





- 四川省一级期刊
- 万方数字化期刊群入网期刊
- 中国学术期刊(光盘版)入编期刊
- 中国期刊全文数据库收录期刊
- 首届《CAJ-CD规范》执行优秀奖获奖期刊
- 中国学术期刊综合评价数据库统计刊源期刊
- 重庆维普中文科技期刊数据库收录期刊
- 超星数字图书馆入网期刊
- 中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊

四川省新型 电力系统研究院

SICHUAN NEW ELECTRIC POWER SYSTEM RESEARCH INSTITUTE

四川省新型电力系统研究院有限公司(以下简称"四川新研院")于2022年1月由时任四川省副省长曹立军 授牌成立,是全国首个省级新型电力系统研究平台。四川新研院定位于能源行业新型智库,始终坚持理论引领、 科技驱动的发展方式,以服务经济社会和能源电力高质量发展为主要任务,近期依托国网四川经研院、国网四川 电科院和国网四川信通公司,远期汇集行业"产学研"和"网源荷储"多方力量,打造新一代水、风、光消纳和 配置的研究平台,构建新型电力系统四川样板和全国标杆。

当前,四川新研院已入围"十四五"第一批国家"赛马争先"创新平台,参与共建天府永兴实验室新型电力 系统研究中心,并与高校、科研院所、行业领军企业开展交流研讨,稳步推进四川新型电力系统建设的创新研究 与科研实践。

期待与各界专家学者的交流合作!



四川电力技术 SICHUAN DIANLI JISHU 四川省一级期刊、万方数据数字化期刊群入网期刊、《中国学术期刊(光盘版)》《中国期刊全文数据库》收录期刊、首届《CAJ-CD 规范》执行优秀奖获奖期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计刊源期刊、重庆维普中文科技期刊数据库、《超星数字图书馆》入网期刊、《中国核心期刊(遴选)数据库》入选期刊

第6期

2023年12月20日

《四川电力技术》 编辑委员会	目 次
 主任委员 胡海舰 副主任委员 刘俊勇 委 员(按姓氏笔画笔形为序) 马芳平 王 卓 王渝红 司马文雷 年 珩 朱 康 	 刊首语
何正友 余 熙 吴广宁 张安安 李 旻 李富祥 李镇义 杨迎春 汪康康 肖 欣 肖先勇 苏少春	 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
邹见效 陈 峰 胡朝华 唐万斌 梅生伟 黄 琦 董秀成 蒋兴良 韩晓言 廖学静	 汛限水位动态控制对水电-新能源互补能力的提升研究
 税 书 李世平 程文婷 	基于 COOT-SVM 的短期光伏发电功率预测 陈晓华,王志平,吴杰康,许海文,陈盛语,张勋祥,龙泳丞,谢明钊(28) • 电网控制保护与安全防御技术 •
四川电力技术 _{双月刊} 1978年创刊 中国标准连续出版物号: <u>ISSN 1003-6954</u> <u>(N 51-1315/TM</u>	考虑控制模式影响的多电压等级直流电网潮流计算方法
2023 年第46卷第6期(总288期)(卷终) 主管单位:四川省电力公司 主办单位:四川省电机工程学会	・低碳综合能源供能技术・ 考虑热网潮流的区域热-电综合能源系统协同优化配置研究
四川电力科学研究院 发行范围:公开 主 编:李富祥 副 主 编:程文婷	
编辑出版:《四川电力技术》编辑部 发 行:四川电力科学研究院 地 址:成都市高新区锦晖西二街 16 号 邮政编码:610041	计及分布式光伏安装面积限制的配电网储能与线路扩容联合规划
电话:(028)69995169/5168/5165 邮箱:cdscdljs@163.com 设计:四川科锐得实业集团有限公司 文化传播分公司	基于深度强化学习的微电网源-荷低碳调度优化研究
国内定价:每册 12.00 元 [期刊基本参数] CN 51-1315/TM * 1978 * b * A4 * 94 * zh * P * ¥ 12.00 * 3000 * 12 * 2023-12	·····································

本期责任编辑 洪 洁 编辑 程文婷 洪 洁 罗 锦

CONTENTS

· Key Generic Supporting Technology ·
Theoretical Model Exploration of New Power System with High-proportional Hydropower
WANG Yongping, LIU Chang, XU Weiting, PAN Ting, CHEN Yufan, HU Yalu(3)
A Review of Typical Characteristics and Development Challenges of New Power System Considering "Dual Carbon" Goal
······ FAN Rongquan, YANG Yun, XU Ke, XU Weiting(10)
\cdot Supporting Technology of High New Energy Penetration to Power System \cdot
Research on Dynamic Control of Flood Limit Water Level to Improve Complementary Capacity of Hydropower and New Energy
Fast Robust Optimal Dispatch of Multi-energy System Based on Optimal Decision Tree PENG Haojin, QIU Gao, SHUI Yue(21)
Short-term Photovoltaic Power Forecasting Based on COOT-SVM
CHEN Xiaohua, WANG Zhiping, WU Jiekang, XU Haiwen, CHEN Shengyu, ZHANG Xunxiang, LQNG Yongcheng, XIE Mingzhao (28)
\cdot Technology of Power System Control Protection and Security Defense \cdot
Calculation Method for Power Flow of DC Power Grid with Multi-voltage Levels Considering Influence of Control Modes
······ YE Xi, CHEN Zhen, ZHU Tong, ZHANG Yingmin, LI Baohong(34)
Research on Dispatching Control Strategy Considering Distributed Coal-to-Electricity Load Access to Distribution Network
HOU Zedong, WANG Xiaoyuan, ZHU Hong, JIAN Dongxiang, GUO Wei, XIE Wencheng, DUAN Deyi(41)
· Technology of Low-carbon Integrated Energy Supply ·
Research on Collaborative Optimal Allocation of District Thermal-Electric Integrated Energy System Considering Thermal Network Power Flow
DENG Jingwei, CAO Minqi, CHAO Huawei, CHEN Dawei, HU Tao(50)
Capacity Planning for Water-Hydrogen Integrated Energy Systems Considering Hydro-electricity Hydrogen Production
LI Hua, TANG Yu , YANG Xinyu , XIE Chuansheng, ZHANG Xiaochun, ZENG Bo(59)
Joint Planning for Energy Storage Systems and Line Capacity Enhancement of Distribution Network Considering Installation Area Limits of Distributed
Photovoltaic ······ SHAO Chenying, LI Peilin, YANG Xinting, LIU Youbo(67)
\cdot Technology of Production-consumption Integration and Interaction \cdot
Research on Source-load Low-carbon Optimal Dispatching for Microgrid Based on Deep Reinforcement Learning
FENG Wentao, LI Longsheng, ZENG Yu, PAN Kejia, ZHANG Ziwen, JING Zhiyuan(75)
Research on Multi-market Equilibrium of Electricity-Carbon-Green Certificates Based on Multi-agent Reinforcement Learning
······ MA Tiannan, XIANG Mingxu, WEI Yang, LIU Chang, CHEN Yumin (83)
Contents of 2023

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY

2023 Vol.46 No.6 (Ser.No.288) Bimonthly, Started in 1978 Address: No. 16, 2ND Jinhui West Street, High-tech Zone, Chengdu, Sichuan, China Postcode:610041

Sponsor:

Sichuan Society of Electrical Engineering Sichuan Electric Power Research Institute Editor in chief:LI Fuxiang Editor & Publisher: Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY

刊 首 语

习近平总书记高度重视能源电力工作,提出了"四个革命、一个合作"能源安全新战略,作 出碳达峰碳中和、规划建设新型能源体系、构建新型电力系统等重要指示,在2023年5月的中 央财经委会、7月的中央深改委会上,提出要加快建设清洁低碳、安全充裕、经济高效、供需协 同、灵活智能的新型电力系统。在国网南瑞集团考察时,指出能源保障和安全事关国计民生, 是须臾不可忽视的"国之大者"。在四川考察调研期间,强调要在科技创新、现代产业、乡村振 兴、生态环境等4个方面发力,科学规划建设新型能源体系。这些重要论述,把能源电力发展 的规律性认识提升到了一个新高度,为我们做好新时代能源电力工作提供了根本遵循。

近年来,国网公司深入学习贯彻习近平总书记重要讲话和重要指示批示精神,立足服务党 和国家事业发展,坚定不移走中国式现代化电力发展之路,走"一体四翼"高质量发展之路,为 我们指明了四川电网和四川公司高质量发展的方向,深化了对四川电网发展规律性的认识。 从四川电网历史发展情况看,1998 年随着 500 kV 二滩水电送出工程投产,迈入了"超高压"阶 段;2010 年随着±800 kV 特高压向家坝至上海输电线路投产,开启了"大送端"格局。当前,四 川电网正从"大送端"转为"强电网、保内供、稳外送",进入了特高压交直流"立体枢纽"时代, 迎来了第三次重大发展机遇。国网四川电力深刻把握、认真研究,提出了打造四川"双典范"、 推动公司"双创新"、建设现代双一流的发展目标。在建设现代一流电网上,通过打造四川清 洁能源高质量就地消纳的典范和四川清洁能源大范围优化配置的典范,建设坚强电网、立体枢 纽、绿色低碳、安全高效的现代一流电网。在建设现代一流公司上,通过推动建立现代企业制 度为主体的管理创新和提升核心竞争能力为主体的科技创新,建设高效运营、精益管理、卓越 服务、作风优良的现代一流公司。通过打造四川"双典范"、推动公司"双创新"、建设现代双一 流,推动四川新型电力系统建设和四川公司高质量发展,服务国网战略目标实现和四川省现代 化建设。

新机遇催生新挑战,新目标呼唤新担当。四川省新型电力系统研究院有限公司、国网四川 省电力公司电力科学研究院、《四川电力技术》期刊立志于搭建集学术交流、成果展示于一体 的平台,共同策划组织了"新型能源体系构建与新能源高质量发展"专刊,旨在汇聚新型电力 系统研究的前沿热点成果,促进探索研究、引领创新导向。希望紧紧围绕党和国家关于能源电 力发展的重大决策部署,以高质量学术期刊、高水平研究成果推动四川新型电力系统构建,助 力国网四川电力高质量建设现代双一流,为能源电力事业发展贡献更多智慧和力量。

2023年12月于成都

专刊寄语

党的二十大报告提出"要积极稳妥推进碳达峰碳中和,深入推进能源革命,加快规划建设 新型能源体系",擘画了中国能源体系发展新蓝图,为能源电力发展提供了航标,为《四川电力 技术》期刊建设指明了方向。在"双碳"发展战略和新型能源体系建设的大背景下,新型电力 系统建设进入加速转型期,新能源迎来跨越发展机遇,随之对能源电力生产、输送、消费各环节 以及系统规划、运行和保护控制等方面带来新挑战,亟需加强理论研究,为能源电力发展提供 技术支撑。

为宣传能源转型政策,奉献理论前沿智慧,共享最新学术和技术成果,《四川电力技术》期 刊和四川省新型电力系统研究院有限公司共同策划组织了"新型能源体系构建与新能源高质 量发展"专刊。征稿启事发出后,得到了相关领域研究人员的积极响应,经过专家严格评审, 选择收录论文12篇,涵盖了新型电力系统构建的理论基础、技术路线等多方面内容。

理论基础方面,结合四川高比例水电资源禀赋特性,提出新型电力系统"源网荷储脑"五 大关键要素,构建了高比例新型电力系统的理论模型框架。在全面分析新型电力系统建设各 方面优劣势及面临的机遇与挑战的基础上,总结了新型电力系统在电源侧、电网侧、负荷侧的 典型特征,并提出了针对性政策建议。

技术路线方面,在"高比例新能源并网支撑技术"部分,建立了一定条件下源荷匹配度最 大的水风互补模型,开展了水风光多能系统在日内快速协调调度方法和短期光伏发电功率预 测研究。在"电网控制保护与安全防御技术"部分,探究多电压等级直流电网稳态等值模型, 并选取"煤改电"工程改造实例开展配电网运行柔性控制策略研究。在"低碳综合能源供能技 术"部分,基于"区域热-电综合能源系统",建立了考虑流向可变量调节运行方式下的协同优 化配置模型;并重点展示了新型能源转换对综合能源系统的耦合互补、能源综合利用规划及调 控、多元化清洁能源供给体系建设等研究成果。在"产消融合互动技术"部分,以微电网为代 表探索提高系统灵活性的优化机制,以及碳市场、绿证市场对电力市场均衡的耦合影响研究。

感谢各位专家学者对本次专刊给予的大力支持,感谢《四川电力技术》期刊和四川省新型 电力系统研究院有限公司为本次专刊顺利推出作出的辛勤工作。

风帆已起,协力远航。《四川电力技术》期刊、四川省新型电力系统研究院有限公司立志 于打造开放、共享的高端学术交流平台,希望能给相关领域的学者和专业技术人员抛砖引玉, 引发广泛共鸣与积极思考,共同推动能源电力行业的蓬勃发展。

湖海舰

2023年12月于成都

高比例水电新型电力系统理论模型探索

王永平^{1,2},刘 畅¹,胥威汀¹,潘 婷³,陈雨帆¹,胡雅璐¹

(1.四川省新型电力系统研究院有限公司,四川成都 610041;2.国网四川省电力公司, 四川成都 610041;3.华北电力大学经济与管理学院,北京 102206)

摘 要:着眼于部分省份丰富的水电资源禀赋,探索高比例水电新型电力系统理论模型。首先,分析了其发展定位和 价值内涵,创新将"源网荷储"四要素扩展为"源网荷储脑"五要素,并以水能富集地区典型省份四川为例,详细分析了 各要素的基本内涵及关联关系;然后,构建了高比例水电新型电力系统的理论模型框架并分析了其演变趋势;最后, 基于理论模型分析了四川新型电力系统发展目标和演化路径,介绍了四川新型电力系统初期探索实践的基本思路, 为全国范围内水能富集地区新型电力系统构建提供参考。

关键词:高比例水电;新型电力系统;理论模型;关键要素

中图分类号:TM 715 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)06-0003-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230601

Theoretical Model Exploration of New Power System with High-proportional Hydropower

WANG Yongping^{1,2}, LIU Chang¹, XU Weiting¹, PAN Ting³, CHEN Yufan¹, HU Yalu¹
(1.Sichuan New Electric Power System Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Focusing on the characteristics of rich endowment of hydropower resource in Sichuan and similar provinces, the exploration for theoretical model of new power system with high-proportional hydropower (HHNPS) is carried out. Firstly, the development orientation and value connotation of HHNPS are analyzed. The basic connotation and correlation relationship of five key elements of new power system, namely "source-grid-load-energy storage-intelligens", are proposed and analyzed. And then, the theoretical model framework of HHNPS is constructed and its evolution trend at different development stages are analyzed. Finally, the basic ideas of initial exploration and practice for new power system in Sichuan are introduced, which can provide a reference for the construction of new power system in similar areas nationwide.

Key words: high-proportional hydropower; new power system; theoretical model; key elements

0 引 言

随着气候变化、能源枯竭、国际能源环境复杂等 一系列问题的日益凸显,开展能源清洁替代、推动能 源低碳转型已成为各国的普遍共识。新型电力系统 作为新型能源体系的载体,对新型能源体系构建具 有至关重要的意义。2014年中国能源安全新战略 提出以来,包括新能源在内的可再生能源持续快速 发展,能源结构持续优化。现有新型电力系统研 究^[1-3]及顶层设计^[4]解析了中国新型电力系统的特 征内涵,明确了新型电力系统发展的主要阶段及重 点任务,为新型电力系统的建设提供了战略指引。 上述研究主要着眼于全国以化石能源为主体的基本 盘。考虑到各省能源结构、资源禀赋和发展路径差 异,需进一步结合不同省份在全国新型电力系统中 的作用和定位,因地制宜差异化开展以省为实体的 新型能源体系构建,先行先试开展理论探索和创新 实践,为全国新型电力系统建设提供落地方案。

以四川、云南、青海、西藏等省份为代表的地区 水电资源丰富,可再生能源资源装机容量已超过 80%。参考已经率先实现 100% 可再生能源供应的 国家和地区的能源结构:冰岛主要以水电和地热为 主,巴拉圭、阿尔巴尼亚、刚果均以水电为主。可见 水能富集地区具有能源低碳转型的先天优势,需加 快研究高比例水电新型电力系统的发展模式和理论 体系,从而更好地带动全国能源低碳化进程。在可 再生能源新型电力系统构建方面,文献[5]分析了 以风电和光伏为代表的非水可再生能源电力系统迈 向高比例可再生能源过程的三大阶段,并从稳定控 制、电力电量时空平衡、多样化清洁电力等方面分析 了新型电力系统关键技术。文献[6]阐述了纯清洁 能源电力系统、碳中和电力系统、100%可再生能源 电力系统(100% renewable energy power system, REPS)在内的电力系统清洁化3种形态及 REPS 面 临的挑战。从国际高比例可再生能源地区发展经验 看,文献[7]以丹麦可再生能源系统发展路径为例, 阐述了欧盟在智能电网领域的技术进展。在新型电 力系统关键要素方面,文献[8]对"源网荷储"四要 素进行拓展,新增"碳目标""数字化"两大要素,构 建了新型电力系统"源网荷储碳数"六大关键要素, 对完善新型电力系统关键要素具有重要作用。然 而,新型电力系统的核心控制中枢是驱动实现清洁 能源高效并网消纳、促进降碳目标,也是其区别于传 统电力系统的重要要素,但尚未见智能化的控制中 枢要素研究的相关内容。

上述研究成果重点针对高比例可再生能源系统 的发展形态、面临的挑战、关键技术等方面,对水能 富集地区新型电力系统的构建有一定借鉴意义。然 而,目前尚未见以省为实体的高比例水电新型电力 系统构建基本要素和理论体系的研究。为此,下面 以省为实体对高比例水电新型电力系统理论模型进 行探索:首先,分析了高比例水电新型电力系统的定 位与内涵,并以四川新型电力系统作为高比例水电 新型电力系统典型案例,开展了"源网荷储脑"五位 一体关键要素梳理,构建了理论模型框架并分析了 其动态演变过程;然后,分析四川新型电力系统发展 目标和演变趋势;最后,介绍了四川当前正在开展的 新型电力系统理论探索与实践思路。

1 高比例水电新型电力系统

1.1 与新型电力系统的关系

总体而言,高比例水电新型电力系统是新型电 力系统中的一类,依托水能富集地区的优质水电资 源禀赋,加速水、风、光等多类型可再生能源开发利 用,从而形成能源安全、结构多元、清洁低碳的新型电 力系统。其与新型电力系统的关系包括两个方面:

1)是新型电力系统的先期示范样板。中国要 建设"新能源占比逐渐提升的新型电力系统"^[9],需 充分立足中国清洁能源资源禀赋,坚持"先立后 破"[9]。以水电、新能源等清洁能源资源富集地区 为抓手,开展新型电力系统先行先试,以先"低碳" 地区带动后"低碳"地区能源转型,是"先立后破"的 重要部分。以四川为实例探索打造四川特色高比例 水电新型电力系统,对全国新型电力系统构建具有 重要示范作用。一方面,四川风能、太阳能等新能源 能可开发容量超100 GW,正逐步实现从"以水电为 主"到"水风光并举"的转变,与国家整体发展路径 具有较强的相似性;另一方面,四川已构建"省内省 外"两个西电东送的电网格局,从全国范围看,四川 新型电力系统是西电东送送端省份的典型实践:从 省内看,正处在新型工业化、城镇化进程中的四川, 川西地区能源资源与川东全国"第四经济增长极" 负荷的逆向分布特性,折射了全国新型电力构建助 力经济发展的关键问题,可为全国新型电力系统发 展提供创新思路和示范样板。

2)是新型电力系统的后期战略支撑。在构建 新型电力系统过程中,四川既注重省内能源电力供 应和经济社会发展同步,大力促进清洁电力与天然 气资源协同发展,力争为全国新型电力系统建设提 供稳定的战略大后方;同时,四川又注重与其他省份 广泛互联、参与全国电力电量平衡,推动形成大电网 为主导,微电网、分布式能源系统等多种电网形态并 存的格局,已成为全国重要的清洁能源送出基地和 全国重要的枢纽电网。未来还将进一步成为清洁能 源接续转送基地,在全国战略发展格局中具备一定 的辐射作用和能源支撑作用,为全国新型电力系统 的构建提供重要参考和有力支撑。

1.2 价值内涵

2023年,国家能源局发布《新型电力系统蓝皮 书》,明确了新型电力系统"安全高效、清洁低碳、柔 性灵活、智慧融合"四大特征^[4]。国家全面深化改 革委员会第二次会议明确要加快构建清洁低碳、安 全充裕、经济高效、供需协同、灵活智能的新型电力 系统,为中国电力系统发展指明了方向。四川水电 技术可开发容量148 GW,目前四川水电装机容量超 过80%,是中国典型的省级高比例水电电力系统, 承担着西电东送能源基地和战略枢纽的重要使命。 下面以国家对新型电力系统发展要求和基本特征定 位为重要参考,立足四川能源资源禀赋和电网特性, 以四川能源发展路径为基础,分析高比例水电新型 电力系统的价值内涵。

高比例水电新型电力系统是以确保能源电力安 全为基本前提,以实现"双碳"目标及服务经济社会 高质量发展为核心目标,以电力系统"横向多能互 济、纵向源网荷储协调"的多向协同、灵活互动为坚 强支撑,以技术创新和体制机制创新为基础保障,以 大型水电为基础、支持高比例绿电电力电量贡献的 新型能源体系建设为主线任务的新时代电力系统, 可实现供需高效协同,支持经济低碳能源供应。

从基本特征看,其具备安全高效、清洁低碳、柔 性灵活、智慧经济等特征,支持利用储能、调峰机组、 需求响应等灵活性调节资源,实现源网荷储协调发 展、互济互利、能源安全、结构多源、供需协同,具有 应对极端气候、极限场景能力。

从战略定位看,高比例水电新型电力系统是中 国新型电力系统的先期示范样板和后期战略支撑, 立足中国重要清洁能源基地和清洁能源接续转送基 地的基本方略,肩负清洁能源转型战略大后方的重 要使命。

从关键要素看,在"源网荷储"四要素的基础上, 拓展以智慧能源大脑为核心的"脑"关键要素,形成涵 盖"源网荷储脑"的五大关键要素。"脑"以数字化和 市场化为核心抓手,体现了新型电力系统智慧融合的 关键特征,包括"电"脑和"碳"脑两个关键部分,为 新型电力系统提供战略指引和决策支持。

2 四川新型电力系统要素梳理与模型 构建

四川是典型的水能富集地区,具备开展新型电 力系统探索实践的必要条件和先天优势。因此,重 点以四川典型场景探索,结合四川新型电力系统建 设的实际问题和发展需求,围绕"源网荷储脑"五大 要素,提炼理论模型和发展路径,形成以省为实体的 高比例水电新型电力系统理论体系。

2.1 四川新型电力系统要素解析

如第1章所述,高比例水电新型电力系统的核 心要素包括"源网荷储脑"五大要素,其关联关系如 图1所示。



图 1 新型电力系统关键要素关系

2.1.1 "源":构建以清洁能源为主体、结构多元的 电源结构

保障能源安全是构建新型电力系统的首要任 务,从国内外相关地区停电事故分析看,结构性能源 短缺和事故性停电是威胁能源安全的两大诱 因[10-12]。当前,四川电源结构以水电为主,风光新 能源发展处于起步阶段,能源结构相对单一,易受极 端天气因素影响导致结构性能源短缺风险。构建多 元供给结构、加强互联互济是结构性问题的主要破 解方式。未来,四川水电开发速度逐步减缓,结构性 供需矛盾进一步凸显,需要促进风光资源开发实现 跨越式发展,加快形成省内水风光能源为主、多元化 的供应结构,同时通过多能互补提升,充分发挥新能 源、水电参与系统调节的能力,提升系统整体灵活性 资源水平,提升整体电力供应保障能力。加强跨省 跨区多源互济,深刻把握承接西部清洁能源接续转 送的发展契机,拓展特高压单一外送格局,促进跨区 域差异化能源结构高质量协同发展。具有一定的极

限场景应对能力,降低极端场景或单一品类能源短 缺对电力系统造成的影响。

2.1.2 "网":构建资源优化配置平台

 加强电网建设与电源发展统筹协调,加快推进特高压交直流输电工程建设,推动电网提档升级, 促进特高压送受互济,具备电力资源跨区快速调度 能力,实现更大范围(省内、省间)、更高效率的资源 优化配置。

 加强主网与配电网互动互济,形成"省-地-配-微"多级协同、柔性互动的发展格局。

3)实现由静态方式向动态方式转变,通过动态 潮流、动态无功控制等理论模型,促进交直流输电通 道跟随电源结构多阶梯运行,进一步提升电网灵活 控制水平和电网资源配置能力。

4)加强不同能源品种的互济发展,促进电力网络与天然气、氢、分布式清洁能源等供应网络协同, 实现多类型能源互联,避免因能源网络中断导致多 类型能源网络故障。

2.1.3 "荷":构建多样化清洁用能结构体系,建设 多元互动支撑能力

依托城乡能源革命、交通电气化发展等战略契 机,促进分布式新能源+储能、生物质能广泛利用, 形成多样化、清洁化的用能结构体系。培育"源网 荷储+"、虚拟电厂、负荷聚合商等新型用能主体和 调节方式,依托市场机制和数字化支撑体系,实现最 后一公里的靶向控制,具备用户精准响应能力以及 丰富的可中断负荷用于电力系统"避峰填谷"。

2.1.4 "储":构建跨时空、多样化储能体系

加强新型储能应用,促进"源网荷"各侧储能快 速发展,"新能源+储能"、电网替代性储能、智能微 电网等"区域充电宝"应用场景全面推广,系统灵活 性资源量显著上升,具备系统应急保障能力。因地 制宜发展抽水蓄能、压缩空气储能等多品种储能示 范与应用推广。适时推动包括电制氢-氢储能-氢 燃料电池等在内的新技术应用示范,打造电氢耦合 的能源存储新业态。

2.1.5 "脑":形成"电-碳"双控型能源控制中枢

"电-碳"双控型能源控制中枢包括"电"脑和 "碳"脑两个关键部分。"电"脑以源网荷储各侧数 据融合数字化技术为依托,以支撑电力安全可靠供 应、促进高比例可再生能源有效消纳、提升可再生能 源电力贡献能力为核心目标,是促进源网荷储协调 发展和互联互动的核心智慧体。"碳"脑以能源大数据等数据资源为基础,以实现能源低碳转型与服务社会低碳经济为核心目标,支撑电力与多类型清洁能源协调互济,促进碳市场与电力市场协同发展, 是"电"与"碳"联结的核心枢纽。"脑"这一要素的出现有力推动新型电力系统向着智能化、高效化、低碳化的智慧融合方向发展。

2.2 理论模型框架

根据上述五大要素及其关键技术梳理,形成四 川新型电力系统构建的理论模型框架,形成以源网 提档升级为基础,以新型电力系统机制为保障,以网 源协调匹配、多能互补提升为核心支撑,涵盖动态无 功响应、动态潮流控制、储能辅助运行、网荷互动补 充4个关键技术的"梁柱型"理论模型体系,具备极 限场景应对能力,如图2所示。



图 2 理论模型框架

2.2.1 以源网提档升级为基础

从当前电网的发展状态看,四川正处于新型电 力系统构建的关键时期,源网加速提档升级是构建 四川新型电力系统的重要基础,新能源等清洁能源 加速发展,超特高压骨干网络加速建设,形成相互独 立、互联互济的主网结构;同时对配电网网架进行设 备改造,建设灵活可靠的配电网,支撑电从身边来和 电从远方来两条路径畅通且高效,构成新型电力系 统的重要物理载体。

2.2.2 以新型电力系统机制为重要横梁

随着新能源装机容量快速增长,加之大量径流 式水电丰枯特性明显且调节能力不足,电网灵活性 资源不足问题日益凸显。新型电力市场机制通过柔 性市场机制引导系统内源网荷储依托市场化交易手 段,创新挖掘系统内水电、风光新能源等电源的互动 调节能力,促进负荷侧调节潜力释放;通过现货市 场、中长期市场、辅助服务市场等多市场联动机制, 提升电力系统稳定性和灵活调节能力,充分发挥电 力市场"看不见的手"的作用,助力实现电力资源在 更大范围内共享互济和优化配置,推动形成有更强 新能源消纳能力的新型电力系统;同时,通过绿色电 力交易等手段,还原清洁能源的环境价值属性,促进 电碳耦合发展,承担新型电力系统低碳发展的核心纽 带和关键承载,形成"梁拉型"理论模型的"横梁"。 2.2.3 以源网协调匹配和多能互补提升为支柱

从发展阶段看,四川新型电力系统仍以结构性 供需平衡矛盾为主,丰期保消纳、枯期互补提升保供 应需求迫切,极端气候条件下电力电量双缺问题依 然严峻,源网协调匹配和多能互补提升仍是解决上 述难题的关键支撑,成为四川新型电力系统构建的 关键支柱。源网协调匹配,既包括源网战略规划、建 设时序、运行控制的最优匹配,也包括源网关键特 性、互动能力的最优匹配,是省内电源与电网的匹 配,也是省外电源与省间通道的匹配。多能互补是 保供应和促消纳的关键手段,既是水、风、光、生物质 等多种电源结构的互补提升,也是跨省跨区不同类 型能源主体之间的互补互济,充分发挥四川水电的调 节作用,挖掘综合调节潜力,实现电力电量双提升。

2.2.4 以涵盖源、网、荷、储4个环节的关键技术为 重要支撑

动态潮流是新型电力系统区别于传统电力系统 的重要体现。随着新能源比例不断提升,加之新型 负荷随机性波动性不断增强,电网运行方式将逐步 由传统仅考虑"冬大、冬小、夏大、夏小"4 种代表性 运行模式,过渡到更加丰富化、精细化的动态运行模 式。通过动态的有功及无功控制模型,提升电网的 安全性和灵活性,实现电网资源配置能力挖潜。储 能辅助运行与网荷互动补充是未来新型电力系统的 重要发展方向。从技术发展趋势看,储能技术不断 突破将为新型动力系统运行方式、电力电量平衡模 式带来系统性的变革,是新型电力系统发展的重要 "调节器"。网荷互动是挖掘电网用户侧灵活资源 的关键手段,是保障系统安全的重要力量。当前阶 段受限于技术成熟度和技术经济性等因素,储能和 网荷互动对四川新型电力系统建设具备一定的辅助 支撑和补充作用,但尚未形成规模效应。需以理论 模型为引领,加快技术创新和示范应用,促进负荷侧 成规模的响应能力提升,为全面新型电力系统构建 提供理论和技术支撑。

2.3 理论模型框架的动态演变

随着新型电力系统建设的不断推进,数字化支 撑技术不断发展,新型市场机制的不断完善,储能技 术不断取得突破,"源网荷储脑"相关要素互联、互 通、互动能力和"脑力"进一步提升,各要素内涵进 一步丰富和补充,高比例水电新型电力系统理论框 架呈现更加立体、多维的态势:以源网荷储提档升级 为基础,以新型电碳市场机制为保障,以网源协调匹 配、多能互补提升、储能协同运行、网荷多元互动、系 统动态控制为五大关键支柱,如图 3 所示。



图 3 演化后八大模型框架

源网荷储提档升级是在源网提档升级的基础 上,加快开展新型储能体系构建,促进新型储能、抽 水蓄能压缩、空气储能、氢储能等深化应用。部分梯 级水电逐步转变为混合式抽水蓄能,短时储能与长 时储能协调发展,系统调节能力不断提升,电力平衡 由时空紧耦合转变为松耦合。负荷侧氢能、分布式 光伏、沼气发电等多种类型清洁能源革命持续深化, 规模化可控负荷与电网多元互动、柔性互济的基础 架构搭建完成,网荷互动已成为提升系统安全水平 和促进清洁能源高效消纳的又一重要支撑。

