

低碳综合能源系统研究框架与关键问题研究综述

袁 越¹, 苗安康¹, 吴 涵¹, 朱俊澎¹, 王作民², 钱 康²

(1. 河海大学电气与动力工程学院, 南京 211100;

2. 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 南京 211102)

摘 要: 低碳综合能源系统是融合多种低碳技术和措施、集成灵活性资源、促进清洁能源消纳、降低碳排放的多能源系统, 是实现“双碳”目标的物理载体。首先, 从能源转型的宏观战略、物理载体和低碳技术角度论证了低碳综合能源系统是能源转型的有效路径, 归纳了低碳综合能源系统的定义与特征内涵; 然后, 构建了低碳综合能源系统的研究框架, 从源-网-荷-储及碳捕集等环节挖掘了低碳综合能源系统的减排潜力; 为了充分发挥低碳综合能源系统的低碳优势, 从协同规划与优化调度、市场机制等角度提炼了低碳综合能源系统的几个关键问题; 最后, 聚焦提炼的协同优化关键问题, 从研究现状、面临问题和研究展望等方面进行了阐述, 以期能为能源系统的低碳发展提供参考。

关键词: “双碳”; 低碳综合能源系统; 低碳研究框架; 减排潜力; 关键问题; 协同规划与调度

Review of the Research Framework and Key Issues for Low-carbon Integrated Energy System

YUAN Yue¹, MIAO Ankang¹, WU Han¹, ZHU Junpeng¹, WANG Zuomin², QIAN Kang²

(1. School of Electrical and Power Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. China Energy Engineering Group Jiangsu Electric Power Design Institute Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The low-carbon integrated energy system is a multi-energy system that integrates multiple low-carbon technologies and measures, fully mobilizes flexible resources in the energy system, promotes clean energy accommodation and reduces carbon emissions, and is a physical carrier to achieve the goal of carbon peaking and carbon neutrality. Firstly, this paper demonstrates the low-carbon integrated energy system as a practical path for an energy transition from the perspectives of macro strategy, physical carrier, and low-carbon technology. This paper summarizes the definition and characteristics connotation of the low-carbon integrated energy system. Then, a low-carbon research framework is established, and the carbon reduction potential of the low-carbon integrated energy system is explored from the source-grid-load-storage and carbon capture technology. To fully mobilize the low-carbon potential of the low-carbon integrated energy system, several key issues of the low-carbon integrated energy system are extracted and summarized from aspects of cooperative planning, optimal scheduling, and low-carbon market mechanism. Finally, focusing on these collaborative optimization key issues, this paper elaborates the low-carbon integrated energy system development from the viewpoint of research status, challenges, and research prospect so as to provide a reference for the low-carbon development of energy systems.

Key words: carbon peak and carbon neutrality; low-carbon integrated energy system; low-carbon research framework; carbon reduction potential; key issues; cooperative planning and optimal scheduling

0 引言

全球的环境恶化和气候变暖给绿色可持续发展带来了严峻的挑战, 实施节能减排措施, 减少温

室气体排放已成为全球共识^[1]。能源活动的碳排放是我国碳排放的主要来源, 约占全社会 CO₂ 排放总量的 87%, 约占温室气体排放总量的 73%^[2]。在此背景下, 被认为是能源行业低碳转型重要解决方案的综合能源系统(integrated energy system, IES)越来越受到关注^[3-4]。IES 耦合了多种异质能源系统, 促进了能源的互补协调和梯级利用, 可以提高能源的利用效率, 促进清洁能源的消纳, 加快“双碳”目标的实现^[5-6]。

基金资助项目: 江苏省自然科学基金(BK20221165); 江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX22_0606); 中国能源建设集团科技项目(CEEC2020-KJ07)。

Projected supported by Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20221165), Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (KYCX22_0606), Science and Technology Projects of China Energy Engineering Group (CEEC2020-KJ07).

为了探索能源的低碳发展,综合能源系统的规划与运行^[7-8]、碳交易市场的建设^[9]、低碳技术的应用^[10-11]、碳排放的计量^[12]等研究越来越受到关注。诸多研究成果为综合能源系统的低碳化发展指明了方向,通过清洁能源替代^[13]、碳捕集技术^[14]、多元化储能技术^[15]、能源互联互通^[16-17]、综合需求响应机制^[18]和碳交易机制^[19]等低碳技术手段和机制措施,以清洁替代和能效提升的方式来直接或者间接地降低能源系统的碳排放。目前,对于综合能源系统的低碳化发展,国内外不仅从学术方面开展了相关研究,还从示范工程项目方面进行了探索,例如:集成了潮汐发电和海水源热泵的加拿大耶洛奈夫镇项目,融合电动汽车、储能和微型热电联产的美国山核桃街项目,实施需求侧管理的日本柏叶智慧城市项目,发挥乡村生物质资源丰富优势的中国安徽小岗村综合能源示范项目,集成碳捕集技术的中国泰州电厂碳捕集示范项目,实现多能互补的中国苏州同里综合能源服务中心示范项目等。

对于能源系统的低碳发展,虽然在学术研究和工程示范上已做了大量探索,但对于低碳综合能源系统还没有明确的定义,对于综合能源系统的低碳发展路径及其减排潜力还有待探索与挖掘,对于综合能源系统的低碳发展问题缺乏系统性的梳理和总结。因此,本文首先对综合能源系统的低碳发展路径进行了分析,归纳总结了低碳综合能源系统的定义与特征内涵;然后构建了低碳综合能源系统研究框架,挖掘了低碳综合能源系统在源-网-荷-储及碳捕集环节的节能减排潜力;为了充分发挥系统的低碳潜力,从协同规划与调度、市场机制等角度提炼了影响低碳潜力的几个关键问题;最后,针对协同优化关键问题,从研究现状、当前面临问题和未来研究展望等方面进行了分析和阐述。

1 综合能源系统低碳发展路径分析

能源转型的根本目的是构建绿色低碳、安全高效和新能源占比逐渐提高的新型能源体系^[20]。我国煤炭资源较为丰富,能源结构长期以煤为主,并且能效有待提高,然而经济的快速发展又需要能源的支撑。因此,清洁的能源替代和能源碳排放强度的降低将是我国“双碳”目标实现的关键。针对以上问题,能源低碳转型路径越来越受到关注。

从能源转型宏观战略角度,减少化石能源的消耗与促进新能源的发展是能源转型的根本途径,政

策支撑与市场机制是能源转型的主要保障,能源系统的互联与低碳技术的应用是促进能源转型的有效措施^[21]。从能源转型物理载体角度,构建绿色低碳、安全高效的新一代能源系统,应对能源供应和消费方式的革命性变化,是当前能源转型的根本任务^[4]。各类能源自身的局限性和终端能源需求的多样性,决定了单一能源难以承担起能源转型的重任。IES是承载电、气、热、冷和氢能等多种能源互联互通和高效利用的物理网络,是连接能源生产、传输和消费等环节的功能载体,能源转型只有依托于能源系统的低碳建设与发展才能实现^[22]。从能源转型低碳技术角度,能源的低碳转型离不开碳捕集技术、清洁能源发电技术、电能替代技术、能源耦合转换技术和储能技术等关键低碳技术的支撑^[10, 23]。

综上,能源的低碳转型与综合能源系统的低碳发展是相辅相成的,作为能源生产、传输与消费的主要载体,低碳综合能源系统将是能源转型发展的必然趋势。目前关于低碳综合能源系统还没有一个明确、统一的定义,但根据能源系统多能互补与绿色低碳的发展趋势,结合文献^[3, 24]的研究基础,本文认为低碳综合能源系统应该是融合多种低碳技术和节能减排措施,充分利用源-网-荷-储多个能源环节的灵活性资源,以促进清洁能源消纳、提高能源综合利用效率、降低碳排放为目的的多能源系统。从低碳综合能源系统内涵分析,应具备图1所示的特征,主要包括多能源互补、多环节设备、多网融合、多元储能、多能负荷、多重机制和多样化服务等。

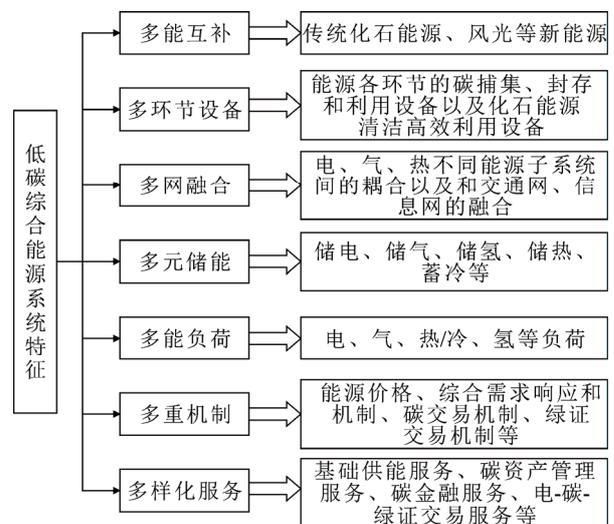


图1 低碳综合能源系统特征内涵

Fig.1 Characteristics of the low-carbon IES

2 低碳综合能源系统低碳特性及减排潜力

本文将碳生命周期分为碳排放和碳吸收 2 个阶段, 并针对 2 个阶段从源/网/荷/储能源环节和碳捕集技术来分析、挖掘低碳综合能源系统的低碳特性及减排潜力。在碳排放阶段, 低碳综合能源系统在源侧促进清洁能源替代、在网侧减少能源损耗、在荷侧实施电能替代、在储能侧利用多元化的储能方式, 依托于相应的低碳技术和高新技术设备, 通过碳源减少和碳排放削弱等技术和手段, 以直接或间接的方式降低碳排放; 在碳吸收阶段, 由于短时期内以煤炭为主的化石能源仍将占据我国能源结构中的主导地位, 不可避免地需要利用化石能源来满足能源供需平衡而造成碳排放。对于这部分不可避免的碳排放, 可以利用碳捕集技术对排放的碳进行捕集、运输、利用和封存, 从而减少碳的净排放。因此, 本文构建了低碳综合能源系统的研究框架, 如附录 A 图 A1 所示, 基于该研究框架, 分析和挖掘低碳综合能源系统各环节的低碳特性和减排潜力。

2.1 源侧特性及减排潜力

低碳综合能源系统具有丰富的能源资源, 除了包含传统的化石能源外, 还融合了大量的清洁能源, 如风电、光伏、光热、水电、氢能等, 可以实现多种能源的互补互济。低碳综合能源系统源侧的节能减排潜力主要通过化石能源的清洁高效利用和清洁多能源互补替代来体现。

1) 化石能源的清洁高效利用

当前阶段以煤炭为主的化石能源仍然是我国的主体能源, 化石能源高效清洁利用技术是国家能源结构转型的关键^[25]。淘汰落后产能的传统火电机组, 利用化石能源高效清洁技术, 提高化石能源的综合利用效率, 是实现碳排放削弱的主要技术和手段。文献[26]从能源演变过程出发, 指出能源清洁低碳化利用是必然趋势, 但针对能源发展情况, 化石能源的高效清洁化利用是当前需要, 规模化的清洁能源并网是战略性趋势。

2) 清洁多能源互补替代

低碳综合能源系统接入了风电、光伏、光热、水电、氢能等多种清洁能源, 融合了电、热、气等多种能源系统, 可以实现能源生产和消费的低碳化。以风光为主的新能源因与天气等环境因素密切相关而存在间歇性和波动性。低碳综合能源系统背景下, 不同类型的能源可以在时间和空间上协同互补,

能够改善新能源出力的波动性, 促进清洁能源消纳。能源的梯级利用具有巨大的节能潜力, 通过提高能源的综合利用效率来降低能源的需求总量, 低碳综合能源系统的碳排放相应减少。文献[27]证实了风光水等能源和电-气综合能源系统在季节、日和日内等多个时间尺度上存在互补特性, 对包含多种可再生能源和多能源系统的综合能源系统进行协同规划建模, 可以有效应对新能源出力的随机性问题, 促进新能源消纳, 进而降低系统的碳排放。

