shanxi Province [J]. *Power System Technology*, 2022, 46(1): 20–27.
- [44] 曾鸣, 许彦斌, 马嘉欣, 等. “绿证交易+配额制考核”对责任主体交易策略影响研究 [EB/OL]. (2022-10-05)[2022-10-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20221028.1119.002.html>.
- Zeng M, Xu Y B, Ma J X, et al. Research on impact of “tradable green certificate trading+renewable portfolio standard assessment” on trading strategy of responsible subjects [EB/OL]. (2022-10-05)[2022-10-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20221028.1119.002.html>.
- [45] 汪鹏, 宋晓华, 杨昊雯, 等. 新配额制下电力-绿证-超额消纳量多尺度市场交易仿真 [J]. *系统仿真学报*, 2022, 34(11): 2458–2469.
- Wang P, Song X H, Yang H W, et al. Multi-market coupling trading simulation of electricity green certificate and excess consumption under new renewable portfolio standard [J]. *Journal of System Simulation*, 2022, 34(11): 2458–2469.
- [46] 冯昌森, 谢方锐, 文福拴, 等. 基于智能合约的绿证和碳联合交易市场的设计与实现 [J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(23): 1–11.
- Feng C S, Xie F R, Wen F S, et al. Design and implementation of joint trading market for green power certificate and carbon based on smart contract [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(23): 1–11.
- [47] 杨雪, 金孝俊, 王海洋, 等. 基于区块链的绿证和碳交易市场联合激励机制 [J]. *电力建设*, 2022, 43(6): 24–33.
- Yang X, Jin X J, Wang H Y, et al. Blockchain-based joint incentive mechanism for tradable green certificate and carbon trading market [J]. *Electric Power Construction*, 2022, 43(6): 24–33.
- [48] 彭文兵, 黄书旭, 张潮. 电力“现货+中长期”市场交易下不平衡电量分摊机制优化研究——考量将电力交易价格纳入分摊方法的分析 [J]. *价格理论与实践*, 2020 (12): 144–147.
- Peng W B, Huang S X, Zhang C. Study on the optimization of unbalanced electricity allocation mechanism under the “spot + medium and long term” electricity market transaction—Considering the analysis of electricity transaction price into the allocation method [J]. *Price: Theory & Practice*, 2020 (12): 144–147.
- [49] 程松, 周鑫, 任景, 等. 面向多级市场出清的负荷聚合商联合交易策略 [J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(20): 158–167.
- Cheng S, Zhou X, Ren J, et al. Bidding strategy for load aggregators in a multi-stage electricity market [J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(20): 158–167.
- [50] 孟繁林, 钟海旺, 夏清. 基于非凸报价的高比例新能源现货市场机制 [J]. *电网技术*, 2023, 47(1): 120–128.
- Meng F L, Zhong H W, Xia Q. Non-convex bidding-based spot market mechanism of high penetration renewable energy [J]. *Power System Technology*, 2023, 47(1): 120–128.
- [51] 朱军飞, 李京, 李辉, 等. 计及期权合约和交易路径的省间优化出清模型与算法研究 [J]. *智慧电力*, 2022, 50(7): 89–95.
- Zhu J F, Li J, Li H, et al. Inter-provincial optimization clearing model and algorithm considering option contract and trading path [J]. *Smart Power*, 2022, 50(7): 89–95.
- [52] 刘敦楠, 李竹, 董治新, 等. 基于标准能量块合约的电力中长期市场连续运营方案设计 [J]. *电网技术*, 2023, 47(1): 129–144.
- Liu D N, Li Z, Dong Z X, et al. Design of continuous operation scheme of electric power medium and long-term market based on standard energy block contracts [J]. *Power System Technology*, 2023, 47(1): 129–144.
- [53] 李国庆, 闫克非, 范高峰, 等. 储能参与现货电能量-调频辅助服务市场的交易决策研究 [J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(17): 45–54.
- Li G Q, Yan K F, Fan G F, et al. Transaction decision-making of energy storage stations participating in the spot energy and frequency modulation ancillary service market [J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(17): 45–54.
- [54] 高爽, 戴如鑫. 电动汽车集群参与调频辅助服务市场的充电调控策略 [EB/OL]. (2021-11-07)[2022-08-30]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20220829.1653.008.html>.
- Gao S, Dai R X. Charging control strategy for electric vehicle cluster participating in frequency regulation ancillary service market [EB/OL]. (2021-11-07)[2022-08-30]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20220829.1653.008.html>.
- [55] 林阿竹, 柯清辉, 江岳文. 独立储能参与调频辅助服务市场机制设计 [J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(12): 26–34.
- Lin A Z, Ke Q H, Jiang Y W. Market mechanism design of independent energy storage participating in frequency modulation auxiliary service market [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(12): 26–34.
- [56] 刘硕, 张梦晗, 夏清, 等. 基于备用辅助服务需求申报的现货市场机制设计 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(22): 72–82.
- Liu S, Zhang M H, Xia Q, et al. Design of spot market mechanism based on demand bidding of reserve ancillary service [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(22): 72–82.
- [57] 刘学, 刘硕, 于松泰, 等. 面向新型电力系统灵活性提升的调峰容量补偿机制设计 [J]. *电网技术*, 2023, 47(1): 155–163.
- Liu X, Liu S, Yu S T, et al. Design of peak load regulation capacity compensation mechanism for new power system flexibility enhancement [J]. *Power Grid Technology*, 2023, 47(1): 155–163.
- [58] 李振坤, 魏砚军, 张智泉, 等. 有源配电网黑启动恢复供电辅助服务市场机制研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(18): 6641–6654.
- Li Z K, Wei Y J, Zhang Z Q, et al. Research on market mechanism of black start restoration auxiliary service in distribution network [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(18): 6641–6654.
- [59] Sreekumar S, Yamujala S, Sharma K C, et al. Flexible ramp products: A solution to enhance power system flexibility [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 162: 112429.
- [60] 刘敦楠, 李竹, 徐尔丰, 等. 面向新型电力系统的灵活能量块交易出清模型 [J]. *电网技术*, 2022, 46(11): 4150–4162.
- Liu D N, Li Z, Xu E F, et al. Flexible block order trading clearing model for new power systems [J]. *Power System Technology*, 2022, 46(11): 4150–4162.
- [61] 王宣元, 刘蓁. 虚拟电厂参与电网调控与市场运营的发展与实践 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(18): 158–168.
- Wang X Y, Liu Z. Development and practice of virtual power plant participating in power grid regulation and market operation [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(18): 158–168.
- [62] 高洪超, 陈启鑫, 金泰, 等. 考虑虚拟电厂灵活调节特性的现货市场出清模型及灵活性溢价评估方法 [J]. *电网技术*, 2023, 47(1): 194–207.
- Gao H C, Chen Q X, Jin T, et al. Clearing model and flexible premium evaluation method of spot market considering flexible regulatable characteristics of virtual power plant [J]. *Power System Technology*, 2023, 47(1): 194–207.
- [63] Cai T T, Dong M Y, Chen K, et al. Methods of participating power spot market bidding and settlement for renewable energy systems [J]. *Energy Reports*, 2022 (8): 7764–7772.