新型电碳市场在新型电力市场的基础上,实现 了电力市场与碳市场的深度耦合,健全流域梯级水 库上下游利益共享机制、多能互补的新能源配置机 制、灵活性资源价格机制,"西电东送"绿色电力的 环境价值属性充分显现,完善碳市场与电力市场的 协同联动机制,形成"用能-降碳"相互促进新型市 场格局。

五大关键支撑技术中,以由动态无功响应和动 态潮流控制模型组成的系统动态控制模型成为新型 电力系统的核心支撑,为源网荷储的柔性协调控制 提供关键技术支持。源网协调匹配、多能互补提升、 网荷多元互动以及储能系统运行模型在源荷逆向分 布的大电网资源配置场景中成为四大关键环节,在 局域配电网/微电网场景中深度耦合形成源网荷储 互联互动的新形态,通过模型架构确保主网与配电 网的模型一致性和结构匹配性,促进主网与配电网 协同互动。

3 四川新型电力系统发展演化路径

3.1 战略目标

通过理论创新和试验示范推动高比例水电新型 电力系统建设,最终建成以水电和新能源为主体、新 能源接纳能力和运行效率不断提升、可承接西部地 区大型清洁能源消纳的系统,有力支撑四川建设新 能源比例逐步提升的世界级清洁能源基地,助力成 渝双城经济圈发展,实现建设近零排放系统的宏远 目标,为全国双碳目标实现提供有力支撑。

3.2 演化阶段

根据四川新型电力系统的发展现状及规划情况,将其分为转型期、建设期、形成期和成熟期,各阶段指标权重演化规律如图4所示^[13]。



图 4 新型电力系统发展阶段特征指标权重演变

1)新型电力系统转型期(至 2025 年)

关键特征:新能源快速发展,抽水蓄能、燃气等 灵活性资源启动建设,负荷侧灵活性资源响应能力 逐步显现,初步建成安全、高效、灵活的电网。此阶 段提高供电保障能力仍为发展重点,安全高效权重 最高,新能源发展迅速,灵活调节设备处于快速发展 时期,清洁低碳和柔性灵活权重递减。

实施路径:重点优化省内电源结构,并挖掘电力 系统各类灵活性资源,提升系统能效,保障负荷侧用 电安全可靠,加快推进特高压交直流电网建设,初步 实现电网提档升级,网源匹配和互补提升的支柱性 作用和建设成效初显,现货、辅助服务等多元市场机 制逐步建立,推动实现电力稳定供应。

2)新型电力系统建设期(2026—2030年)

关键特征:水电开发速度逐步放缓,新能源加速 开发,电网提档升级基本完成,抽水蓄能和储能快速 发展,源侧、荷侧调节能力持续提升,外电入川有序 推动,清洁能源资源配置平台能力提升,全面建成现 代一流电网。此阶段是实现 2030 碳达峰目标的关 键时期,迎来新能源大规模开发,电力需求高速增 长,安全高效、清洁低碳仍是主要方向。

实施路径:强化数字智能技术在电力系统中的 应用,并在优化省内电源结构的基础上,增强跨区交 互与区内交互能力,动态有功无功控制能力显著增 强,实现源网提档升级,网源匹配和互补提升支柱性 作用显著,实现源网协调发展和多源互补互济,具备 较强的网荷互动能力,储能辅助运行支撑能力初步 显现,绿电市场、碳市场等多元市场机制逐步健全完 善,进一步提升系统能源利用率。

3) 新型电力系统形成期(2031—2035年)

关键特征:新能源发电占比快速提升,逐渐形成 水电和新能源为发电主体的电源格局,源网荷储各 侧调节能力进一步提升,外电入川持续深化,系统枢 纽地位进一步提升,绿色电力贡献和价值进一步凸 显,基本建成四川新型电力系统。此阶段是全面普 及智能化电力系统的发展时期,智慧经济维度的权 重显著提升。

实施路径:强化"脑力"的建设,进一步增强跨 区交互与区内交互能力,负荷侧和储能侧调节作用 进一步提升,初步实现源网荷储提档升级,网荷互动 和储能辅助运行成为系统重要支撑,四川新型电力 市场体系初步建成,初步实现绿色电力价值变现,源 网荷储脑协同有序发展。

4)新型电力系统成熟期(2036—2060年)

关键特征:新型电力系统全面建成,清洁能源主体加强且近零排放系统,已具备了应对极端状况的能力,水电角色由能源供应者向具有高效支撑能力的"多面手"转变,电能、氢能多种类型能源互济共通,化石能源实现电力电量保障向辅助保障转变。此阶段新型电力系统在安全高效方面已经较为成熟,相应的指标权重略有下降。

实施路径:电力系统低碳化持续推进,依托最新 技术突破持续优化系统结构形态,电能与氢能耦合 互济,"梁柱型"支撑模型体系搭建完善,促进"源网 荷储脑"协同发力,经济性、安全性稳步提升。

4 高比例水电新型电力系统理论落地 实践

基于理论模型架构分析,四川按照"理论引领, 创新驱动"的思路,从理论创新、集成创新、应用创 新3个方面,率先开展了高比例水电新型电力系统 的理论探索和创新实践,如图5所示。



图 5 四川新型电力系统的创新探索

4.1 要素梳理,先行先试

全面梳理"源网荷储脑"五大核心要素,形成了 构建新型电力系统的理论体系,并重点围绕引领、消 纳、保障、互补、协助、挖潜、友好、互联八大重点内 容,开展新型能源体系理论创新和探索实践。从宏 观趋势和指标量化两个方面,形成了新型电力系统 评价指标体系^[13];从电源侧、电网侧、负荷侧、体制 机制等方面出发,提出构建新型电力系统的分阶段 实施路径^[14],探索了水电为主的新型电力系统发展 模式,为四川新型电力系统构建提供战略方向。先 行先试,创新打造世界首例梯级水光蓄互补联合示 范项目,在四川新能源富集地区和水电富集地区探 索"源网荷储脑"全要素新型电力系统示范区建设, 探索利用分布式清洁能源打造源网荷储互联互动的 零碳村、零碳园区等示范。

4.2 提档升级,体系构建

四川将加速建设特高压交、直流网络,实现 500 kV 梯格型网络向立体双环网提档升级。通过建设优质 高效、安全柔性的电网,安全保障清洁能源大规模开 发。加快新能源开发利用,实现以水电为主电源结 构向水风光多能互补结构升级。加快研究适应新型 能源体系构建的新型电力系统市场机制,着眼于四 川新型电力系统调节能力不足的问题,设计四川省 多元资源辅助服务市场机制并提出对应发展规划的 政策建议,服务构建支撑四川省电力系统低碳发展 的"蓄水池"。围绕四川水、风、光清洁能源资源发 展主线条,创新市场机制和交易模式,促进新型能源 体系构建,电气化助力乡村振兴,因地制宜推动沼 气、垃圾发电、废水发电等能用利用新形式创新发 展,推动"源网荷储+""分布式电源+"发展模式应 用,实现高质量创新与统筹协调,形成结构多元、能 源安全的新型能源体系。

4.3 价值挖掘,协调发展

立足四川清洁能源资源禀赋,积极服务绿色低 碳优势产业发展战略,深挖电力与减污降碳、电力与 经济协同发展的内在规律。基于新型电力系统碳计 量、人工智能、大数据等相关数字化关键技术,开发 系列数字化服务产品,探索建立绿电市场与碳市场 的有效衔接。充分挖掘四川水电、风光新能源等清 洁能源绿色环境属性价值,率先实现绿色能源价值 变现,促进新型绿色能源体系与社会经济、生态环境 的协调发展。

5 结 语

新型电力系统是新型能源体系的重要载体,关 系中国能源安全和能源低碳转型重大战略,是一项 系统性的重大工程。鉴于中国各省能源结构和发展 路径差异巨大,明确不同省份在全国新型电力系统 和新型能源体系中的作用和地位,因地制宜差异化 开展以省为实体的新型电力系统创新探索,具有战 略意义。上面着眼于四川、云南等省份高比例水电 资源禀赋特征,开展高比例水电新型电力理论模型 探索,分析了高比例水电新型电力系统的定位和内 涵,论证了高比例水电新型电力系统是全国新型电 力系统的先期示范样板和后期战略支撑,提出了 "先低碳"地区带动"后低碳"地区的发展思路,创新 并解析了新型电力系统的"源网荷储脑"五大关键 要素,分析了高比例水电新型电力系统的发展目标 及演化阶段,构建了不同发展阶段的"梁柱型"理论 模型框架,介绍了现阶段四川新型电力理论模型实 践思路,为四川及能源结构类似地区发展新型电力 系统构建提供了理论支撑。

(下转第20页)

"双碳"目标下新型电力系统典型特征与 发展挑战综述

范荣全¹,杨 云²,许 珂¹,胥威汀¹

(1.四川省新型电力系统研究院有限公司,四川成都 610041;2.国网四川省电力公司,四川成都 610041)

摘 要:构建新型电力系统是实现"碳达峰、碳中和"目标的重要举措。为了更好地开展新型电力系统的规划发展研究工作,从多个角度阐述了对新型电力系统的认识,提出了新型电力系统的典型特征;并进一步从管理与体制机制、 经济性、技术性3个方面,剖析了当前构建新型电力系统面临的主要挑战。 关键词:碳达峰、碳中和;新型电力系统;"源-网-荷"侧典型特征

中图分类号:TM 711 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)06-0010-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230602

A Review of Typical Characteristics and Development Challenges of New Power System Considering "Dual Carbon" Goal

FAN Rongquan¹, YANG Yun², XU Ke¹, XU Weiting¹

(1. Sichuan New Electric Power System Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The construction of new power system is an important measure to achieve the goal of carbon peak and carbon neutrality. The differences between new power system and traditional power system are analyzed. Afterwards, the understanding of new power system is discribed from multiple angles, and the typical characteristics of new power system are put forward. Finally, the main challenges for the construction of new power system are analyzed from the management, economy and technology, which will be a kind of reference for the planning and research of new power system.

Key words: carbon peaking and carbon neutrality; new power system; typical characteristics of "source-grid-load" side

0 引 言

随着全球气候关注度以及可持续发展呼声的提高,能源转型成为各国政府和能源行业的重要议题,而电力系统作为关键的能源基础设施,扮演着重要的角色。在实现"碳达峰、碳中和"目标的指引下,构建以新能源为主体的新型电力系统应运而 生^[1-4]。

为应对全球气候变化和可持续发展,中国明确 提出 2030 年"碳达峰"和 2060 年"碳中和"的目标。 在实现"双碳"目标的战略背景下,旧有的电力系统 无法满足日益严格的碳排放要求。为了应对这一挑 战,构建新型电力系统已成为不可避免的趋势。

为此,中国已采取了诸多政策和措施,包括鼓励 可再生能源的开发和利用、推动能源转型以及加强 能源效率等,促进新型电力系统的建设。同时,在智 能电网技术和能源储存技术方面加大研发,以提高 电力系统的灵活性和智能化水平,实现供需平衡和 能源管理的优化。

下面在相关新型电力系统研究的基础上,结合 国家能源政策与形势的最新变化,对电力系统的发 展历程、新型电力系统的认识、典型特征及构建新型 电力系统面临的挑战 4 个方面进行了综述研究,以 期为"双碳"目标下新型电力系统的规划发展及相 关研究工作的开展提供参考与借鉴。

1 认识新型电力系统

1.1 新型电力系统的多层含义

在国家能源政策与形势变化的背景下,对新型 电力系统的认识也不断更新。目前还没有针对新型 电力系统的统一定义和描述。

部分大型能源企业提出了相关的认识:国家电 网以新能源为主要供给,形成了以能源电力安全为 基本前提,以满足经济社会发展的电力需求为首要 目标的结构化认识^[5];南方电网从绿色高效、柔性 开放和数字赋能^[6]3个方面体现了对新型电力系统 的认识。

中国科学院院士提出新型电力系统包含以下主 要特征:高比例可再生能源、高比例电力电子装备、 多能互补综合能源、信息物理融合智慧能源、清洁高 效低碳零碳、高韧性本质安全可靠。国家气候战略 中心学术委员会采用清洁化、低碳化和智能化来概 括传统电力系统和新型电力系统的本质区别。清华 四川能源互联网研究院提出了新型电力系统的"四 新",即新结构、新形态、新技术以及新机制。

2022 年 5 月《新型电力系统导论》提出:新型电 力系统以绿色低碳、安全可控、智慧灵活、开放互动、 数字赋能、经济高效为基本特征^[7],结构上有更强 新能源消纳能力,形态上源网荷储深度融合互动,技 术上各环节数字化和智能化,经济上电力和碳市场 协同发展。

1.2 哲学中的新型电力系统

中国传统文化与哲学观点一脉相承,讲究矛盾 的双方既是相互对立,又是相互依存的,不能消除任 何一方,须达到相互平衡。

电力系统的对立统一关系如图1所示。电力系统的发展来源于需求,发展与需求是相互促进依存的关系。直流和交流是相互对立又相互依赖的,没有绝对的优劣之分,应在不同应用场景下发挥最佳优势。电力的供应和需求是既相互对立又相互依赖的。电力系统的发展与技术进步紧密相关,而技术的发展并不是单一走向、单一维度、一往直前的,而是有上升、有回落,有横线、有曲线,呈螺旋式上升发展的。



图 1 电力系统的对立统一关系

在电力系统发展的过程中,安全-经济-环保的 "矛盾三角形"将长期存在,如图2所示。在新型电 力系统中:从安全角度考虑,需要解决系统转动惯量 下降、宽频振荡以及高/低电压穿越等问题,需要通 过合理设计和控制策略来解决,以确保系统的稳定 运行和电力供应的安全性;从环保角度,需要在能源 安全稳定保供的前提下,逐步稳步替代传统能源,实 现新能源的大规模应用和发展,同时不断释放负荷 侧电气化水平潜力;在经济方面,不仅要考虑到新能 源发电、电网接入以及系统调节的成本,还应顾及到 灵活调节资源、清洁能源外送以及环境属性所带来 的效益。三者相互对立又相互统一,需要找到最佳 的平衡点,才能实现可持续发展。



图 2 安全-经济-环保"矛盾三角形"

哲学方法论与人文结合指出新型电力系统的 发展与人类社会进步、先进技术迭代以及消费行为 习惯紧密相关。另外,哲学和传统文化为新型电力 系统的发展指明了方向,即电力系统的技术发展是 与需求紧密相关、相互促进的,通过如交直流之争等 矛盾引起的发展或否定之否定,最终将呈螺旋式迭 代上升。

2 新型电力系统的典型特征

与传统电力系统相比,新型电力系统在电源侧、 电网侧、负荷侧具有新的典型特征。

2.1 电源侧典型特征

1) 电源类型发生转变

以往电力系统使用的一次能源主要是化石能 源,而在构建的新型电力系统中,新能源将逐步成为 新的电源主体,主要包含风能、太阳能等清洁能源。

2) 电源布局发生转变

根据中国风能、太阳能等新能源的资源分布情况,新能源在开发过程中主要以集中式、分散式为主。

2.2 电网侧典型特征

在主网侧将呈现更大规模的超、特高压交直流 互联。超大规模同步电网改异步电网,设备也更加 智能化、小型化、分散化。

同时,随着新型源荷主体的大量接入,配电网形 态特征也将发生重大变化。从电源结构来看,具有 "主网+分布式电源"、储能^[8]、能源产消者、供给多 元化等新要素;网架结构和运行方式有变化,电力潮 流从单向变为双向^[9];负荷类型方面,各类柔性负 荷接入使负荷特性愈趋复杂;电力装备方面,大量电 力电子装备并网,各环节的电力电子化进程加快。

新型电力系统通过运用 5G、人工智能、大数据、 数字孪生等新一代信息通信技术^[10],达到广泛互联 互通、智能友好互动以及全局协同计算的目的,实现 可控负荷智能感知、虚拟电厂自动响应、分布式电源 智慧上网,从而形成如图 3 所示的数字化主动配电 网,以提升电网的智能化水平。



图 3 数字化主动配电网框架

另外,新型配电网具备灵活调节能力,能够更 好地利用负荷侧资源,通过源网荷储多向互动的方 式,进一步加强电源、电网和负荷之间的协调与交 互。通过引入虚拟电厂等一体化聚合模式,新型配 电网能够参与电力市场的中长期交易、辅助服务交 易和现货交易等。这样的安排可以实现电网资源的 全局统筹、跨区协同和区域自治,形成一个如图4所 示的多元源荷储聚合的新型能源自治体系,促进能 源的高效利用和可持续发展。



图 4 多元源荷储聚合的新型能源自治体系

2.3 负荷侧典型特征

传统负荷体量不断增大,用户用电需求也越来 越高。近年来,随着经济社会发展和人们生活水平 提高,传统负荷体量庞大,如空调的社会保有量估计 约5.4亿台。2022年,经济复苏带来用电高需求,全 社会用电量 8.6 PWh,同比增长 3.6%;据中电联预 测,2023年全社会用电量将达到约9.15 PWh,全年 增速在 6%左右^[11]。

新型负荷如雨后春笋般快速发展。近年来,分 布式电源、电动汽车和储能等新型负荷快速发展,在 配电侧接入的容量越来越大,更多新型用能场景涌 现。预计到 2025 年,电动汽车作为移动分布式储能 装置,其充换电服务电量将超过 50 TWh。因此可以 预见,新型负荷的比例在未来会继续增加,具备高随 机性、高灵活性和高可靠性的特点,传统负荷与新型 负荷将长期交织并存。

在某些场景下负荷可以转换为电源。分布式电 源、用户侧储能、电动汽车反向放电^[12]、虚拟电 厂^[13]等逐步应用推广,部分负荷不再是单一流向而 是参与电网侧的双向能量互动。同样的,抽水蓄能 通过消耗电能在低负荷时抽水至上水库储能,并在 高负荷时放水发电,实现了双向能量互动。

3 构建新型电力系统面临的挑战

随着新型电力系统电源侧、电网侧、负荷侧新特征的出现,构建新型电力系统也将面临许多新的挑战^[14-16],主要包括管理及体制机制、经济性、技术性 三类挑战。

3.1 管理及体制机制挑战

 4)经济属性、社会属性和政治属性交织带来的 关联影响问题。新型电力系统集经济属性、社会属 性和政治属性于一体,引起新的更为复杂的管理及 体制机制挑战,超越通常的工程技术经济研究领域 和理论。

2)新型电力系统安全、经济、环保的对立和统一问题。如何在保障能源安全供应(保供应、保安全)的前提下,经济高效地实现双碳目标,是一个复杂的系统性问题,经济-安全-环保"矛盾三角形"将长期存在。

3)适应新型电力系统发展的配套政策、机制问题。《新型电力系统发展蓝皮书》^[17]提出:配套政策 与体制机制是构建新型电力系统的制度保障,是充 分发挥市场在资源配置中的决定性作用。

4) 非对称信息带来的管理技术和利益分配博 弈问题。新型电力系统背景下,用户数据更加多元 化,电网在需要获取传统的用户负荷数据外,还需要 获取光伏、储能等数据,在获取过程中由于技术、管 理等原因可能会出现与用户之间信息不对称的问 题,进而导致产生难以解决的正和博弈问题。

3.2 经济性挑战

1)目前,新型储能发展亟需成本疏导。锂、钒 等电化学储能和盐穴、飞轮等物理储能设施均缺乏 高效的成本回收机制。特别是氢能源和燃料电池等 虽清洁低碳、存用灵活,但成本高且配套设施不完 善,目前普及程度有限。然而,随着市场规模扩大以 及政府对储能技术的持续支持,氢能发电技术将更 加成熟、成本也会大幅降低。在未来,预计氢能等技 术可能在电力行业得到广泛应用,例如小型便携式 氢储能。当然这种发展趋势也将给电力系统的安全 生产运营提出巨大挑战。

2)微电网"自平衡"导致的经济性问题。微电 网"自平衡"是能源电力发展新的形态,是行业适应 社会发展的趋势之一。但能源电力也是国家安全的 基本要素,如何在满足清洁能源分布式开发与就地 消纳的基础上,保障缺电等特殊时期的供电需求和成 本的合理疏导,需要统筹兼顾其政治、社会和经济性。

3)新型电力系统发展的投资和收益的平衡问题。新型电力系统规划、建设、运行等环节的投资决策对于其可持续发展至关重要。在开展大规模特高压建设、电网改造、电网智能化设备配置、储能等灵活性资源的投资和考虑多元主体参与电力市场建设等多方面,需要兼顾投资和收益的平衡。

4)人工智能等前沿技术的投资收益问题。人

工智能等技术的不断成熟,使其将逐步渗透到电力 系统发电、输电、配电、用电等各个环节,实现提升设 备工作效率、辅助智能监控和决策、解决人工误操作 等问题。这些环节涉及的设备规模和消耗的人力资 源都非常庞大,形成一定的市场规模后,能带来不错 的投资收益。

3.3 技术性挑战

1)分布式光伏接入配电网带来的挑战^[18]。分 布式光伏电源接入配电网是一种新兴的能源发电方 式,可以有效地利用太阳能资源并分散能源生产,减 少对传统能源的依赖。但同时也给配电网带来了一 些问题。

首先,分布式光伏电源接入配电网可能引发电 压调整问题。由于光伏电源的功率波动性较大,接 入配电网后,可能会导致电压不稳定,尤其在光照强 度变化较大的情况下。因此,需要配电网进行相应 的电压调整和稳定措施,以确保电力供应的可靠性 和稳定性。其次,保护配置是分布式光伏电源接入 配电网所面临的另一个问题。在传统的电力系统 中,保护配置主要是针对集中式发电系统设计的,而 分布式光伏电源的接入会导致电力流向的变化且不 确定性增加。因此,配电网需要重新评估保护配置, 确保对分布式光伏电源的故障进行及时的隔离和保 护,以防止故障扩散并影响整个配电网的运行。此 外,分布式光伏电源接入配电网还涉及电能质量、电 量计量计费和供电可靠性等问题。

总而言之,分布式光伏电源接入配电网为能源 领域带来了新的发展机遇,但也面临着一系列问题; 需要合理的规划和技术措施来解决相关问题,实现 分布式光伏电源与配电网的有机融合,推动清洁能 源的可持续发展。

2)新能源出力损失与电能质量问题^[19]。在新 能源发电装机规模达到一定比例后,在通常气象变 化下存在新能源出力损失以及与其他能源发电的补 位能量平衡和电能质量问题。图 5 展示了在一天中 风能、光伏等新能源的发电量与电网的实际出力及 负荷曲线,新能源发电并网会带来间歇性和波动性 的问题,同时还可能存在孤网问题、谐波问题等,影 响电网的电能质量。

3)适应新型电力系统发展的各类发电机组配置比例问题。新型电力系统的核心特征之一,是新能源如风能和太阳能等,逐渐成为主要的电力供应

来源。这种转变是为了减少对传统化石燃料的依赖,降低碳排放,实现清洁能源的可持续利用。而新能源发电的随机性、波动性以及带来的安全问题都需要一定的调节性资源进行补充。因此,为了确保新型电力系统的安全和稳定运行,需要适量的水电、 火电等可控电源作为基石,提供基础的调节服务,同时,一定配比的储能也将发挥全时间尺度的系统调节能力,以满足系统的需求。



图 5 新能源参与的电网出力及负荷曲线

4)多重复杂特性电源共存状态下发电连续性 出力的协同控制问题。新型直流汇集接入技术能解 决新能源间歇性问题,高比例新能源将极大增加电 源侧的不可控性。传统电力系统多种电源简单叠加 的形态将不再适应新型电力系统的要求,风光互补、 新能源+水电、新能源+储能、新能源+氢能、风光水 火储一体化等多元协同开发模式的创新能更好地实 现多时间尺度下的优化配置。

5)超大范围、超大规模同步电网的系统稳 定^[20]、短路电流和安全问题。从安全性角度来看, 大同步电网具有短路电流问题突出和大面积停电的 风险。由于大同步电网存在大量的电力设备和复杂 的电力传输网络,发生短路故障时会导致巨大的短 路电流,对电力设备和系统造成严重的冲击;发生故 障或其他意外情况时,可能会导致整个区域范围内 的停电。同时,大同步电网还存在连锁反应事故的 问题。与中小同步电网相比,大同步电网的影响范 围更广,可能会造成巨大的损失。

此外,还存在交直流并存和大量电力电子元器 件所带的协同控制与系统振荡问题、新型电力系统 抵御自然灾害的能力问题、多重因素耦合下的总能 量需求预测问题、适应新型电力系统发展的储能布 局与配置问题^[21]、大规模储能带来的协同控制问题 以及大规模、大容量、快充动力电池对配电网带来的 问题等。

4 结 语

综上所述,新型电力系统是由多种复杂特性电 源共存,具有自主可控的超大规模交直流电能传输 分配网络,庞大灵活多变的不同能量形态转换终端 集群,集经济属性、社会属性、政治属性为一体的高 安全可靠的能量转换、传输和分配的超大规模智慧 系统。

上面从电力系统的发展历程和形势入手,提炼 了关于新型电力系统的认知,建议采用"对立统一、 相互促进"的发展观来看待并指导新型电力系统建 设;并总结了新型电力系统在电源侧、电网侧、负荷 侧的典型特征,梳理了电源类型和布局、主配网形 态、多要素接入与聚合、源网荷储互联互动等重要转 变趋势;最后,从管理及体制机制、经济性、技术性3 个角度阐述了构建新型电力系统所面临的挑战,也 从中捕捉到了一系列关键的发展机遇和突破重点, 为今后的相关研究提供参考和建议。

参考文献

- [1] 舒印彪,陈国平,贺静波,等.构建以新能源为主体的 新型电力系统框架研究[J].中国工程科学,2021, 23(6):61-69.
- [2] 徐三敏,张云飞,赵添辰,等."双碳"目标下新型电力系统发展综述[J].水电与抽水蓄能,2022,8(6):21-25.
- [3] 张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的 挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022,42(8): 2806-2819.
- [4] 华志刚,侯勇,吴水木,等.我国电力行业碳达峰实施路 径研究[J].能源,2022(4):44-49.
- [5] 袁士超,朱耿,严勇,等.台湾省 303 大停电后面向新型电力系统建设的思考与建议[J].农村电气化,2022(10): 30-34.
- [6] 郭卫华.绿色高效 柔性开放 数字赋能[N].中国电力 报,2022-04-15(1).
- [7] 电力装备助力"碳达峰・碳中和"途径与措施研究
 (上)[J].电器工业,2022(6):1-7.
- [8] 张文亮, 丘明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应 用[J].电网技术, 2008, 32(7):1-9.

(下转第58页)

汛限水位动态控制对水电-新能源 互补能力的提升研究

张阳博¹,张 帅²,朱燕梅¹,黄炜斌¹,邓靖微²,曹敏琦²

(1.四川大学水利水电学院,四川成都 610065;2.国网四川省电力公司经济技术

研究院,四川 成都 610041)

摘 要:在水能富集地区,丰水期来水量大,水电发电量大,调节能力不足,水电-新能源消纳矛盾突出,互补调度困难 较大。为了缓解汛期水电-新能源消纳矛盾,创新地将汛限水位与新能源消纳相结合,探讨汛限水位动态控制对水风 互补能力的提升效果。建立了一定弃电率条件下源荷匹配度最大的水风互补模型,以旬为计算周期、小时为计算时 段,采用遗传算法对雅砻江下游"两库五级"梯级电站及周边风电场组成的互补系统开展模拟计算,通过对比分析发 现汛限水位动态控制方案相比静态控制方案可多消纳 2.55% 的风电。结果表明,通过汛限水位的动态控制可以动态 增加水电可利用的调节库容,从而提升水电调节新能源的能力。

关键词:汛限水位; 互补能力; 水风消纳; 雅砻江

中图分类号:TV 76 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)06-0015-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230603

Research on Dynamic Control of Flood Limit Water Level to Improve Complementary Capacity of Hydropower and New Energy

ZHANG Yangbo¹, ZHANG Shuai², ZHU Yanmei¹, HUANG Weibin¹, DENG Jingwei², CAO Minqi²
(1. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: In water rich areas, the large amount of incoming water and hydropower generation during the abundant water period are not sufficiently regulated, resulting in prominent hydropower-new energy consumption contradictions and greater difficulties in complementary scheduling. In order to alleviate the contradiction between hydropower and new energy consumption during the flood season, the flood water level is innovatively combined with new energy consumption, and the effect of dynamic control of flood water level on the improvement of water-wind complementary capacity is discussed. A model with maximum source-load matching under a certain abandonment rate is established, and a genetic algorithm is used to simulate the complementary system consisting of " two reservoirs and five stages" downstream of Yalong river and the surrounding wind farms. This shows that the dynamic control of flood limit water level can dynamically increase the available regulating reservoir capacity of hydropower, thus enhancing the ability of hydropower to regulate the new energy.