2.2 网侧特性及减排潜力

低碳综合能源系统联通了不同能源子系统网络和交通信息网络。不同的能源网络在运行过程中具有不同的运行特性, 依托于先进的技术水平和设备, 低碳综合能源系统可以充分调动供能网络的灵活性, 促进可再生能源消纳, 减少能量在传输过程中的损耗, 间接减少碳源的消耗、降低碳排放。低碳综合能源系统网侧的节能减排潜力主要表现为电网的主动管理和能源-信息-交通多网融合等几个方面。

1) 电网的主动管理

低碳综合能源系统中的电力网由传统的被动式网络转变为多源可控的主动式网络, 电网的主动管理是提高可再生能源发电消纳能力、支撑低碳经济发展的重要手段。文献[28]指出在配电网中进行主动管理可以充分调动配电网中的灵活性资源, 有效减少网络损耗和提高能源的利用效率。

2) 能源-信息-交通多网融合

作为战略性与基础性的行业, 能源、信息和交通是生产生活与经济发展的根本保障, 能源网、信息网和交通网融合发展是实现“双碳”目标的有效途径之一^[29]。构建低碳综合能源系统可以更好地促进能源网与其他低碳网络相互融合协同发展, 为能量流与信息流的深度融合和双向互动提供物理载体。文献[30]以能源网与交通网融合下的弹性公路能源系统为对象开展了研究, 从能源转型、经济建设和发展布局等方面阐述了能源网与交通网融合发展的必要性与低碳性。

2.3 荷侧特性及减排潜力

随着“双碳”目标的快速推进和新能源的快速发展, 源侧调节能力显著下降, 亟待充分挖掘负荷侧的灵活调节能力, 弥补新能源并网所引起的灵活性资源匮乏问题。低碳综合能源系统包含冷、热、电、气等多能负荷, 并且每类负荷中还存在大量可控的柔性负荷, 在能源价格和激励措施的刺激下具

有很大的柔性调节潜力；不同于电力负荷，冷热负荷具有明显的热惯性，在满足用户满意度的前提下可以更为经济地进行柔性调节；不同区域、不同类型的负荷需求不仅具有显著的时空互补特性^[17]，还存在互联互通相互转化的耦合关系，通过不同系统之间的协同优化，可以提高能源的转化和利用效率，降低能源的消费总量，进而减少碳排放。低碳综合能源系统荷侧的节能减排潜力主要表现在柔性负荷的灵活特性和多能负荷的互补特性。

1) 柔性负荷的灵活特性

对于低碳综合能源系统中的柔性可控负荷，采用价格或激励机制进行调节，以挖掘系统负荷侧的灵活性潜力，通过促进新能源消纳和减少能源消费来实现节能减排的目的。以数据中心和电动汽车为代表的柔性负荷可以实现多能负荷时间维度和空间维度的转移，提高能源系统的综合利用效率，促进综合能源系统的数字化转型和拓展数据增值服务业务^[31]。文献[32]针对综合能源系统中的多能源耦合和多时间尺度特性，将用户侧需求响应模型和用户侧的热动态特性等关键技术应用于多能流优化调度，挖掘用户侧资源的灵活调节能力。

2) 多能负荷的互补特性

不同区域的多能负荷的用能高峰具有明显差别，多能负荷在时序上和空间上都存在互补特性。充分利用低碳综合能源系统中多能负荷的互补特性，可以有效提高系统的灵活性，促进新能源的消纳。不同的能源形式通过大量的能量转换设备进行转换，如电-热转换、气-电转换、氢-电转换、氢-热转换等。在低碳综合能源系统的优化调度中，可根据能源资源、能源价格、低碳约束等条件，实现系统的低碳经济运行。文献[33]提出了一种考虑多能负荷灵活分配的综合能源系统协同规划方法，充分发挥负荷侧的耦合互补特性，降低了能源系统的损耗。文献[34]基于多能负荷互补替代的特点，构建了多能负荷互补弹性曲线模型，通过参与市场使负荷侧的购能方式更加灵活，且能有效降低购能价格，提升了能源市场的社会福利，提高了能源系统的运行效率。

2.4 储侧特性及减排潜力

储能作为一种灵活的可调度资源，可以提升能源系统各环节的灵活性和可靠性，是平抑功率波动和改善供能质量最有效的途径之一。低碳综合能源系统具有融合电、气、冷、热、氢等多种能源形式

的储能能力，可以更好应对大规模清洁能源并网下系统的波动，促进清洁能源的消纳，降低系统运行成本和减少碳排放。低碳综合能源系统在储能侧的节能减排潜力主要表现为实体的多元储能和虚拟的广义储能，促进系统清洁能源的消纳，提升系统供能的灵活性、经济性和可靠性。

1) 实体的多元储能

低碳综合能源系统通过耦合储电、储气、储热、储氢等多元储能设备，结合各类能量转换设备，根据优化运行策略将用能低谷时段的新能源进行储存，在需要时采用经济灵活的形式使用，可以平抑系统的多重不确定性，提高系统的供能可靠性，促进新能源的消纳。文献[35]从平抑效果和平抑成本2个角度验证了储能对于风电出力波动的平抑效果。文献[36]指出储电、储气、储氢、储热和蓄冷等多种类型的分布式储能在解决配电侧新能源机组随机性、波动性的同时，提升了系统运行的灵活性与经济性。

2) 虚拟的广义储能

低碳综合能源系统除了融合了冷、热、电、气等实体的多元储能外，还融合了很多虚拟的广义储能，如电动汽车的移动式储能特性、冷热系统的热惯性、气网的管存特性等，可以实现能量的时空转移，具备实体储能的储能特性。热力网和天然气网的动态特性可以提高系统适应波动的能力，协同配合柔性负荷消纳清洁能源，使供能更加安全可靠，提升系统的碳减排潜力^[24]。文献[37]研究了热网与气网的管网动态特性，构建了多能流动态潮流模型，验证了气网和热网的动态特性可以有效提升系统的整体灵活性，配合柔性负荷的调节能力，可以有效促进新能源消纳，提升能源系统运行的经济性和低碳性。文献[38]认为能改变能量的时空特性和支撑能量供需平衡的设备、方法和措施都属于广义储能，如电动汽车的移动式储能特性、空调集群效应和综合需求响应等。广义储能具备实体储能同样的效果，可以缓解新能源出力的不稳定性，降低能源系统的运行费用，提高供能可靠性^[39]。

2.5 碳捕集技术减排潜力

低碳综合能源系统不仅实现了能源的清洁高效利用，还集成碳移除设备，通过相应技术捕集使用化石能源所排放的二氧化碳。在低碳综合能源系统中，碳捕集的应用范围更为广泛，如燃煤去碳、燃气去碳、生物质去碳^[40]等，化石燃料燃烧的环节

均可引入碳捕集装置^[3]。碳捕集利用与封存(carbon capture, utilization and storage, CCUS)技术可以提高低碳综合能源系统能源生产设备的清洁化水平; CCUS 技术搭配余热回收等循环利用装置, 可以提高能源的循环利用效率, 减少能源消费; CCUS 技术与多能生产和转换设备的深度耦合, 有助于多种能源灵活互补转化, 进而促进清洁能源消纳。因此, 低碳综合能源系统中 CCUS 的节能减排潜力主要体现在碳捕集利用与封存、能量循环利用特性和系统灵活运行特性几个方面。

1) 碳捕集利用与封存

CCUS 技术是实现火电机组低碳改造的关键技术, 对于建立清洁低碳的新型能源体系具有积极意义。相比于传统火电机组, 碳捕集机组具备更大的出力调节范围, 能够为能源系统提供更多的灵活性资源; 碳捕集机组实现了化石能源的高效清洁利用, 有效减少了火电机组的碳排放, 是低碳综合能源系统发挥低碳作用的重要支撑。目前, CCUS 技术在我国的发展和应用尚处于起步阶段, 需要加大技术研发和资金扶持力度、推广示范项目及商业化应用, 助力我国“双碳”目标的实现。

2) 能量循环利用特性

低碳综合能源系统中碳捕集转置捕获的二氧化碳可作为电转气的原料来制取甲烷等, 碳捕集产生的富余热能也可进行回收循环利用, 从而降低系统的碳排放, 提高系统的综合利用效率。文献[41]构建了碳捕集与电转气协同的低碳调度模型, 基于碳捕集系统将捕获的二氧化碳作为制取甲烷的原料, 在减少系统碳排放的同时提高系统运行的经济性。

3) 系统灵活运行特性

在碳捕集系统引入溶液存储器等设备, 可以使碳捕集系统的碳捕集状态与机组出力在一定程度上解耦, 灵活分配碳捕集系统的功率输出与碳捕集功率消耗。碳捕集系统的综合灵活运行方式具有良好的调峰性能和备用特性。文献[42]研究了碳捕集系统不同的运行方式, 可以灵活调节系统的净出力范围与碳捕集水平, 提高系统的灵活性能力, 实现系统的低碳经济运行。

3 低碳综合能源系统协同规划与优化调度

如何对低碳综合能源系统的灵活性资源进行灵活调控是提高能源利用效率和降低碳排放所面临

的主要难题。为调动各环节的灵活性资源, 充分发挥低碳综合能源系统的减排潜力, 需要从低碳综合能源系统的规划与优化调度等多个层面来协同考虑。根据地理范围和能源生产、输送、供配和消费特性, 现有研究将综合能源系统划分为跨区级、区域级和用户级^[3,16]。

3.1 低碳综合能源系统的协同规划问题

低碳综合能源系统涵盖电力、天然气和热力系统等多个子系统, 能源互联的理念打破了传统多种能源形式的子系统独立规划壁垒, 可以增加不同能源系统的协同效益。现有综合能源系统协同规划研究主要以经济性和安全性为目标; 低碳综合能源系统背景下, 碳减排目标将成为能源系统规划的重要组成部分, 协调多能源系统, 综合考虑安全、经济和环保等多方面的效益和风险, 构建低碳综合能源系统协同规划模型, 以实现能源系统的最优建设方案是低碳综合能源系统协调规划的主要目的。由于低碳综合能源系统涉及的要素繁杂众多, 特性差异明显, 规划模型存在多种的形式, 因此对于规划问题, 应从实际的决策需求出发, 根据主要影响因素构建更为准确的规划模型。不同层级低碳综合能源系统协同规划的主要问题如表 1 所示^[43-49]。

3.2 低碳综合能源系统的优化调度问题

能源的低碳转型与能源的生产、传输、转化、分配、存储和利用等过程紧密相关。低碳综合能源系统的优化调度旨在调动低碳能源系统各环节灵活性, 充分发挥其低碳潜力, 平衡环保性与经济性, 实现综合能源系统的低碳调度决策。低碳综合能源系统优化调度问题的研究思路如图 2 所示, 相比于传统以经济性为目标的调度方式, 低碳能源系统已发展为以安全经济与绿色环保等综合效益为目标的调度方式。如何从低碳综合能源系统的优化调度问题出发, 更好地发挥能源系统的低碳潜力, 是低碳综合能源系统优化调度亟需研究的重点。

图 3 展示了低碳综合能源系统协同优化关键问题。低碳综合能源系统关键问题的提炼和总结应从协同规划、优化调度和市场机制等多个层面和角度考虑, 聚焦低碳技术应用、规划和调度方法的实施、低碳机制引入和其他能够在低碳潜力挖掘方面具有积极影响的关键问题。针对发挥低碳综合能源系统节能减排潜力的众多影响因素, 通过挖掘分析与提炼总结, 并结合现有低碳综合能源系统的研究重点

表 1 低碳综合能源系统协同规划主要问题

Table 1 Key issues in collaborative planning for low-carbon integrated energy system