Key words:flood limit water level; complementary capacity; water and wind accommodation; Yalong river

0 引 言

水库汛期的限制水位是水电站防洪调度中的关键参数^[1],分静态和动态两种控制方式,前者采用固定的汛限水位,在防洪时期,超过静态汛限水位的

水一律泄掉,一方面大量水资源浪费^[2],也存在后 续水库无法蓄满的风险。汛限水位动态控制是在设 计的水位范围内上下浮动,有效地改善了静态控制 的缺陷^[3]。学者们针对汛期分期、汛限水位的分期 控制、汛限水位的动态控制阈^[4]等开展了有效的研 究。文献[5]在考虑溪洛渡—向家坝梯级电站调蓄 影响的条件下,研究了三峡水库的分期汛限水位。 文献[6]采用蒙特卡罗随机方法对动态汛限水位带 来的风险进行了分析和量化。文献[7]以最小化出 库流量的最大值为目标构建了碧流河水库汛限水位 优化模型,通过遗传算法求解发现,汛限水位优化使 得水库的蓄水发电效益提高。综上所述,现有文献 就如何通过梯级水库群汛限水位动态控制进行汛期 防洪调度,提高流域整体防洪效益和发电效益作了 深入探索,并取得了较好的成果;然而,将水库汛限水 位动态控制与新能源消纳相结合的研究尚未见报道。

在水能富集地区,丰水期来水量大,水电发电量 大,调节能力不足,水风光等多能互补系统在来水量 较大的汛期常常存在弃水、总出力波动较大的现象, 水电、新能源消纳矛盾更为突出,互补调度困难较 大。新型电力系统建设背景下,出力不可控的新能 源发展迅猛,如何利用梯级水库群汛限水位动态控 制思想尽可能多地增加新能源消纳量是解决其汛期 消纳问题的重要手段,这对推动水能富集地区新型 电力系统建设具有战略意义。因此,下面立足于汛 期水电-新能源消纳矛盾点,将水库汛限水位动态 控制与风电调节相结合,重点探讨汛限水位动态控 制对于水电承载风电能力的提升效果。

1 互补模型

1.1 目标函数

梯级水电-新能源汛期互补调度面临着流域防 洪、新能源消纳及水能利用等问题。由于新能源出 力具有不可调节性,需要通过梯级水电调节自身出 力来平抑新能源出力波动,会出现水电出力上调或 者下调两种情况。汛期入库径流较大,水量充沛,一 般不会出现水电出力上调无法满足的情形;但汛期 调度还受限于防洪任务及其他流域水资源综合利用 约束,可能会出现水电出力下调无法满足的情形。

 水电-新能源总出力大于电网分配的负荷需求,且梯级水电出力已达到最小出力,无法继续下调, 为满足电量供需平衡,需要弃掉部分新能源电量。

2)水电-新能源总出力可以满足电网分配的负

荷需求,但水库水位达到汛期上限要求,梯级水电出 力无法继续下调,产生了一定弃水,考虑到防洪风 险,需要弃掉部分新能源电量。

为在防洪安全范围内既充分消纳新能源电量, 又合理利用水能资源,所提模型利用动态汛限水位, 设定目标函数为一定弃电率条件下源荷匹配度最 大,目标函数表达式为

$$\begin{cases} \operatorname{Max} \rho = \operatorname{Max}(1 - \frac{E_{q} + E_{que}}{E_{load}}) \\ E_{q} = \sum_{t \in T} \left[(N_{t} - N_{load,t}) \times \Delta t \right], \ N_{t} \ge N_{load,t} \\ E_{que} = \sum_{t \in T} \left[(N_{load,t} - N_{t}) \times \Delta t \right], \ N_{t} < N_{load,t} \\ N_{t} = \sum_{i \in I} N_{h,i,t} + N_{w,t} + N_{pv,t} \end{cases}$$

$$(1)$$

式中: E_q 为互补系统总弃电量; E_{que} 为互补系统缺电 量; E_{load} 为系统需求电量; ρ 为源荷匹配度; N_t 和 $N_{load,t}$ 分别为t 时段光伏发电总出力和负荷需求; Δt 为第t 时段持续时间;I 为所有水电站的集合; $N_{h,i,t}$ 为第i 个水电站第t 时段的发电出力; $N_{w,t}$ 和 $N_{ov,t}$ 分别为第t 时段风电出力和光伏发电出力。

1.2 约束条件

模型考虑的约束条件分为电网类约束、电站类约束、水力类约束。

1) 电网类约束: 输电通道约束和系统弃电率约束

$$\sum_{v \in T} N_{\mathrm{h},i,t} + N_{\mathrm{w},t}^d + N_{\mathrm{pv},t}^d \leqslant c_t^d \tag{2}$$

$$A_{\rm R} = \frac{E_{\rm q}}{E_{\rm q} + E} = \partial \tag{3}$$

式中: $N_{w,t}^{d}$ 为断面 d 内的风电第 t 时段的发电出力; $N_{pv,t}^{d}$ 为断面 d 内的光伏发电第 t 时段的发电出力; c_{t}^{d} 为断面 d 的输电容量; A_{R} 为弃电率; ∂ 为假定的弃 电率水平;E 为互补系统实际发电量。

2)电站类约束:新能源接入装机约束、各类电 站出力约束

$$\begin{cases} N_{w,s} \leq N_{w,m} \\ N_{pv,s} \leq N_{pv,m} \\ N_{h,j,t}^{\min} \leq N_{h,i,t} \leq N_{h,i,t}^{\max} \\ N_{w,t}^{\min} \leq N_{w,t} \leq N_{w,t}^{\max} \\ N_{pv,t}^{\min} \leq N_{pv,t} \leq N_{pv,t}^{\max} \end{cases}$$
(4)

式中: $N_{w,s}$ 为风电接入装机; $N_{w,m}$ 为风电理论装机; $N_{pv,s}$ 为光伏接入装机; $N_{pv,m}$ 为光伏理论装机; $N_{h,i,t}$ 、 $N_{h,i,t}^{max}$ 分别为第i个水电站在第t时段内的最小出力 和最大出力; $N_{w,t}^{min}$ 、 $N_{w,t}^{max}$ 分别为风电场在第t时段内 的最小出力和最大出力; $N_{pv,t}^{min}$ 、 $N_{pv,t}^{max}$ 分别为光伏电站 在第t时段内的最小出力和最大出力。

3)水力类约束:水量平衡约束、流量平衡约束、 水库蓄水量约束、水库水位约束、发电流量约束、下 泄流量约束

$$\begin{cases} V_{i,t+1} = V_{i,t} + (Q_{r,i,t} - Q_{i,t} - Q_{q,i,t}) \Delta t \\ Q_{r,i,t} = Q_{i-1,t-1} = Q_{q,i-1,t-1} + q_{i,t} \\ V_{i,t}^{\min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,t}^{\max} \\ Z_{i,t}^{\min} \leq Z_{i,t} \leq Z_{i,t}^{\max} \\ Q_{i,t}^{\min} \leq Q_{i,t} \leq Q_{i,t}^{\max} \\ Q_{s,i,t}^{\min} \leq (Q_{i,t} + Q_{q,i,t}) \leq Q_{s,i,t}^{\max} \end{cases}$$
(5)

式中: $Q_{r,i,t}$ 为第 i 个水电站在第 t 时段内的平均入库 流量; $Q_{i,t}$ 为第 i 个水电站在第 t 时段内的发电流量; $Q_{q,i,t}$ 为第 i 个水电站在第 t 时段内的弃水流量; $q_{i,t}$ 为第 i 个水电站与第 i-1 个水电站在第 t 时段内的 区间流量; $V_{i,t}$ 为第 i 个水电站在第 t 时段初的水库 蓄水量; $Z_{i,t}$ 为第 i 个水电站在第 t 时段初的水库水 位; $V_{i,t}^{\min}$ 、 $V_{i,t}^{\max}$ 分别为i 第个水电站在第 t 时段内允许 的最小蓄水量和最大蓄水量; $Z_{i,t}^{\min}$ 、 $Z_{i,t}^{\max}$ 分别为i 第个 水电站在第 t 时段内允许的最小水位和最大水位, 在动态汛限水位和静态汛限水位模型中,该水位约 束条件有所不同; $Q_{i,t}^{\min}$ 、 $Q_{i,t}^{\max}$ 分别为第 i 个水电站在 第 t 时段内允许的最小发电流量和最大发电流量; $Q_{s,i,t}^{\min}$ 、 $Q_{s,i,t}^{\max}$ 分别为第 i 个水电站在第 t 时段内允许的

1.3 模型求解算法

考虑到遗传算法作为一种快捷、简便、容错性强 的算法,与传统的搜索方法相比,具有广泛的适应 性、并行性、鲁棒性、全局优化性等优点,对求解问题 的目标函数无连续、可微等要求,特别适合于求解类 似水库群优化调度等含有多参数多变量的优化问 题。因此采用遗传算法求解水风互补模型。

遗传算法主要包含优化解的编码设计、种群规

模及计算参数的设定、约束处理与适应度函数、进化 算子操作等方面,计算流程如图1所示。



图 1 遗传算法计算流程

1.4 动态汛限水位的确定方法

采用预泄能力约束法确定水库的动态汛限水 位。预泄能力约束法是根据预报信息和水库自身条 件来预判泄流能力,从而确定汛限水位可以上调的 空间。降雨及洪水预报精度、预报信息的预见期及 有效预见期、有效预泄期内水库的出入水量、有效预 见期内预蓄水量、有效预见期内水库泄流能力、有效 预见期内预泄水量以及其他人为操作、地质等因素 是预泄能力约束法的主要影响因素。预泄能力约束 法具体求解步骤如下:

1) 计算有效预见期

预见期指从预报信息发布时刻与预报事件发生 时刻之间的间隔时长。有效预见期指将预报信息获 得分析、决策指令传达、现场指令执行等时间从预见 期中扣除后的剩余有效时间,具体计算公式为

$$\begin{cases} T_{v} = T_{x} + T_{y} - T_{z} \\ T_{z} = T_{r} + T_{p} + T_{q} \end{cases}$$
(6)

式中:*T*,为有效预见期;*T*,为预报精度达到可利用 程度的预见期;*T*,为预泄水库极限预泄时间;*T*,为 预报信息获得分析时间、决策指令传达时间、现场指 令执行时间之和;*T*,为获得、分析预报信息时间;*T*。 2) 计算有效预见期内预泄水库的平均出入库 流量

出于安全考虑,根据洪水预报信息,有效预见期 期间预泄水库的平均入库流量取该时段内多年最大 平均入库流量,平均出库流量取下游河道的最低安 全允许泄流量,具体公式为

$$\begin{cases} Q_{\text{in}} = \max Q_{\text{H},n}, (n = 1, \cdots, N) \\ Q_{\text{out}} = \min Q_{\text{N},l}, (l = 1, \cdots, L) \end{cases}$$
(7)

式中: Q_{in} 为有效预见期内预泄水库的平均入库流 量; $Q_{H,n}$ 为第 n 次发布洪水预报时的洪水流量, N 为 发布洪水预报总次数; Q_{out} 为有效预见期内预泄水库 的平均出库流量; $Q_{N,l}$ 为下游河道第 l 级安全允许泄 流量, L 为下游河道防洪安全允许泄流量级数。

3) 计算有效预见期内预泄水库的泄流能力

根据有效预见期内预泄水库平均出入库流量 Q_{in}、Q_{out},按式(8)计算预泄水库最大允许泄水量,即 泄流能力。

$$W_{\rm x} = (Q_{\rm out} - Q_{\rm in}) \times T_{\rm y} \tag{8}$$

4) 计算汛限水位动态控制域的上限水位

将水库在有效预见期内的最大安全泄流能力作 为汛期水位上浮的增效库容,通过库容-水位关系 即可得到增效库容所对应的动态汛限水位上限值, 计算公式为

$$Z_{D_{y}}^{+} = \begin{cases} f[V(Z_{D}^{0}) + W_{x}], \ Z_{D_{y}}^{+} < Z_{x} \\ \\ Z_{x}, \ Z_{D_{y}}^{+} \ge Z_{x} \end{cases}$$
(9)

式中: $Z_{D_y}^*$ 为库容扩展后动态汛限水位上限值; Z_x 为水库正常蓄水位;f(*)为水库水位-库容关系。

2 案例分析

已有研究表明相比光伏发电,风电的不确定性 对水电调节能力影响更大^[8]。因此以水风互补系 统为研究对象,选取雅砻江流域下游5座梯级水电 站及其周边风电场作为研究案例,梯级水电总装机 为14 700 MW,根据最新研究成果,雅砻江流域规划 风电 5377 MW,下面将以此作为边界条件。各水电 站的特征参数如表1所示。

表1 雅砻江流域下游控制性水库设计特征参数

特征参数	锦屏一级	锦东	官地	二滩	若水
多年平均 流量/(m ³ ・s ⁻¹)	1190	1190	1360	1650	1890
正常蓄水位/m	1880	1646	1330	1200	1015
死水位/m	1646	1330	1220	1035	995
总库容/(10 ⁸ m ³)	77.6	0.11	6.26	57.9	0.72
调节库容/(10 ⁸ m ³)	49.10	0.05	1.72	33.70	0.23
调节性能	年	日	日	季	日

选取具有汛限水位要求的7月中旬(7月11日 至7月20日)为计算周期,以小时为计算时段,共计 240个时段。在固定负荷需求曲线下,优化得到满 足一定弃电率要求和源荷匹配度最大化目标的风电 接入规模和消纳电量。为了分析动态汛限水位对于 汛期互补调度运行的影响,设定一个对照方案,即按 原静态汛限水位要求运行,其中锦屏一级水库、二滩 水库的静态汛限水位分别为1859.00 m、1190.00 m、 根据预泄能力约束法得到锦屏一级、二滩两水库的 动态汛限水位范围分别为[1859.00,1862.71]m、 [1 190.00,1 195.00]m。两个方案中水位约束条件 不同:静态汛限水位方案中,除水库初末水位保持与 实际运行时水位一致以外,中间时段的运行水位应 不超过原静态汛限水位;动态汛限水位方案中,中间 时段水位可在动态汛限水位范围内变动。两方案风 电出力特性相同,5座梯级电站初末水位为实际运 行数据,如表2所示。

表 2 梯级水电站初末运行水位 单位:m

水位	锦屏一级	锦东	官地	二滩	若水
初始水位	1 849.50	1 645.00	1 329.80	1 187.00	1 012.00
末水位	1 859.00	1 645.00	1 329.80	1 190.00	1 012.00

表3统计了两种汛限水位方案下消纳的风电、 水电等各类电源的数据。由表3可知,通过汛限水 位动态控制,按照5%的弃电率水平,梯级水电可多 接入122 MW风电。在相同负荷需求下,可多消 纳风电电量9528.9 MW,相比静态汛限水位方案 可多消纳2.55%的风电,源荷匹配度可提高0.29个 百分点。

两种方案下梯级水电与风电出力互补过程分别 如图 2 和图 3 所示。总体来看,两种方案下水风互 补总出力较好地跟踪负荷,与负荷需求曲线趋势 一致,其中汛限水位静态控制时源荷匹配度为 94.37%,汛限水位动态控制时源荷匹配度为 94.66%, 相比静态控制方案提高 0.29%。两种方案的水风电 量构成差异不大,其中动态汛限水位控制方案下风、 水电量分别占13.72%、86.28%,静态汛限水位控制 方案下风、水电量分别占13.42%、86.58%。

表 3 不同汛限水位方案容量配置成果

配置参数	静态汛限 水位方案	动态汛限 水位方案			
接入风电装机容量/MW	4782	4904			
消纳风电电量/MWh	373 104.4	382 633.3			
弃风电量/MWh	10.4	0			
水电装机容量/MW	14 700	14 700			
水电实发电量/MWh	2 407 926	2 407 234			
弃水电量/MWh	146 644.4	147 346.9			
送出电量/MWh	2 781 031	2 789 868			
缺失电量/MWh	104 97.8	1 661.2			
需求电量/MWh	2 791 529	2 791 529			
总弃电量/MWh	146 654.8	147 346.9			
总弃电率/%	5.01	5.02			
源荷匹配度/%	94.37	94.66			
● 锦西 ● 锦东 ● 官地 20 000 15 000 10 000 500 0 15 29 43 57 71 85 99 113 Bt	一滩 考	水 ■风电 197 211 225 239			
^{时间/h} 图 2 静态汛限水位方案下水风互补出力过程					
●第西 ● 第东 ● 官地 20 000 15 000 10 000	■二滩 ■ 若2	k ■风电			
5000 01 15 29 43 57 71 85 99 113 1	27 141 155 169 183 1	97 211 225 239			



两种方案下锦屏一级水库和二滩水库水位变化 过程分别如图4和图5所示。在水位升到汛限水位 之前,锦屏一级电站和二滩电站在静态汛限水位方 案和动态汛限水位方案下蓄水过程基本一致。当蓄 至原静态汛限水位后,在动态汛限水位方案下,两个 电站继续蓄水至动态汛限水位上限,将此部分水存于 水库中,给风电让出发电空间,存蓄起来的水量用于 后期风电发电较少时段放水发电以满足用电量需求, 这是动态汛限水位方案能多接纳风电的本质原因。



综上所述,丰水期来水量大,水电发电量大,调 节能力不足,因此在不新增弃水的情况下,丰水期水 电可以调节消纳的新能源电量十分有限。通过汛限 水位的动态控制可以动态增加水电可利用的调节库 容,从而提升水电调节新能源的能力。在实际调度 运行中,可结合洪水预报情况,在洪水来临之前采取 提前预泄手段以腾出一定的调节库容,促进水电-新 能源的消纳。

3 结 论

在水能富集地区,丰水期来水量大,水电发电量 大,调节能力不足,水电-新能源消纳矛盾突出,互 补调度困难较大。为了缓解汛期水电-新能源消纳 矛盾,所做研究以雅砻江下游"两库五级"梯级电站 为例,以旬为计算周期,以小时为计算时段,计算汛 限水位动态控制方案和静态控制方案下可调节的风 电电量,发现汛限水位动态控制方案可多消纳风电 电量 9 528.9 MWh,相比静态汛限水位方案可多消 纳 2.55%的风电;源荷匹配度可提高 0.29%。结果 表明,通过汛限水位的动态控制可以动态增加水电可 利用的调节库容,从而提升水电调节新能源的能力。

参考文献

- [1] 郭生练,刘攀,王俊,等.再论水库汛期水位动态控制的 必要性和可行性[J].水利学报,2023,54(1):1-12.
- [2] 陈浩.某水库汛限水位动态控制研究[J].水利科技与 经济,2022,28(6):87-89.
- [3] 宋伟华,贺顺德,徐晓英,等.龙羊峡水库汛限水位动态 控制方案研究[J].人民黄河,2020,42(2):18-21.
- [4] 冯佳宁,李晓英,张琰,等.基于系统协调度模型的汛限水位分期控制研究[J/OL].长江科学院院报:1-10
 [2023-05-04].http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.
 1171.tv.20230210.1508.008.html.

- [5] 李英海,夏青青,王永强,等.考虑溪-向梯级调蓄影响 的三峡水库分期汛限水位研究[J].长江流域资源与环 境,2022,31(7):1514-1522.
- [6] 建剑波,曾智珍,卢金阁,等.基于蒙特卡洛法的水库汛 限水位动态控制风险分析[J].河南水利与南水北调, 2020,49(2):18-20.
- [7] 王祥伟.基于遗传算法的碧流河水库汛限水位优化研 究[J].水科学与工程技术,2019,216(4):48-51.
- [8] LIAO Shengli, LIU Huan, LIU Benxi, et al. An information gap decision theory-based decision-making model for complementary operation of hydro-wind-solar system considering wind and solar output uncertainties [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 348: 131382.

作者简介:

张阳博(2000),男,硕士研究生,研究方向为水文水资 源、水利电力经济管理。

(收稿日期:2023-05-25)

(上接第9页)

参考文献

- [1] 张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2818.
- [2] 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(26):137-151.
- [3] 林卫斌,宁佳钧,张凡.分"三步走"构建新型电力系统的战略构想[J].价格理论与实践, 2022(10):71-74.
- [4] 章建华,林山青,余兵,等.新型电力系统发展蓝皮 书[M].北京:中国电力出版社,2023.
- [5] 国家能源局.国家能源局组织发布《新型电力系统发展 蓝皮书》[EB/OL].[2023-06-02].http:// www.nea. gov.cn/2023-06/02/c_1310724249.htm.
- [6] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统
 关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,
 45(9):171-191.
- [7] 文云峰,杨伟峰,汪荣华,等.构建100%可再生能源
 电力系统述评与展望[J].中国电机工程学报,2020,40(6):1843-1855.
- [8] 康重庆,杜尔顺,郭鸿业,等.新型电力系统的六要素分析[J].电网技术,2023,47(5):1742-1750.
- [9] 国务院办公厅.国务院办公厅转发国家发展改革委国家能源局关于促进新时代新能源高质量发展实施方案的通知:国办函[2022]39号[EB/OL].(2022-05-

30) [2023 - 06 - 02]. https://www.gov.cn/zhengce/ content/2022-05/30/content_5693013.htm.

- [10] 钟海旺,张广伦,程通,等.美国得州 2021 年极寒天
 气停电事故分析及启示[J].电力系统自动化,2022,
 46(6):1-9.
- [11] 曾辉,孙峰,李铁,等.澳大利亚"9·28"大停电事故分析及对中国启示[J].电力系统自动化,2017,41(13):
 1-6.
- [12] 孙华东,许涛,郭强,等.英国"8·9"大停电事故分析 及对中国电网的启示[J].中国电机工程学报,2019, 39(21):6183-6191.
- [13] WANG Yongping, XU Weiting, LIU Chang, et al. Evaluation methods for the development of new power systems based on cloud model [C].2022 the 12th International Conference on Power and Energy Systems, 2022.
- [14] XU Ke, XU Weiting, LIU Chang, et al.Research on the development path of new power system based on SWOT-PEST analysis[C]//2022 Asian Conference on Frontiers of Power and Energy, 2022.

作者简介:

王永平(1963),男,硕士,教授级高级工程师,研究方向 为电力系统规划与建设;

刘 畅(1991),女,博士研究生,工程师,研究方向为电 力系统运行分析。

(收稿日期:2023-07-12)

基于最优决策树的多能系统快速鲁棒优化调度

彭浩晋¹,邱 高¹,税 月²

(1.四川大学电气工程学院,四川成都 610065;2.国网四川省电力公司技能培训中心,

四川 成都 611133)

摘 要:新能源渗透率的持续增长造成了多能系统快速协调调度的巨大挑战,包括调度结果过于保守以及日内调度 低效等问题。为此,提出了一种基于最优决策树分布式鲁棒优化的多能系统协调快速调度方法,所构建模型考虑电 网日内经济调度,引入基于范数约束的概率分布置信集精准描述新能源的不确定性,防止调度结果过于保守。同时, 根据新能源日内运行数据,分别通过可解释的最优分类树和最优回归树算法,优化日内机组启停状态和出力水平的 初始决策量,解决日内鲁棒调度的低效问题。在四川某地区电网的验证结果表明,该模型可在兼顾调度成本和鲁棒 性的同时,实现水风光多能系统的日内快速协调调度。

关键词:分布鲁棒优化;多能互补调度;数据驱动技术;最优决策树 中图分类号:TM 732 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)06-0021-07 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230604

Fast Robust Optimal Dispatch of Multi-energy System Based on Optimal Decision Tree

PENG Haojin¹, QIU Gao¹, SHUI Yue²

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Technical Training Center, Chengdu 611133, Sichuan, China)

Abstract: The increasing penetration of new energy has caused challenges to the fast coordinated dispatch of multi-energy systems, including overly conservative operation and low-efficient intraday dispatch. For this purpose, a fast and coordinated dispatch method for multi-energy systems based on optimal decision tree-based distributed robust optimization (ODT-DRO) is proposed. Considering the intraday economic dispatch of power grid, and in order to prevent the result from being too conservative, the proposed model introduces probability distribution confidence set based on norm constraint, which precisely discribes the uncertainties of new energy. At the same time, according to the intraday operation data of new energy, the interpretable optimal classification tree and optimal regression tree algorithms are used to optimize the initial intraday decisions of the status and output level of the units, thus solving the inefficiency problem in intraday rubust dispatch. Testing results of a power grid in Sichuan show that the proposed method can balance the operational costs and the robustness, and meanwhile achieve the fast coordinated intraday dispatch for multi-energy system.

Key words: distributionally robust optimization; multi-energy coordinated dispatch; data-driven technology; optimal decision tree

0 引 言

对于包括风能、太阳能、水力资源和其他可再生 能源的具有多维不确定性的互补发电系统的协调调 度^[1-3],通常采用随机优化^[4]和鲁棒优化^[5]方法进 行建模和处理。 随机优化可以用于具有多不确定性的可再生能 源发电调度过程的定量分析,但由于对混合可再生 电力系统中不确定性概率分布规律进行精确描述十 分困难^[6],随机优化需要预先设置概率分布类 型^[7],这在一定程度上降低了其可靠性。除此之 外,随机优化基于大量离散场景,将使计算规模过 大,从而导致更长的消耗时间和较低的计算效 率^[8]。尽管离散场景的场景约简技术^[9]和 Benders 分解加速方法^[10]可以减少计算规模,但这些方法不 能覆盖所有实际场景,并且所获得场景的代表性和典 型性值得怀疑,那么解的准确性也会降低。

相较而言,鲁棒优化不需要预先设置随机变量 的概率分布^[11-13],它通过不确定变量的边界参数来 描述随机变化特征^[14],只要变量值在边界内,就可 以从鲁棒优化模型中获得可行的解。与随机优化相 比,鲁棒优化可以为边界内任意取值的不确定变量 获得可行解^[15],并能严格保证决策的可靠性,同时 计算规模大大缩小,数据需求也减少。但由于鲁棒 优化是基于最坏的情况来搜索最优值^[16-17],因此鲁 棒优化存在优化结果过分保守的缺点,这将导致在 水风光多能互补调度中不能充分利用资源。

针对随机优化、鲁棒优化在处理水电、风能和太 阳能等可再生能源的不确定性特征过程中存在的问 题,相关研究人员尝试将随机优化和鲁棒优化结合 起来,使其优势互补并避免两种方法的缺点。此外, 随着测量技术的不断改进,电力系统产生了大量的 多类型生产数据。在此背景下,数据驱动的分布式 鲁棒优化(distributionally robust optimization, DRO) 应运而生,这为解决随机优化模型的低精度和鲁棒 优化模型的保守性提供了新的途径^[18]。目前,DRO 技术已初步应用于电力系统的机组组合[19]、多能互 补调度^[20]等,也有相关研究简化了 DRO 的复杂计 算过程^[14]。与随机优化和鲁棒优化相比, DRO 不 需要获得变量的精确概率分布,只需要构建一个覆 盖真实分布的不确定集,并在最坏分布下进行决策, 从而避免了变量的复杂概率分布难以获得的难题。 此外,通过采用线性决策规则、拉格朗日对偶处 理^[21]等技术,可以将 DRO 问题转化为确定性优化 问题,以避免随机优化方法的大采样规模和低计算 效率问题。DRO 的显著优点是它覆盖了不确定参 数的概率统计信息,并可以提高决策的保守性。 DRO 不仅结合了随机优化的概率统计特性,还借鉴 了鲁棒优化的思想,其决策结果具有抗风险性能,在 处理电力系统的不确定性特征方面具有独特的显著 优势[16]。

鉴于数据驱动 DRO 在不确定经济调度、低碳调 度和机组组合领域的独特优势,下面提出了一种基 于最优决策树的 DRO 的梯级水电与风/光新能源电 站联合系统协调优化调度方法(two-stage distributed robustness based on optimal decision tree,ODT-DRO)。 该方法首先建立了数据驱动的两阶段 DRO 调度模 型,第一阶段考虑系统的互补经济调度成本,第二阶 段考虑系统实时调整能力,并引入范数约束来限制 风电与太阳能的不确定输出的概率分布置信集,以 寻求最差分布情况的最优解。同时,通过嵌入基于 优化理论的可解释的最优决策树算法^[22-24]实现机 组状态和出力水平的日内快速决策,实现模型热启 动有效提升日内决策效率。

1 基于数据驱动的两阶段 DRO 水风 光互补协调调度模型

1.1 模型目标函数

基于数据驱动的两阶段分布鲁棒优化水风光互 补协调调度模型包含两个阶段,第一阶段为机组组 合模型,第二阶段为实时调整模型。模型目标函数 如式(1)所示。

 $\min \{ C^{uc} + \max \{ p_k \} \left[\sum_{k=1}^{h} p_k \cdot \min(C^{re}) \right] \} (1)$ 式中: p_k 为第 k 个离散场景的概率; K为离散场量总数; C^{uc} 与 C^{re} 分别为机组运行成本和实时调整成本。

可以看出,式(1)是一个 min-max-min 三层的两 阶段鲁棒优化问题,与仅针对最坏情况进行优化的 传统两阶段鲁棒优化相比,该模型的内部 max、min 函数通过优化决策变量来计算 *K* 个离散情况的最 坏概率分布,并获得最大期望成本值。*C*^{uc}与 *C*^m分 别由式(2)和式(3)计算得到。

$$C^{\rm uc} = \sum_{t=1}^{T} \left(C_t^{\rm buy} + C_t^{\rm H} + C_t^{\rm IIG} \right)$$
(2)

式中, C_t^{buy} 、 C_t^{H} 和 C_t^{IIC} 分别为t时段购电成本、梯级 水电系统和风/光发电站的运行成本。

$$C^{\rm re} = \sum_{t=1}^{T} \left(C_t^{\rm buy_re} + C_t^{\rm H_re} + C_t^{\rm IIG_re} \right)$$
(3)

式中, $C_{t}^{\text{buy-re}}$ 、 $C_{t}^{\text{H-re}}$ 和 $C_{t}^{\text{IIG-re}}$ 分别为t时段购电调整成本、梯级水电站和风/光电站运行调整成本。

1.2 考虑经济调度和综合范数的约束条件

模型的约束主要分为3种类型:常规运行约束、

实时经济调整约束和数据驱动的综合范数约束。基 于梯级水电系统和风/光系统的预测信息形成的运 行约束主要包括功率平衡约束、水量平衡约束、机组 运行约束、电网约束^[25]和备用约束等。由于实时阶 段的不确定性,需要调整梯级水电的输出,以平衡风 光出力的随机波动。因此引入实时调整约束,如 式(4)—式(12)所示,分别表示实时调整阶段的 源-荷平衡约束、水库蓄水量变化约束、梯级水电有 功输出约束、排放流量约束、水量平衡约束、级间液 压连接约束、水轮机爬坡率约束、风力/光伏电站的 有功约束以及网络约束。

$$\sum_{n=1}^{N^{\text{Hoy}}} (P_{n,t} + \Delta P_{n,t,k}) + \sum_{i=1}^{N^{\text{H}}} (P_{i,t}^{\text{H}} + \Delta P_{i,t,k}^{\text{H}}) + \sum_{j=1}^{N^{\text{HG}}} (P_{j,t}^{\text{HG}} + \Delta P_{j,t,k}^{\text{HG}}) = \sum_{m=1}^{N^{\text{L}}} P_{m,t}^{\text{L}}$$
(4)

$$V_{\cdot}^{\min} \leq (V_{\cdot,\cdot} + \Delta V_{\cdot,\cdot,\cdot}) \leq V_{\cdot}^{\max}$$

$$(5)$$

$$P^{\text{Hmin}} \leq (P^{\text{H}} + \Delta P^{\text{H}}) \leq P^{\text{H0}} \tag{6}$$

$$Q_i^{\text{Hmin}} \leq (Q_{i,t}^{\text{H}} + \Delta Q_{i,t,k}^{\text{H}}) \leq Q_i^{\text{Hmax}}$$
(7)

$$V_{i,t+1} + \Delta V_{i,t+1,k} = V_{i,t} + \Delta V_{i,t,k} + (I_{i,t} + \Delta I_{i,t,k} - Q_{i,t}^{H} - \Delta Q_{i,t,k}^{H}) \Delta t = V_{i,t} + \Delta V_{i,t,k} + (I_{i,t} + \Delta I_{i,t,k} - Q_{i,t}^{C} - \Delta Q_{i,t,k}^{C} - Q_{i,t,k}^{C}) \Delta t$$

$$Q_{i,t}^{C} - \Delta Q_{i,t,k}^{C}) \Delta t$$
(8)

$$I_{i+1,t+\tau} + \Delta I_{i+1,t+\tau,k} = Q_{i,t}^{H} + \Delta Q_{i,t,k}^{H} + L_{i,t} + \Delta L_{i,t,k}$$
(9)

$$\delta^{\mathrm{L}}\Delta t \leq (P_{i,t+1}^{\mathrm{H}} + \Delta P_{i,t+1,k}^{\mathrm{H}} - P_{i,t}^{\mathrm{H}} - \Delta P_{i,t,k}^{\mathrm{H}}) \leq \delta^{\mathrm{U}}\Delta t$$
(10)

0

$$\leq (P_{i,i}^{\mathrm{IIG}} + \Delta P_{i,i,h}^{\mathrm{IIG}}) \leq P_{i,i}^{\mathrm{IIG0}}$$
(11)

$$\begin{cases} P_{\text{tline}} = \boldsymbol{B}_{\text{diag}} \boldsymbol{L} \boldsymbol{B}^{-1} [(P_t + \Delta P_{t,k}) + (P_t^{\text{H}} + \Delta P_{t,k}^{\text{H}}) + P_{t,k}^{\text{IIG}}] \\ - \bar{P}_{\text{line}} \leqslant P_{t\text{line}} \leqslant \bar{P}_{\text{line}} \\ \boldsymbol{B}_{\text{diag}} = \text{diag} \left(\frac{1}{x_1}, \frac{1}{x_2}, \cdots, \frac{1}{x_N} \right) \end{cases}$$

(12)