不同层级	规划目的	主要特点	建模要素	时间尺度	主要难题	处理方法	求解算法
跨区级	大型能源站的选址定容, 能源网络的最优路径与型号选择等	以电力系统和天然气系统为主, 能源的大规模远距离传输, 集中式清洁能源并网, 集成碳捕集技术等	电力系统潮流, 天然气系统潮流, 气网与热网的动态特性, 大型能源站功率平衡, 碳捕集电厂净出力, 输电网网架重构, 能源转换设备的耦合转换, 季节性储能, 交通网等	长时间	能源子系统耦合程度加深, 能源碳排放准确核算难度加大, 碳捕集与不确定性等精细化模型的构建与求解难度加大, 能源市场与碳交易市场规模和复杂程度上升 ^[43-44]	1) 对于不同能源子系统的耦合关系采用能源集线器或者能源母线模型表征, 以稳态多能流分析模型为主, 考虑系统和系统的变工况特性进行精细化建模研究。 2) 对于碳排放的核算, 供给侧可采用碳排放系数法或者全生命周期法, 消费侧可采用碳流分析法进行碳排放量核算。 3) 对于碳捕集技术的应用与建模, 可采用综合灵活运行方式。 4) 对于可再生能源出力和多能负荷的不确定性, 可根据不确定性产生的机理, 采用随机优化、鲁棒优化、分布鲁棒优化、区间优化和模糊优化等方法进行处理。 5) 在规划阶段考虑碳市场交易的市场化手段, 有利于促进能源系统降碳	1) 数学解析方法, 如 Benders 分解、C&CG 算法、分支定界法、交替乘子算法等。 2) 人工智能方法, 如启发式群优化智能算法和机器学习方法等 ^[45-46]
区域级	综合能源站、分布式能源、多元储能和能源网络的优化设计等	电、气、冷和热多能源形式, 多种灵活性资源, 多种分布式能源, 多元化储能 ^[47]	电力系统潮流, 天然气系统潮流, 气网与热网的动态特性, 配电网重构, 能源转换设备的耦合转换, 多元储能, 综合需求响应, 能源-信息-交通网融合等 ^[48]	较长时间			
用户级	微型供能设备、能源转换设备、多元储能设备、灵活用能设备等	以微型能源系统为主, 主要涉及源荷储多个环节, 引入节能技术与需求侧管理 ^[49]	系统功率平衡, 能源转换设备的耦合转换, 供能设备和多元储能的运行特性, 新能源汽车与建筑节能技术, 综合需求响应等	短时间			

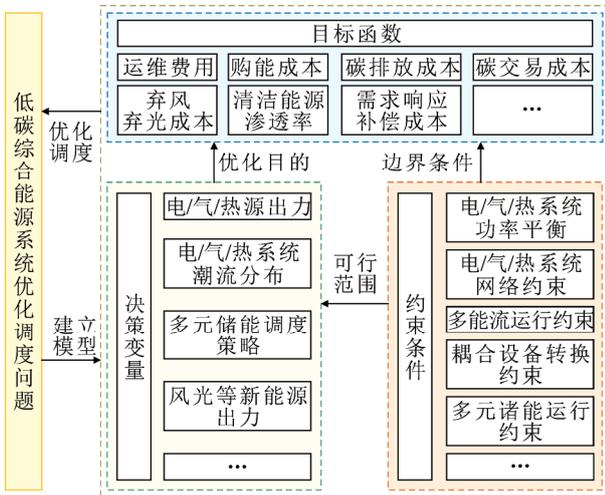


图 2 低碳综合能源系统优化调度问题研究思路

Fig.2 Research ideas on optimal scheduling of low-carbon IES

和热点, 本文主要从协同规划、优化运行和市场机制的角度, 将新能源集群调度、碳捕集技术应用、多重不确定性处理、综合需求响应、碳交易机制、多元储能应用等问题作为低碳综合能源系统协同优化关键问题进行了详细的综述和分析。

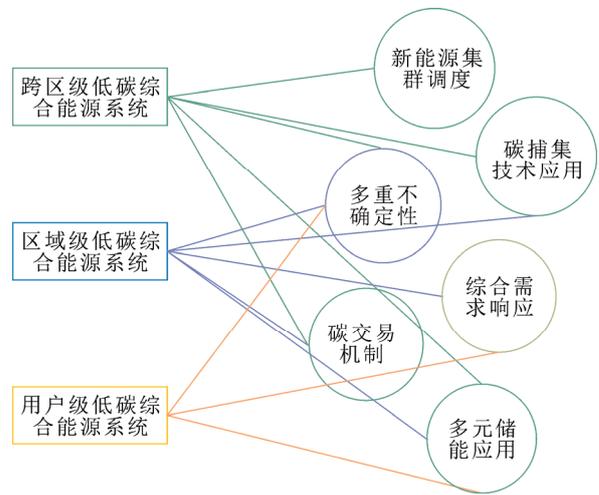


图 3 低碳综合能源系统协同优化关键问题

Fig.3 Cooperative optimization key issues of low-carbon IES

4 低碳协同优化关键问题研究现状

4.1 新能源集群调度研究现状

大力发展新能源是实现“双碳”目标的根本途径。随着大规模新能源的开发建设和利用, 新能源站的集群调度成了低碳综合能源系统所面临的重要问题之一。以风光为主的新能源电站具有随机性和

波动性大的特点,对新能源电站进行优化调度相对困难。新能源站的出力易受气候和环境的影响,并且电站的分布相对分散,不同地方的新能源电站的出力曲线具有明显差异。如果以单一新能源站为运行调度对象,对于调度建模和求解效率的影响较大,将会给电网的调度计划造成较大的不确定性。因此,对以风光为主的新能源站进行集群调度是促进新能源消纳、优化能源结构、减少能源系统碳排放的有效方法。

目前关于新能源集群调度的研究主要聚焦于新能源集群划分的原则和方法,以及集群划分的评价指标等。为了实现能源系统的稳定性与调度的简便性,常用的集群划分方法主要有 k-means 聚类、模糊 C 均值聚类算法和层次聚类算法等。集群划分的指标主要有:(1)体现集群结构强度的集群关联度指标、模块度指标和集群消纳能力指标等^[50];(2)表征集群自治能力的有功和无功调节容量指标、电压灵敏度指标和供需匹配度指标等^[51];(3)描述集群出力波动性的峰谷差比指标、最大波动比指标、峰值同时率指标、调峰容量比指标等^[52]。现有新能源站集群划分方法和评价指标仍存在一定程度的局限性。集群划分方法需要依靠主观预设聚类个数,可能会导致不合理结果。集群划分的指标主要反映了日内时间尺度出力的整体波动,难以体现出相邻时段的出力变化情况和出力曲线特性。

对于未来大规模新能源并网的集群调度,仍需要探寻更适合的集群划分方法和集群评价指标。新能源的集聚特性和电站规模大小密切相关,风光等新能源电站集群划分可以根据风光电站的分布特点,综合考虑风速和光照等时变的环境因素、不同分布位置条件、各电站出力变化特点、不同能源站的出力相关性、并网节点等,从同类型能源站的集群聚集特点和不同类型能源站的时空相关性和互补特性,研究新能源电站集群划分方法和准则。(1)首先确定集群划分的评价指标,分析新能源电站的出力特性,建立不同电站间的出力互补特性和波动性等指标,以此来反映集群的整体出力;(2)确定风光新能源电站集群的划分方法,综合考虑互补性和波动性等特点来建立评价指标;(3)依据新能源电站的历史数据,进行数据挖掘和聚类分析,建立集群的综合评价矩阵;(4)分析集群划分后的总体效果,从集群调度规模和利用效率等因素,确定集群的最优划分方式。

4.2 碳捕集技术应用研究现状

碳捕集技术作为减少化石能源燃烧和工业过程中二氧化碳排放的高效减排技术,已在实际工程应用中取得了良好的减排效果。碳捕集技术包括燃烧前捕集、燃烧后捕集和富氧燃烧捕集。(1)燃烧前碳捕集技术的能耗较低,但会改变发电流程,对现有电厂改造将受到一定的限制;(2)燃烧后碳捕集技术原理简单、适用性广,可以应用于大多数火电厂,但烟气中的 CO₂ 浓度较低,碳捕集能力弱,且能耗高、设备占地面积大;(3)富氧燃烧碳捕集技术对常规电厂的发电流程影响较小,碳捕集能力也较强,但需要创造高氧环境,成本相对较高,且对燃料的清洁性要求较高,不适用于燃煤电厂。碳捕集系统不仅能够降低碳排放,还可以参与系统的调峰和备用,提高低碳综合能源系统运行的灵活性,促进清洁能源的消纳。目前,碳捕集技术应用仍面临着建设成本和运行成本相对较高的难题,如何制定相应的激励措施和机制,采取灵活经济的运行方式,实现碳捕集系统的协同规划和低碳经济运行是低碳综合能源系统面临的挑战。

当前,化石能源燃烧仍是我国的主要碳排放源,而火力发电是其中主要的能源消耗方式。因此,对传统火电机组进行碳捕集改造可以在化石能源燃烧的过程中有效减少碳排放量^[53]。碳捕集机组主要有烟气分流式运行方式、储液式运行方式和综合灵活运行方式等^[54]。烟气分流式运行方式可以调整排出的烟气比例,实现调整碳捕集机组的净出力和碳捕集能耗的大小。储液式运行方式主要依赖于贫液和富液存储器,溶液存储器能够使实现碳捕集的碳吸收过程与碳分离过程的解耦运行。烟气分流式与溶液存储器相互协调配合组成综合灵活运行方式,将负荷高峰时段捕集的碳存储在溶液存储器中,在负荷低谷时段从富液存储器中分离出来,实现碳捕集能耗从高峰时段转移到低谷时段,扩大了碳捕集机组的净出力范围,提高了碳捕集水平和能源系统调度的灵活性。相比于传统火电机组,碳捕集机组可以更好地调节机组的出力,配合其他机组协调运行。不同运行方式下的碳捕集机组功率区间如附录 A 图 A2 所示。

在负荷高峰时段,分流式运行方式下的碳捕集机组净输出功率高,同时也会产生造成更多的二氧化碳排放。若此时对所有碳排放进行捕集,则会引起更大的碳捕集能耗,机组的净输出功率会相应降

低,加重负荷高峰时段的供能压力;在综合灵活运行方式情况下,溶液存储器可以将排放的二氧化碳储存起来,降低高峰时段的碳捕集能耗,提高碳捕集机组的输出功率。在负荷低谷时段,分流式运行方式下,碳捕集机组进行碳捕集来降低净输出功率,在碳捕集的同时促进清洁能源的消纳,减少二氧化碳排放。由于碳捕集机组出力降低,释放的二氧化碳量也相对较少;在综合灵活运行方式下,可通过捕集溶液存储器储存的高峰时段的二氧化碳来提高碳捕集机组的能耗,使碳捕集机组的净输出功率下限降低和净输出功率区间范围扩大,从而促进清洁能源的消纳。

文献[55]采用学习曲线模型和成本优化模型,探讨了我国燃煤电厂碳捕集改造潜力及其商业化发展的合适时机。文献[56]在考虑氢能的综合能源系统中引入碳捕集技术,验证了富氧燃烧技术有助于加深燃气机组与电转气系统的耦合,提高燃气机组的效率,降低碳捕集的能耗。文献[57]在能源系统中引入碳捕集技术和供热设备,研究表明碳捕集技术可以提高供热机组的调峰能力,降低系统的碳排放。目前针对碳捕集的研究主要聚焦于碳捕集系统对能源系统灵活性、经济性、低碳性的影响。为了更为准确地表征碳捕集系统的机理、挖掘碳捕集系统对于新能源消纳的支撑作用,文献[58]建立了双碳量模型,研究了碳捕集系统在储液式运行方式下的工作机理。上述研究主要分析了碳捕集技术的运行机理,验证了碳捕集技术具有显著的低碳特性,并且能够有效提升能源系统的清洁能源消纳能力和调峰能力。但碳捕集技术仍存在一定的局限性,若峰值负荷过大,则碳捕集机组在综合灵活运行方式下的输出功率将接近上限,会加剧传统火电机组提供备用容量的压力。碳捕集机组灵活运行方式的能量时移特性受到溶液存储器容量的限制,其体积较大、成本高,制约了碳捕集技术的规模化应用和发展。