式中: N^{huy} 、 N^{H} 、 N^{IC} 、 N^{L} 分别为购电时期总期数、梯 级水电机组总数、新能源机组总数和负荷总数; $P_{n,t}$ 、 $\Delta P_{n,t,k}$ 分别为n购电期t时段的购电功率和场景k中实时购电调整功率; $P_{i,t}^{\text{H}}$ 、 $\Delta P_{i,t,k}^{\text{H}}$ 分别为i水电机组 t时段有功出力和场景k中实时调整功率; $P_{j,t}^{\text{IC}}$ 、 $\Delta P_{j,t,k}^{\text{IG}}$ 分别为j新能源机组t时段有功功率和场景k中实时调整功率; $P_{m,t}^{\text{L}}$ 为系统m负荷t时段有功需 求; $V_{i,\iota}$, $\Delta V_{i,\iota,k}$ 分别为*i*水电机组*t*时段水库水量和 场景 k 中水库水量的实时调整量; V^{min}、V^{max} 分别为 i 水电机组水库水量的最小值和最大值: P_{i}^{Hmin} 、 P_{i}^{H0} 分 别为 i 水电机组 t 时段最小允许出力和当前最大出 力能力; $Q_{i,t}^{H}$ 、 $\Delta Q_{i,t,k}^{H}$ 分别为*i*水电机组*t*时段水库的 排水量和场景 k 中实施调整的排水量; Q_i^{Hmin} 、 Q_i^{Hmax} 分别为i水电机组水库最小和最大排水量。Iii $Q_{i,i}^{G}$ 、 $Q_{i,i}^{C}$ 分别为i水电机组水库的流入量、发电流量 和排放量; $\Delta I_{i,t,k}$ 、 $\Delta Q_{i,t,k}^{c}$ 、 $\Delta Q_{i,t,k}^{c}$ 分别为 *i* 水电机组 *t* 时段场景 k 流入量、发电流量和排放量的实时调整 量; $I_{i+1,t+\tau}$ 、 $\Delta I_{i+1,t+\tau,k}$ 分别为 i 水电机组下级水库 t+ τ 期间流入量和场景 k 流入调整量; $L_{i,i}$ 、 $\Delta L_{i,i,k}$ 分别为 i水电机组 t 时段流量延迟量和场景 k 延迟调整量; δ^{L} 、 δ^{U} 分别为梯级水电机组爬坡能力上、下限; $P_{i,t}^{IIGO}$ 为j新能源机组t时段的出力预测值;B、L分别为导 纳矩阵和节点连接矩阵; P_{line} 分别为支路 t 时 段的直流功率和最大支路功率;x_l为第 l 个支路的 支路阻抗。

由于传统的求解方法对于求解上述 DRO 优化 调度模型来说过于复杂,引入了一种基于 1-范数和 ∞-范数的数据驱动的 DRO 算法来求解模型。首 先,该算法以水力径流和风力/光伏强度等不确定参 数的历史数据为参考,通过提取有限典型日的水力 和风力/光伏历史数据,筛选 K 个离散场景的水力 和风/光发电量以及每个场景的初始概率;然后,以 每个初始概率分布为中心,引入综合范数约束来计 算该联合优化问题,从而获得每个离散场景的最坏 概率分布,并获得该场景下的最大期望目标值。因 此,在数据驱动的两阶段 DRO 协调调度模型中,除 了常规运行调度约束和实时调度约束外,还需要考 虑综合范数约束。

由 1-范数和∞-范数对水风光随机输出的离散 场景施加了约束, *Ω* 为综合范数的可行域, 可用 式(13)表示。

$$\Omega = \{p_k\} \begin{vmatrix} p_k \ge 0, \ k = 1, 2, \cdots, K \\ \sum_{k=1}^{K} p_k = 1 \\ \sum_{k=1}^{K} |p_k - p_k^0| \le \theta_1 \\ \max_{1 \le k \le K} |p_k - p_k^0| \le \theta_{\infty} \end{vmatrix}$$
(13)

式中: p_k 为优化过程中第 k 个离散场景的概率; p_k^0 为离散场景 k 的初始概率值; $\sum_{k=1}^{K} |p_k - p_k^0| \le \theta_1$ 和 max $|s_k \le K| |p_k - p_k^0| \le \theta_\infty$ 分别为 1-范数约束和∞ -范数约 束, θ_1 、 θ_∞ 分别为对应约束下离散情景概率的允许 偏差极限。其中置信系数{ p_k }根据文献[26-27]可 以描述为:

$$\begin{cases} \Pr\left\{\sum_{k=1}^{K} |p_{k} - p_{k}^{0}| \leq \theta_{1}\right\} \geq \alpha_{1} \\ \Pr\left\{\max_{1 \leq k \leq K} |p_{k} - p_{k}^{0}| \leq \theta_{\infty}\right\} \geq \alpha_{\infty} \end{cases} \\ \begin{cases} \alpha_{1} = 1 - 2Ke^{-\frac{2M\theta_{1}}{K}} \\ \alpha_{\infty} = 1 - 2Ke^{-2M\theta_{\infty}} \end{cases} \end{cases}$$
(15)

式中: α_1 和 α_{∞} 分别为 1-范数和 ∞ -范数约束下离散 场景集的概率分布置信系数;M为选定的有限典型 水风光发电场景日数。根据式(13)和式(14),约束 水风光不确定性输出的允许偏差限值 θ_1 和 θ_{∞} 是可 以获得的,如式(16)所示。

$$\begin{cases} \theta_1 = \frac{K}{2M} \ln \frac{2K}{1 - \alpha_1} \\ \theta_\infty = \frac{1}{2M} \ln \frac{2K}{1 - \alpha_\infty} \end{cases}$$
(16)

2 最优决策树模型

鲁棒优化受初值影响较大。若可将初值设置在 最优解附近,则鲁棒优化的搜索范围将极大减小,从 而可有效提升多能系统的调度效率。下面通过引入 可解释性较强的最优树方法,建立以风、光、荷等实 时量测值为输入、机组出力和机组组合为输出的决 策树映射,实现对鲁棒调度决策变量的实时"热启 动"优化初始化。

决策树模型基于树结构对特征进行拆分,能够 实现数据的分类与回归任务,具有可解释性强的优 点^[28-31]。这里使用混合整数规划(mixed integer programming, MIP)搭建最优决策树模型,相较于经 典的决策树算法(classification and regression tree, CART),最优决策树模型在树的顶部做出的决策也 会影响全局最优解,而不是简单地做出一系列局部 最优决策,避免了对决策树采取修剪和杂质措施。 并且模型为混合整数规划问题,可以通过 MIP 解算 器,如 Gurobi 和 CPLEX 进行求解。

搭建 MIP 的最优决策树可概述为建立分支结 点与叶结点的精细参数化决策规则以及约束条件, 并明确最终优化函数目标,最后通过 MIP 解算器求 解。搭建的最优决策树结构如图 1 所示。



图 1 最优决策树结构

图中,*a* 为分支选择状态变量,且 $a \in \{0,1\}$;*b* 为分支判别变量。分支结点的拆分遵守 $a^Tx < b$,即 在分支结点拆分时满足此约束的样本进入左分支, 不符合的进入右分支,其中x是样本的某一特征属 性进行归一化处理后的值,即 $x \in [0,1]$ 。而对于此 拆分引入以下变量:

$$d_s \leq d_{p(s)}, \quad \forall s \in T_{\rm B}$$
 (17)

$$\sum_{r=1}^{p} a_{rs} = d_s, \quad \forall s \in T_{\rm B}$$
(18)

$$0 \le b_s \le d_s, \quad \forall s \in T_{\rm B} \tag{19}$$

 $a_{rs} \in \{0,1\}, r = 1, ..., p, \forall t \in T_{B}$ (20) 式中: d_{s} 为结点s 的分支指示变量,其取值只有 0 和 1, 表示不可拆分或可拆分;p(s) 为结点s 父结点; T_{B} 为 决策树的分支结点集合;p 为样本包含的特征总数; r 为特征序号; a_{rs} 为二进制变量,用以确保每个结点 只允许对一个变量(即样本属性)进行拆分; b_{s} 为在 分支结点s 上进行拆分的判断阈值条件,作为连续 变量,因为样本特征属性是归一化的结果,所以 b_{s} 取值也在 0 和 1 之间。式(17)表示当分支结点 的父结点不可拆分,那么分支结点也必定不能拆分; 式(18)表示在分支结点上一次只能针对一个属性 进行拆分。

通过上述规则和引入的变量可以能够实现 MIP 的树结构建模,同时还需要建立叶结点的分配规则, 将叶结点与样本类别相匹配。通过引入二进制变量 *z_{ms}*=1来标志有样本 *m* 落入叶结点中,样本总数为 *n*,并引入二进制变量 *l_s*=1 表示叶结点满足最小落 入样本数,最小样本数为 *N_{min}*,并且需要强制每个样 本点只能分配给一个叶结点,因此有如下约束:

$$z_{ms} \leq l_s, \quad s \in T_{\rm L}$$
 (21)

$$\sum_{m=1}^{n} z_{ms} \ge N_{\min} l_s, \quad s \in T_{\mathrm{L}}$$
(22)

$$\sum_{s \in T_{\rm L}} z_{ms} = 1, \quad m = 1, \cdots, n$$
 (23)

式中:*z_{ms}*为叶结点样本指示变量,*z_{ms}*=1 表示样本 *x_m* 落在结点 *s*,以此来跟踪分配给每个叶结点的样本; *l_s*为叶结点最小样本数限制指示变量,与叶结点最小 样本数 *N_{min}构*建最小样本数限制:*T_i*为叶结点集合。

最后在将样本分配给叶结点时需要用强制约束 进行拆分:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{a}_{v}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}_{m}+\boldsymbol{\delta}) &\leq \boldsymbol{b}_{s}+\boldsymbol{M}_{1}(1-\boldsymbol{z}_{ms}),\\ \boldsymbol{m}=1,\cdots,\boldsymbol{n}, \quad \forall s \in \boldsymbol{T}_{\mathrm{B}}, \quad \forall v \in \boldsymbol{A}_{\mathrm{L}}(s) \quad (24)\\ \boldsymbol{a}_{v}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}_{m} &\geq \boldsymbol{b}_{s}-\boldsymbol{M}_{2}(1-\boldsymbol{z}_{ms}), \end{aligned}$$

m = 1, ..., n, $\forall s \in T_B$, $\forall v \in A_R(s)$ (25) 式中: $M_1 = M_2$ 都为任意大的常数; $A_L(s)$ 为叶结点 的拆分路径上的左分支结点集; $A_R(s)$ 为叶结点的拆 分路径上的右分支集;v为左分支结点或右分支结 点的索引; δ 为引入的小常数,满足 MIP 解算器 的不等式要求。

通过上述模型,需要最小化每个叶结点中误分 类样本的个数 L,,线性化表达为:

$$L_{s} \geq N_{s} - N_{us} - M(1 - c_{us}) ,$$

$$u = 1, \cdots, U, \quad \forall s \in T_{L}$$
(26)

 $L_s \leq N_s - N_{us} + Mc_{us},$

 $u = 1, \cdots, U, \quad \forall s \in T_{\mathrm{L}}$ (27)

$$L_s \ge 0, \quad \forall s \in T_L$$
 (28)

式中:L_s为误分类损失,其值为叶结点样本总数减 去比例最多标签样本数;N_s为叶结点上总的样本个 数;N_{us}为叶结点上第 u 类样本的个数;通过找到叶 结点中样本数最多的类,确定该类为叶结点所对应 的类别,最小化错误分类样本个数,引入 c_{us}=1 表示 叶结点 s 对应类别为 u;M 为任意大常数,结合 c_{us}的 取值使约束无效。

根据基线精度标准化错误分类,得到模型的优 化目标为

$$\min \frac{1}{\hat{L}} \sum_{s \in T_{\rm L}} L_s + \alpha \sum_{s \in T_{\rm B}} d_s \tag{29}$$

式中,α为复杂性参数,控制树的精度与复杂性。

构建的最优决策树模型为混合整数规划问题, 能够有效嵌入数据驱动的水风光两阶段分布鲁棒模 型中。根据新能源实测数据进行运行方式快速决 策,提供给模型进一步优化,解释性强,可通过 Gurobi 和 CPLEX 等求解器进行求解。

3 ODT-DRO 联合优化调度方法

使用 ODT-DRO 实现水风光多能系统协调调 度。首先,需要通过大量历史新能源出力水平、负荷 水平、发电机出力水平、机组启停状态等数据作为最 优决策树训练数据输入特征,分别得到最优分类决 策树与最优回归决策树;最优分类决策树与最优回 归决策树根据新能源机组出力能力实测数据分别输 出同步发电机组启停状态与出力水平,将同步发电 机启停状态与出力水平传递给两阶段 DRO 水风光 协调调度模型,进一步优化得到日内发电策略,具体 流程如图 2 所示。



图 2 联合优化方法流程

由于最优决策树模型通过离线训练得到,对新 能源实测数据能够快速给出发电机出力和状态的决 策结果,实现对两阶段 DRO 水风光协调调度的加 速,避免由于新能源预测误差对调度结果的不利影 响,实现多能互补系统的日内发电策略快速决策。

4 算例分析

将所提 ODT-DRO 模型在四川 ZD 地区电网的 试验应用,验证所提方法多能互补协调调度可行性。 ZD 地区等值系统如图 3 所示,根据拓扑结构与基础 数据将该系统简化为 29 个母线节点的系统,包含 BT、SWL、KJW、YFG 与 KL 等发电厂。参考攀西新 能源大发运行方式作为基准运行方式,该运行方式





图 3 ZD 地区等值系统

4.1 最优决策树算法分类与回归效果分析

引入最优分类决策树,根据新能源实测数据、负 荷水平以及水电机组实际运行条件对同步机组启停 状态进行决策。最优决策树树结构最大深度为5, 最优分类决策树进行分支的最小样本数为10,最优 回归决策树采用均方差来进行评估。最优决策树算 法在分类准确率达到99.52%且训练样本数据量充 足的情况下,能精确地决策机组启停状态。相比于 经典的 CART 算法,其准确率提升了5.18%,如表1 所示。

衣 I UARI 伏束树 与 取 化 伏束树 万 尖 准 佣 华	表 1	CART 决策树与最优决策树分类准确率
----------------------------------	-----	---------------------

算法	CART 决策树	最优决策树
准确率/%	94.34	99.52

通过最优回归决策树拟合不同运行环境下同步 机组有功出力,并与 CART 决策树拟合结果进行对 比,如图 4 所示。由图 4 可以看到:CART 算法拟合 后得到的发电机出力曲线与实际曲线存在较大误 差;使用最优决策树进行拟合后得到的发电机出力曲 线与实际曲线贴合度较高,误差较小,拟合效果更好。



4.2 模型求解时间

通过最优分类决策树与最优回归决策树得到 同步发电机组启停状态和出力结果。将该结果传递 给两阶段 DRO 水风光协调调度模型作为初始解,实 现热启动,加速模型优化求解速度。相较于没有嵌入最优决策树的模型,所建模型求解时间节省了231.7523 s,如表2所示。

表 2 模型求解时间对比

模型	求解时间/s
DRO 调度模型	755.093 8
ODT-DRO 模型	523.341 5

4.3 新能源机组调度出力偏差分析

在不考虑新能源消纳受阻情况下,以 ZD 地区风 机出力能力为例,对比日前调度与所提 ODT-DRO 模型对新能源机组优化出力与实测数据的偏差,如 图 5 所示。从图 5 可以看到:日前调度通常根据未 来一天新能源预测曲线对未来一天的发电计划进行 优化计算,因此新能源预测误差较大,与实际测得的 新能源出力水平曲线有较大偏差;所提 ODT-DRO 调 度方法根据当前时刻新能源机组出力水平的实测数 据进行决策,时间尺度短,预测误差与调度误差较小。



4.4 ODT-DRO 优化调度结果分析

表 3

ODT-DRO 水风光协调调度结果如图 6 所示。 可以看到所提模型能够在四川电网 ZD 地区完成水 风光多能协调互补调度,并且在新能源机组出力水 平较高的时间段(10:00—16:00),降低同步发电机 组出力甚至关停部分机组,为新能源机组让出更多 空间,防止出现新能源消纳受阻的情况,验证了 所提模型在多能互补系统中调度的合理性和可行 性。表3是部分调度结果展示。

节点	9:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
9	834	834	834	834	834	795	834
10	1500	1500	1114	819	1035	1500	1500
11	765	765	765	765	765	765	765
17	100	40	0	0	0	0	80
19	40	15	0	0	0	0	30



图 6 模型优化调度结果

4.5 模型成本分析

表4比较了所提 ODT-DRO 算法、随机优化算法以及传统鲁棒优化算法的调度成本。ODT-DRO 单位调度成本为 148.721 6 元/MWh,远低于传统鲁 棒优化算法单位平均调度成本,也略低于随机优化算 法的单位平均调度成本。因此,所提出的 ODT-DRO 协调调度方法更具经济性。

模型	单位平均调度成本 /(元・MWh ⁻¹)
ODT-DRO	148.721 6
随机优化	152.476 5
传统鲁棒优化	185.536 2

表 4 模型调度成本对比

5 结 论

为了在包含多清洁能源的系统中实现水风光多能互补调度,并且在防止调度结果过度保守的同时 实现以新能源优先消纳为目标的日内发电策略快速 决策,提出了基于最优决策树的两阶段 DRO 水风光 协调调度模型。该模型考虑实时调整能力以及范数 约束,避免了调度结果的过分保守。同时,嵌入的最 优决策树模型根据新能源实测数据、负荷数据以及实 际运行情况,为两阶段 DRO 提供了同步发电机启停 状态与出力决策,加速两阶段 DRO 求解,实现日内发 电策略快速决策。通过在四川某地区电网的试验验 证了所提模型的有效性,该模型在求解速度、决策精 度、调度成本、安全稳定性以及鲁棒性上都有较好的 表现,能够快速给出可靠的日内调度辅助决策信息。

参考文献

- [1] 王开艳,罗先觉,贾嵘,等.充分发挥多能互补作用的风 蓄水火协调短期优化调度方法[J].电网技术,2020, 44(10):3631-3641.
- [2] 周晓倩, 艾芊, 林琳, 等. 多能互补微电网集群分布式 优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3678-3686.
- [3] 施烨,金浩,郝飞,等.一种多能互补系统优化调度通用化建模方法[J].电网技术,2022,46(12):4924-4943.
- [4] 印月,刘天琪,何川,等.风-光-水-火多能互补系统 随机优化调度[J].电测与仪表,2020,57(16):51-58.
- [5] 张增强,高明,吕盼,等.基于鲁棒优化理论的输电网 随机优化方法研究[J].电工技术,2019(14):106-110.
- [6] NING C, YOU F Q. Data-driven stochastic robust optimization: General computational framework and algorithm leveraging machine learning for optimization under uncertainty in the big data era[J]. Computers & Chemical Engineering, 2018, 111: 115-133.
- [7] 张沈习,袁加妍,程浩忠,等.主动配电网中考虑需 求侧管理和网络重构的分布式电源规划方法[J].中 国电机工程学报,2016,36(S1):1-9.
- [8] 欧阳金鑫,于莉,蒋航,等.基于多层随机优化的电 网安全稳定控制装置机会检修决策方法[J].电力自动 化设备,2023,43(6):144-151.
- [9] GROWE-KUSKA N, HEITSCH H, ROMISCH W. Scenario reduction and scenario tree construction for power management problems [C]//2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, IEEE, 2003:1-7.
- [10] 晏鸣宇,张伊宁,艾小猛,等.采用 Benders 分解含 机组禁止运行区间的安全约束最优潮流[J].电力系 统自动化,2018,42(6):60-65.
- [11] ZHONG Z M, FAN N, WU L. Robust optimization for the day-Ahead scheduling of cascaded hydroelectric systems[C]//2022 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), IEEE, 2022: 1-8.
- [12] CHEN Y B, ZHANG Z, CHEN H, et al. Robust UC model based on multi-band uncertainty set considering the temporal correlation of wind/load prediction errors [J].
 IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(2); 180-190.

基于 COOT-SVM 的短期光伏发电功率预测

陈晓华^{1,2},王志平¹,吴杰康²,许海文²,陈盛语²,张勋祥²,龙泳丞²,谢明钊²

(1. 东莞理工学院电子工程与智能化学院,广东东莞 523808;

2. 广东工业大学自动化学院,广东 广州 510006)

摘 要:为了提高短期光伏发电功率预测的精度,提出了一种基于白冠鸡优化算法(COOT)优化支持向量机(SVM)的 短期光伏发电功率预测模型。首先,分别选取某光伏电站在 2017 年 4 月和 7 月的前 21 天数据进行仿真分析,计算光 伏输出功率和每一个气象因素之间的皮尔逊相关系数;然后,依据皮尔逊相关系数选择太阳总辐射强度、太阳散射辐 射强度、太阳直射辐射强度、组件温度和环境温度 5 个气象因素作为预测模型的输入数据,光伏电站的发电功率作为 输出数据。通过与 BP 和 SVM 预测模型进行仿真对比可知,对于 4 月和 7 月的数据来说,COOT-SVM 预测模型的均方 根误差、均方误差和平均绝对误差均比 BP 和 SVM 预测模型小。因此,所提 COOT-SVM 预测模型可有效提高短期光 伏发电功率的预测精度,具有较高的工程应用价值。

关键词:光伏发电;功率预测;白冠鸡优化算法;支持向量机;皮尔逊相关系数 中图分类号:TM 615 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)06-0028-06 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230605

Short-term Photovoltaic Power Forecasting Based on COOT-SVM

CHEN Xiaohua^{1,2}, WANG Zhiping¹, WU Jiekang², XU Haiwen², CHEN Shengyu², ZHANG Xunxiang², LONG Yongcheng², XIE Mingzhao²

(1. School of Electrical Engineering & Intelligentization, Dongguan University of Technology,

Dongguan 523808, Guangdong, China; 2. School of Automation, Guangdong University of

Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of short-term photovoltaic power forecasting, a short-term photovoltaic power forecasting model based on support vector machine (SVM) optimized by coot optimization algorithm (COOT) is proposed. Firstly, the data of a photovoltaic power station in the first 21 days of April and July in 2017 are selected for simulation analysis, and the Pearson correlation coefficient between photovoltaic output power and each meteorological factor is calculated. And then the total solar radiation intensity, solar scattered radiation intensity, solar direct radiation intensity, component temperature and ambient temperature are selected as the input data of the prediction model, and the generated output of photovoltaic power station is used as the output data. Through simulation comparison with BP and SVM prediction models, it is obtained that for the data in April and July, the root mean square error, mean square error and mean absolute error of COOT-SVM prediction model are smaller than those of BP and SVM prediction models. Therefore, the proposed COOT-SVM prediction model can effectively improve the prediction accuracy of short-term photovoltaic power generation, which has high engineering application value.

Key words: photovoltaic power generation; power forecasting; coot optimization algorithm; support vector machine; Pearson correlation coefficient

基金项目:国家自然科学基金项目(50767001);国家863高技术基金项目(2007AA04Z197);广东省基础与应用基础研究基金项目 (2019B1515120076));富华电子智能制造和电力电子技术服务项目(20221800500253);广东省基础与应用基础研究基金区域联合 基金项目"粤港澳研究团队项目"(2020B1515130001)

0 引 言

2020年9月,中国在联合国大会上提出了"双 碳"的目标:在2030年之前实现"碳达峰"以及在 2060年之前实现"碳中和"的目标^[1]。在"双碳"目 标的引领下,具有获取方便、取之不尽、用之不竭和 低污染等优点的光伏发电将逐步取代传统的化石能 源发电。随着光伏发电技术的不断成熟,使用太阳 能发电逐渐成为人类能源需求的首选绿色清洁新能 源。然而,光伏发电具有随机性、波动性和间歇性等 缺点,因此,提高光伏功率预测的准确率有助于电网 的安全稳定运行、提高光伏发电并网能力、有效减少 弃光和提高电网运行的经济性^[1-6]。

现有的大部分文献对光伏功率预测的方法主要 有直接预测和间接预测两种^[7]。直接预测的方法 只需光伏功率的历史数据和气象信息就能够对光伏 功率进行预测,此方法主要包括前馈神经网络算法 (back propagation, BP)^[8-14]、支持向量机(support vector machine, SVM)^[5,15-18]和组合预测法^[19]等。 间接预测的方法是基于物理法预测太阳辐射等气象 因素.根据光电转换效率得到光伏发电的输出功 率^[20]。但神经网络算法容易陷入局部最优解并且 算法耗时较长,使得光伏发电功率预测很难快速得 到最优解:支持向量回归预测模型能够很好地解决 预测值偏差过大和局部最优等问题,但核函数的参 数和惩罚因子数值的选择对预测结果影响较大:组 合预测法可以获得较高精度的光伏功率预测,但计 算模型复杂并且消耗时间较长:使用间接预测法对 太阳辐射等预测值的准确度要求较高。

针对以往研究的不足,下面建立了基于白冠鸡 优化算法(coot optimization algorithm, COOT)优化 SVM 的预测模型来提高光伏发电功率短期预测的 精度。选取某光伏电站在 2017 年春季中的 4 月前 21 天和夏季中的 7 月前 21 天的数据进行仿真;利 用皮尔逊相关系数公式可以计算得到对光伏发电影 响较大的因素为太阳总辐射强度、太阳散射辐射强 度、太阳直射辐射强度、组件温度和环境温度 5 个气 象因素,将它们作为输入数据,光伏发电功率作为输 出数据,并对输入和输出的数据进行归一化处理;最 后,利用 COOT-SVM 预测模型实现光伏发电功率的 短期预测,对比 COOT-SVM 预测模型与 BP 和 SVM 预测模型,可知 COOT-SVM 预测模型具有较高的预 测精度。

1 影响光伏发电预测结果的因素

光伏发电的日变化周期比较强,其输出功率会 受各种气象因素的影响。太阳总辐射强度、太阳散 射辐射强度、太阳直射辐射强度、组件温度、环境温 度、相对湿度和气压等参数对光伏发电均有不同程 度的影响。准确详细的输入数据是提高预测精度的 关键,但输入数据过多会使预测过程更加复杂。因 此以训练样本数据来计算光伏输出功率与各个气象 因素之间的皮尔逊相关系数,计算表达式^[2]为

$$r = \left(\sum X_{pv} Y_{met} - \frac{\sum X_{pv} \sum Y_{met}}{N_{met}}\right) \cdot \left\{ \left[\sum X_{pv}^2 - \frac{\left(\sum X_{pv}\right)^2}{N_{pv}}\right] \cdot \left[\sum Y_{met}^2 - \frac{\left(\sum Y_{met}\right)^2}{N_{met}}\right] \right\}^{-\frac{1}{2}}$$
(1)

式中:X_{pv}为光伏输出功率;Y_{met}为气象因子;N_{pv}为光 伏输出功率数据样本的数量;N_{met}为气象因子数据 样本的数量。

一般而言,两个变量的相关程度由以下范围判断:当0≤|r|<0.2,为极弱相关或不相关;当0.2≤
|r|<0.4,为弱相关;当0.4≤|r|<0.6,为中等程度相关;当0.6≤|r|<0.8,为强相关;当0.8≤|r|≤1.0,为极强相关。

选取某光伏电站在 2017 年春季中的 4 月前 21 天和夏季中的 7 月前 21 天的相关气象因素历史数 据和光伏发电系统输出功率历史数据作为研究对 象,计算其光伏输出功率与每一个气象因素的相关 系数,见表 1。由表 1 可知:

1)该地区 4 月训练样本时间段内太阳总辐射 强度、太阳散射辐射强度和太阳直射辐射强度 3 个 气象因素与光伏输出功率极强相关;组件温度和环 境温度两个气象因素与光伏输出功率强相关;相对 湿度与光伏输出功率中等相关(负相关);气压与光 伏输出功率极弱相关。

2)该地区 7 月训练样本时间段内太阳总辐射 强度和太阳散射辐射强度两个气象因素与光伏输出 功率极强相关;太阳直射辐射强度、组件温度和环境 温度 3 个气象因素与光伏输出功率强相关;相对湿 度与光伏输出功率中等相关(负相关);气压与光伏 输出功率极弱相关。

表1 光伏输出功率与各个气象因素的相关系数

左角田妻	相关系数 r			
气承凶杀	4月前21天	7月前21天		
太阳总辐射强度	0.916 3	0.864 2		
太阳散射辐射强度	0.927 2	0.850 6		
太阳直射辐射强度	0.899 7	0.793 4		
组件温度	0.775 2	0.655 7		
环境温度	0.606 4	0.606 2		
相对湿度	-0.568 4	-0.598 9		
气压	0.052 3	0.180 0		

因此,对于该地区春季4月和夏季7月的短期 光伏功率预测,均选择太阳总辐射强度、太阳散射辐 射强度、太阳直射辐射强度、组件温度与环境温度 5个气象因素作为预测模型的输入数据,光伏发电 功率作为输出数据。

2 白冠鸡优化算法的原理

在 2021 年由 Naruei I 等人提出的 COOT 优化 算法^[21]主要模拟白冠鸡在自然界中获取食物的行 为,从而实现算法寻优的目的。该算法假设白冠鸡 种群中有 N 个个体,从中选取 10%的个体作为白冠 鸡的领导者,剩余的白冠鸡为跟随者。

对白冠鸡种群领导者的位置进行初始化的计算 表达式为

 $x_{\text{LD},s,j} = x_{\text{L},j} + \eta_{s,j} \cdot (x_{\text{U},j} - x_{\text{L},j})$ (2) 式中: $x_{\text{LD},s,j}$ 为第 *s* 只白冠鸡领导者在第 *j* 维上的位置, *s* = 1, 2, …, N_{LD} , N_{LD} 为白冠鸡领导者的数量, 并且 $N_{\text{LD}} = 0.1N$; $\eta_{s,j}$ 为在[0,1]区间上第 *s* 行第 *j* 列的一个随机数; *j* = 1, 2, …, *d*, *d* 为待优化问题的维数; $x_{\text{U},j}$ 、 $x_{\text{L},j}$ 分别为搜索空间中第 *j* 维变量的上限和下限。

对白冠鸡跟随者种群个体进行初始化的计算表 达式为

 $x_{i,j} = x_{L,j} + \eta_{i,j} \cdot (x_{U,j} - x_{L,j})$ (3) 式中: $x_{i,j}$ 为第 *i* 只白冠鸡跟随者在第 *j* 维上的位置, *i* = 1,2,…, N_{coot} , N_{coot} 为白冠鸡跟随者种群大小,并 且 $N_{coot} = N - N_{LD}$; $\eta_{i,j}$ 为在[0,1]区间上第 *i* 行第 *j* 列的一个随机数。

该算法中,白冠鸡的行为主要包含以下4种:

1)个体随机移动

令白冠鸡跟随者种群朝搜索空间中的一个随机 位置移动,随机位置的计算表达式为 $r_{1,j}^* = x_{\mathrm{L},j} + \eta_{1,j} \cdot (x_{\mathrm{U},j} - x_{\mathrm{L},j})$ (4)

式中, $\eta_{1,j}$ 为在[0,1]区间上第1行第j列的一个随机数。

随机运动有利于算法跳出局部最优解,使用这 种方法更新白冠鸡跟随者位置的计算表达式为

$$x'_{i,j} = x_{i,j} + A \cdot R_2 \cdot (r_{1,j}^* - x_{i,j})$$

$$A = 1 - \frac{T_{\text{cur}}}{T_{\text{max}}}$$
(5)

式中: R_2 为在[0,1]区间上的随机数; T_{cur} 和 T_{max} 分别为当前迭代次数和最大迭代次数。

2)链式运动

两只白冠鸡跟随者的平均位置可以实现链式运动,计算表达式为

$$\bar{x}_{i,j} = 0.5(x_{i-1,j} + x_{i,j})$$
 (6)

式中, $x_{i-1,j}$ 为第i-1只白冠鸡跟随者在第j维上的位置。

3) 根据种群的领导者调整位置

通常情况下,白冠鸡跟随者种群必须根据白冠 鸡领导者的位置调整自己的位置并且朝着它们的方 向移动,这里利用 k 来控制白冠鸡领导者的位置引 导作用。

$$k = 1 + \operatorname{mod}(i, N_{\rm LD}) \tag{7}$$

式中:i 为第i 只白冠鸡跟随者的序号;mod(i, N_{LD})的含义为i 对 N_{LD} 取模;k 为白冠鸡领导者的序号。

因此白冠鸡跟随者的位置更新为

$$x'_{i,j} = x_{\text{LD},k,j} + 2R_1 \cdot \cos 2R\pi \cdot (x_{\text{LD},k,j} - x_{i,j})$$
(8)

式中: R_1 为在[0,1]区间上的随机数;R为在[-1,1] 区间上的一个随机数; x_{LD,k_j} 为第k只白冠鸡领导者 在第j维上的位置。

4) 白冠鸡领导者带领白冠鸡跟随者走向最佳 区域

白冠鸡种群的领导者不断更新它们朝着最佳 区域目标方向的位置,从而带领白冠鸡跟随者种 群走向最佳区域,白冠鸡领导者的位置更新计算 表达式为

$$x'_{\text{LD},k,j} = \begin{cases} B \cdot R_3 \cdot \cos 2R\pi \cdot (g_{\text{best}} - x_{\text{LD},k,j}) + g_{\text{best}} & R_4 < 0.5 \\ B \cdot R_3 \cdot \cos 2R\pi \cdot (g_{\text{best}} - x_{\text{LD},k,j}) - g_{\text{best}} & R_4 \ge 0.5 \end{cases}$$
(9)
$$B = 2 - \frac{T_{\text{cur}}}{T}$$

式中: g_{best} 为种群内个体的最优位置; R_3 和 R_4 为在 [0,1]区间上的随机数。

3 白冠鸡优化算法优化 SVM 参数的 预测模型

3.1 支持向量机(SVM)

由于篇幅有限,不再对 SVM 的预测理论进行推导,具体步骤可以参考文献[17]。因为 SVM 的预测结果在很大程度上受惩罚因子和核函数中参数的影响^[17],所以采用白冠鸡优化算法对这两个参数进行寻优,从而提高短期光伏发电功率预测的精度。

3.2 白冠鸡优化算法优化 SVM 参数

利用 COOT 算法对 SVM 的参数进行优化的步骤如下:

1)利用式(2)和式(3)分别初始化白冠鸡领导 者和跟随者数量。设置白冠鸡种群的个体数 N =50,其中白冠鸡领导者的数量 $N_{LD} = 5$,白冠鸡跟随 者的数量 $N_{coot} = 45$,最大迭代次数 $T_{max} = 30$,待优化 问题的维数 d = 2,搜索空间的上限 $x_{U,1} = x_{U,2} = 100$, 下限 $x_{L,1} = x_{L,2} = 0.01$ 。

2) 计算白冠鸡领导者和白冠鸡跟随者的适应 度函数, 找出白冠鸡种群内个体的最优位置 g_{best}, 记 下此时的适应度函数值为 f_{coet}(g_{best})。

3) 计算 *A* 和 *B* 的值。随机生成一个在[0,1] 区 间上的随机数 *r*₁, 若 *r*₁<0.5, 则 *R*₁, 和 *R*₃ 均为 1 行 *d* 列的随机向量; 否则, *R*₁ 和 *R*₃ 均为随机数。

4) 计算白冠鸡领导者的序号 k。

5)随机生成一个在[0,1]区间上的随机数 r₂, 若 r₂>0.5,则利用式(8)计算白冠鸡跟随者个体的 位置;否则,跳到步骤 6。

6) 若 r₂<0.5&&i ≠1,则利用式(6) 计算白冠鸡 跟随者个体的位置; 否则,利用式(4) 和式(5) 计算 白冠鸡跟随者个体的位置。

7) 以均方误差作为适应度函数 $f_{coot}(\cdot)$,如 式(10) 所示,分别计算白冠鸡跟随者个体 $x_{i,j}$ 的适 应度函数 $f_{coot}(x_{i,j})$ 的值和白冠鸡领导者个体 $x_{LD,k,j}$ 的适应度函数 $f_{coot}(x_{LD,k,j})$ 的值。若 $f_{coot}(x_{i,j}) < f_{coot}(x_{LD,k,j})$,则令白冠鸡跟随者个体的位置与白冠 鸡领导者个体的位置进行互换,同时令白冠鸡跟随 者个体的适应度函数值与白冠鸡领导者个体的适应 度函数值进行互换;否则不变。

$$F_{\text{coot}}(\cdot) = \frac{1}{N_{\text{t}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{t}}} (y_{\text{pv},\text{t},i} - y_{\text{pv},\text{a},i})^2 \qquad (10)$$

式中: N_t 为训练集样本数; $y_{pv,t,i}$ 为光伏功率的预测值; $y_{pv,a,i}$ 为光伏功率的实际值。

8)随机生成一个在[0,1]区间上的随机数 R₄,利用式(9)计算白冠鸡领导者的位置。

9) 计算白冠鸡领导者的适应度函数 $f_{coot}(x_{LD,s,j})$ 的值, 若 $f_{coot}(x_{LD,s,j}) < f_{coot}(g_{best})$,则将领导者的位置 与白冠鸡种群内个体的最优位置互换;否则不变。

10)判断白冠鸡优化算法是否已达到最大迭代 次数。如果已达到,那么输出支持向量机的最优参 数;否则迭代次数加1,并跳至步骤3继续寻优。

COOT 算法优化 SVM 参数的流程如图 1 所示。



图 1 COOT 算法优化 SVM 参数流程

4 算例分析

以所建立的 COOT-SVM 短期光伏发电功率预 测模型,选取某光伏电站在 2017 年春季中的 4 月前 21 天和夏季中的 7 月前 21 天的相关气象因素历史 数据和光伏发电系统输出功率历史数据作为研究对 象。4 月 1 日至 21 日和 7 月 1 日至 21 日的光伏发 电功率历史数据分别如图 2 和图 3 所示,所选取的 数据按照每隔 15 min 采样一次的频率进行采集,采 集时间范围为一整天,并分别选取4月22日和7月 22日作为待预测日期,预测间隔为15min,输出96 个光伏发电功率预测数据。



图 3 7月前 21 天的光伏发电功率

为了避免数据之间因为不同量纲的差异而对预测结果造成影响,对所有输入和输出的数据都进行 归一化处理,使数据都规整在[0,1]范围内,归一化 的计算表达式^[22-24]为

$$T_{\rm norm} = \frac{T - T_{\rm min}}{T_{\rm max} - T_{\rm min}} \tag{11}$$

式中:T为原始数据; T_{min} 为原始数据最小值; T_{max} 为 原始数据最大值。

4.1 短期光伏功率预测结果及其分析

通过白冠鸡优化算法优化 SVM 的惩罚因子和 核函数参数可以获得 COOT-SVM 预测模型对光伏 功率进行 24 h 的短期预测。为了进一步验证 COOT-SVM 预测模型的预测效果,通过与 BP 和 SVM 的预测结果进行比较,再通过仿真分析,可得 某光伏电站在 2017 年春季中的 4 月 22 日和夏季中 的 7 月 22 日的短期光伏发电功率的预测值和实际 值,分别如图 4 和图 5 所示。



图 4 4 月短期光伏发电功率预测结果



图 5 7 月短期光伏发电功率预测结果

从图 4、图 5 中可以看出,COOT-SVM 预测模型的预测值比 BP 和 SVM 预测模型更接近实际光伏 功率的数值。

4.2 预测结果评价指标

考虑多种误差对预测结果的影响,提高了预测 结果的鲁棒性。这里采用3种误差指标对光伏功率 预测结果进行评价,分别为均方根误差、均方误差以 及平均绝对误差。

1) 均方根误差^[25]

$$T_{\text{RMSE}} = \left\{ \sum_{t=1}^{m} \left[T_{\text{real}}(t) - T_{\text{pred}}(t) \right]^2 / m \right\}^{\frac{1}{2}} (12)$$

式中: $T_{real}(t)$ 为t时刻实际的光伏发电功率; $T_{pred}(t)$ 为t时刻预测的光伏发电功率;m为预测样本数据的数量。

2) 均方误差^[1]

$$T_{\rm MSE} = \frac{\sum_{t=1}^{m} [T_{\rm pred}(t) - T_{\rm real}(t)]^2}{m}$$
(13)
3) 平均绝对误差^[26]

$$T_{\text{MAE}} = \frac{\sum_{t=1}^{m} |T_{\text{real}}(t) - T_{\text{pred}}(t)|}{m}$$
(14)

使用 BP、SVM 和 COOT-SVM 模型对 4 月短期 光伏发电功率进行的预测误差如表 2 所示。

3年2月十十十十	均方根误差	均方误差	平均绝对误差
顶侧力法	$T_{\rm RMSE}/{ m MW}$	$T_{\rm MSE}/{ m MW}$	$T_{\rm MAE}/{ m MW}$
BP	6.730 3	45.297 6	6.139 5
SVM	5.562 3	30.938 9	4.512 6
COOT-SVM	3.404 2	11.588 8	2.508 7

表 2 不同方法预测误差分析(4月)

从表 2 中可以计算出, COOT-SVM 预测模型的 *T*_{RMSE}比 BP 和 SVM 预测模型分别降低了 49.42% 和 38.80%; COOT-SVM 预测模型的误差 *T*_{MSE}比 BP 和 SVM 预测模型分别降低了 74.42% 和 62.54%; COOT-SVM 预测模型的 *T*_{MAE}比 BP 和 SVM 预测模 型分别降低了 59.14% 和 44.41%。

使用 BP、SVM 和 COOT-SVM 模型对 7 月短期 光伏发电功率进行预测的误差如表 3 所示。

至测一子计	均方根误差	均方误差	平均绝对误差
顶侧刀法	$T_{\rm RMSE}/{ m MW}$	$T_{\rm MSE}/{ m MW}$	$T_{\rm MAE}/{ m MW}$
BP	4.472 0	19.998 8	2.886 7
SVM	5.036 7	25.368 2	4.537 9
COOT-SVM	3.826 3	14.640 4	2.648 9

表 3 不同方法预测误差分析(7月)

从表 3 中可以计算出, COOT-SVM 预测模型的 T_{RMSE} 比 BP 和 SVM 预测模型分别降低了 14.44%和 24.03%; COOT-SVM 预测模型的 T_{MSE} 比 BP 和 SVM 预测模型分别降低了 26.79%和 42.29%; COOT-SVM 预测模型的 T_{MAE} 比 BP 和 SVM 预测模型分别降低 了 8.24%和 41.63%。

对比结果表明,COOT-SVM 预测模型比 BP 和 SVM 预测模型具有更好的预测精度和稳定性。

5 结 论

上面构建了一种 COOT-SVM 预测模型对短期 光伏发电功率进行预测。通过皮尔逊相关系数公式 可以计算得到对光伏发电影响较大的因素为太阳总 辐射强度、太阳散射辐射强度、太阳直射辐射强度、 组件温度和环境温度 5 个气象因素,将它们作为输 入数据,光伏电站的发电功率作为输出数据,并对输 入和输出的数据进行归一化处理;利用 COOT-SVM 预测模型实现光伏发电功率的短期预测。通过将由 COOT-SVM 预测模型与 BP、SVM 预测模型得到的 预测功率的曲线和实际输出功率进行对比,并计算 出 BP、SVM 和 COOT-SVM 预测模型的均方根误差、 均方误差和平均绝对误差,可知 COOT-SVM 预测模 型具有优越的预测性能和较高的稳定性,能够为短 期光伏发电功率预测提供理论参考。

参考文献

- [1] 杨锡运,赵泽宇,杨岩,等.基于时空信息组合的分布式 光伏功率预测方法研究[J].热力发电,2022,51(8): 64-72.
- [2] 宋子博,葛曼玲,谢冲,等.基于改进 CSO 算法的光伏 系统发电功率短期预测[J].电源技术,2022,46(2): 182-185.
- [3] 王小杨,罗多,孙韵琳,等.基于 ABC-SVM 和 PSO-RF 的光伏微电网日发电功率组合预测方法研究[J].太阳 能学报,2020,41(3):177-183.
- [4] 张涛,朱瑞金,扎西顿珠.基于改进骨干差分进化算法 优化 LSSVM 的短期光伏发电功率预测[J].热力发电, 2021,50(5):102-107.
- [5] 张雨金,杨凌帆,葛双冶,等.基于 Kmeans-SVM 的短期光伏发电功率预测[J].电力系统保护与控制, 2018,46(21):118-124.
- [6] 王昕,黄柯,郑益慧,等.基于 PNN/PCA/SS-SVR 的光 伏发电功率短期预测方法[J].电力系统自动化,2016, 40(17):156-162.
- [7] 谭津,邓长虹,杨威,等.微电网光伏发电的 Adaboost 天
 气聚类超短期预测方法[J].电力系统自动化,2017,41(21):33-39.
- [8] 孙子涵,姜志海,刘延龙,等.基于小波变换和优化的 Elman 神经网络的光伏功率预测[J].电网与清洁能 源,2022,38(6):98-103.
- [9] 马磊,黄伟,李克成,等.基于 Attention-LSTM 的光伏 超短期功率预测模型[J].电测与仪表,2021,58(2): 146-152.
- [10] 何家裕,吴杰康,杨金文,等.基于改进 BP 神经网络的光伏发电预测模型[J].黑龙江电力,2021,43(1):
 1-10.
- [11] 王英立,陶帅,候晓晓,等.基于 MIV 分析的 GA-BP 神经网络光伏短期发电预测[J].太阳能学报,2020, 41(8):236-242.
- [12] 胡兵,詹仲强,陈洁,等.基于 PCA-GA-Elman 的短期 光伏出力预测研究[J].太阳能学报,2020,41(6): 256-263.
- [13] 孟巍,郭腾炫,刘昳娟,等.基于长短记忆神经网络优化的短期光伏发电预测方法[J].电网与清洁能源, 2022,38(5):129-134.

(下转第40页)

考虑控制模式影响的多电压等级 百流电网潮流计算方法

叶 希¹,陈 振²,朱 $\hat{\pm}^{1}$,张英敏³,李保宏³

(1.国网四川省电力公司,四川 成都 610041;2.国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041; 3.四川大学电气工程学院,四川 成都 610025)

摘 要:多电压等级直流电网可满足不同地区接入各类能源和负荷的电压等级需求,是未来电网建设的发展方向。 直流电网潮流分析是电网规划设计、运行控制的基础,而相比于传统电网潮流分析,多电压等级直流电网控制方式灵 活、运行方式多样,使得潮流分析更加复杂。计及换流站的控制方式,首先,对多电压等级直流电网进行分区处理,建 立了多电压等级直流电网稳态等值模型;然后,基于牛顿迭代法建立节点导纳矩阵及潮流方程,推导了直流电网潮流 计算方法;最后,基于 PSCAD 搭建了多端直流电网模型,验证了所提计算方法的有效性和正确性。

关键词:直流电网;多电压等级;控制方式;潮流计算

中图分类号:TM 744 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)06-0034-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230606

Calculation Method for Power Flow of DC Power Grid with Multi-voltage Levels Considering Influence of Control Modes

YE Xi¹, CHEN Zhen², ZHU Tong¹, ZHANG Yingmin³, LI Baohong³

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

3. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610025, Sichuan, China)

Abstract: The DC power grid with multi-voltage levels can meet the requirements of voltage level in different regions to connect to various energy sources and loads, and it is the development direction of future power grid construction. Power flow analysis of DC power grid is the basis of grid planning, design and operation control. Compared with traditional power flow analysis, power flow analysis of DC power grid with multi-voltage levels is more complicated due to its flexible control methods and diverse operation modes. Taking into account the control modes of converter station, firstly, the DC power grid with multi-voltage levels is partitioned, and the steady-state equivalent model for DC power grid with multi-voltage levels is established. Then, the node admittance matrix and power flow equation are established based on Newton iterative method, and the power flow calculation method of DC power grid is derived. Finally, a multi-terminal DC grid model is built based on PSCAD, which verifies the validity and correctness of the proposed calculation method.

Key words: DC power grid; multi-voltage levels; control mode; power flow calculation

0 引 言

有能源结构,实现能源结构多元化意义重大^[3-4]。 据统计,截止到 2022 年年底,中国已有发电装机容 量大致为 2560 GW,风电约占 14.45%,光伏约占 15.23%。展望未来,伴随着可再生能源成本降低 以及配套储能技术的进步和成熟,可再生能源装机 有望保持较快增长势头^[5]。安全、可靠、经济的电 能传输通道是可再生能源规模化发展、远距离输送 和消纳的关键。但交流电力系统稳定性等问题随着 输送容量和距离的增加变得更加复杂。而基于先进 的直流输电技术建立主干电网^[6],在远距离、大容 量电能输送方面优势明显。

潮流分布在规划电力系统未来扩展方面扮演着 关键的角色^[7-8]。通过分析潮流分布可以确定潮流 集中的区域和负载高峰期,从而合理调整电力系统 的组成部分,有效提升系统的输电能力和供电可靠 性。此外,潮流分布分析还可以揭示系统中可能存 在的瓶颈和薄弱环节,为改进和升级电力设备提供 指导。对潮流分布进行深入研究和分析,有助于有 效评估电力系统的负载需求、优化系统配置,并制定 可持续发展的电力规划策略^[9-12]。

现有潮流计算方法大多以迭代法为核心[13],考 虑直流系统的状态变量和控制变量进行迭代求解。 文献[14]将潮流分布分解为定电压节点和定功率 节点的叠加,通过灵敏度分析,实现了直流电网潮流 分布的线性表达。文献[15]提出了一种新的潮流 计算表达式,该表达式仅需改变式中的系数即可进 行控制方式的转换,具有高效性。文献[16]提出了 在下垂控制下,模块化多电平多端直流系统的潮流 计算方法,但未指明在扰动及故障时潮流的变化规 律。文献[17]在直流电网的稳态潮流计算中引入 了基于节点阻抗矩阵的 G-S 法,能够提高计算精 度,收敛性较好。文献[18]建立了电压控制模型, 并考虑了换流站损耗对潮流计算的影响。文献[19] 提出了针对不同控制方式的潮流计算方法,并推导 了在不同控制方式下计算雅可比矩阵和网络参数的 方法,该方法适用性较广。但是目前计及直流变压 器的多电压等级下直流电网潮流计算较少,在多电 压等级直流电网中,不同电压等级的直流系统通过 直流变压器相连,探究不同控制方式下的直流变压 器损耗和通过的潮流对建立含多个电压等级的直流 电网的潮流计算方法有重要意义。

下面首先基于直流变压器、换流站的控制方式, 对多电压等级直流电网分区处理,建立了多电压等 级直流电网稳态等值模型;然后,在对直流电网节点 进行定义和分类的基础上,基于牛顿迭代法建立节 点导纳矩阵及潮流方程,推导了直流电网潮流计算 方法;最后,基于 PSCAD 仿真软件,搭建一个三电压 等级 13 端柔性直流电网模型,验证了所提计算方法 的有效性和正确性。

1 多电压等级直流电网稳态等值模型

1.1 换流站和直流系统的稳态等值模型

换流站的等值模型主要包括基于开关函数的数 学模型、换流站交直流功率交换规律及控制器模型。 模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)在工作时是子模块的不断投切实现功率传 输,从子模块的投切状态来研究 MMC 的开关数学 模型。换流器控制方法是实现交直流功率交换的重 要保障,电压源型换流器的控制方法主要有间接电 流控制方法、直接电流控制方法。其中间接电流控 制过程相对简单,主要应用于早期的电压源型换流 器(voltage sourse converter, VSC)直流输电技术中, 但由于缺乏电流反馈环节,其动态响应时间较长,系 统参数变化对控制稳定性的影响较大。在基于 MMC 的直流输电技术中,采用 dq 坐标系、PI 控制算 法的直流电流控制方法受到广泛使用。有功类外环 控制器主要有定有功功率控制、定直流电压控制、定 交流频率控制。

在数学模型和控制器设计的研究中,设注入到 MMC 的有功功率 P 等于直流侧功率 P_{dc}和损耗 P_{loss} 之和

$$P = P_{\rm dc} + P_{\rm loss} \tag{1}$$

换流站损耗 P_{loss} 与传输功率 P_{de} 间的关系可表 征^[20]为

 $P_{\text{loss}} = a \cdot P_{\text{dc}}^{2} + b \cdot P_{\text{dc}} + c$ (2) 式中,*a*、*b*、*c*为损耗系数。

从稳态潮流计算的角度看,直流系统可以忽略 线路中的电感、电容等参数,仅考虑电阻参数即可。 基于图论的方法,假定换流站*i*注入直流系统的电 流为 I_{a} ,换流站*i*直流出口处电压为 U_{a} ,将换流站 直流侧出口类比交流系统中发电机节点,即换流站 *i*、换流站*j*等效为节点*i*、节点*j*,且节点*i*与节点*j*间 的线路电阻用 r_{ij} 表示,节点*i*与节点*j*间的线路电导 用 G_{ij} 表示;基于电路原理中的基尔霍夫定律,换流 站节点电压 U_{a} 和节点注入电流 I_{a} 间的关系为

$$I_{di} = \sum_{j=1}^{q} G_{ij} U_{di}$$
(3)

式中,q为直流电网节点数。

节点导纳矩阵 G 的元素定义为

$$\begin{cases} G_{ii} = \sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{n} 1/r_{ij} \\ G_{ij} = 1/r_{ij} \end{cases}$$
(4)

1.2 DC/DC 稳态模型及多电压等级直流电网分区 方法

重点研究用于高压大功率直流电网 DC/DC 变换器的稳态等值模型。在多电压等级直流电网中为 了具备一定的阻断直流故障能力,往往采用如图 1 所 示的 MMC 两端口隔离型 DC/DC 变换器拓扑结构。



图 1 基于 MMC 的隔离型 DC/DC 拓扑结构

为保证功率的有效传输,这种 MMC 隔离型直 流变压器必须有一侧采用定交流系统频率f与交流 系统电压v控制方式(以下简称 VF 控制),以建立 稳定的交流电压;另一侧的 d 轴控制可采用定直流 电压控制、定有功功率控制或下垂控制等。因而 该类型直流变压器一般有 3 种控制模式,分别为: 1) VF 控制/定直流电压控制;2) VF 控制/定有功功 率控制;3) VF 控制/下垂控制。

直流电网中 DC/DC 稳态模型主要考虑其损耗的 等值。由于该类型变压器与换流器相似,采用拟合方 法可得到直流变压器损耗与输送功率的函数关系式。

在 PSCAD 中对 13 端系统进行仿真采样,记录所 有直流变压器低压侧和高压侧的功率,求差即为换流 站和直流变压器的损耗。这里仿真 10 次数据,利用 Matlab 中的拟合模块 curve fitting 进行拟合。变压器定 功率值作为自变量,损耗值为因变量。

直流变压器的拟合以 DC/DC1 为例,其二次拟 合结果为 $f(x) = p_1 \cdot x^2 + p_2 \cdot x + p_3, x$ 为变量,此处为 运行功率。设定: $p_1 = 5.953e^{-0.5}, p_2 = -0.022$ 15, $p_3 =$ 4.605,拟合结果如图 2 所示。



表1对损耗拟合结果进行了量化分析,结果表 明所提方法误差均在3%以下,具有较高的准确度。

表 1	拟合误差

运行功率/	损耗拟合值/	损耗实际值/	拟合误差/%
MW	MW	MW	
250	2.79	2.85	2.11
350	4.14	4.20	1.43
450	6.69	6.78	1.33
550	10.43	10.50	0.67
定有功功率			m —— 孤岛控制

图 3 直流变压器等效模型

其中,假定直流变压器 m 侧为 VF 控制,n 侧为 定有功率控制、定电压控制或下垂控制中的一种。 由于 VF 控制方式是以交流侧频率、交流电压为控 制对象,对直流侧有功功率或直流电压无控制能力, 考虑直流变压器内部损耗,两侧的功率 P_n、P_m为

$$P_n = P_m + P_{\rm loss} \tag{5}$$

将变压器损耗公式代入式(5)得

下垂控制

$$P_m = -aP_n^2 + (1-b)P_n - c \tag{6}$$

故可将直流变压器可等效为一换流站。

直流变压器位于电网中独立母线节点或与换流 站并联于同一母线节点。当位于独立母线节点时, 直流变压器等效为换流站 k₁,控制方式取决于 *n* 侧 控制方式,如图 4 所示。



图 4 直流变压器接入独立母线节点

当 n 侧与换流站 a 并联于同一母线节点,直流 变压器与换流站 a 可共同等效为一个换流站 k₂,控 制方式取决于 n 侧换流站与换流站 a,如图 5 所示。



图 5 直流变压器接入换流站母线节点

直流变压器 m 侧换流站控制方式主要分为表 2 的 9 种情况。

直流变压器控制	换流站 a	m 侧换流站
	定功率控制	定功率控制
定功率控制	定直流电压控制	定直流电压控制
	下垂控制	下垂控制
	定功率控制	下垂控制
下垂控制	定直流电压控制	定直流电压控制
	下垂控制	下垂控制
	定功率控制	定直流电压控制
定直流电压控制	定直流电压控制	无(不符合规律)
	下垂控制	定直流电压控制

表 2 换流站控制方式

以图 6 为例,由于直流变压器两侧功率 P_n 、 P_m 存在如式(5)所示关系,故按电压等级将多电压等级直流电网分区考虑,可将区域 1 的潮流计算结果代入区域 2、区域 3 进行相关的潮流计算。



图 6 潮流计算区域

2 多电压等级直流电网潮流计算模型

2.1 直流电网节点定义及分类

在直流电网中,每条直流母线同样可看作一个 节点。然而,为所连接母线提供电压和注入功率的 MMC 换流器可独立控制其注入有功功率和无功功 率,这是完全有别于交流系统的特征之一。类似交 流系统潮流计算将节点划分 PQ 节点、PV 节点和 Vθ 节点,根据 MMC 的不同控制方式,可将直流电 网中的节点分为 3 类,以便用不同的潮流方程。即 直流节点分为 3 类,以便用不同的潮流方程。即 直流节点分为 3 类;类型 I 为定交流有功功率和定 直流功率节点,该类节点维持 P 跟踪参考值;类型 II 为定直流电压节点,该类节点直流电压 U_a始终恒 定;类型III 为下垂控制节点,该类节点保持 P_a和 U_a 满足特定斜率关系。

直流电网的协调控制主要体现为各换流站有功 功率控制的相互配合,以此保证系统功率平衡和直 流电压稳定。直流电网内至少需包含1个功率控制 类(Ⅰ类或Ⅲ类)节点,且最多有1个直流电压控制 类(Ⅱ类)节点。 目前采用较为广泛的两种协调控制方式是主从运行方式和下垂运行方式。

2.2 节点导纳矩阵及潮流方程

直流电网中,接入的储能单元也可看作电源或 负荷,如光伏列阵经过 DC/DC 接入,可视为直流电 源。与直流负载或电源直接相连的节点处理为恒功 率节点,其功率修正方程为

$$\Delta P_{\rm di} = U_{\rm di} \sum_{j=1}^{\lambda} G_{ij} U_{\rm dj} + P_{\rm loss} - P_{\rm dcLi}$$
(7)

式中:ΔP_{di}为 i 节点直流功率不平衡量;λ 为与直流 负载或电源直接相连的节点数;P_{deli}为 i 节点直流负 载或电源的直流功率。

与直流负载或电源非直接相连节点中,与 MMC 非直接相连的中间直流节点功率修正方程为

$$\Delta P_{\rm di} = U_{\rm di} \sum_{j=1}^{\gamma} G_{ij} U_{\rm dj} + P_{\rm loss} \tag{8}$$

式中, y 为与直流负载或电源非直接相连的中间节 点数。

可采用牛顿-拉夫逊法对上述非线性方程进行 迭代求解。直流电网潮流修正方程为:

$$\Delta P_{\rm d} = \boldsymbol{J}_{\rm dc} \Delta U_{\rm d} \tag{9}$$

$$U_{\rm d}^{(k+1)} = U_{\rm d}^{(k)} + \Delta U_{\rm d}^{(k)} \tag{10}$$

式中: ΔP_{d} 为直流节点功率增量向量; ΔU_{d} 为直流节 点功率增量向量; J_{dc} 为直流电网雅克比矩阵;k为迭 代次数。

采用主从控制时,从换流站节点功率修正方程为

$$\Delta P_{\rm di} = U_{\rm di} \sum_{j=1}^{\eta} G_{ij} U_{\rm dj} + P_{\rm loss} - P_{\rm dcLi} \qquad (11)$$

式中,η为从换流站节点数。

当采用下垂控制时,节点功率修正方程为

 $\Delta P_{d} = P_{d} + P_{loss} - P_{dref} + K(U_{d} - U_{dref}) \quad (12)$ 式中: P_{dref} 为有功功率参考值; U_{dref} 为直流电压参考 值; K 为下垂控制系统下垂系数。

将式(11)—式(12)中的 p 个多元函数在初始 值附近分别展开成泰勒级数,并略去ΔU 的二次及以 上阶次的各项便得到:

$$\begin{cases} \Delta P_{d1} = \frac{\partial P_{d1}}{\partial U_{d1}} \Delta U_{d1} + \frac{\partial P_{d1}}{\partial U_{d2}} \Delta U_{d2} + \dots + \frac{\partial P_{d1}}{\partial U_{dp}} \Delta U_{dp} \\ \Delta P_{d2} = \frac{\partial P_{d2}}{\partial U_{d1}} \Delta U_{d1} + \frac{\partial P_{d2}}{\partial U_{d2}} \Delta U_{d2} + \dots + \frac{\partial P_{d2}}{\partial U_{dp}} \Delta U_{dp} \\ \dots \\ \Delta P_{dn} = \frac{\partial P_{dp}}{\partial U_{d1}} \Delta U_{d1} + \frac{\partial P_{dp}}{\partial U_{d2}} \Delta U_{d2} + \dots + \frac{\partial P_{dp}}{\partial U_{dp}} \Delta U_{dp} \end{cases}$$
(13)

将式(13)写成矩阵形式就如式(9)所示,其中 雅可比矩阵 **J**_a如式(14)所示。

$$\boldsymbol{J}_{dc} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{d1}}{\partial U_{d1}} & \frac{\partial P_{d1}}{\partial U_{d2}} & \cdots & \frac{\partial P_{d1}}{\partial U_{dp}} \\ \frac{\partial P_{d2}}{\partial U_{d1}} & \cdots & \frac{\partial P_{d2}}{\partial U_{dp}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_{dp}}{\partial U_{d1}} & \cdots & \frac{\partial P_{dp}}{\partial U_{dp}} \end{bmatrix}$$
(14)

雅可比矩阵各元素定义为

$$J_{dexy} = \begin{cases} U_{dx} \cdot G_{xy} & x \neq y \\ \sum_{k=1}^{x-1} G_{xk} \cdot U_{dk} + 2G_{xx} \cdot U_{dx} & x = y \end{cases}$$
(15)

式中, J_{dexy} 为 J_{de} 中第x行第y列的元素。

定直流电压的主换流站是功率平衡站,直流电压 恒定,不需要加入迭代中,故而雅可比矩阵 **J**_{de}需要降 一阶,将对应定直流电压站节点的行列元素删去。

当采用下垂控制时,对应雅可比矩阵各元素定 义如下:

$$J_{dexy} = \begin{cases} U_{dx} \cdot G_{xy} & x \neq y \\ \sum_{k=1}^{x-1} G_{xk} \cdot U_{dk} + 2G_{xx} \cdot U_{dx} + K & x = y \end{cases}$$
(16)

2.3 直流电网的潮流计算方法

这里只研究基于牛顿迭代法潮流计算方法的流 程框图,如图7所示。



图 7 牛顿法潮流计算程序

计算过程为:

1) 输入系统原始数据。

2) 将多电压等级直流电网分区,构建分区节点 导纳矩阵;设定节点电压初值。

3) 计算功率修正方程不平衡量 ΔP_{d_o}

4)判断相应变量是否达到收敛要求:是,则输 出结果,计算结束;否,则继续执行下一步。

5)计算迭代雅克比矩阵 J_{dc} 及电压修正量 ΔU_{dc} 。 6)返回步骤 3,继续进行计算。

3 仿真验证

为了验证上述多电压等级直流电网潮流计算方法的正确性,现基于 PSCAD 仿真软件,搭建一个三电压等级 13 端柔性直流电网模型,如图 8 所示。其中各换流站的控制参数如表 3 所示,直流变压器的控制参数如表 4 所示。