4.3 多重不确定性研究现状

低碳综合能源系统作为实现“双碳”目标的物理载体,已从确定性的能源系统转变为强不确定性的能源系统。在源侧,高比例清洁可再生能源成为低碳综合能源系统的主要特征。相比于传统化石能源,以风光为主的清洁可再生能源易受天气条件和环境因素的影响,具有明显的随机性与波动性,给功率预测造成了困难,使得低碳综合能源系统运行具有显著的不确定性。在荷侧,随着电动汽车等灵

活性资源的广泛接入、用户侧光伏与储能的发展、综合需求响应机制的引入等,能源系统供需互动日益频繁,负荷侧也表现出不确定性特征。因此,如何准确描述低碳综合能源系统中的多重不确定性,建立准确的不确定性因素模型是提高多能互补协调运行水平、促进清洁能源消纳的关键问题,也是低碳综合能源系统协同规划和调度的基础。

低碳综合能源系统面临多重不确定性因素的影响,如源侧的风光等新能源出力、负荷侧的主动负荷和电动汽车负荷、能源价格和交易机制、技术和经济参数等^[59]。目前描述综合能源系统中多重不确定性的模型方法主要有模糊优化(fuzzy optimization, FO)、随机优化(stochastic optimization, SO)、鲁棒优化(robust optimization, RO)、分布鲁棒优化(distributionally robust optimization, DRO)和区间优化(interval optimization, IO)等,如表2所示^[60-69]。从不确定性的来源看,已有研究分析了风电、光伏、负荷和电价的不确定性;从不确定性的处理方法来看,随机优化和鲁棒优化的理论方法较为完善,应用简便,在综合能源系统的优化调度中应用最为广泛。

模糊优化采用模糊隶属度函数描述系统中的随机参数,常用的隶属度函数主要有三角形隶属度函数、梯形隶属度函数和高斯隶属度函数等。模糊优化实现了采用较少的样本数据或者经验表征系统中的不确定性,降低了对不确定性分布信息的依赖程度,但不确定性的处理方法存在很大的主观性。区间优化以区间形式描述不确定性参数,仅依据不确定变量的取值范围就可以求解,不但减少了不确定参数的信息量,还可以根据最优最劣子模型得出多种可行的优化方案。

随机优化以概率的方法描述随机参数,然后将不确定性问题转化为确定性问题的求解。随机规划模型主要有期望值模型、机会约束规划模型和风险度量模型^[62]。期望值模型以期望的形式给出目标函数,结构和求解较为简单方便。机会约束规划模型通过设置置信水平区间,要求在给定的置信水平区间内满足相应的约束条件。风险度量模型需要运用条件风险价值等工具,以规避系统在某些恶劣场景下的风险。目前随机优化在综合能源系统的不确定性处理中最为常用,但仍具有一些明显的缺点:(1)随机优化模型的构建需要较为准确的概率分布信息,在实际的应用中很难获取;(2)随机优化要考虑

表 2 不确定性建模研究现状

Table 2 Research status of uncertainty modeling

优化模型	特点	求解方法	文献	不确定因素	研究内容
FO	定量分析模糊性的不确定性问题, 隶属度函数的确定有主观性	模糊化约束和目标函数, 清晰类转化求解	[60] [61]	风电、光伏、光热 风电误差、负荷	综合能源系统低碳调度 综合能源系统优化调度
SO	经济性较好, 需确定概率分布, 鲁棒性较差、求解时间较长	结合场景生成, 场景削减等方法转化为确定模型求解	[62] [63]	风电、能源价格 光伏	综合能源系统能量管理 综合能源系统优化调度
RO	鲁棒性好, 经济性较差, 求解较快, 等价对偶转换比较困难	利用对偶转化, 采用 C&CG、Benders 分解等方法求解	[64] [65]	负荷 风电出力	综合能源系统经济调度 电-气能源系统优化调度
DRO	无需知道精确概率分布, 较好地平衡鲁棒性与经济性	通过线性决策规则、对偶转换等方法转化为确定性问题求解	[66] [67]	风电预测误差 风电、负荷	机组组合 综合能源系统两阶段规划
IO	无需确立概率分布或隶属度函数, 结果以区间形式给出	转化为最优和最劣子模型求解	[68] [69]	转换效率 风电、光伏、负荷	综合能源系统优化调度 综合能源系统优化调度

到数量庞大的随机应用场景, 大量的场景使得模型计算与求解速度较慢, 场景削减等技术虽然在一定程度上减少了计算量, 但也牺牲了相应的计算精度。

鲁棒优化以不确定集的形式表征能源系统中的不确定参数。常用不确定集主要有盒式不确定集、多面体不确定集、椭球不确定集和基数不确定集。盒式不确定集采用区间形式刻画不确定变量波动范围, 涵盖所有不确定性情景, 优化结果最为保守, 但会降低系统运行的经济性。多面体不确定集可以设置不确定度, 以此来调整优化结果的保守程度, 在处理不确定性问题的研究中应用较为广泛。盒式和多面体不确定集均未考虑不确定量之间的相关性, 而采用椭球不确定集可以描述不确定量的时空特性, 提高不确定参数刻画的准确度。鲁棒优化不需要确定不确定参数的概率分布信息, 只通过不确定性参数的上下限就可以求解, 求解速度相比于随机优化要快得多。相比于模糊优化和随机优化, 鲁棒优化的直接求解较为困难, 需要进行对偶转化, 转化过程较为复杂繁琐。

目前, 结合鲁棒优化与随机优化优势的分布鲁棒优化方法备受关注。分布鲁棒优化方法包括基于矩信息和基于概率密度信息 2 大类。相比于随机优化, 分布鲁棒优化不需要随机变量精确的概率分布信息, 仅通过建立包含真实概率分布的不确定集合, 在最恶劣的概率分布下进行最优决策, 克服了随机优化中获取精确概率分布信息的困难。分布鲁棒优化通过线性决策规则、对偶转换等方法将不确定性问题转化为确定性模型进行求解, 不会像随机优化在求解中出现采样规模大和求解时间长的问题。相比于鲁棒优化, 分布鲁棒优化包含了随机变量的部分概率信息, 优化结果的保守性有了一定改善。分

布鲁棒优化包含了随机变量的概率统计信息, 又具有鲁棒优化的思想, 优化结果平衡了保守性和经济性。

综上, 对于综合能源系统中的多重不确定性, 现有研究主要聚焦于源侧的风光等新能源出力和负荷侧的负荷预测。大部分研究考虑了单一不确定性因素的影响, 没有协同考虑多重不确定性因素的影响, 并且建模方法较为单一; 部分研究考虑了源荷双侧的不确定性, 但对于双侧不确定性都采用统一的建模方法和优化求解方法进行处理, 没有考虑源荷双侧不确定性产生机理不同而采取有针对性的处理方法。

4.4 综合需求响应研究现状

大规模新能源并网为低碳综合能源系统提供了清洁可靠的能源, 但也大幅削弱了源侧的灵活调节能力, 能源系统供需平衡压力增大, 造成能源系统源侧的灵活性资源短缺。在此背景下, 负荷侧的灵活调节能力逐渐显现出来。相关研究表明综合需求响应有助于维持能源系统的稳定性, 提高系统对可再生能源的消纳能力, 缓解负荷峰谷差过大的压力^[18]。低碳综合能源系统背景下, 多种能源的强耦合性与互补替代特性为综合需求响应提供了应用基础。低碳综合能源系统中多能负荷具有显著差异的用能特点, 对于不同的价格和激励信号会出现显著不同又紧密相关的用能行为。如何构建更为准确的多激励多类型的综合需求响应模型, 并以此为基础建立考虑综合需求响应的低碳综合能源系统协同规划和优化调度模型, 是低碳综合能源系统发展所亟需解决的问题。

在低碳综合能源系统中, 电、气、热、冷能源需求均包含可控负荷参与到需求响应中, 替代型综合需求响应扩展了负荷侧的灵活调节范围, 综合需

求响应也实现了横向的多能替代和纵向的时间转移。多能负荷的综合需求响应分类如图4所示。

综合需求响应可以结合能源系统自身的多能源供应特性,根据能源供需情况协调各类能源的供给方式,从而促进清洁能源消纳。对于价格型需求响应,文献[70]针对综合能源系统低碳调度问题,建立了价格型需求响应模型,分析其减排激励效果,验证了价格型需求响应对于低碳经济调度的作用。对于激励型需求响应,文献[71]研究了激励型需求响应的市场运行机制和实施流程,提出了一种考虑需求侧动态响应特性的激励型综合需求响应模型。在低碳综合能源系统中,电力、天然气、冷热等多种能源互补共济,除了价格型和激励型需求响应外,终端用户可以根据实时能源价格,选择不同形式的能源互补替代,满足用能需求。替代型需求响应充分利用多能源的耦合转化关系,能够平抑系统的波动,提高能源的综合利用效率,提升能源系统运行经济性和可靠性。

上述研究均体现了需求侧资源参与优化调度的灵活性,但仍存在以下问题:(1)大多研究仅考虑了一种类型的需求响应策略,很少有考虑不同类型能源间的相互转化替代,缺少对多种能源、多类型综合需求响应的精细化建模;(2)多数文献采用基于分时定价机制的价格型需求响应,相比于分时定价机制,实时定价机制具有更短的价格更新步长,能够根据能源供需关系实时差异化定价,具有更好的激励效果;(3)现有研究未能考虑综合需求响应与能源系统源-网-储环节的灵活性资源之间的互补协调关系,难以充分发挥综合需求响应在促进多能互补耦合与能源供需平衡方面的优势。

4.5 碳交易机制研究现状

碳交易机制是平衡能源经济性与环保性、降低能源系统的碳排放的有效方法。政府为碳排放单位分配初始碳排放额度,如果实际生产中所排放的CO₂比初始分配的碳配额高,则需要在碳交易市场上购买不足的碳排放额度,并支付相应碳排放费用;如果实际碳排放量比初始碳排放额度低,可以在碳交易市场上卖出多余的碳排放额度而获得相应收益。碳交易机制将碳排放权作为商品在市场上进行交易,极大地调动了碳排放单位节能减排的积极性,可以有效降低生产活动中的碳排放。在碳交易市场上,碳排放权作为商品进行交易,如何准确计量与核算能源系统的碳排放量是开展碳交易的基础和前

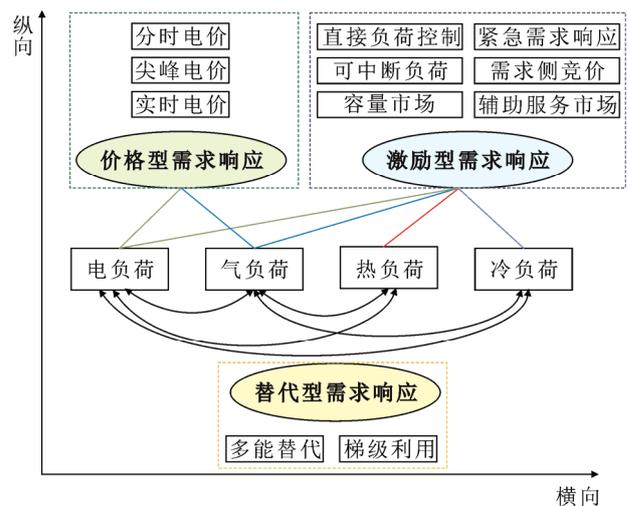


图4 多能负荷的综合需求响应类型

Fig.4 IDR types for multi-energy loads

提。如何将碳交易机制引入低碳综合能源系统,建立准确的、与低碳综合能源系统相适应的碳交易机制模型,是低碳综合能源系统充分发挥低碳特性的关键问题。

碳排放的准确计量与核算是引入碳交易机制和参与碳交易市场的前提。碳排放包括直接排放和间接排放,直接碳排放的分析方法主要包括实测法、排放因子法和物料平衡法;间接碳排放计量与分析方法主要有合作博弈法、定价机制法、灵敏度追踪法和碳排放流追踪法^[72]。文献[73]基于碳排放流理论,以动态碳排放因子为信号,激励用户参与碳交易市场,验证了能源系统用户侧的减排潜力。文献[74]基于 Shapley 值碳排放责任分摊方法提出了阶梯碳交易定价方法,分析了负荷侧的碳排放责任及成本,验证了需求侧管理可以有效降低系统总碳排放量。文献[75]对电力系统的碳排放计量进行了研究,提出了电力碳表系统的基本理念和形式。上述研究主要针对能源系统碳排放的表征和核算进行了探讨,指出能源系统碳排放的精准核算对于能源低碳转型和碳交易市场健康发展具有重要意义。然而能源系统源网荷储全环节碳排放的精准计量与核算的理论方法、计量标准和设备尚不完善。在低碳综合能源系统背景下,探索碳排放计量和核算的新方法,制定科学合理的计量标准和设计实施精准的测量设备对于挖掘能源系统全环节的减排潜力、助力能源系统低碳转型和支撑能源市场和碳交易市场建设具有重要意义。