表 3 换流站控制参数

换流站	控制方式	控制参数
MA-1	定有功功率控制	$P_{\rm sref} = -600 {\rm MW}$
MA-2	下垂控制	$P_{\rm sref} = 800 \text{ MW},$ $U_{\rm dref} = 640 \text{ kV}, K = 5$
MA-3	下垂控制	$P_{\rm sref} = -1000 \text{ MW},$ $U_{\rm dref} = 640 \text{ kV}, K = 7$
MA-4	定有功功率控制	$P_{\rm sref}$ = 700 MW
MB-1	定有功功率控制	$P_{\rm sref} = 2000 {\rm MW}$
MB-2	定有功功率控制	$P_{\rm sref}$ = 600 MW
MB-3	定有功功率控制	$P_{\rm sref}$ = 450 MW
MB-4	定有功功率控制	$P_{\rm sref} = -1500 \text{ MW}$
MB-5	定直流电压控制	$U_{\rm dref}$ = 800 kV
MC-1	定有功功率控制	$P_{\rm sref} = -350 {\rm MW}$
MC-2	定有功功率控制	$P_{\rm sref}$ = 600 MW
MC-3	定有功功率控制	$P_{\rm sref}$ = 250 MW
MC-4	定直流电压控制	$U_{\rm dref}$ = 400 kV
	表 4 直流变压器	控制方式

直流变压器	高压侧	低压侧
DC/DC1	VF 控制	下垂控制 (P _{sref} = 100 MW,
		$U_{\rm dref} = 640 {\rm kV}, K = 6$)
DC/DC2	いた 松井山	定有功功率控制
	VF 控制	$(P_{\text{sref}} = 300 \text{ MW})$

根据多电压等级直流电网分区方法,将图 8 划 分为 3 个分区,如图 8 中虚框所示。根据与直流变 压器相连的换流站节点等效方法,换流站 MA-4、 MB-1、MC-2 与直流变压器直接相连, DC/DC2 高 压侧与独立母线 BB-4 相连, 对应的等效换流站的 控制方式及参数如表 5 所示。



图 8 13 端多电压等级直流电网 拓扑结构及计算分区模型

表 5 等效换流站节点控制参数

等效换流站	控制方式	控制参数
MA-4	下垂控制	$P_{\rm sref} = 800 \text{ MW},$ $U_{\rm dref} = 640 \text{ kV}, K = 6$
MB-1	定有功功率控制	$\begin{aligned} P_{\text{sref}} &= 2000 - a_1 \left[100 + 6(640 - U_{\text{dA}} - 4) \right] 2 + \\ &(1 - b_1) \left[100 + 6(640 - U_{\text{dA}-4}) \right] - c_1 \end{aligned}$
MC-2	定有功功率控制	$P_{\rm sref} = 900 {\rm MW}$
MB-6	定有功功率控制	$P_{\text{sref}} = -a_2 \times 3002 + 300 \times (1 - b_2) - c_2$

表 5 中: *a*₁、*b*₁、*c*₁ 和 *a*₂、*b*₂、*c*₂ 分别为直流变压器 DC/DC1 和 DC/DC2 损耗系数; *U*_{dA-4}为潮流计算 中节点 BA-4 的直流电压迭代结果。

该潮流计算方法线路潮流计算结果与 PSCAD 仿真值的对比如表 6 所示。从表 6 可看出,线路潮 流计算结果与仿真值的差值均在 1%以内。产生误 差的主要原因是换流器、直流变压器器的损耗由拟 合函数求得,与实际损耗存在一定的误差;次要原因 是牛顿迭代法存在固有的截断误差。但计算结果与 仿真值可观的吻合度验证了所提多电压等级直流电 网潮流计算方法的正确性。

表6 线路的潮流计算结果与仿真值对比

线路	计算值/MW	仿真值/MW	误差/%
BA-1—BA-2	-382	-380	0.526
BA-1—BA-4	-231	-230	0.435
BA-2—BA-3	351	350	0.286
BA-2—BA-4	60	60	0
BA-3—BA-4	-613	-615	0.325
BB-1—BB-2	-177	-178	0.562
BB-1—BB-5	883	882	0.113
BB-1—BB-6	1350	1346	0.297
BB-2—BB-3	390	392	0.51
BB-3—BB-4	833	831	0.241
BB-4—BB-5	512	510	0.392
BB-5—BB-6	-170	-170	0
BB-6—BB-7	1163	1160	0.259
BC-1—BC-4	-360	-359	0.279
BC-2—BC-3	-241	-241	0
BC-2—BC-4	1130	1129	0.089

4 结 论

上面研究基于 MMC 的多端直流电网潮流计算 问题,主要内容包含以下两个方面:

1)基于直流变压器、换流站的控制方式,对多 电压等级直流电网分区处理,建立了多电压等级直 流电网稳态等值模型;

2)根据所提多电压等级直流电网分区方法,基 于牛顿迭代法建立节点导纳矩阵及潮流方程,推导 了直流电网潮流计算方法,并在13端直流电网上验 证了所提方法的正确性。

参考文献

- [1] 杨宇,于宏源,鲁刚,等.世界能源百年变局与国家能源 安全[J].自然资源学报,2020,35(11):2803-2820.
- [2] NIKMEHR N, RAVADANEGH S N. Optimal power dispatch of multi-microgrids at future smart distribution grids [J].IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1648-1657.
- [3] 张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022,42(8): 2806-2819.
- [4] 辛保安,单葆国,李琼慧,等."双碳"目标下"能源三要素" 再思考[J].中国电机工程学报,2022,42(9):3117-3126.
- [5] 朱妍.储能是构建新型电力系统的必要环节[N].中国 能源报,2023-01-16(7).
- [6] 安婷,刘栋,常彬,等.2020年国际大电网会议学术动态—直流系统及电力电子[J].电力系统自动化,2021,45(1):141-149.
- [7] 陈可,张英敏,李俊松.直流电网网架结构对潮流分布

的影响研究[J].电测与仪表,2020,57(19):14-20.

- [8] 朱大锐,王睿,程文姬,等.基于改进 PageRank 算法的 输电网关键节点辨识方法研究[J].电力系统保护与控 制,2022,50(5):86-93.
- [9] 罗志刚,韦钢,袁洪涛,等.基于区间直觉模糊理论的直 流配网规划方案综合决策[J].电工技术学报, 2019,34(10):2011-2021.
- [10] TABARI M, YAZDANI A.An energy management strategy for a DC distribution system for power system integration of plug-in electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2):659-668.
- [11] 廖建权,周念成,王强钢,等.直流配电网电能质量指标定义及关联性分析[J].中国电机工程学报,2018, 38(23):6847-6860.
- [12] JIA Ke, XUAN Zhenwen, FENG Tao, et al. Transient high-frequency impedance comparison-based protection for flexible DC distribution systems [J].IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1):323-333.
- [13] 李国庆,边竞,王鹤,等.直流电网潮流分析与控制研 究综述[J].高电压技术,2017,43(4):1067-1078.
- [14] 许丹,王斌,张晓天,等.考虑节点控制模式的柔性直流电网潮流线性化计算方法[J].电力系统自动化, 2017,41(19):54-58.
- (上接第33页)
- [14] 谢宏文,查浩,陈庆文,等.一种使用 CALSTM 模型 进行短期光伏功率预测的方法[J].供用电,2020, 37(12):61-66.
- [15] 王继东,宋智林,冉冉.基于改进支持向量机算法的光 伏发电短期功率滚动预测[J].电力系统及其自动化 学报,2016,28(11):9-13.
- [16] 于秋玲,许长清,李珊,等.基于模糊聚类和支持向量 机的短期光伏功率预测[J].电力系统及其自动化学 报,2016,28(12):115-118.
- [17] 马骏,江锐,丁倩,等.基于多元宇宙优化支持向量
 机的短期光伏发电功率预测[J].热力发电,2020,
 49(4):87-92.
- [18] 魏鹏飞,樊小朝,史瑞静,等.基于改进麻雀搜索算法 优化支持向量机的短期光伏发电功率预测[J].热力 发电,2021,50(12):74-79.
- [19] 王鹏翔,沈娟,王菁旸,等.基于 PCA-LMD-WOA-ELM 的短期光伏功率预测[J].智慧电力,2022,50(6): 72-78.
- [20] 谭海旺,杨启亮,邢建春,等.基于 XGBoost-LSTM 组合 模型的光伏出力预测[J].太阳能学报,2022,43(8): 75-81.
- [21] NARUEI I, KEYNIA F. A new optimization method based on coot bird natural life model[J].Expert Systems with Applications, 2021, 183(2):115352.
- [22] 陈晓华,吴杰康,陈盛语,等.基于 EMD 和 IABC-SVM

- [15] 柴润泽,窦竟铭,张保会.含电压源换流器的交直流混 合电网潮流统一表达与可行解求取[J].中国电机工 程学报,2016,36(5):1260-1268.
- [16] 张朝学,邹晓松,余梦天,等.基于电压下垂控制的含 MMC 直流电网潮流计算方法研究[J].电力科学与工程,2018,34(11):1-7.
- [17] 孙银锋,吴学光,汤广福,等.基于节点阻抗矩阵 GS 法 的直流电网稳态潮流计算[J].中国电机工程学报, 2015,35(8):1882-1892.
- [18] 杨堤,程浩忠,姚良忠,等.基于电压控制特性的电压 源型多端直流/交流系统潮流求解[J].电力系统自动 化,2016,40(6):42-48.
- [19] 和敬涵,李智诚,王小君,等.计及多种控制方式的直流 电网潮流计算方法[J].电网技术,2016,40(3):712-718.
- [20] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京:中国电力出版社,2010.

作者简介:

叶 希(1987),女,博士,高级工程师,从事电网调度运行相关工作;

陈 振(1991),男,博士,高级工程师,从事电网智能调 度运行研究;

朱 童(1992),男,硕士,工程师,从事电网调度运行工作。

(收稿日期:2023-05-29)

算法的复合电压暂降源辨识方法[J].广东电力, 2022,35(2):11-18.

- [23] 陈晓华,王志平,吴杰康,等.基于 VMD 和 IAO-SVM 的电压暂降源识别方法[J].广东电力,2023,36(1): 59-67.
- [24] CHEN Xiaohua, WANG Zhiping, HONG Mingzhi, et al. Power quality disturbance identification method based on improved GSA-SVM algorithm [C]//2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), IEEE, 2022:191-196.
- [25] 殷豪,张铮,丁伟锋,等.基于生成对抗网络和 LSTM-CSO 的少样本光伏功率短期预测[J].高电压技术, 2022,48(11):4342-4351.
- [26] 孟安波,许炫淙,陈嘉铭,等.基于强化学习和组合式 深度学习模型的超短期光伏功率预测[J].电网技术, 2021,45(12):4721-4728.

作者简介:

陈晓华(1996),男,硕士研究生,研究方向为电能质量 分析、电力系统运行与控制、智能算法优化、能源需求预测、 备用容量优化、虚拟电厂管控等;

王志平(1978),男,博士,研究员,硕士生导师,研究方 向为电力电子装置及控制、智能制造等;

吴杰康(1965),男,博士,教授,博士生导师,研究方向 为电力系统运行与控制等。

(收稿日期:2023-02-21)

考虑分布式煤改电负荷接入的配电网 运行调度控制策略研究

侯泽东,王晓园,朱 洪,菅东祥,郭 伟,谢文成,段德毅

(国网新疆电力有限公司吐鲁番供电公司,新疆 吐鲁番 838000)

摘 要:大规模的煤改电用负荷的投入对本身薄弱的配电网造成较大的负担。高峰时期用户使用电供暖设备数量持续增加、使用时长逐渐延长,造成局部台区、线路重载及过载运行,给吐鲁番电网安全稳定运行带来了威胁。在考虑 "煤改电"负荷接入配电网的网架下,首先,通过调研吐鲁番"煤改电"工程接入模式和设备种类,建立"煤改电"标准 化配置模式及产品分类统计;然后,基于电路模拟的等效热参数模型建立运行典型电供暖配置模式下的运行机理模 型,研究直接负荷控制技术进行"煤改电"负荷控制。选取吐鲁番市完成"煤改电"工程改造的台区重过载运行进行实 例分析,调度控制策略成功将变压器运行在安全边界以内,且不影响用户采暖的热舒适度。 关键词:调度控制;煤改电;电网运行安全;热舒适度;直接负荷控制技术 中图分类号:TM 732 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)06-0041-09 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230607

Research on Dispatching Control Strategy Considering Distributed Coal-to-Electricity Load Access to Distribution Network

HOU Zedong, WANG Xiaoyuan, ZHU Hong, JIAN Dongxiang, GUO Wei, XIE Wencheng, DUAN Deyi (State Grid Turpan Electric Power Supply Company, Turpan 838000, Xinjiang, China)

Abstract: The large scale load input of coal-to-electricity has caused a great load burden to the weak distribution network, and during the peak period, the number of electric heating equipment used by users continues to increase and the use time gradually extends, resulting in heavy load and overload operation of local stations and lines, which has brought threats to the safe and stable operation of Turpan power grid. In consideration of grid frame for coal-to-electricity load access to distribution network, the access mode and equipment types of coal-to-electricity project in Turpan are firstly investigated, and the standardized configuration mode of coal-to-electricity and product classification statistics are established. Then, based on the equivalent thermal parameter model of circuit simulation, the operating mechanism model of typical electric heating configuration mode is established, direct load control (DLC) technology is studied for load control of coal-to-electricity conversion. Finally, the heavy overload operation areas in Turpan that has completed coal-to-electricity conversion is analyzed, and the operation of transformers is controlled within the boundary by the dispatching control strategy successfully, which does not affect the thermal comfort of user heating.

Key words: dispatching control; coal-to-electricity conversion; grid operation safety; thermal comfort; DLC technology

0 引 言

散煤燃烧是造成大气污染的重要原因之一,每 年燃煤锅炉和北方农村烧煤取暖需要消耗大量煤 炭,对环境产生了较大危害,而电能具有清洁、安全、 便捷等优势,实施电能替代是有效防治大气污染的 重要举措之一。2020 年 9 月 22 日,中国国家主席 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣 布:"中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力 的政策和措施,二氧化碳排放力争于 2023 年前达到 峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和。" 能源与电 力领域一直是国家实现碳达峰、碳中和战略目标的 关键领域和主战场。2021 年,吐鲁番市开始进行 31 万居民供电设施改造以及 365 条 10 kV 线路"煤改 电"(二期)配套电网基础建设。考虑到"煤改电"的 负荷增长速率过快、负荷压力高、温度昼夜变动大且 主要集中在冬季供暖压力高峰期的特点,加上客户 用电供暖压力长期、短期大幅增长,给电力的承载能 力和用电调控水平带来了一定难度。

统计吐鲁番电网 2022 年"迎峰度冬"期间配电网 运行设备监测异常数据,冬季保暖保供电期间 10 kV 线路监测异常 11 条,均因夜间"煤改电"负荷突增 造成重载运行;配电变压器监测异常共计 1842 台, 因"煤改电"负荷突增造成配电变压器运行异常 1422 台(配电变压器重载 986 台、配电变压器过载 436 台),占保电期间变压器异常运行的 77.20%。 显然,电供暖负荷突增造成配电变压器重过载运行 在配电变压器异常设备监测中所占比例较高,降低 了供电可靠性。

由于"煤改电"供暖设备安装相对集中,往往处 于配电网末端的台区,因此大规模"煤改电"供暖设 备的投入对本身薄弱的配电网造成较大的负荷负 担。高峰时期用户使用电供暖设备数量持续增加、 使用时长逐渐延长,造成局部台区、线路重载、过载, 容易引发电网故障,严重威胁电网的安全稳定运行, 同时也降低了用户的用能体验。而短时间内要提升 网架的供电能力存在一定的困难,因此考虑保供热 时伸缩性的特征,以配电网的协调运行作为切入点, 从调度运行控制的角度出发,在不影响用户供暖舒 适度的前提下,对"煤改电"用户的用能进行有序控 制,保证电力用户的采暖需求。

1 "煤改电"典型负荷及其运行机理

1.1 "煤改电"标准化模式

电供暖设备按接入电网模式的不同分为集中式 供暖和分散式供暖,其中:分散式电供暖设备电热转 换率高,电能直接在终端转换为热能,没有热能输配 热损损失,节能效果好;集中供暖方式需要设置热水 管道系统,向终端热用户输送热量,因而存在管网热 损耗和循环水泵能耗。按照产生热的原理分为电热 式和电驱动热泵式;按照有无蓄热装置,电热式又分为直热式和蓄热式。相关产品分类见表1。

表1 电供暖产品及分类

电供暖类型		电供暖产品
		碳晶板
	直热类	发热电缆
		电热膜
		踢脚线电暖器
分散式		电油灯、碳纤维、电热丝等电散热器
-		户式电锅炉(无蓄热)
	蓄热类	蓄热式电锅炉
		户式蓄热式电锅炉
	热泵类	户式空气源热泵
	直热类	电锅炉
- 集中式 -		蓄热式电锅炉
		热泵+电蓄热联合机组
	热泵类	地源热泵、空气源热泵

1.2 典型电供暖设备的运行机理

1.2.1 直热类(热泵类)设备运行机理模型

基于电供热装置和建筑系统中良好的热储能特 点,直热类(热泵类)产品的电功率由房间、室外环 境共同确定,因此,在对直热类、热泵类电供热装置 进行机理特性建模中,往往采用能量守恒原理建模 房间和环境之间的能量转换情况,从而寻求系统的 电-温特性关联^[1]。目前一般为基于电路仿真的等 效热参数(equivalent thermal parameters, ETP)模型 以及基于系统冷热负载平衡的建模,而目前则大多 使用 ETP 模型的二阶微分形式,来表述对"煤改电" 负荷的暂态热平衡关系,如图 1 所示为直热类、热泵 类温控负荷-建筑系统中的 ETP 模型。



图 1 直热类(热泵类)设备 ETP 模型

图 1 中: C_a 为空气比热容,J/ \mathbb{C} ;P为直热类(热 泵类)装置的总供热能量,kW; T_{out} 为户外温度, \mathbb{C} ; T_{in} 为室内温度, \mathbb{C} ; T_m 为室内固体温度, \mathbb{C} ; R_1 、 R_2 分 别为室内空气热阻和室内固体热阻。 根据图1所示模型,其状态空间方程可表述为:

$$\begin{bmatrix} T_{\rm in}^{t+1} \\ T_{\rm m} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} T_{\rm in}^{t} \\ T_{\rm m} \end{bmatrix} + Bu, u = 1$$
(1)

$$A = \begin{vmatrix} -\left(\frac{1}{R_{1}C_{a}} + \frac{1}{R_{2}C_{a}}\right) & \frac{1}{R_{2}C_{a}} \\ \frac{1}{R_{2}C_{m}} & -\frac{1}{R_{2}C_{m}} \end{vmatrix}$$
(2)

$$R_2 C_{\rm m} \qquad R_2 C_{\rm m} \end{bmatrix}$$
$$B = \begin{bmatrix} \frac{T_{\rm out}}{R_1 C_{\rm a}} + \frac{P}{C_{\rm a}} \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (3)$$

基于式(1)—式(3)的 ETP 模型,直热类(热泵 类)在工作过程中可进一步简化,得到电供暖设备 功率与室温的关系为:

$$T_{\rm in}^{t+1} = T_{\rm out}^{t+1} - (T_{\rm out}^{t+1} - T_{\rm in}^{t})\varepsilon, s = 1$$
(4)

 $T_{\rm in}^{t+1} = T_{\rm out}^{t+1} - \eta P_t / \rho - (T_{\rm out}^{t+1} - \eta P_t / \rho - T_{\rm in}^t) \varepsilon, s = 0$ (5)

式中:s 为直热类(热泵类)装置的运行位置,s=1 为 装置关闭,s=0 为装置开启; T_{in} 为t 时刻的室内温 度; T_{in}^{t+1} 为t+1 时刻的室内温度; T_{out}^{t+1} 为t+1 时刻的户 外温度; ε 为散热系数, $\varepsilon = e^{-\tau/T_c}$, τ 为控制时间段, T_c 为时间常数,此处 ε 取 0.96; η 为电供暖装置制热效 率; ρ 为导热系数, $1/(kW \cdot C^{-1})$,此处取 0.18; P_t 为 t 时刻电供暖装置额定制热耗功率, ηP_t 为t 时刻 额定制热量^[2]。

通常将式(5)简写为

$$T_{in}^{t+1} = T_{out}^{t+1} + P_t R - (T_{out}^{t+1} + P_t R - T_{in}^t) \varepsilon, s = 0$$
(6)

式中,R为等效热阻。

实际计算时将式(4)、式(6)表述为

$$T_{in}^{t+1} = T_{out}^{t+1} - (T_{out}^{t+1} - T_{in}^{t})\varepsilon + R(1 - \varepsilon) \sum_{i=1}^{m} s_{t,i}P_{i}$$
(7)

式中: $s_{t,i}$ 为第i台电供暖设备在t时刻的启停状态; m为装设的电供暖设备数量; P_i 为第i台电供暖设备的热功率。

在电供暖设备开启、关闭过程中,室内温度变化 量为

$$\Delta T(t,s_t) = T_{\rm in}^{t+1} - T_{\rm in}^t =$$

$$(1 - \varepsilon) T_{\text{out}}^{t+1} + R(1 - \varepsilon) \sum_{i=1}^{m} s_{t,i} P_i - (1 - \varepsilon) T_{\text{in}}^{t}$$
(8)

室内温度的递推函数关系为

$$\begin{cases} T_{\text{in}}^{t+1} = T_{\text{in}}^{1} + \sum_{t} \Delta T_{t} \\ \Delta T_{t} = (1 - \varepsilon) \left(T_{\text{out}}^{t+1} - T_{\text{in}}^{t} \right) + R(1 - \varepsilon) \sum_{i=1}^{m} s_{t,i} P_{i} \end{cases}$$

$$(9)$$

式中: T_{in}^{t} 为 t时刻室内设置温度; ΔT_{t} 为两时刻间 温差。

显然,电供暖负荷对室内温度的变化作用,不仅 与电供暖设备的启停状态有关,还与此刻室内的温 度有关。

1.2.2 蓄热类电供暖设备运行机理模型

蓄热式电供暖设备有直热式电供暖装置和蓄热 装置两部分组成,其中蓄热装置作为主要储能部件, 能够灵活切换供暖运行方式,在电网低谷时段用户 热量需求使用直接式电供暖设备供暖;同时将一部 分热能量储存在储能元件,在电网高峰时段使用蓄 热装置释放热能量来平衡直热式供热量与用户热量 需求,在不影响用户热舒适的情况下同时参与电力 削峰填谷。

1) 蓄热装置蓄热与释放

根据蓄热式电供暖设备的组成,蓄热式电供暖 设备的工作过程也分为直热类电供暖装置供暖和蓄 热装置蓄热、释放过程,直热式电供暖装置供暖在上 面已作具体分析,这里不再赘述。下面重点分析蓄 热装置的蓄热与释放过程和运行机理模型。

①蓄热装置蓄释热量约束

$$E_{\rm HS}(T+1) = E_{\rm HS}(T)(1-\sigma_{\rm HS}) - \left[\eta_{\rm HS}I_{\rm HS,C}(T)P_{\rm HS,C} + \frac{1}{\eta_{\rm HS,D}}I_{\rm HS,D}(T)P_{\rm HS,D}\right]\tau (10)$$

$$I_{\text{HS.C}}(T) + I_{\text{HS.D}}(T) \in (0,1)$$
 (11)

$$E_{\rm HS\,min} \le E_{\rm HS}(T+1) \le E_{\rm HS\,max} \tag{12}$$

式中: σ_{HS} 为蓄热装置的热量耗散率; $E_{HS}(T)$ 为蓄热 装置在 T 时刻的蓄热量; $E_{HS max}$ 与 $E_{HS min}$ 分别为蓄热 装置的蓄热量上、下限; $I_{HS,C}$ 为蓄热装置的蓄热状态 变量; $\eta_{HS,C}$ 为蓄热装置的蓄热能效率; $I_{HS,D}$ 为蓄热装 置的散热状态变量; $\eta_{HS,D}$ 为蓄热装置的散热效率。 ②蓄热装置蓄释热功率约束

$$\begin{cases} I_{\text{HS.C}} P_{\text{HS.C min}} + I_{\text{HS.D}} P_{\text{HS.D min}} \leq P_{\text{HS.C/HS.D}} \\ I_{\text{HS.C}} P_{\text{HS.C max}} + I_{\text{HS.D}} P_{\text{HS.D max}} \leq P_{\text{HS.C/HS.D}} \end{cases}$$
(13)

式中:P_{HS.C min}和 P_{HS.C max}分别为蓄热装置的最小、最 大蓄热输出功率;P_{HS.D min}和 P_{HS.D max}分别为蓄热装置 的最小、最大散热能量输出功率。

2 可控制"煤改电"负荷评价

2.1 配电网运行安全性评价

电网安全是电网在运行过程中的一个特点,它 反映了电网在遇到可能的干扰后继续向用户提供电 力的能力。目前的评价指标主要以电网公司和用户 为对象进行,同时也会计及综合效益的作用^[3]。配 电变压器处于电网的末端,国外有些研究单位通过 引入变压器负载率、运行年份等来对变压器运行状 况分析^[4]。

变压器的负载率是"某一时段"该设备的视在 功率与额定容量的比值,能反映变压器在"某一时 段内"的运行状况,相对于以往设计规划阶段对经 济性、三相不平衡方面的研究,负载率更加符合配电 变压器的实际工作特性与需要,计算公式为

$$\mu = \sqrt{3} UI/S_{\rm N} \tag{14}$$

式中:µ为配电变压器运行负载率,%;U为配电 变压器运行线电压,kV;I为配电变压器运行线电 流,A;S_N为配电变压器额定容量,kVA。

依据配电变压器负载率将设备划分为警告级和 限制级。警告级:设备重载运行,80% ≤最大负载率< 100%,原则上可开发容量为0,但仍然可以接入少 量负荷,需要持续监测台区并做好台区预测及事故 应急处置措施。限制级:设备过载运行,最大负载率≥ 100%,原则上计算可开放容量为0,限制接入负荷, 需要持续监测台区,并尽快落实台区升级改造或进 行需求侧负荷资源调度。

2.2 用户热舒适度评价

国际标准化组织(international organization for standardization, ISO)有关热舒适度 ISO 7730 系列标 准由 ISO/TC 159 人类工效学-物理环境分委会制 定^[5],现行的热舒适度标准版本是 ISO 7730—2005 《热环境人类工效学—基于 PMV-PPD 计算确定的 热舒适及局部热舒适判据的分析测定和解析》,采 用了丹麦范格尔教授的 PMV-PPD 模型来评价热舒 适度,ISO 基于 PMV-PDD 模型提出对人体热平衡特 性建立《适中的热环境—PMV 与 PPD 指标的确定 及热舒适条件的确定》(ISO 7730)热舒适度模型。

人体对外界的温度感受与体温变化的热量感受 模型即为一个预测平均值模型(predicted mean vote,PMV)。在稳态热环境下,通过 ISO 模型得出 PMV 指标值与人体热感觉值对应关系,如表2所示。

表 2 PMV 指标值与舒适度

指标值	含义
-3	冷
-2	凉
-1	稍凉
0	舒适
1	稍暖
2	暖
3	热

ISO 7730 热舒适度模型指出 *P*_{MV}指标值在 -0.5~0.5 区间均为人体感受的舒适温度区间,最 近舒适温度为 *P*_{MV}=0。参照 ASHRAE 55 标准^[6]简 化 ISO 7730 热舒适度模型。

 $P_{MV} = 0.208T_{in} - 5.276$ (15) 式中: P_{MV} 为热感觉 PMV 指标值; T_{in} 为室内温度。

显然,室内温度增加时,P_{MV}增大,室内温度降低时,P_{MV}减小,两者呈正向线性关系。根据式(15)所建立的简化热舒适度模型,可得出人的体感温度可接受范围为[23.0,27.8]℃,当室内温低于 23.0 ℃或着高于 27.8 ℃时,则超出了人体的舒适范围,用户将感到不舒服,此区间以外的温度范围定为人体不可接受温度区域。

3 "煤改电"负荷调度控制策略

3.1 直接负荷控制技术概述

直接负荷控制(direct load control, DLC)是指在 用户同意的前提下,调度侧使用智能终端直接控制 管理用户的一部分负荷,对电网运行性能优化研究 的同时实现最大程度的清洁能源消纳^[7],能够参与 DLC 的负荷具有一下特点:1)快速响应能力,负荷 能够快速响应电力调度控制中心的控制指令,响应 时间一般小于 15 min^[8],是参与电力系统负荷快速 调节的基础;2)具备能量储存能力,保证负荷短时 服务质量不会有较大影响;3)容易形成规模化效 应,一定规模的负荷能够影响负荷曲线的峰谷差,这 是实现 DLC 的关键^[9]。从"煤改电"标准化配置的 供暖设备可以看出,供暖负荷类能量为单相能量传 输负荷,电力调度控制中心通过无线公网远程遥控 电供暖设备智能终端直接管理用户用电。

DLC 在高级量测体系(A-MI)的支持下由负荷 管理中心发布指令,通过负荷控制设备执行控制命 令,实现负荷分类、分时控制^[10],DLC 技术的典型结 构如图 2 所示。



图 2 DLC 典型结构

首先,电供暖负荷单向能量传输控制模型根据 调度需求和负荷容量,把参与 DLC 的负荷分成 *N* 组^[8];然后,把电力系统负荷曲线按时段绘制成阶 梯状^[11],如图 3 所示。



图 3 阶梯状负荷曲线

设t时段第n组 DLC 实际受控负荷 P_m 为

 $P_{nt} = \beta_{nt}P_{Nn}, \quad \beta \in [-1,1]$ (16) 式中: P_{nt} 为第 n 组 DLC 实际受控负荷; P_{Nn} 为第 n 组 DLC 受控负荷额定功率; β_{nt} 为控制指令, $\beta_{nt} \in [-1,0)$ 对应降低负荷指令, $\beta_{u} = 0$ 保持负荷不变, $\beta_{u} \in (-1,0]$ 对应提高负荷指令。

综上所述,t时段 N 组内 DLC 总受控负荷为

$$P_{t} = \sum_{n=1}^{N} P_{nt} = \sum_{n=1}^{N} \beta_{nt} P_{Nn}, \quad \beta_{nt} \in [-1,1] \quad (17)$$

DLC 执行完成减少负荷指令之后,受控负荷开 始正常运行。受控期间被削减的用电量需求在控制 结束后将部分或全部偿还用电设备,试图恢复到甚 至高于其被控制前的负荷水平,从而导致后续负荷 突然增大,这部分在 DLC 受控结束后产生的超过未 参与 DLC 时的负荷被称为反弹负荷^[12]。当前许多 文献都研究了反弹负荷的数学模型,然而由于不同 类型的负荷所处的运行环境不同,反弹负荷的准 确。对于温控负荷的反弹负荷通常使用 3 阶自 回归模型^[13],设第 n 组 DLC 的滞后电量需求为

 $P_{nt}^{b} = aP_{n(t-1)} + bP_{n(t-2)} + cP_{n(t-3)}$ (18) 式中: P_{nt}^{b} 为第 t 时段、第 n 组 DLC 的反弹负荷; $P_{n(t-1)}$ 、 $P_{n(t-2)}$ 、 $P_{n(t-3)}$ 分别为第 t-1、t-2、t-3 时段第 n 组 DLC 实际受控负荷;a、b、c 为相应时段的控制 系数。

结合实际受控负荷与反弹负荷,从式(16)、 式(18)可知,第*t*时段、第*n*组用户总负荷改变量为

$$\Delta P_{nt} = P_{nt}^{\rm b} - P_{nt} \tag{19}$$

基于 DLC 的配电网运行调度控制策略是一个 数学层面的复杂多目标优化问题,求解方法从最初 的传统优化算法(例如线性规划、多目标线性规划、 动态规划^[14]、模糊线性规划、模糊动态规划等)发展 到目前的启发式优化算法(例如多目标进化算法、 遗传算法、蚁群算法等)。