在低碳综合能源系统优化调度中引入碳交易

机制可以有效降低系统的碳排放。现有研究的碳交易机制主要分为传统碳交易机制和阶梯式碳交易机制^[76]。随着综合能源系统的不断建设, 如何制定合理的碳交易机制, 促进综合能源系统不断向低碳化转型成为研究热点。部分研究通过分析欧洲碳交易模式, 提出碳排放权政策属性、商品属性和金融属性相结合的碳交易机制^[77]。文献^[78]在电-气综合能源系统调度模型中计及了传统的碳交易机制, 验证了碳交易机制可以显著影响能源系统的经济性与碳排放量。文献^[79]采用传统固定碳价的碳交易模式引导综合能源系统低碳运行, 结果表明固定碳价的奖惩激励效果并不显著, 可能会出现碳排放量超过配额过多的问题。目前碳交易机制是以年度进行结算, 存在碳交易配额与碳排放不匹配的问题, 导致碳排放量严重超标和碳交易成本增加等。

随着碳交易市场的不断完善, 阶梯式碳价逐步代替传统碳价, 成为碳交易市场的主流。如附录 A 图 A3 所示, 阶梯式碳交易机制模型主要包含初始碳排放权配额模型、实际碳排放量模型和阶梯式碳排放交易模型。目前我国主要采用基于基准线法的无偿碳排放配额方式进行初始碳排放额的分配^[80]。文献^[81]依据多种原则设置多个指标分配碳排放配额, 提出了省级碳交易初始配额分配方法。文献^[82]建立了考虑碳捕集技术和碳交易机制的园区综合能源系统模型, 利用生命周期评价方法分析不同能源链的温室气体排放, 对园区碳足迹进行核算, 计算了奖惩阶梯型碳交易机制下的碳交易成本。综上, 目前研究主要是将碳交易机制引入综合能源系统, 对碳交易机制的机理仍有待进一步分析, 并且已有的阶梯碳价分级过于复杂, 不能很好地引导综合能源系统向低碳化转型。

为促进能源的低碳发展, 我国已经形成了绿证交易、绿电交易和包含碳排放配额与中国核证减排量(China certified emission reduction, CCER)的碳交易多种市场机制。绿证、绿电和碳交易均体现了新能源的环境价值, 有助于形成绿色能源生产消费的市场体系和长效机制。但目前几种市场机制仍面临一些问题, 例如: 环境价值重复计算, 对可再生能源存在重复激励; 绿电的零碳属性尚未能得到充分认可, 不利于提升绿电消费需求; 在绿电零碳属性未充分体现的情况下, 通过碳市场购买配额和 CCER 就成为了主要履约手段, CCER 机制对于发现合理碳价存在影响; 碳成本变化会影响整体电力

价格, 价格传导机制不畅, 不利于能源绿色低碳转型, 对于传统发电企业而言负担过重, 对于新能源发电企业而言无法很好地从需求侧产生激励。

4.6 多元储能应用研究现状

储能系统作为一种响应速度快的灵活可调动资源, 在源侧可以平抑新能源出力波动和减少弃风弃光; 在网侧能够改善潮流分布、参与电网调频, 提高系统稳定性; 在负荷侧可以保障供能的质量和可靠性, 降低供能成本。在低碳综合能源系统框架下, 储电、储气、储氢、储热和蓄冷等多元化储能互补协调, 根据能源资源情况、能源价格、能源存储转换效率等约束限制, 可以更有效地提升能源系统运行的灵活性与经济性。储能作为低碳综合能源系统中不可或缺的重要组成部分, 目前仍面临着投资成本高和设备利用率较低等突出问题。如何推动储能的规模化应用、减低储能的使用成本、提高储能的利用效率、更好地发挥储能系统在源-网-荷多个环节的重要作用, 是多元储能在低碳综合能源系统协同规划和优化调度中需要重点关注的问题。

“双碳”目标下, 随着新型能源体系的构建, 促进低碳综合能源系统发展已是大势所趋。作为能源系统的重要组成部分, 储能系统正朝着储电、储气、储氢、储热和蓄冷多元化的方向发展。目前, 储能在能源电力系统中已得到了广泛应用, 其多重应用功能主要体现在以下几个方面^[83]: (1)源侧: 快速调频、抑制低频振荡、调峰、促进新能源消纳、平抑新能源出力波动、新能源出力计划跟踪、新能源出力爬坡控制、黑启动和旋转备用等; (2)网侧: 参与电网调频、电压稳定控制、优化新能源并网、优化潮流分布、缓解线路阻塞和延缓设备升级改造等; (3)荷侧: 改善电能质量、保障供能可靠性、促进分布式能源利用、削峰填谷、优化资源配置、参与市场调节和电动汽车并网调节等。从储能的应用功能现状来看, 现有的实际工程应用和理论研究均以电储能为主, 针对低碳综合能源背景下的多元储能在灵活调控方面的研究较少。然而, 储气系统能够为能源系统提供重要的备用和灵活性支撑作用, 储热在降低能耗和提高热网灵活经济运行方面具有显著优势, 蓄冷装置具有明显的削峰填谷作用。氢储能可应用于中长时间尺度的季节性调峰, 为系统提供能量支撑服务, 应用前景广阔。因此, 对低碳综合能源系统中的多元化储能进行深入研究, 有利于发挥储能系统的低碳经济优势, 促进能源系统的

低碳经济运行。

低碳综合能源系统背景下，多元储能的应用研究前景如图 5 所示^[84-85]。多元储能可以作为不同能源系统相互融合的枢纽，改善网络之间的刚性关联，实现能源系统在时间和空间上的解耦。如在优化调度中考虑热储能，可以突破“以热定电”的约束限制，使得能源系统更加灵活经济的运行^[86]。氢能是一种清洁低碳、高效灵活的能源载体和储能方式，可与电、热、气等不同能源形式耦合互补，形成以氢能为能量转换媒介的低碳能源系统，有助于提高能源利用灵活性。针对氢储能的碳减排效果，文献^[87]分析了氢储能的多能特性，构建了氢储能单元的多元储能协同模型，验证了氢储能在降低碳排放和提高综合能效等方面的优势。

基于“共享经济”理念的新型储能投资与应用模式“共享储能”越来越受到关注。共享储能一般是指一个储能设备为多个用户提供储能服务^[88]。不同用户的负荷需求具有差异性和互补性，共享储能运营商通过对多个用户的储能需求进行整合优化，合理配置储能容量，以提升储能设备的利用率、降低用户的投资成本^[89]。云储能是共享储能的新发展形态，可以将分散的多类型储能装置进行集中整合，采用云端虚拟的储能容量替代用户的实体储能，通过对储能的共享利用，提高储能的利用率，降低储

能使用成本，创造新的收益和盈利模式，缩短投资回收期。

目前，共享储能已在促进新能源消纳^[85]、新能源调峰^[90]、电网调频^[91]、社区能源服务^[92]和微电网建设^[93]等应用场景中进行了理论研究和工程实践，共享储能的技术可行性与应用经济性也得到了验证。文献^[94]将共享储能理念应用到售电公司储能优化配置及投资中，具有良好的投资效益和运行经济性。园区综合能源系统目前是共享储能和云储能应用研究的典型场景之一。文献^[95]分析了综合能源背景下的云储能机制，提出了一种考虑最优建设时序和云储能的园区综合能源系统优化配置方法。文献^[96]将共享储能应用到园区综合能源系统，验证了共享储能可以有效提升储能设备的利用率，促进分布式能源就地消纳和降低用户的用能成本。相比于传统储能，共享储能具有灵活性强、场景多样等优势，为多元储能的发展瓶颈提供了思路。

5 低碳协同优化关键问题研究展望

5.1 新能源集群调度

大规模新能源并网与常规电源相比有显著不同，风光等新能源具有明显的波动性与随机性，并且同一地区的风力发电、光伏发电受相同气候情况影响，多个风电场和光伏电场的出力存在着复杂的

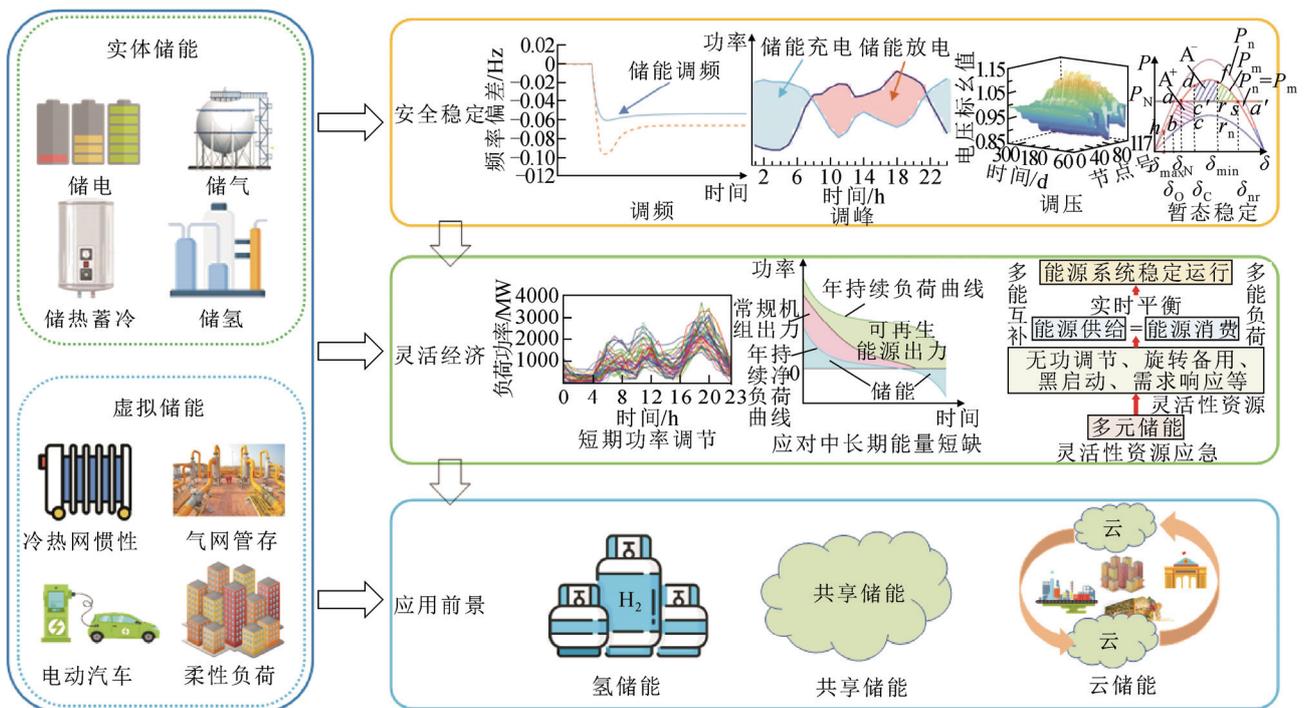


图 5 多元储能的应用前景

Fig.5 Multi-energy storage application prospect

相关性。如果直接将新能源大规模并网, 不仅会影响电力系统的安全稳定运行, 而且极易造成电网电压波动、网损加剧等问题, 并给能源电力系统的运行与规划工作带来巨大困难。因此, 为了更好地指导新能源的规划开发和并网运行, 必须准确描述风光复杂的相关性和互补特性, 提高新能源集群出力的建模精度。低碳综合能源系统背景下, 新能源站的集群划分方法要能够承载大规模的风电站和光伏电站融合, 利用不同类型、不同位置电站的空间平滑特性和时间互补特性进行汇聚整合, 建立考虑时空相关性的风光互补出力模型, 提高新能源站集群的可调度水平, 促进清洁可再生能源的消纳。

5.2 碳捕集技术应用

低碳综合能源系统背景下, 碳捕集机组可以与源-网-荷-储环节的其他灵活性资源相互协调配合, 充分发挥多种设备之间的互补特性, 实现最优能源供应。碳捕集机组捕获的二氧化碳可以作为电转气设备甲烷化过程的原料, 通过碳捕集机组与电转气设备的耦合来促进碳的循环再利用, 在减少碳排放的同时提高能源的综合利用效率, 并且缓解 CO₂ 的存储、运输和利用封存压力。对于碳捕集技术在低碳综合能源系统中的应用研究可以从以下几个方面开展: (1)碳捕集技术如何发挥灵活运行特性支撑高比例清洁能源并网; (2)碳捕集技术如何发挥良好的调峰与备用能力以更好地参与电力市场和碳交易市场; (3)碳捕集技术如何更好地发挥低碳特性以联合其他低碳技术和手段挖掘低碳综合能源系统的节能减排潜力等。因此, 应针对碳捕集电厂建立更为准确的数学模型, 包括烟气分流模型、碳存储溶液模型、碳吸收解析和压缩模型等, 以探索碳捕集电厂综合灵活运行方式下更为精准的能量转移特性和低碳特性, 为低碳综合能源系统的准确优化调度提供基础。

5.3 多重不确定性

对于不确定性的描述, 分布鲁棒优化方法可以作为应对低碳综合能源系统多重不确定性的重点研究方向。分布鲁棒优化模型考虑了不确定量概率分布的不确定性, 通过分析历史数据来获取不确定量的统计信息, 考虑统计信息的不确定性优化方法对于不确定性的描述将更为准确可靠。随着人工智能和数据挖掘技术的快速发展, 历史数据的挖掘分析将会更加简单, 可以简化分布鲁棒优化模型的转化与求解。分布鲁棒优化一般采用线性决策规则对模

型进行转化求解, 对于可能存在的非线性关系, 此方法会影响分布鲁棒优化模型的精度。如何利用人工智能和大数据技术来更准确地描述不确定性的概率分布或者不确定参数的波动范围、平衡分布鲁棒优化方法的保守性和精确性, 仍有待深入研究。能源系统在规划和运行时具有时序特征, 但目前的分布鲁棒优化方法主要针对固定时间点的不确定性问题描述, 对于多时间尺度的数据关联性研究不足。如何处理分布鲁棒优化方法中的多时间尺度关联性问题将是未来低碳综合能源系统低碳调度研究的重点。低碳综合能源系统的协同规划和优化调度将面临更为复杂的多重高维不确定性, 优化问题的规模也进一步加大, 而鲁棒优化和分布鲁棒优化等不确定性优化方法加重了模型求解的负担。对此, 将深度强化学习方法与鲁棒优化、随机优化和分布鲁棒优化等数学优化方法相结合, 可以为未来低碳综合能源系统中的多重高维不确定性协同优化问题提供建模和求解思路。另外, 针对低综合能源系统中的多重不确定性, 可以根据不确定性因素的产生机理, 选取针对性的不确定性优化处理方法, 例如针对源侧新能源采用随机优化来应对新能源出力的不确定性, 针对荷侧的需求响应负荷采用模糊优化处理, 针对系统中的技术或者经济参数和政策的不确定性可以考虑采用非概率的信息间隙决策方法等。

5.4 综合需求响应

如何充分调动源-网-荷-储各个能源环节的灵活性是解决未来高比例新能源并网、促进低碳综合能源系统稳定可靠运行的关键。需求侧灵活性资源丰富, 引入综合需求响应机制是促进能源系统供需互动、实现能源系统低碳经济调度的重要途径。由于需求侧的用户主体种类多样, 不同负荷类型在可调节容量、优化调度方法、需求响应速率、智能化的程度等方面具有显著差异。因此, 对于在低碳综合能源系统中引入综合需求响应机制, 可以从综合需求响应重点对象选择、需求响应机制设计、关键技术支撑、数学模型构建、规划与运行优化、商业模式探索等方面开展研究。在低碳综合能源系统中, 不同能流具有明显不同的时间尺度特性, 在优化调度时, 需要研究不同能流对价格变换和外界需求的响应速度, 以及不同能流在能源供需平衡上的时间要求。例如: 根据不同类型需求响应资源的响应特性和响应速率, 分析需求响应资源的多时间尺度特性, 建立更为准确的需求响应模型。目前关于综合

需求响应的研究仍缺乏完善的量化评估方法,难以定量评估综合需求响应在规划和优化运行层面的具体作用。因此可以从时间、空间、能流、实施对象、参与设备等方面构建多维量化指标,从响应行为、方式、效果、程度等多角度研究综合需求响应在低碳综合能源系统规划和运行层面上的效益评估方法。

5.5 碳交易机制

随着低碳综合能源系统和碳交易市场的发展,碳交易逐渐呈现多场景和多样化的特点,有待对碳交易机制进行完善和细化,以满足综合能源系统低碳发展的需求,实现能源市场和碳交易市场的同步发展。不同层级的低碳综合能源系统具有显著的差异,如能源结构、供能网络、能源生产和用能设备等,研究如何构建与能源系统对应的多层级的碳交易机制,是促进能源市场与碳市场互补协调、从而充分发挥碳市场低碳潜力的关键。在低碳综合能源系统中引入碳交易机制后,碳交易价格会显著影响能源机组的出力计划,还会进一步影响到能源市场的运行状态。相比于传统火电机组,清洁可再生能源机组近零排放,在碳市场中具有经济优势,将影响能源供应机组分配策略。碳交易市场对绿证、电力市场和天然气市场等能源市场也具有一定影响,影响各级能源市场的供需关系和市场均衡结果,进而影响能源系统的优化运行策略,在中长期尺度上也将促进能源结构的调整。因此,研究碳市场与其他能源市场之间的相互影响机理对于能源系统的低碳经济发展具有重要意义。目前,绿证、绿电和碳交易之间的协调机制仍存在不足,不同市场间的协同效用还有较大的提升空间,如何结合碳市场的发展趋势和我国实际情况,制定绿色电力消费与碳交易市场链接的政策机制,是促进绿电、绿证和碳市场协同发展的关键。对于不同市场的衔接机制,建议从以下方面着手:完善环境价值转移机制,明确绿证与 CCER 之间的制度边界,加强不同市场交易之间的数据共享,建立统一监管平台;理顺电碳价格传导机制,完善配额分配制度,控制 CCER 的抵消比例;结合碳交易和绿电交易,明确绿证的功能定位,加强与其他市场机制之间的融合。

5.6 多元储能应用

目前关于共享储能和云储能在综合能源系统中应用的研究主要以概念和理念为主,对于低碳综合能源系统背景下电、热、气、氢等多元实体储能与广义的虚拟储能的云储能等新型储能商业模式仍

有待深入研究。为了更好地发挥云储能的优势,可以聚焦于低碳经济的投资与规划方法、灵活高效的优化调度方法和科学合理的商业模式设计等关键问题,以降低储能系统投资成本、提高储能的利用效率。例如:从规划路径的角度,重点关注电力、热力和燃气系统的交互,从单一储能形式面向单一的服务模式逐步发展为多种储能形式提供多元化的储能服务,并最终实现根据多类型用户的差异来定制个性化的储能服务;从市场机制的角度,多元储能的应用需要一个稳定、有序的市场政策环境,以及完善的能量市场、辅助服务市场和价格机制的支撑,并基于完善的信息披露及监管机制,为用户提供优质的储能服务,从而推动多元储能的应用与推广。

附录见本刊网络版(<http://hve.epri.sgcc.com.cn>)。

参考文献 References

- [1] 孙蒙,李长云,邢振方,等.碳中和目标下中国碳排放关键影响因素分析及情景预测[J].高电压技术,2023,49(9):4011-4021.
SUN Meng, LI Changyun, XING Zhenfang, et al. Analysis of key influencing factors and scenario prediction of China's carbon emission under carbon neutrality[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 4011-4021.
- [2] 舒印彪,张丽英,张运洲,等.我国电力碳达峰、碳中和路径研究[J].中国工程科学,2021,23(6):1-14.
SHU Yinbiao, ZHANG Liying, ZHANG Yunzhou, et al. Carbon peak and carbon neutrality path for China's power industry[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 1-14.
- [3] 张沈习,王丹阳,程浩忠,等.双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J].电力系统自动化,2022,46(8):189-207.
ZHANG Shenxi, WANG Danyang, CHENG Haozhong, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 189-207.
- [4] 舒印彪,薛禹胜,蔡斌,等.关于能源转型分析的评述(一)转型要素及研究范式[J].电力系统自动化,2018,42(9):1-15.
SHU Yinbiao, XUE Yusheng, CAI Bin, et al. A review of energy transition analysis part one elements and paradigms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 1-15.
- [5] LIN S F, LIU C T, SHEN Y W, et al. Stochastic planning of integrated energy system via Frank-Copula function and scenario reduction[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(1): 202-212.
- [6] ZHANG D D, ZHU H Y, ZHANG H C, et al. Multi-objective optimization for smart integrated energy system considering demand responses and dynamic prices[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(2): 1100-1112.
- [7] 邵成成,王锡凡,王秀丽,等.多能源系统分析规划初探[J].中国电机工程学报,2016,36(14):3817-3828.
SHAO Chengcheng, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Probe into analysis and planning of multi-energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3817-3828.
- [8] HOSSEINI S H R, ALLAHHAM A, WALKER S L, et al. Optimal planning and operation of multi-vector energy networks: a systematic review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 133: 110216.
- [9] 程耀华,张宁,康重庆,等.低碳多能源系统的研究框架及展望[J].中国电机工程学报,2017,37(14):4060-4069.