3.2 调度控制策略

变压器作为联系用户与电力调度控制中心的重 要媒介,向下为用户提供负荷,向上准实时上报运行 情况(目前新疆上报负荷曲线频次为15 min/次), 调度侧确定变压器需要削减容量的大小。通过电网 拓扑关系向下分析出"煤改电"用户信息,再基于 DLC 控制计算通过远程控制装置循环控制用户的 电供暖设备,用户参与负荷控制的结构如图4 所 示。调度侧对参与的"煤改电"负荷开展轮控,整个 控制过程中必须满足用户舒适度需求,即室内温度





图 4 用户负荷参与 DLC 结构

3.2.1 可控"煤改电"负荷预测

假设 *t* 时段电供暖设备的平均额定功率为 *P*, 控制周期内室外环境温度设为恒定值 T_{out} ,根据电 供暖设备的热动力模型式(4)、式(5),结合室内温 度控制区间[$T_{in,min}$, $T_{in,max}$]=[23.0,27.8] \mathbb{C} ,可计算 负荷控制周期 τ_c 以及电供暖设备的开启时间 τ_{on} 和 关闭时间 τ_{off} ,计算公式^[2]为:

$$T_{\max} = T_{\text{out}} (1 - \varepsilon^{\tau_{\text{off}}}) + T_{\min} \varepsilon^{\tau_{\text{off}}}$$
(20)

$$T_{\min} = (T_{out} - \eta \bar{P}/A) (1 - \varepsilon^{\tau_{on}}) + T_{\max} \varepsilon^{\tau_{on}} (21)$$

$$\tau_{c} = \tau_{off} + \tau_{on} \qquad (22)$$

假设变压器下有 m 台电供暖设备,并将这些电 供暖负荷平均分成 n 组进行轮控,轮控策略如图 5 所示。



图 5 电供暖负荷轮控策略

每组电供暖负荷在一个 τ_c 控制周期内的"开 启"状态(白色)时间为 τ_{on} ,"关闭"状态(黑色)时间 为 τ_{off} 。当室内温度达到人体感受的最低舒适温度 T_{min} 时,电供暖负荷控制状态进入"关闭"状态,电供 暖负荷恢复正常供暖,室内温度开始上升;当室内温 度达到人体感受的最高舒适温度 T_{max} 时,电供暖负 荷控制状态进入"开启"状态,停止电供暖负荷供 暖,温度开始下降。

设1个控制状态时间间隔为 ω ,则一个 τ_e 控制 周期内有 τ_e/ω 个控制状态。每组电供暖设备在同 一时刻处于不同状态,进入下一个控制状态时总有 一组电供暖设备处于"开启"状态,同时另一组电供 暖设备处于"关闭"状态,保证每个控制状态下的处 于"开启"状态的电供暖设备相同,即 τ_{on}/τ_c比例相 同。这样就可以得到第 t 时段参与 DLC 行动的"煤 改电"负荷可控容量为

$$C_{t} = \frac{\tau_{\text{off}}}{\tau_{c}} \times m\bar{P}$$
 (23)

式中,mP为变压器下"煤改电"额定功率。 3.2.2 调度控制策略

1) 调度控制计划模型

调度侧提前一日计算配电变压器各时段的"煤 改电"可控负荷,以配电变压器不出现重过载运行 为原则(负载率μ=80%)对需求侧负荷资源进行分 析,分配系统缺额,制定调度控制计划。

在宏观侧,以配电变压器不出现重过载运行决 策出配电变压器削减量的调度控制计划。假设次日 负荷调度控制共分为M个时段,每个时段间隔为 Δx ,该变压器在第x时段($x=1,2,3,\dots,M$)应进行 电力削减量为C(x),调度侧按照重过载边界条件计 算并分配给该变压器的削减量为D(x),按照该变 压器在M个时段内削减量最少为目标建立调度控 制模型为:

$$\min\sum_{x=1}^{M} D(x) \tag{24}$$

s.t.
$$0 \leq D(x) \leq C(x)$$
 (25)

$$\sum_{x=1}^{M} D(x) \ge C(x)$$
(26)

在微观侧,以最小化"煤改电"负荷实际削减量 与调度侧控制计划间的偏差实施 DLC,满足规定的 调度计划。假设调度侧分配给配电变压器的削减量 为D(x),该变压器接带"煤改电"用户m家(每家一 台电供暖设备),第x时段的功率分别为 $P_i(x)$ (i=1,2,...,m), $s_i(x)$ 表示第i家用户电供暖设备在 第x时段的控制状态, $s_i(x) = 0$ 说明第i家用户 电供暖设备控制状态处于"关闭"状态,即电供暖 设备开启; $s_i(x) = 1$ 说明第i家用户电供暖设备 控制状态处于"开启"状态,即电供暖设备 关闭。 该变压器接带用户组的控制变量记为 $\Phi(x) =$ { $s_1(x), s_2(x), ..., s_m(x)$ },表示第x时段m家用 户的电供暖设备的受控状态组合,则第x时段该 变压器所能提供的"煤改电"负荷组实际供应电力 削减量为

$$G(x) = \sum_{i=1}^{m} s_i(x) \times P_i(x)$$
 (27)

从而确定第 x 时段,该变压器对"煤改电"负荷 组的需求响应资源供应量与调度计划的偏差为

$$e(x) = G(x) - D(x)$$
 (28)

2) 约束条件

①可控"煤改电"负荷约束

调度侧实施 DLC 的同时还需要考虑用户的热舒适度,室内环境温度不能超出[*T*_{in,min},*T*_{in,max}],调度侧分配给变压器的负荷削减量 *D*(*x*)不能超过该变压器的可控"煤改电"负荷 *C*_t,DLC 需求响应控制量约束为

$$D(x) \leq C_{\iota} \tag{29}$$

②DLC 需求响应控制量约束

由于实时测量室温需要给用户电供暖设备安装 温度传感器设备,安装难度较大,所以基于电供暖设 备的运行机理模型,用电供暖设备持续运行时间来 代替实时温度变化量,提供 DLC 决策模型的约束 条件,电供暖设备 i 处于连续"开启"状态的时间 $\tau_i^{\text{on}}(x)$ 和处于连续"关闭"状态的时间 $\tau_i^{\text{off}}(x)$ 的计算 公式^[2]为:

$$\tau_i^{\text{on}}(x) = \{\tau_i^{\text{on}}(x-1) + [1 - s_i(x)]\Delta x\} [1 - s_i(x)]$$
(30)

$$\tau_i^{\text{off}}(x) = \{\tau_i^{\text{off}}(x-1) + s_i(x)\Delta x\} s_i(x) \quad (31)$$

进行 DLC 行动的同时室内温度不能超出[T_{min} , T_{max}], 电供暖设备 i 处于连续"关闭"状态的时间 $\tau_i^{\text{off}}(x)$ 不能超出 τ_{off} , 室内温度变化量约束为

$$\tau_i^{\text{off}}(x) \leq \tau_{\text{off}} \tag{32}$$

理想情况下:

$$\frac{\sum_{i=1}^{m} \tau_i^{\text{on}}(i)}{\sum_{i=1}^{m} \tau_i^{\text{off}}(i)} \ge \frac{\tau_{\text{on}}}{\tau_{\text{off}}}, \sum_{i=1}^{m} \tau_i^{\text{off}}(i) \neq 0$$
(33)

式中:初始状态为 $\tau_i^{\text{off}}(0) = 0$; $\tau_i^{\text{on}}(0) = \tau_i^{\text{off}}$, i = 1, 2,..., m_{\circ}

3)决策模型

当调度侧分配给变压器的负荷削减量 D(x)与 变压器开展"煤改电"负荷削减量相同时,由电供暖 设备的运行机理即热舒适度模型可知,此时室内温 度变化最小,引起用户感受到的舒适度变化最小,但 求解过程中可使偏差 e(x)尽可能小。根据调度控 制模型及约束条件整理出决策模型为

$$\begin{cases} \min e(x) = G(x) - D(x), \ e(x) \ge 0\\ D(x) = D(x), \ D(x) \le C_t \\ D(x) = C_t, \ D(x) > C_t \end{cases}$$
(34)

s.t.
$$\tau_i^{\text{ar}}(x) \leq \tau_{\text{off}}$$
 (35)

$$\frac{\sum_{i=1}^{i} \tau_i^{\text{on}}(i)}{\sum_{i=1}^{m} \tau_i^{\text{off}}(i)} \ge \frac{\tau_{\text{on}}}{\tau_{\text{off}}}, \sum_{i=1}^{m} \tau_i^{\text{off}}(i) \neq 0 \qquad (36)$$

上述模型为非线性多目标优化问题,决策变量 为: $\Phi(x) = \{s_1(x), s_2(x), \dots, s_m(x)\}, x = 1, 2, 3, \dots, M_o$

4 案例分析

2022年12月吐鲁番市持续低温,导致多台配 电变压器出现重过载运行现象,选取其中"煤改电" 用户改造完成的典型台区进行案例分析。10 kV 高 昌线 95 号杆变压器额定容量为 400 kVA,通过查看 配用电调度感知系统可知该变压器接带的"煤改 电"总负荷为 210 kW,"煤改电"用户为 70 户,均为 分布式"煤改电"用户,使用的电供暖设备为分散式直 热类,该变压器 2021年12月5日负荷晚高峰期间 (19:30—00:30)的负荷曲线与负载率如图6所示。



图 6 配电变压器负荷与负载率曲线

由图 6 中负载率曲线可知,该变压器在 20:15— 21:45 区间出现重过载运行现象,甚至在 20:45 时 出现过载运行。变压器长时间的重过载运行会对设 备安全稳定运行造成威胁,若不及时处置可能产生 大范围长时间停电情况。

负荷采集时间段为 15 min, 20: 15-21: 45 共为 7个时间段,根据图3中的负荷曲线与重载边界值 计算出1~7个时段所需削减功率如表3所示。

厺 ₹

时间段/15 min	准实时功率 P/kW	需削减功率 D/kW
1	290	18
2	300	28
3	340	68
4	335	63
5	325	53
6	300	28
7	280	8

假设 10 kV 高昌线 95 号杆变压器接带"煤 改电"用户的电供暖设备平均制热功率为3 kW,平 均能效比(制热率)为2.7.用户热舒适度为[23.0. 27.8 ℃, 20:15—21:45 期间室外环境温度为0℃, 由此可得到电供暖设备额热动力学模型为:

 $T_{in}^{t+1} = 0 - 0.96(0 - T_{in}^{t}), s = 1$ (37) $T_{in}^{t+1} = 0 - 45 - 0.96(0 - 45 - T_{in}^{t}), s = 0$ (38)

根据可控"煤改电"负荷预测模型式(20)、式(21)、 式(22)可求解负荷控制周期 τ_{e} 为13.77 min,电供 暖设备处于"开启"控制状态时间 τ_{on}为 9.1 min,处于 "关闭"控制状态时间 7 off 为 4.67 min。

根据 DLC 可控容量预测式(25),可得出 20:15-21:45 期间能参与控制行动的"煤改电"负 荷为71.19 kW。

显然,实际可执行负荷削减量大于20:50-21:45 期间调度侧要求的每个时间段削减需求量,因此实 际进行"煤改电"负荷削减可按表3的要求执行。为 简化计算,将70家"煤改电"用户分为7组进行轮 控,每组10家电供暖设备在实施调度控制策略时行 动一致,各负荷组的制热功率如表4所示。

表 4 各 6 荷 4 的 制 执 功 率

负荷组编号	制热功率/kW
1	25
2	26
3	31
4	36
5	40
6	24
7	28

表 3	各时段所需削减功率

设负荷控制时间间隔 $\omega = 1 \min$,在 20:15— 21:45 期间 7 个时段内执行 105 次控制,每个时段 执行 15 次相同控制方式,需要各负荷组提供的响应 资源由式(31)的决策模型得出:

min
$$e(x) = G(x) - D(x), e(x) \ge 0$$
 (39)

s.t.
$$\tau_i^{\text{off}}(x) \leq 4.67$$
 (40)

$$\frac{\sum_{i=1}^{7} \tau_{i}^{\text{on}}(i)}{\sum_{i=1}^{7} \tau_{i}^{\text{off}}(i)} \ge \frac{4.67}{9.1}, \sum_{i=1}^{7} \tau_{i}^{\text{off}}(i) \neq 0 \quad (41)$$

式中:
$$G(x) = \sum_{i=1}^{7} s_i(x) \times P_i$$
, $s_i(x) = \{0,1\}$;

$$D(x) = \begin{cases} 18, & x = 1, \dots, 15 \\ 28, & x = 15, \dots, 30 \\ 68, & x = 31, \dots, 45 \\ 63, & x = 46, \dots, 60 \\ 53, & x = 61, \dots, 75 \\ 28, & x = 76, \dots, 90 \\ 8, & x = 91, \dots, 105 \end{cases}$$

CPLEX 是目前国际上顶尖的线性规划、整数规 划和某些非线性规划问题求解软件包,它可用于求 解线性规划问题、二次规划问题、二次约束规划 问题与混合整数问题^[15],基于 Matalb 的 CPLEX 优化平台编写非线性多目标优化算法程序,通过 调用 ILOG CPLEX 算法求解决策变量。 $\Phi(x)$ = $\{s_1(x), s_2(x), s_3(x), s_4(x), s_5(x), s_6(x), s_7(x)\}, x =$ 1,2,3,...,105。程序流程如图7所示。



图 7 多目标优化算法程序流程

在变压器重过载期间(20:15—21:45),通过与实施"煤改电"负荷调度控制策略前负荷曲线与负载率 图进行对比,变压器负载率均未超过重载边界值,保 持在变压器健康运行的要求范围内,如图8所示。



5 结 论

上面通过实地调研吐鲁番市"煤改电"工程推 进程度以及配电网设备监测异常情况,冬季"迎峰 度冬"保供电期间因"煤改电"负荷短时间、大规模 增长造成10kV线路、配电变压器重过载运行所占 比例较大,严重威胁电网的安全稳定运行,而短时间 提升网架的供电能力存在一定的困难。通过调研吐 鲁番市"煤改电"工程接入模式和设备种类,建立 "煤改电"标准化配置模式,使用变压器负载率作为 实施负荷控制后的运行评价指标,利用 ISO 制定 PMV 指标值简化热舒适度模型,基于 DLC 技术设 计了配电网运行调度控制策略,具体分析策略实施 过程中的目标函数、约束条件以及决策模型。最后, 选取吐鲁番市完成"煤改电"工程改造的台区重过 载运行进行实例分析,通过 Matlab 程序求解出负荷 控制结果显示,调度控制策略成功将变压器运行在 安全边界以内,且不影响用户采暖的热舒适度,具有 一定的有效性和实用性。

参考文献

- [1] 王珊.面向"煤改电"地区计及用户舒适度的需求侧响 应策略研究[D].北京:华北电力大学,2019.
- [2] 高赐威,李倩玉,李扬.基于 DLC 的空调负荷双层优化调度和控制策略[J].中国电机工程学报, 2014, 34(10):
 1546-1555.

- [3] 李锦飚,陈湘萍.需求侧响应技术浅析[J].中外能源, 2021,26(5):16-22.
- BIGDELI M, VAKILIAN M, RAHIMPOUR E. A New Method for Detection and Evaluation of Winding Mechanical Faults in Transformer through Transfer Function Measurements[J]. Advances in Electricat and Computer Engineering, 2011, 11(2): 23-30.
- [5] 景胜蓝,李百战,李楠,等.基于热感觉指标确定热舒适
 判据的一项国际标准简介[J].暖通空调,2010,40(8):
 110-113.
- [6] ASHRAE Standard Committee. Thermal Environmental Condition For Human Occupancy Standard: ANSI/ ASHRAE 55 - 2004 [S/OL]. [2023 - 04 - 01]. https:// max.book118.com/html/2015/0929/26387537.shtm.
- [7] 罗金满,刘丽媛,刘飘,等.考虑源网荷储协调的主动 配电网优化调度方法研究[J].电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 167-173.
- [8] 曹世光,李卫东,柳焯,等. 计及直接负荷控制的动态 优化调度模型[J]. 中国电机工程学报, 1998,18(3): 160-162.
- [9] 赵阅群. 面向能源互联网的直接负荷控制模型与仿真 研究[D]. 北京:华北电力大学, 2016.
- [10] ZHU Lan, YAN Zheng, LEE Wei-Jen, et al. Direct Load Control in Microgrids to Enhance the Performance of Integrated Resources Planning [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(5): 3553-3560.
- [11] 柳焯. 电力系统动态负荷瓶颈分析[J]. 哈尔滨工业 大学学报, 1994, 26(6): 69-74.
- [12] 梁捷,梁广明. 计及反弹负荷平抑的空调集群直接负荷控制研究[J]. 东北电力技术, 2021, 42(11): 31-34.
- [13] 赵阅群,艾欣,周树鹏. 直接负荷控制技术研究[J]. 电气应用, 2016, 35(6):48-55.
- [14] MOLINA A, GABALDON A, FUENTES J A, et al. Implementation and assessment of physically based electrical load models: Application to direct load control residential programmes [C]//IEEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 2003, 15: 61-65.
- [15] 蒋争明,关青苗. 基于 CPLEX 和 C++语言求解优化
 问题的过程[J]. 电脑知识与技术, 2015, 11(23):
 49-50.

作者简介:

侯泽东(1993),男,硕士,研究方向是电力系统、配电自 动化、源网荷储协同控制。

(收稿日期:2023-07-02)

考虑热网潮流的区域热-电综合能源系统 协同优化配置研究

邓靖微¹,曹敏琦¹,晁化伟¹,陈大为²,胡 涛²

(1. 国网四川省电力公司经济技术研究院,四川 成都 610041;

2. 湖南大学电气与信息工程学院,湖南长沙 410082)

摘 要:区域热-电综合能源系统作为连接跨区域和用户侧综合能源系统的"桥梁",如何协同其设备配置与系统运行 是值得关注的问题。首先,研究建立了考虑流向可变量调节运行方式下的热网模型,通过松弛结合罚函数的方式将 其转化为二阶锥形式;进一步结合其他设备及电网潮流模型建立了协同优化配置模型,该模型下的设备配置策略能 够同时优化多种设备接入节点的位置及其配置容量。算例结果表明:与传统配置策略相比,同时考虑设备容量及节 点位置的配置策略能够减少设备容量配置冗余,降低规划及运行综合成本;流向可变的热网模型能提供更灵活的运 行方式以增加设备配置的灵活性,得到成本更低的配置方案。

关键词:综合能源系统;联合优化;量调节;混合整数二阶锥规划

中图分类号:TM 721 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)06-0050-09

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230608

Research on Collaborative Optimal Allocation of District Thermal-Electric Integrated Energy System Considering Thermal Network Power Flow

DENG Jingwei¹, CAO Minqi¹, CHAO Huawei¹, CHEN Dawei², HU Tao²

(1. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

Abstract: As a "bridge" connecting inter-regional and user-side integrated energy systems, the coordinated configuration and operation of a district thermal-electricity integrated energy system is a topic worthy of attention. A thermal network model considering variable flow direction regulation operation is established, which is transformed into second-order cone form by relaxed combination with penalty function. Further combined with other equipment and power grid flow models, a collaborative optimal allocation model is established. The device configuration strategy under this model can simultaneously optimize the location and capacity of multiple device access nodes. The results show that compared with traditional allocation strategies, the allocation strategy that simultaneously considers both equipment capacity and node location can reduce equipment capacity redundancy and lower planning and operating costs. The thermal network model with variable flow direction can provide more flexible operation modes to increase the flexibility of equipment configuration and obtain configuration solutions with lower costs.

Key words: integrated energy system; coordinated optimization; quantity regulation; mixed-integer second-order cone programming

0 引 言

能网络的终端,对于缓解当前环境保护与能源需求 的矛盾具有重要意义^[1]。RIHES 利用能量转换设 备耦合区域热网和配电网能够提高能源利用率。 RIHES 作为能量转换最复杂的环节,合理统筹其新 增设备规划与系统运行策略,实现节能增效的同时 兼顾投资经济性是一个值得关注的问题^[2]。

目前,针对 RIHES 的协同优化配置已有较广泛 的研究^[3-9]。如文献[3]固定了待配置设备的容量, 以设备是否安装的 0-1 变量作为规划决策变量. 用随机优化方法求解 RIHES 的随机规划模型。文 献[4-5]以设备容量作为规划决策变量,固定了待 配置设备的数量,采用随机优化方法、区间优化等方 法求解计及源荷不确定性因素的 RIHES 规划模型。 文献[6-7]考虑经济性与可靠性双重因素,分别从 引入可靠性指标校验经济性的单目标优化和可靠性 与经济性双目标优化两个角度,讨论了双重目标下 的 RIHES 优化配置问题。文献 [8-9] 从储能角度展 开,通过精细化储能模型,考虑 RIHES 中储能装置的 配置问题。上述文献从不同角度研究了 RIHES 的优 化配置问题,但是,在设备配置方面均以待配置设备 的容量[4-9]或数量[3,9]作为规划决策变量,并未考虑 同类设备的容量及数量同时作为规划决策变量的设 备配置策略。此外,在运行方面,上述文献均未考虑 传输网络模型,而导致优化结果无法满足实际 RIHES 的网络传输损耗及传输变量对应的静态安全约束。

考虑传输网络模型后,规划决策变量还需考虑 待配置设备的选址,即设备接入对应网络的节点位 置:此外,原决策变量设备数量变为设备可接入节点 的数量。现有考虑传输网络模型的 RIHES 协同优 化配置的研究主要集中在用户侧综合能源系 统[10-11]和多区域综合能源系统[12]。有研究初步考 虑了传输网络模型,但其热-电传输网络模型仅包 含外部母线功率平衡模型,并未对网络潮流进行精 细建模^[10]。文献[12]建立了热网潮流模型,针对各 区域接入网络的设备容量进行优化配置,但并未考 虑电网潮流模型。然而实际热网采用调节流量的量 调节或调节温度的质调节运行方式[1],但上述研究 中的热网模型并未考虑区域热网流量或温度的变 化。因此,有研究进一步考虑了质调节运行下区域 热网及储能模型,优化配置接入 RIHES 中的储能容 量及接入节点位置[13],但由于储热装置难以用温度 量化其充放热过程,因此采用控制储热装置等效水 流量的运行方式改变储能的充放功率,导致储热与热 网的运行方式不符。由此可以看到,在包含储热装置 的 RIHES 规划问题中采用量调节运行方式下的热网 模型能够统一二者的运行方式。然而量调节运行方 式下热网的潮流模型变为非凸非线性,造成优化模型 难以求解。常用的求解方法即为假定管道流向已知

且在调度周期内不变,采用凸松弛方法结合商业求解 器来求解^[14-15],但流向固定的运行方式难以适用于 部分管道流向通常不确定的多热源区域热网^[16]。

综上所述,现有关于考虑传输网络模型的 RIHES 规划-运行联合优化的研究仍有部分不足, 具体为:

1)鲜有针对区域级综合能源系统应用场景;

2)规划方面除了少量研究仅考虑设备定容,大部分将设备容量通常考虑为几类离散的已知量,仅规划其接入节点及设备选型的规划策略;

3)运行方面热网模型与供热设备模型采用的运行方式不符及未考虑热网的管道流向可变因素。

基于上述考虑,提出了一种考虑流向可变的量 调节运行方式下的 RIHES 的协同优化配置模型。 首先,在运行方面建立了流向可变的量调节运行方 式下的热网潮流模型;然后,对热网模型进行松弛, 同时引入罚函数以收紧松弛间隙,进而将其转化为 二阶锥规划模型。其次,在设备配置方面,同时考虑 设备待配置容量及接入节点位置作为决策变量的设 备配置策略建立规划模型。最后,结合其他设备及 配电网的模型提出以设备配置与系统运行的经济性 及新能源机组削减为目标的协同优化配置模型,并 在 IEEE 33 节点配电网与 17 节点区域热网测试系 统中求解。算例验证表明所提协同优化配置模型具 有优越性,考虑流向可变的热网模型对设备配置经 济性有积极的影响。

1 区域热-电综合能源系统模型

所建立的 RIHES 结构如图 1 所示,由热电联 产(combined heat and power, CHP)、风力发电(wind



图1 区域热-电综合能源系统结构

turbine generation,WT)、光伏发电(photovoltaic power generation,PV)、电锅炉(electric boiler,EB)、蓄热 式电锅炉(electric boiler with thermal energy storage, EBTES)、蓄电装置(electrical energy storage,EES)及 配电网、区域热网与电、热负荷组成。

1.1 区域热网凸松弛模型

1.1.1 考虑流向可变的水力模型

热网中各节点处与该节点相关支路的质量流量 满足:

$$A\boldsymbol{m}_{\mathrm{b},t} = \boldsymbol{m}_{\mathrm{g},t} \tag{1}$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{@fillion for equation in the set of the set of$$

式中:A 为热网的供水网络的节点-支路关联矩阵; $m_{b,t}$ 为 t 时段热网各管道的质量流列向量; $m_{q,t}$ 为 t 时 段热网各节点质量流列向量; a_{ii} 为 A 阵中元素。

由于传输管道有一定的粗糙度,可由达西-魏 斯巴赫(Darcy-Weisbach)公式计算。

 $h_{bj,\iota} = S_j m_{bj,\iota} | m_{bj,\iota} |, \forall j \in B$ (3) $\exists \Psi: S_j \ \mathfrak{H} \cong \check{B} \text{ blue } \mathbb{R}^{[17]}; B \ \mathfrak{H} \cong \check{B} \triangleq \check{B} \text{ blue } \mathbb{R}^{[17]}$

考虑流向可变因素时,则需要预定义各管道的 方向,式(1)中A阵中各元素按照预定义的方向选 取,若所求得管道 j 在 t 时段的流量 m_{bj},为正,则表 示管道实际流向与预定义的方向一致,反之亦然。 建立式(4)模型表征管道流向及流量限制。

$$\begin{cases} m_{\mathrm{b}j,\mathrm{min}} \leqslant m_{\mathrm{b}j,t} \leqslant m_{\mathrm{b}j,\mathrm{max}}, \mathbf{m}_{\mathrm{b}j,t} \geqslant 0 & \forall j \in B \\ -m_{\mathrm{b}j,\mathrm{max}} \leqslant m_{\mathrm{b}j,t} \leqslant -m_{\mathrm{b}j,\mathrm{min}}, m_{\mathrm{b}j,t} \leqslant 0 & \forall j \in B \end{cases}$$

$$(4)$$

式中,*m*_{bj,min}、*m*_{bj,max}分别为管道集合 *B* 中管道 *j* 的流 量最小值和最大值。

1.1.2 热力模型

$$\varphi_{i,\iota} = C_{\mathrm{p}} m_{\mathrm{q}i,\iota} (T_{\mathrm{S}i} - T_{\mathrm{O}i}) , \forall i \in Q$$

$$(5)$$

$$\sum_{e \in I^{\text{HS}}_{\text{in},t}} \varphi_{\text{in},t}^{\text{HS}i} = \sum_{i \in Q_{\text{load}}} \varphi_{i,t}^{\text{load}} + \varphi_{\text{loss}}^{\text{s}} + \varphi_{\text{loss}}^{\text{r}} \qquad (6)$$

式中: $\varphi_{i,i}$ 为热负荷节点 *i* 消耗的热功率或热源节点 提供给热网的热功率; C_p 为水的比热容; T_{si} 、 T_{0i} 分 别为节点 *i* 的供水温度和回水温度; $\varphi_{in,i}^{HSi}$ 为热源节点 集合 I_q^{HS} 中节点 *i* 处的热源供热功率; $\varphi_{i,i}^{load}$ 为热负荷 节点集合 Q_{load} 中节点 *i* 处的热负荷功率需求。

此外,热力模型还有热损耗模型及热力拓扑模型,详见文献[15]。

1.1.3 热网模型松弛

考虑管道流向后,去掉式(3)绝对值,松弛为分

段二阶锥形式,同时引入中间二进制变量 $x_{bj,t}$ 将分段约束式线性化,同时采用麦考密克(McCormick) 松弛^[18]引入变量 $Z_{bj,t}$ 并令其满足:

$$Z_{bj,t} = x_{bj,t} h_{bj,t}, \forall j \in B$$
(7)
则式(3)、式(4)变为:
- $m_{bj,max}(1 - x_{bj,t}) \leq m_{bj,t} \leq m_{bj,max} x_{bj,t}, \forall j \in B$ (8)

$$m_{\mathrm{b}j,\mathrm{min}} x_{\mathrm{b}j,t} \leq m_{\mathrm{b}j,t} \leq - m_{\mathrm{b}j,\mathrm{min}} (1 - x_{\mathrm{b}j,t}) , \forall j \in B$$
(9)

$$\begin{aligned} x_{\rm bj,t} h_{\rm bj,min} &\leq Z_{\rm bj,t} \leq x_{\rm bj,t} h_{\rm bj,max}, \, \forall j \in B \quad (10) \\ h_{\rm bj,t} + (x_{\rm bj,t} - 1) \, h_{\rm bj,min} \leq Z_{\rm bj,t} \leq h_{\rm bj,t} + \\ & (x_{\rm bj,t} - 1) \, h_{\rm bj,max}, \, \forall j \in B \quad (11) \end{aligned}$$

$$2Z_{\mathbf{b}j,\iota} - h_{\mathbf{b}j,\iota} \ge S_j m_{\mathbf{b}j,\iota}^2, \forall j \in B$$
(12)

式(8)—式(11)均为线性约束,式(12)为二阶 锥约束。

为保证松弛精确性,将管道压差作为惩罚目标 函数。

$$F_{\rm h} = \mu_{\rm h} \cdot \sum_{j \in B} \sum_{t=1}^{T} 2Z_{{\rm b}j,t} - h_{{\rm b}j,t}$$
(13)

式中,µ_h为管道压差惩罚因子。通过最小化惩罚项 能够使二阶锥约束接近原等式约束,保证松弛的精 确性。

1.2 蓄热式电锅炉模型

相比单一 EB, EBTES 不受热负荷需求限制,能 够在热负荷需求低谷阶段将电能转化为热能,通过 TES 在时间尺度上平移至负荷需求高峰阶段供热, 缺点是供热能量损耗较电锅炉直供方式下大。因 此,采用 EB 与 EBTES 自由组合的配置方式,二者模 型可统一描述如下。

1.2.1 电锅炉模型

$$\varphi_{i,t}^{\text{EB}} = \eta_{\text{EB}} \cdot P_{i,t}^{\text{EB}}, \qquad i \in N \qquad (14)$$

$$\varphi_{i,t}^{\text{EB}} = \varphi_{i,t}^{\text{EBin}} + \varphi_{i,t}^{\text{TESchr}}, \quad i \in N$$
(15)

式中:N 为区域热网的节点集合; $P_{i,t}^{EB}$ 为区域热 网节点 i 处的 EB 在 t 时段所消耗的电功率与其制 热功率; η_{EB} 为 EB 的电热转化效率; $\varphi_{i,t}^{TESchr}$ 为供给 TES 储存的热功率。

1.2.2 蓄热装置模型

不同于传统 TES 的充放热端口均与热网连接, 仅可在热负荷低谷且供热设备供能过剩时期储存热 网多余的热能,反之向热网放热,因而其储、放能不 可同时发生。而 EBTES 中的 TES 由于储热功率来 源于 EB,无需满足上述限制,可实现利用 EB 储热的同时向热网放热,并在一段时间内与 EB 同时供热以提高供热上限。

$$S_{i,t}^{\text{TES}} = S_{i,t-1}^{\text{TES}} (1 - \gamma_{\text{TES}}) + (\varphi_{i,t}^{\text{TESchr}} \eta_{\text{chr}}^{\text{TES}} - \varphi_{i,t}^{\text{TESdis}} / \eta_{\text{dis}}^{\text{TES}}) \cdot \Delta t, \quad i \in N \quad (16)$$
$$\varphi_{i,t}^{\text{EBTES}} = \varphi_{i,t}^{\text{EBin}} + \varphi_{i,t}^{\text{TESdis}}, \quad i \in N \quad (17)$$