- CHENG Yaohua, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Research framework and prospects of low-carbon multiple energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4060-4069.
- [10] 别朝红, 王则凯, 肖 遥, 等. 双碳目标下新型电力系统发展展望[J]. 新型电力系统, 2023, 1(2): 116-131.
- BIE Zhaohong, WANG Zekai, XIAO Yao, et al. Outlook on the development of new power system under dual-carbon target[J]. New Type Power Systems, 2023, 1(2): 116-131.
- [11] 韩肖清, 李廷钧, 张东霞, 等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3036-3046.
- HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036-3046.
- [12] CHENG Y H, ZHANG N, WANG Y, et al. Modeling carbon emission flow in multiple energy systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 3562-3574.
- [13] 曹 阳, 刘 纯, 黄越辉, 等. 基于等效聚合的大型互联网风电接纳能力[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2792-2799.
- CAO Yang, LIU Chun, HUANG Yuehui, et al. Wind power accommodation capability of large-scale interconnected power grid based on equivalent aggregation method[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2792-2799.
- [14] 周任军, 肖钧文, 唐夏菲, 等. 电转气消纳新能源与碳捕集电厂碳利用的协调优化[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 61-67.
- ZHOU Renjun, XIAO Junwen, TANG Xiafei, et al. Coordinated optimization of carbon utilization between power-to-gas renewable energy accommodation and carbon capture power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 61-67.
- [15] 侯 慧, 刘 鹏, 刘志刚, 等. 电热氢多元储能系统优化调度方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(2): 536-543.
- HOU Hui, LIU Peng, LIU Zhigang, et al. Optimal dispatch method for multi-energy storage system of electricity heat hydrogen[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 536-543.
- [16] 吕佳炜, 张沈习, 程浩忠, 等. 考虑互联互通的区域综合能源系统规划研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4001-4020.
- LÜ Jiawei, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Review on district-level integrated energy system planning considering interconnection and interaction[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4001-4020.
- [17] 刘 洪, 郑 楠, 葛少云, 等. 考虑负荷特性互补的综合能源系统站网协同规划[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 52-64.
- LIU Hong, ZHENG Nan, GE Shaoyun, et al. Station and network coordinated planning of integrated energy systems considering complementation of load characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 52-64.
- [18] 徐 箴, 孙宏斌, 郭庆来. 综合需求响应研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7194-7205.
- XU Zheng, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Review and prospect of integrated demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7194-7205.
- [19] WANG Y Q, QIU J, TAO Y C, et al. Carbon-oriented operational planning in coupled electricity and emission trading markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 3145-3157.
- [20] 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): 1663-1671.
- 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): 1663-1671.
- [21] 李 政, 陈思源, 董文娟, 等. 碳约束条件下电力行业低碳转型路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 3987-4000.
- LI Zheng, CHEN Siyuan, DONG Wenjuan, et al. Low carbon transition pathway of power sector under carbon emission constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 3987-4000.
- [22] 别朝红, 任彦哲, 李更丰, 等. “双碳”目标下城市能源系统的形态结构和发展路径[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(17): 3-15.
- BIE Zhaohong, REN Yanzhe, LI Gengfeng, et al. Morphological structure and development path of urban energy system for carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(17): 3-15.
- [23] 刘永奇, 陈龙翔, 韩小琪. 能源转型下我国新能源替代的关键问题分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 515-523.
- LIU Yongqi, CHEN Longxiang, HAN Xiaoqi. The key problem analysis on the alternative new energy under the energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 515-523.
- [24] 杨 龙, 张沈习, 程浩忠, 等. 区域低碳综合能源系统规划关键技术与挑战[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3290-3303.
- YANG Long, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Regional low-carbon integrated energy system planning: key technologies and challenges[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3290-3303.
- [25] 吕清刚, 柴 祯. “双碳”目标下的化石能源高效清洁利用[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 541-548.
- LYU Qinggang, CHAI Zhen. Highly efficient and clean utilization of fossil energy under carbon peak and neutrality targets[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 541-548.
- [26] 王 震, 刘明明, 郭海涛. 中国能源清洁低碳化利用的战略路径[J]. 天然气工业, 2016, 36(4): 96-102.
- WANG Zhen, LIU Mingming, GUO Haitao. A strategic path for the goal of clean-and-low-carbon energy in China[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(4): 96-102.
- [27] 葛怀宇, 贾燕冰, 韩肖清. 考虑季节互补特性的电气综合能源系统容量规划[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 147-157.
- GE Huaiyu, JIA Yanbing, HAN Xiaoqing. Capacity planning of integrated electricity-gas energy systems considering seasonal complementarity[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 147-157.
- [28] ANTONIADOU-PLYTARIA K E, KOUVELIOTIS-LYSIKATOS I N, GEORGILAKIS P S, et al. Distributed and decentralized voltage control of smart distribution networks: models, methods, and future research[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2999-3008.
- [29] 江里舟, 别朝红, 龙 涛, 等. 能源交通一体化系统发展模式与运行关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1285-1300.
- JIANG Lizhou, BIE Zhaohong, LONG Tao, et al. Development model and key technology of integrated energy and transportation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1285-1300.
- [30] 郭 敏, 夏明超, 陈奇芳. 基于能源自组织的能源-信息-交通-社会耦合网络研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(16): 5521-5539.
- GUO Min, XIA Mingchao, CHEN Qifang. A review of the energy-cyber-transportation-social coupling network based on energy self-organization[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(16): 5521-5539.
- [31] CHEN M, GAO C W, SONG M, et al. Internet data centers participating in demand response: a comprehensive review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 117: 109466.
- [32] 陈瑜玮, 王 彬, 潘昭光, 等. 计及用户灵活性和热惯性的多能园区优化调度: 研发及应用[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23): 29-37.
- CHEN Yuwei, WANG Bin, PAN Zhaoguang, et al. Optimal dispatch for multi-energy park considering flexibility and thermal inertia of users: research, development and application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 29-37.
- [33] 刘 沅, 赵海彭, 文 明, 等. 考虑负荷灵活分配的综合能源系统站-网-荷协同规划方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 118-127.
- LIU Hang, ZHAO Haipeng, WEN Ming, et al. Station-grid-load collaborative planning method for integrated energy system considering flexible distribution of load[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 118-127.
- [34] 梁梓杨, 包铭磊, 丁 一, 等. 考虑多能负荷互补弹性的电气耦合市场优化出清模型[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(11): 4295-4306.
- LIANG Ziyang, BAO Minglei, DING Yi, et al. Clearing model of

- electricity-gas joint market considering the complementary elasticity of multi-energy loads[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(11): 4295-4306.
- [35] 张新松, 袁越, 郑源, 等. 用于风功率波动平抑的储能运行策略对比分析[J]. *高电压技术*, 2019, 45(9): 2797-2805.
ZHANG Xinsong, YUAN Yue, ZHENG Yuan, et al. Comparative analyses on operation strategies of energy storage systems for mitigating wind power fluctuations[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(9): 2797-2805.
- [36] 赵冬梅, 徐辰宇, 陶然, 等. 多元分布式储能在新型电力系统配电网侧的灵活调控研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(5): 1776-1798.
ZHAO Dongmei, XU Chenyu, TAO Ran, et al. Review on flexible regulation of multiple distributed energy storage in distribution side of new power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(5): 1776-1798.
- [37] FANG J K, ZENG Q, AI X M, et al. Dynamic optimal energy flow in the integrated natural gas and electrical power systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9(1): 188-198.
- [38] 王瑞东, 吴杰康, 蔡志宏, 等. 含广义储能虚拟电厂-气-热三阶段协同优化调度[J]. *电网技术*, 2022, 46(5): 1857-1866.
WANG Ruidong, WU Jiekang, CAI Zhihong, et al. Three-stage collaborative optimal scheduling of electricity-gas-heat in virtual power plant with generalized energy storage[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(5): 1857-1866.
- [39] 李宏仲, 房宇娇, 肖宝辉. 考虑广义储能的区域综合能源系统优化运行研究[J]. *电网技术*, 2019, 43(9): 3130-3138.
LI Hongzhong, FANG Yujiao, Xiao Baohui, et al. Research on optimized operation of regional integrated energy system considering generalized energy storage[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(9): 3130-3138.
- [40] VO T T Q, WALL D M, RING D, et al. Techno-economic analysis of biogas upgrading via amine scrubber, carbon capture and ex-situ methanation[J]. *Applied Energy*, 2018, 212: 1191-1202.
- [41] 郭静蓉, 向月, 吴佳婕, 等. 考虑CCUS电转气技术及碳市场风险的电-气综合能源系统低碳调度[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(4): 1290-1302.
GUO Jingrong, XIANG Yue, WU Jiajie, et al. Low-carbon optimal scheduling of integrated electricity-gas energy systems considering CCUS-P2G technology and risk of carbon market[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(4): 1290-1302.
- [42] 赵冬梅, 王浩翔, 陶然. 计及风电-负荷不确定性的风-火-核-碳捕集多源协调优化调度[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(3): 707-718.
ZHAO Dongmei, WANG Haoxiang, TAO Ran. A multi-source coordinated optimal scheduling model considering wind-load uncertainty[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(3): 707-718.
- [43] 曹逸滔, 王丹, 贾宏杰, 等. 考虑多能碳流约束的区域综合能源系统双层博弈扩展规划[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(7): 12-22.
CAO Yitao, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Bilevel Nash-stackelberg game expansion planning of regional integrated energy system considering multi-energy carbon flow constraints[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(7): 12-22.
- [44] 廖扬, 蔡帆, 邵佳扬, 等. 多区互联综合能源系统分散协调低碳经济调度[J]. *高电压技术*, 2023, 49(1): 138-146.
LIAO Yang, CAI Zhi, SHAO Jiayang, et al. Decentralized coordinated low-carbon economic dispatch method for multi-regional interconnected integrated energy system[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(1): 138-146.
- [45] 李建林, 谭宇良, 王含, 等. 配网及光储微网储能系统配置优化策略[J]. *高电压技术*, 2022, 48(5): 1893-1902.
LI Jianlin, TAN Yuliang, WANG Han, et al. Research on configuration optimization of energy storage system in distribution network and optical storage microgrid[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(5): 1893-1902.
- [46] 陈乾, 张沈习, 程浩忠, 等. 计及热网蓄热特性的多区域综合能源系统多元储能规划[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(15): 5890-5902.
CHEN Qian, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Multiple energy storage planning of multi-district integrated energy system considering heat storage characteristics of heat network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(15): 5890-5902.
- [47] 魏震波, 郭毅, 魏平校, 等. 基于IGDT的电-气互联综合能源系统多目标扩展规划模型[J]. *高电压技术*, 2022, 48(2): 526-535.
WEI Zhenbo, GUO Yi, WEI Ping'an, et al. IGDT-based multi-objective expansion planning model for integrated natural gas and electric power systems[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(2): 526-535.
- [48] 丁曦, 张笑演, 王胜寒, 等. 双碳目标下考虑最优建设时序的区域综合能源系统低碳规划[J]. *高电压技术*, 2022, 48(7): 2584-2596.
DING Xi, ZHANG Xiaoyan, WANG Shenghan, et al. Low-carbon planning of regional integrated energy system considering optimal construction timing under dual carbon goals[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(7): 2584-2596.
- [49] 曹严, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 考虑建设时序的园区综合能源系统多阶段规划[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(21): 6815-6827.
CAO Yan, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Multi-stage planning of park-level integrated energy system considering construction time sequence[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(21): 6815-6827.
- [50] 卢俊杰, 蔡涛, 郎建勋, 等. 基于集群划分的光伏电站集群发电功率短期预测方法[J]. *高电压技术*, 2022, 48(5): 1943-1951.
LU Junjie, CAI Tao, LANG Jianxun, et al. Short-term power output forecasting of clustered photovoltaic solar plants based on cluster partition[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(5): 1943-1951.
- [51] 申建建, 王月, 程春田, 等. 水风光多能互补发电调度问题研究现状及展望[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(11): 3871-3884.
SHEN Jianjian, WANG Yue, CHENG Chuntian, et al. Research status and prospect of generation scheduling for hydropower-wind-solar energy complementary system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(11): 3871-3884.
- [52] WANG X B, CHANG J X, MENG X J, et al. Short-term hydro-thermal-wind-photovoltaic complementary operation of interconnected power systems[J]. *Applied Energy*, 2018, 229: 945-962.
- [53] LI X, ZHANG R F, BAI L Q, et al. Stochastic low-carbon scheduling with carbon capture power plants and coupon-based demand response[J]. *Applied Energy*, 2018, 210: 1219-1228.
- [54] 崔杨, 邓贵波, 赵钰婷, 等. 考虑源荷低碳特性互补的含风电电力系统经济调度[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(14): 4799-4815.
CUI Yang, DENG Guibo, ZHAO Yuting, et al. Economic dispatch of power system with wind power considering the complementarity of low-carbon characteristics of source side and load side[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(14): 4799-4815.
- [55] FAN J L, XU M, LI F Y, et al. Carbon capture and storage (CCS) retrofit potential of coal-fired power plants in China: the technology lock-in and cost optimization perspective[J]. *Applied Energy*, 2018, 229: 326-334.
- [56] 孙惠娟, 刘昀, 彭春华, 等. 计及电转气协同的含碳捕集与垃圾焚烧虚拟电厂优化调度[J]. *电网技术*, 2021, 45(9): 3534-3544.
SUN Huijuan, LIU Yun, PENG Chunhua, et al. Optimization scheduling of virtual power plant with carbon capture and waste incineration considering power-to-gas coordination[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(9): 3534-3544.
- [57] 袁铁江, 曹继雷. 计及风电-负荷不确定性的风氢低碳能源系统容量优化配置[J]. *高电压技术*, 2022, 48(6): 2037-2044.
YUAN Tiejia, CAO Jilei. Capacity optimization allocation of wind hydrogen low-carbon energy system considering wind power-load uncertainty[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(6): 2037-2044.
- [58] 周任军, 孙洪, 唐夏菲, 等. 双碳量约束下风电-碳捕集虚拟电

- 厂低碳经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1675-1683. ZHOU Renjun, SUN Hong, TANG Xiafei, et al. Low-carbon economic dispatch based on virtual power plant made up of carbon capture unit and wind power under double carbon constraint[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1675-1683.
- [59] 黎静华, 谢育天, 曾鸿宇, 等. 不确定优化调度研究综述及其在新型电力系统中的应用探讨[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3447-3464. LI Jinghua, XIE Yutian, ZENG Hongyu, et al. Research review of uncertain optimal scheduling and its application in new-type power systems[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3447-3464.
- [60] 董海鹰, 负毓韵, 马志程, 等. 计及多能转换及光热电站参与的综合能源系统低碳优化运行[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3689-3699. DONG Haiying, YUN Yunyun, MA Zhicheng, et al. Low-carbon optimal operation of integrated energy system considering multi-energy conversion and concentrating solar power plant participation[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3689-3699.
- [61] 汪 飞, 龚丹丹, 郭 慧, 等. 计及动态氢价和不确定性的区域综合能源系统规划-运行两阶段优化[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 53-62. WANG Fei, GONG Dandan, GUO Hui, et al. Two-stage optimization of regional integrated energy system planning-operation with dynamic hydrogen pricing and uncertainties[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 53-62.
- [62] NAJAFI A, FALAGHI H, CONTRERAS J, et al. Medium-term energy hub management subject to electricity price and wind uncertainty[J]. Applied Energy, 2016, 168: 418-433.
- [63] 李国庆, 董 存, 梁志峰, 等. 考虑光伏发电不确定性的跨省两级优化调度模型[J]. 高电压技术, 2021, 47(12): 4420-4430. LI Guoqing, DONG Cun, LIANG Zhifeng, et al. Cross-provincial two-level optimal scheduling model considering the uncertainty of photovoltaic power generation[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4420-4430.
- [64] LU S, GU W, ZHOU S Y, et al. Adaptive robust dispatch of integrated energy system considering uncertainties of electricity and outdoor temperature[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(7): 4691-4702.
- [65] 罗 平, 闫文乐, 王 严, 等. 考虑CCUS的电-气-热综合能源系统鲁棒优化调度[J]. 高电压技术, 2022, 48(6): 2077-2087. LUO Ping, YAN Wenle, WANG Yan, et al. Robust optimal dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system considering carbon capture, utilization and storage[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2077-2087.
- [66] ZHU R J, WEI H, BAI X Q. Wasserstein metric based distributionally robust approximate framework for unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2991-3001.
- [67] CAO Y, WEI W, WANG J H, et al. Capacity planning of energy hub in multi-carrier energy networks: a data-driven robust stochastic programming approach[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(1): 3-14.
- [68] 蒋超凡, 艾 欣. 计及多能耦合机组不确定性的综合能源系统运行优化模型研究[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2843-2852. JIANG Chaofan, AI Xin. Integrated energy system operation optimization model considering uncertainty of multi-energy coupling units[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2843-2852.
- [69] 罗 平, 周濠炳, 徐 林, 等. 基于区间优化的冷热电联供型多微网日前优化调度[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(9): 137-146. LUO Ping, ZHOU Haobing, XU Lin, et al. Day-ahead optimal scheduling of multi-microgrids with combined cooling, heating and power based on interval optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9): 137-146.
- [70] 刘哲远, 邢海军, 程浩忠, 等. 考虑碳排放流及需求响应的综合能源系统双层优化调度[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 169-178. LIU Zheyuan, XING Haijun, CHENG Haozhong, et al. Bi-level optimal scheduling of integrated energy system considering carbon emission flow and demand response[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 169-178.
- [71] 祁 兵, 郑顺林, 孙 毅, 等. 考虑需求侧动态及耦合特性的激励型综合需求响应优化建模[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1783-1798. QI Bing, ZHENG Shunlin, SUN Yi, et al. A model of incentive-based integrated demand response considering dynamic characteristics and multi-energy coupling effect of demand side[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1783-1798.
- [72] 刘昱良, 李姚旺, 周春雷, 等. 电力系统碳排放计量与分析方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(6): 2220-2235. LIU Yuliang, LI Yaowang, ZHOU Chunlei, et al. Overview of carbon measurement and analysis methods in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2220-2235.
- [73] 李姚旺, 张 宁, 杜尔顺, 等. 基于碳排放流的电力系统低碳需求响应机制研究及效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2830-2841. LI Yaowang, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Mechanism study and benefit analysis on power system low carbon demand response based on carbon emission flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2830-2841.
- [74] 陈厚合, 茅文玲, 张儒峰, 等. 基于碳排放流理论的电力系统源-荷协调低碳优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 1-11. CHEN Houhe, MAO Wenling, ZHANG Rufeng, et al. Low-carbon optimal scheduling of a power system source-load considering coordination based on carbon emission flow theory[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 1-11.
- [75] 张 宁, 李姚旺, 黄俊辉, 等. 电力系统全环节碳计量方法与碳表系统[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 2-12. ZHANG Ning, LI Yaowang, HUANG Junhui, et al. Carbon measurement method and carbon meter system for whole chain of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 2-12.
- [76] 陈锦鹏, 胡志坚, 陈嘉滨, 等. 考虑阶梯式碳交易与供需灵活双响应的综合能源系统优化调度[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3094-3104. CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Jiabin, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering ladder-type carbon trading and flexible double response of supply and demand[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3094-3104.
- [77] 刘牧心, 梁 希, 林千果, 等. 碳中和驱动下CCUS项目衔接碳交易市场的关键问题和对策分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4731-4739. LIU Muxin, LIANG Xi, LIN Qianguo, et al. Key issues and countermeasures of CCUS projects linking carbon emission trading market under the target of carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4731-4739.
- [78] CLEGG S, MANCARELLA P. Integrated modeling and assessment of the operational impact of power-to-gas (P2G) on electrical and gas transmission networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1234-1244.
- [79] LI F Y, QIN J H, KANG Y. Closed-loop hierarchical operation for optimal unit commitment and dispatch in microgrids: a hybrid system approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 516-526.
- [80] 陈 志, 胡志坚, 翁菡宏, 等. 基于阶梯碳交易机制的园区综合能源系统多阶段规划[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 148-155. CHEN Zhi, HU Zhijian, WENG Changhong, et al. Multi-stage planning of park-level integrated energy system based on ladder-type carbon trading mechanism[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 148-155.
- [81] PAN G S, GU W, LU Y P, et al. Optimal planning for electricity-hydrogen integrated energy system considering power to hydrogen and heat and seasonal storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2662-2676.

- [82] 李嘉祺, 陈艳波, 陈来军, 等. 工业园区综合能源系统低碳经济优化运行模型[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3190-3200.
LI Jiaqi, CHEN Yanbo, CHEN Laijun, et al. Low-carbon economy optimization model of integrated energy system in industrial parks[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3190-3200.
- [83] 谢小荣, 马宁嘉, 刘威, 等. 新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 158-168.
XIE Xiaorong, MA Ningjia, LIU Wei, et al. Functions of energy storage in renewable energy dominated power systems: review and prospect[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 158-168.
- [84] 李姚旺, 张宁, 张世旭, 等. 面向电力系统的多能源云储能模式: 基本概念与研究展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2179-2189.
LI Yaowang, ZHANG Ning, ZHANG Shixu, et al. Multi-energy cloud energy storage for power systems: basic concepts and research prospects[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2179-2189.
- [85] 谢雨龙, 罗逸飏, 李智威, 等. 考虑微网新能源经济消纳的共享储能优化配置[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4403-4412.
XIE Yulong, LUO Yiyang, LI Zhiwei, et al. Optimal allocation of shared energy storage considering the economic consumption of microgrid new energy[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4403-4412.
- [86] ZHOU Y F, HU W, MIN Y, et al. Integrated power and heat dispatch considering available reserve of combined heat and power units[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1300-1310.
- [87] 熊宇峰, 陈来军, 郑天文, 等. 考虑电热气耦合特性的低碳园区综合能源系统氢储能优化配置[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 31-38.
XIONG Yufeng, CHEN Laijun, ZHENG Tianwen, et al. Optimal configuration of hydrogen energy storage in low-carbon park integrated energy system considering electricity-heat-gas coupling characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 31-38.
- [88] DAI R, ESMAELBEIGI R, CHARKHGARD H. The utilization of shared energy storage in energy systems: a comprehensive review[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 3163-3174.
- [89] KALATHIL D, WU C Y, POOLLA K, et al. The sharing economy for the electricity storage[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 556-567.
- [90] 李咸善, 方子健, 李飞, 等. 含多微电网租赁共享储能的配电网博弈优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6611-6624.
LI Xianshan, FANG Zijian, LI Fei, et al. Game-based optimal dispatching strategy for distribution network with multiple microgrids leasing shared energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6611-6624.
- [91] 马昱欣, 胡泽春, 刁锐. 新能源场站共享储能提供调频服务的日前优化策略[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3857-3868.
MA Yuxin, HU Zechun, DIAO Rui. Day-ahead optimization strategy for shared energy storage of renewable energy power stations to provide frequency regulation service[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3857-3868.
- [92] ZHONG W F, XIE K, LIU Y, et al. Online control and near-optimal algorithm for distributed energy storage sharing in smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 2552-2562.
- [93] FLEISCHHACKER A, AUER H, LETTNER G, et al. Sharing solar PV and energy storage in apartment buildings: resource allocation and pricing[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 3963-3973.
- [94] 刘继春, 陈雪, 向月. 考虑共享模式的市场机制下售电公司储能优化配置及投资效益分析[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1740-1749.
LIU Jichun, CHEN Xue, XIANG Yue. Optimal sizing and investment

benefit analysis for energy storage of electricity retailers under market mechanisms considering shared mode[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1740-1749.

- [95] 陈昌铭, 张群, 黄亦昕, 等. 考虑最优建设时序和云储能的园区综合能源系统优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(2): 24-32.
CHEN Changming, ZHANG Qun, HUANG Yixin, et al. Optimal configuration method of park-level integrated energy system considering optimal construction time sequence and cloud energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(2): 24-32.
- [96] 李山山, 李华强, 金智博, 等. 基于共享经济理念的园区分布式能源共享服务机制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 56-70.
LI Shanshan, LI Huaqiang, JIN Zhibo, et al. Distributed energy sharing service mechanism for park based on the concept of sharing economy[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 56-70.



YUAN Yue
Ph.D., Professor

袁越

1966—, 男, 博士, 教授
主要研究方向为综合能源系统运行与控制、新能源并网与调度运行
E-mail: yyuan@hhu.edu.cn



MIAO Ankang
Ph.D. candidate
Corresponding author

苗安康(通信作者)

1990—, 男, 博士生
主要研究方向为综合能源系统规划与运行
E-mail: miaoankang@hhu.edu.cn



WU Han
Post-doctorate

吴涵

1990—, 男, 博士(后)
主要研究方向为电力系统不确定运行、主动配电网规划
E-mail: wuhanichina@vip.qq.com



ZHU Junpeng
Ph.D.
Associate professor

朱俊澎

1990—, 男, 博士, 副教授
主要研究方向为高比例新能源接入的电力系统运行与分析
E-mail: jzhu@hhu.edu.cn

收稿日期 2023-12-20 修回日期 2024-03-28 编辑 程子丰