式中: $S_{i,t}^{\text{TES}}$ 、 $S_{i,t-1}^{\text{TES}}$ 分别为 TES 在 t 时段的蓄热量和前 一个时间间隔内的蓄热量; γ_{TES} 为 TES 的储能自损 系数; $\eta_{\text{chr}}^{\text{TES}}$ 、 $\eta_{\text{dis}}^{\text{TES}}$ 分别为 TES 的充、放热效率; $\varphi_{i,t}^{\text{TESdis}}$ 为 TES 在 t 时段向区域热网传输的热功率; $\varphi_{i,t}^{\text{EBTES}}$ 为 EBTES 的总热出力。

1.3 其他模型

其他模型包括配电网潮流模型、热电联产机组 模型及电储能运行模型。配电网模型采用二阶锥形 式的 Distflow 潮流模型,EES 模型见文献[14],CHP 模型见文献[19]。

2 协同优化配置模型

2.1 规划策略

基于第1章所建立的 RIHES 模型建立协同优 化配置模型。模型中决策变量由设备规划变量和系 统运行变量两部分组成。规划变量包含待配置设备 的容量及接入网络的节点位置。考虑到实际中 CHP 机组占地面积较其他各类设备大,受场地环境 等因素影响,CHP 机组无法随意确定安装节点位 置。此外,随着碳排放政策的限制,中国各地"十四 五"能源规划均以分布式新能源和储能规划为 主^[20].合理协调传统化石机组与其他新建供能设备 的容量以达到协同节能降效的效果具有一定现实意 义。因此固定 CHP 机组接入节点及数量, 仅考虑将 配置容量作为规划变量,而WT、PV、EB/EBTES等 其他设备同时考虑能否接入节点的 0-1 变量及待 配置容量的连续变量作为规划决策变量。运行变量 为典型日中各时段内各设备出力、热网的管道质量 流量及节点注入流量、电网潮流相关变量等。

2.2 目标函数

综合考虑 RIHES 的投资及建设的经济性和新 能源机组消纳,以待配置设备的年投资成本 C_{inv}、年 运行成本 C_{op}和新能源机组的年出力削减 C_{cur}最小 为优化目标,其表达式为

$$\min C = C_{inv} + C_{op} + C_{cur}$$
(18)

2.2.1 年投资成本

$$C_{\text{inv}} = \sum_{\Delta t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{k \in [N,N]} \frac{r (1+r)^{y_l}}{(1+r)^{y_l} - 1} \cdot C_l^{\text{inv}} \cdot M_{k,l} \cdot \Delta t$$
(19)

式中:T为典型日的调度周期;L为设备类型集合; r为设备折现率; y_l 为第l类设备寿命年限; C_l^{inv} 为 第l类设备单位容量投资成本; $M_{k,l}$ 为在节点k处配 置的第l类设备的配置容量。

2.2.2 年运行成本

$$C_{\rm op} = \theta_{\rm d} \cdot (F_{\rm CHP} + F_{\rm e} + F_{\rm h}) \qquad (20)$$

$$F_{\text{CHP}} = \sum_{\Delta t \in T} \sum_{i \in N} \left[\alpha_0 + \alpha_1 P_{i,t}^{\text{CHP}} + \alpha_2 \left(P_{i,t}^{\text{CHP}} \right)^2 + \beta_1 \varphi_{i,t}^{\text{CHP}} + \beta_2 \left(\varphi_{i,t}^{\text{CHP}} \right)^2 + \gamma_1 P_{i,t}^{\text{CHP}} \varphi_{i,t}^{\text{CHP}} \right]$$
(21)

$$F_{\rm e} = \sum_{\Delta t \in T} \left[\left(C_{{\rm e},t}^{\rm b} P_{\rm in} + C_{{\rm e},t}^{\rm s} P_{{\rm in},t} \right) \cdot \Delta t \right] \qquad (22)$$

式中: Q_d 为一年内典型日数; F_{CHP} 和 F_e 分别为热电 联产机组运行总成本和上级电网交互成本; α_0 、 α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 、 β_3 、 γ_1 为燃料费用系数; $C_{e,t}^b$ 为分时购电电 价; $C_{e,t}^s$ 为售电电价。

2.2.3 新能源机组年出力削减

$$C_{\rm cur} = \theta_{\rm d} \cdot (F_{\rm WTc} + F_{\rm PVc})$$
(23)

$$F_{\text{WTc}} = \sum_{\Delta t \in T} \sum_{i \in N} \left[\mu_{\text{WT}} (P_{i,t}^{\text{WT,pr}} - P_{i,t}^{\text{WT}}) \cdot \Delta t \right] \quad (24)$$

$$F_{\text{PVc}} = \sum_{\Delta t \in T} \sum_{i \in N} \left[\mu_{\text{PV}} (P_{i,t}^{\text{PV,pr}} - P_{i,t}^{\text{PV}}) \cdot \Delta t \right] \quad (25)$$

式中: F_{WTe} 、 F_{PVe} 分别为弃风、弃光惩罚成本; μ_{WT} 、 μ_{PV} 分别为单位功率弃风、弃光的惩罚系数; $P_{i,t}^{WT,pr}$ 、 $P_{i,t}^{PV,pr}$ 为节点 i 处风电和光伏机组的日前预测出力。

2.3 约束条件

2.3.1 规划约束

1)设备容量及节点规划约束

对于 WT、PV、EB 等同时考虑节点位置及配置 容量的设备,规划变量需满足如下约束:

$$0 \leq M_{k,l} \leq M_{k,l}^{\max} \cdot I_{k,l},$$

$$l \in \{WT, PV, EB, TES, EES\}$$
(26)

$$0 \leq \sum_{k \in N} I_{k,l} \leq I_l^{\max}$$
(27)

式中: $M_{k,l}^{\text{max}}$ 为第l类设备在节点k处的配置容量上限; $I_{k,l}$ 为0-1变量,表征第l类设备是否在节点k建设; I_{l}^{max} 为第l类设备可建设节点数量上限。

此外,考虑场地限制等因素,在单个节点上配置 的供能机组不能超过一台。

$$0 \leq \sum_{l} I_{k,l} \leq 1, \forall k \in N \cup Q$$

 $\forall l \in \{WT, PV, EES\} \cup \{EB, EBTES\}$ (28)

2) CHP 机组规划约束

$$0 \le M_k^{\text{CHP}} \le M_{k,\max}^{\text{CHP}} \tag{29}$$

2.3.2 运行约束

1)WT、PV 约束

$$0 \leqslant P_{i,\iota}^{\rm WT} \leqslant P_{i,\iota}^{\rm WT,pr} \tag{30}$$

$$P_{i,t}^{\mathrm{WT,pr}} = K_{i,t}^{\mathrm{WT}} M_i^{\mathrm{WT}}$$
(31)

$$0 \le P_{i,t}^{\rm PV} \le P_{i,t}^{\rm PV,pr} \tag{32}$$

$$P_{i,t}^{\mathrm{PV,pr}} = K_{i,t}^{\mathrm{PV}} M_i^{\mathrm{PV}}$$
(33)

式中, $K_{i,\iota}^{WT}$ 、 $K_{i,\iota}^{PV}$ 分别为风电和光伏机组载荷系数。 2)储能约束

对于电、热储能设备,典型日内任意时段运行变 量与规划变量需满足如下约束:

$$0 \leq \varphi_{i,t}^{\text{TESchr}} \leq M_{Pi}^{\text{TES}}, \quad i \in N$$
(34)

$$0 \leq \varphi_{i,t}^{\text{TESdis}} \leq M_{Pi}^{\text{TES}}, \quad i \in N$$
(35)

$$\mu_{\min}^{\text{TES}} M_{Si}^{\text{TES}} \leq S_{i,t}^{\text{TES}} \leq M_{Si}^{\text{TES}}, \quad i \in N$$
(36)

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{EESchr}} \leq M_{Pi}^{\text{EES}}, \quad i \in N$$
(37)

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{EESdis}} \leq M_{Pi}^{\text{EES}}, \quad i \in N$$
(38)

$$\mu_{\min}^{\text{EES}} M_{Si}^{\text{EES}} \leq S_{i,t}^{\text{EES}} \leq M_{Si}^{\text{EES}}, \quad i \in N$$
(39)

$$ES M^{\text{EES}} M^{\text{TES}} M^{\text{EES}} \oplus M_{Si}^{\text{EES}} \oplus M_{Si}^{\text{EES}}, \quad i \in N$$
(39)

式中: M_{Pi}^{TES} 、 M_{Pi}^{EES} 、 M_{Si}^{TES} 、 M_{Si}^{EES} 分别为电、热储能的出力 和蓄能容量规划变量; μ_{\min}^{TES} 、 μ_{\min}^{EES} 分别为电、热储能的 最小蓄能容量系数。

2.4 求解方法

上面提出的热-电综合能源系统协同优化配置 模型为混合整数二阶锥规划模型(mixed-integer second-order cone programming, MISOCP),可利用商 业求解器 Gurobi 9.1.1 建模并求解。

3 算例分析

3.1 输入数据

采用改进的 IEEE 33 节点配电网和 17 节点区 域热网测试系统^[21],系统网络结构如图 2 所示。电 网基准电压为 12.66 kV,电网基准容量为 100 MW, 上级电网通过节点 1 与配电网连接,上级电网交互 功率上限为 20 MW;区域热网测试系统包含 17 个 热网节点及 16 条热力管道,基准容量为 150 MW, 各管道预定义流量方向如图 2 区域热网中各支路箭 头所示,其中空心节点代表该节点无热负荷,实心节 点则表明该节点有热负荷,CHP 机组分别位于电网 节点 18 和热网节点 1 处。

待配置设备的相关参数见表 1,表中 e 表示对 应设备配置在配电网中的节点位置;h 表示对应设 备配置在区域热网中的节点位置,其中 TES 和 EES 除了可安装储存容量上限外还有充放功率上限。

风力发电与光伏发电的预测值采用文献[4]中的确定性预测数据,风力及光伏机组惩罚系数取 0.05,热网的松弛惩罚系数取0.04,进水温度为70℃, 回水温度为40℃,热水比热为4.182 kJ/(kg・℃)。



图 2 系统网络结构

表1 设备配置参数

设备	可接入节点	可安装容 量上限	价格/ (元・kW ⁻¹)	寿命/a
CHP	—	100 MW	4500	30
WT	(e) 1-16,18-33	50 MW	7000	25
PV	(e) 1-16,18-33	50 MW	12 000	25
EES	(e) 1-16,18-33	50 MWh 25 MW	1800	15
EB	(e) 1-16,18-33 (h)2,3,6,9, (2,3,16)	30 MW	1000	20
TES	(h)2,3,6,9, 12,13,16	100 MWh 25 MW	200	20

3.2 优化配置结果分析

为验证所提的协同配置策略及热网运行模型的 有效性,分别设置以下3种场景:

1)场景1:同时考虑设备配置容量及节点位置
 作为规划决策变量,热网运行决策变量中管道流向
 可变。

 2)场景2:采用传统规划策略,仅以设备是否 接入节点作为规划决策变量,运行决策变量中管道 的流向可变。

3)场景3:同时考虑设备配置容量及节点位置 作为规划决策变量,但热网运行决策变量中管道流 向固定不变,以所提预定义流量方向作为固定的管 道流向。

3种场景下的设备配置结果见表 2。场景 1 和 场景 3 中 CHP 机组的配置容量基本一致而比场景 2 少 9.89 MW;3 个场景中 WT 配置容量及数量均相同,

	ルタ	CHP	W	Т	Р	V		EES		El	В		TES	
场景	设备 编号	容量/MW	容量/ MW	位置	容量/ MW	位置	容量/ MWh	功率/ MW	位置	容量/ MW	位置	容量/ MWh	功率/ MW	位置
	1	77.76	50	e6	9.4	e20	15.13	14.12	e17	5.2	e32 h③		—	
场景1	2	_	50	e23	5	e21	49.31	17.71	e24	27.78	e17 h⑥	75.7	13.45	h6)
	3	—	50	e31	31.4	e22	39.67	18.06	e29	21.27	e16 h16		—	
	1	87.65	50	e1	50	e24	50	30	e8	30	e15 h③		—	
场景 2	2	_	50	e23	_	_	50	30	e17	30	e17 h⑥	100	27	h6)
	3	—	50	e31	—	_	50	30	e22	30	e16 h16		—	
	1	77.76	50	e5	7.96	e19	15.47	14.43	e17	10.2	e31 h3		—	
场景 3	2	—	50	e23	6.72	e21	49.58	17.4	e24	27.78	e17 h⑥	76.61	15.27	h6
	3	_	50	e31	32.12	22e	35.53	17.26	e29	17.26	e16 h16		_	

表 2 不同场景下设备配置结果

表 3 不同场景下的成本明细

场景	年投资成本/ 万元	年运行成本/ 万元	机组削减 成本/元	总成本/ 万元
场景1	14 486.41	46 202.44	1.68×10 ⁻²	60 688.85
场景 2	16 080.72	49 534.62	1.77×10^{6}	65 792.91
场景 3	14 529.23	46 513.87	1.14×10^{-3}	61 043.10

但各场景下配置的节点位置不同;场景 2 中其他设 备配置的总容量均大于场景 1 和场景 3;而场景 1 配置的 PV 总容量较场景 3 少 1 MW;至于 EES,场 景 1 则比场景 3 多配置了 3.5 MW;3 个场景在区域 热网中均采用两台 EB 及一台 EBTES 的组合配置方 式,而场景 1 中 EB 和 TES 配置的总容量分别比场 景 3 少 1.66 MW 和 0.91 MW。各场景下成本明细见 表 3。场景 1 的年规划成本和运行成本比场景 2 和 场景 3 低,但新能源机组削减成本略高于场景 3,由 于场景 2 中 PV 的配置容量较大导致新能源机组的 削减成本远高于其他两个场景。综合之下,场景 1 的总成本最低,场景 3 的总成本略有增高,而场景 2 的总成本与其他两个场景下的总成本的差异较大。

图 3 为各设备供电、供热结构图。由图 3(a)可 以看到场景 2 中购电比例为 5.32%,少于场景 1 和场 景 3 的 12.39%,这部分购电功率由其他供电设备替 代;场景 2 中 EES 的出力比例为 9.24%,大于场景 1 的 5.37%和场景 3 的 5.71%。图 3(b)中场景 2 的 TES 供热比例为 4.69%,大于场景 1 的 1.59%和场 景 3 的 1.57%。尽管场景 1 与场景 3 各设备的出力 比例接近,但场景 3 中总供电量和供热量较场景 1 分别多出 0.34 GWh 和 0.12 GWh。



3.3 规划策略对协同运行的影响

对比分析不同规划策略下的场景 1 与场景 2 中 典型日的运行结果以验证不同规划策略对 RIHES 协同运行经济性的影响。两场景下 CHP 及 PV 的 电出力如图 4、图 5 所示。由图 4 看到场景 2 下从上 级电网购电的供能比例降低,这部分功率主要由 CHP 和 PV 承担。由于场景 2 中 EES 配置容量过大 及其供能增加,导致其他电源不得不增加出力为 EES 储能,进而使得场景 2 下的设备总出力较大。 尽管图 5 中场景 2 的 PV 供能比例与场景 1 接近, 但由于场景 2 下 PV 配置容量较场景 1 大,因此在 运行周期内 PV 的实际出力比场景 1 多 24.26 MW, 而 CHP 的出力比场景 1 多 283.65 MW。





图 6 为两场景下各供热设备出力。场景 2 中 TES 同样由于配置容量较大比场景 1 多储热 62.5 MW; 但其 EB 及 EBTES 向区域热网的实际总供热功率比 场景 1 少了 6.99 MW,因此场景 2 中 CHP 热出力比 场景 1 多 6.99 MW 以补充这部分功率缺额。



图 6 场景 1 和场景 2 下供热设备热出力

综上,由于场景2配置容量固定策略下设备配 置容量较大,为了提高设备利用效率,一方面外购电 能供能降低以提高配置的供能设备的出力;另一方 面供能设备额外增加出力向储能装置充能,导致了 场景2的运行成本增加。

3.4 热网管道流向对协同运行的影响

对比分析管道流向可变的场景 1 与管道流向固 定的场景 3,验证管道流向对 RIHES 协同运行经济 性的影响。由于场景 3 中管道流向固定,导致两场 景中优化结果管道流量不同。以流量差别最大的管 道 L15 为例,两场景中该管道流量如图 7 所示,场景 1 中流量正负交替,表明场景 1 下该管道的流向在调 度周期内发生了两次变化;而场景 3 中流向固定不 变,导致部分时间流量较小,两场景均在区域热网节 点⑥处配置有 EB,场景 3 中节点⑥处的 EB 受到管 道流量限制,仅能向节点⑦处热负荷供能。因此在 该结点处 EB 的配置容量较小,转而增加了在节点 ③处的 EB 配置容量。两场景的购电功率见图 8,场 景 3 比场景 1 多购电 1.07 MW。



场景1中在管道 L15 处的流量为负的对应时刻 即为 EB 通过管道 L15 向其他热负荷传输热能。两 场景下节点⑩处 EB 注入功率如图 9(a) 所示,场景1 中节点⑩处 EB 供能比场景 3 多 16.12 MW,这部分 热功率在场景 3 中由配置在节点③处 EB 和 CHP 机 组提供;图 9(b)、(c)为两场景下 EB 和 EBTES 总 供热功率及 CHP 机组供热功率。与场景 1 相比, 场景 3 中 EB 和 EBTES 的总供热功率比场景 1 少 1.05 MW, 而 CHP 增加出力替代这部分功率。由于 流量限制进一步导致了 CHP 机组出力的增加和外购 电功率的增加使得场景 3 的运行成本略高于场景 1。



4 结 论

上面建立了考虑流向可变量调节运行方式下的 热网模型,通过松弛结合罚函数的方式将其转化为 二阶锥形式。进一步结合其他设备及电网潮流模 型,在传统经济性目标的基础上考虑新能源机组消 纳目标,建立了规划-运行联合优化模型(混合整数 二阶锥规划模型),该模型下的规划策略能够同时 优化多种设备接入节点的位置及其配置容量。通过 算例验证,得出以下结论:

 同时考虑设备配置容量及节点位置的规划 策略能够有效降低规划成本,并且能够避免部分容 量配置冗余的供能设备增加出力与储能装置进行多 余的能量转换,具有更好的经济性。

2) 流向可变的区域热网模型在提高 RIHES 的 经济性和运行灵活性方面具有优势。通过仅改变局 部管道的流向进而在就近节点负荷需求较低时将热 能传输给更多热负荷,增加供热机组的灵活性,能够 得到更经济的设备配置方案及运行方案。

参考文献

- [1] 汤木易,罗毅,胡博,等. 电热联合调度模型综述[J].
 电力系统保护与控制,2020,48(23):161-175.
- [2] 吕佳炜,张沈习,程浩忠,等.考虑互联互动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):4001-4021.
- [3] 雷金勇,郭祚刚,陈聪,等.考虑不确定性及电/热储能的综合能源系统两阶段规划-运行联合优化方法[J].电力自动化设备,2019,39(8):169-175.
- [4] 程杉,徐建宇,何畅,等.计及不确定性的综合能源
 系统容量规划方法[J].电力系统保护与控制,2021,
 49(18):17-24.
- [5] 曾博,徐富强,刘裕,等.考虑可再生能源与需求响应协同增效的能量枢纽多目标区间优化规划方法[J].中国电机工程学报,2021,41(21):7212-7225.
- [6] 孙强,高松,谢典,等. 协调可靠性与经济性的园区综合能源系统优化规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020,32(4):76-82.
- [7] 边晓燕,史越奇,裴传逊,等.计及经济性和可靠性因素的区域综合能源系统双层协同优化配置[J].电工技术 学报,2021,36(21):4529-4543.
- [8] 李军徽,付英男,李翠萍,等.提升风电消纳的储热
 电混合储能系统经济优化配置[J].电网技术,2020,
 44(12):4547-4557.
- [9] 代琼丹,杨莉,林振智,等.考虑功能区差异性和虚拟
 储能的综合能源系统多元储能规划[J].电力自动化设
 备,2021,41(9):182-190.
- [10] 崔全胜,白晓民,董伟杰,等.用户侧综合能源系统 规划运行联合优化[J].中国电机工程学报,2019, 39(17):4967-4981.
- [11] 白牧可,唐巍,吴聪,等. 基于热网-电网综合潮流的 用户侧微型能源站及接入网络优化规划[J]. 电力自 动化设备,2017,37(6):84-93.
- [12] 王珺,顾伟,陆帅,等.结合热网模型的多区域综合 能源系统协同规划[J].电力系统自动化,2016, 40(15):17-24.
- [13] 刁涵彬,李培强,吕小秀,等.考虑多元储能差异性的
 区域综合能源系统储能协同优化配置[J].电工技术
 学报,2021,36(1):151-165.

- [14] MITRIDATI L, TAYLOR J A. Power systems flexibility from district heating networks [C] //Power Systems Computation Conference, 2018:1-7.
- [15] 韩赫,张沛超,杜炜,等.量调节方式下区域热电系统的联合最优潮流[J].电力系统自动化,2021,45(2): 30-36.
- [16] HUANG S J, TANG W C, WU Q W, et al. Network constrained economic dispatch of integrated heat and electricity systems through mixed integer conic programming[J]. Energy, 2019, 179: 464-474.
- [17] LIU X Z, WU J Z, JENKINS N, et al. Combined analysis of electricity and heat networks [J]. Applied Energy, 2016,162:1238-1250.
- [18] MCCORMICK Garth P. Computability of global solutions to factorable nonconvex programs: Part I —Convex underestimating problems[J]. Mathematical Programming, 1976,10(1):147-175.
- [19] CAO Y, WEI W, WANG J H, et al. Capacity planning of energy hub in multi-carrier energy networks: A

(上接第14页)

- [9] 杨媛平,杨扬,全相军,等."光伏扶贫"场景下配电网 台区电压质量综合治理方案研究[J].浙江电力,2022, 41(9):40-49.
- [10] 江秀臣,许永鹏,李曜丞,等.新型电力系统背景下的输 变电数字化转型[J].高电压技术,2022,48(1):1-10.
- [11] 中电联:2023年度全国电力供需形势分析预测报告 [EB/OL].(2023-1-19)[2023-06-30].http:// www.indaa.com.cn/zz/nypl/=nyp l202302/202302/ P020230216513268767807.pdf.
- [12] CHOEUNG Chivon, KRY Meng Leang, LEE Young-II. Robust Tracking Control of a Three-Phase Bidirectional Charger for Electric Vehicle[J/OL]. Journal of Advanced Transportation, 2022, Carpus ID:251996578[2023-06-30]. https://semanticschoolar.org/parer/Robust-Tralking-Control-of-a-Three-Phase-Charger-Choeung-Kry/ 02594013452c46c2e72853fac44ce1197c9cbfb3.
- [13] 张慧,李健,吴青青,等.虚拟电厂通信网络体系架构 及通信方式适配方法[J].电力信息与通信技术, 2022,20(12):47-54.
- [14] 张逸,吴逸帆,陈晶腾.新型电力系统背景下电压暂
 降风险评估技术挑战与展望[J].电力建设,2023,44(2):15-24.

data-driven robust stochastic programming approach[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2020,11(1): 3-14.

- [20] 赵剑波,王蕾."十四五"构建以新能源为主体的新型 电力系统[J].中国能源,2021,43(5):17-21.
- [21] 葛晓琳,王云鹏,朱肖和,等.计及差异化能量惯性的 电-热-气综合能源系统日前优化调度[J].电网技 术,2021,45(12):4630-4642.

作者简介:

邓靖微(1996),女,硕士,助理工程师,从事电力系统规 划工作;

曹敏琦(1995),女,硕士,助理工程师,从事电力系统规 划工作;

晁化伟(1995),男,硕士,工程师,从事新能源并网工作;

陈大为(1993),男,博士研究生,研究方向为电力能源 系统规划与运行;

胡 涛(2000),男,硕士研究生,研究方向为电力系统 规划。

(收稿日期:2023-06-06)

- [15] 马睿,程硕.新型电力系统面临的挑战以及有关机制 探讨[J].工程建设与设计,2022(23):242-244.
- [16] 周劼英,张晓,邵立嵩,等.新型电力系统网络安全防护 挑战与展望[J].电力系统自动化,2023,47(8):15-24.
- [17] 国家能源局.新型电力系统发展蓝皮书[M].北京:中国电力出版社,2023.
- [18] 林原,顾涛,仇向东,等.分布式光伏对户用配电网电能 质量影响研究[J].电子器件,2023,46(2):561-566.
- [19] 王黄磊,江涛,吴玉玲,等.计及新能源并网发电的配电 网电能质量分析[J].电气自动化,2021,43(4):20-23.
- [20] 郭小江,郑超,尚慧玉,等.西藏中部同步电网安全稳 定性研究[J].电网技术,2010,34(6):87-92.
- [21] 李相俊,马会萌,姜倩.新能源侧储能配置技术研究综述[J].中国电力,2022,55(1):13-25.

作者简介:

范荣全(1966),男,硕士,正高级工程师,研究方向为柔 性输电、智能电网、设备在线监测、电网防灾减灾、新型电力 系统等方面的科学理论和工程应用;

杨 云(1975),男,硕士,高级工程师,研究方向为新型 电力系统、智慧配电网等方面的规划与应用;

许 珂(1991), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为新型电力 系统发展模式和数字化转型。

考虑水电制氢的水-氢综合能源系统容量规划

李 华¹,唐 瑀¹,杨欣宇²,谢传胜¹,张晓春¹,曾 博²

(1. 华北电力大学经济与管理学院,北京 102206;

2. 华北电力大学电气与工程学院,北京 102206)

摘 要:为促进"双碳"目标的实现,将水电系统与氢能相结合可提高水电资源利用率、降低制氢成本,并提升能源系统的清洁程度,助力中国实现能源转型。为此,构建了一个考虑水电制氢的水-氢综合能源系统双层规划模型。在上层中,目标是最大程度降低系统成本,提高系统制氢、储氢能力以及燃料电池性能。而在下层中,目标是最大限度减少日常运行中的负荷损失,以提高综合能源系统中所有设施的利用率。通过综合考虑这两个层面的目标,优化系统的设计和运行策略。最后,以某水电站实际运行数据为基础进行了算例分析。结果显示,氢能设施建立后降低系统成本19.08%,减少弃水流量53.12%,提升了水电站的利用效率,从而验证了所建模型的合理性与有效性。 关键词:氢能;水电制氢;容量优化配置;综合能源系统;k-medoids聚类算法 中图分类号:TM 71 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)06-0059-08

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230609

Capacity Planning for Water-Hydrogen Integrated Energy Systems Considering Hydro-electricity Hydrogen Production

LI Hua¹, TANG Yu¹, YANG Xinyu², XIE Chuansheng¹, ZHANG Xiaochun¹, ZENG Bo²

(1. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206,

China; 2. School of Electrical and Engineering, North China Electric Power

University, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to promote the realization of dual-carbon goal, the combination of hydropower system with hydrogen energy can improve the utilization rate of hydropower resources, reduce the cost of hydrogen production, and enhance the cleanliness of energy system to help China realize the energy transition. To this end, a two-layer planning model for an integrated water-hydrogen energy system considering hydro-electricity hydrogen production is constructed. In the upper layer, the goal is to minimize the system cost and improve the system hydrogen production and storage capacity as well as fuel cell performance. While in the lower level, the goal is to minimize load losses in daily operations to improve the utilization of all facilities in the integrated energy system. By considering the objectives at both levels together, the design and operation strategy of the system is optimized. Finally, an arithmetic analysis is carried out based on the actual operational data of a hydropower plant. The results show that the establishment of hydrogen facilities reduces the system cost by 19.08% and the abandoned water flow by 53.12%, which improves the utilization efficiency of hydropower plant, thus verifying the rationality and validity of the proposed model.

Key words: hydrogen energy; hydro-electricity hydrogen production; optimal capacity allocation; integrated energy system; k-medoids clustering algorithm

0 引 言

氢能作为一种高效、清洁、可再生的能源形式, 在交通、工业、发电和储能等领域具有巨大的应用潜 力^[1-2]。随着氢能技术的发展和应用,越来越多的 国家将氢能纳入能源发展战略,以实现能源结构转 型和碳减排。2022年,中国发布了《氢能产业发展 中长期规划(2021-2035年)》,将氢能视为未来国 家能源体系的重要组成部分,提出要构建清洁化、低 碳化、低成本的多元制氢体系,重点发展可再生能源 制氢。中国西南地区拥有丰富的可再生资源,尤其 是水力资源。根据《四川省氢能产业发展规划 (2021-2025年)》数据,截至2019年,四川水电装 机容量 76 960 MW,其中 2019 年全省调峰弃水电量 达9200 GWh,电解水制氢潜力巨大。在此背景下, 将电力制氢系统与其他可再生能源发电系统相结 合,可以在不放弃可再生能源资源的情况下生产氢 气,这不仅可以降低制氢成本,还可以提高可再生能 源利用率^[3-4]。

在"双碳"目标的背景下,电网系统中可再生能 源发电比例快速增长,电解水制氢成本有望进一步 降低^[5-6]。为了提高可再生能源的利用效率,同时 降低制氢成本,人们开始研究将氢能系统与可再生 能源发电系统相结合的方式。文献[7-9]研究了在 各种需求增长和技术干预情景下,可再生能源制氢的 潜力和经济可行性,以及对碳减排的影响。文献[10] 提出利用氢储能系统提高风电并网调度计划可信度 的方法,并建立了氢储能系统全寿命周期的经济效 益计算数学模型,验证了该方法的可行性以及经济 性。以上文献大多是为了解决氢能系统与可再生能 源发电系统相结合的经济性和可行性问题。

目前,很多国内外学者对考虑电解水制氢的综 合能源系统的容量规划方案开展了研究。文献[11] 提出了一种光伏制氢的办法,构建了以最小化弃光 为目标的电网调度确定模型,确定了氢能系统的并 网方式以及最佳容量配置。文献[12-13]将氢能系 统视为负荷,以最小化年化成本为目标,在满足电力 平衡和各方面要求的前提下,建立了考虑氢负荷的 电源规划模型。以上文献研究风光发电制氢问题, 但是水电制氢与风光发电制氢有很大不同。水力发 电时功率波动较小,可以通过调节储存和释放天然 水来发电,比风光等发电方式更稳定;同时,水力发 电具有明显的季节特征,在雨季和旱季时有较大的 差别。也有一些学者对水电制氢的能源系统容量规 划问题展开研究。文献[14]研究孤立电网下的综 合能源系统容量规划问题,但是孤立电网较少,所提 容量规划方法的适用范围较小。文献[15]建立了 梯级水电站并网情况下的水电制氢系统双层容量规 划模型,但是未考虑水电站库容问题,存量水电不能 充分利用。目前的水电制氢容量规划研究大多限定 了某个特殊应用场景,在考虑氢能系统建设对可再生 能源资源利用率的影响方面关注较少,对依托存量水 电进行氢能系统容量配置的研究也存在不足。

鉴于此,基于水电制氢的思路,充分利用水电的 灵活调节能力和水能资源,构建了水-氢综合能源 系统容量双层规划模型。该模型旨在在合理的范围 内配备一定规模的氢能设施,以提高水电资源的利 用效率、降低制氢成本,并促进水电开发和绿色制氢 技术的应用。最后,以某地区水电站的实际运行数 据为基础进行了算例分析,结果验证了所提模型的 合理性与有效性。

1 典型日选取

随着氢能在实现"双碳"目标过程中扮演的角 色不断加强,对氢气生产的可持续性和可变性的需 求将不断增强。在不额外增加火电等灵活性资源的 前提下,需认真考虑可再生能源发电量严重不足以 及在特定且不常见的极端情况下,综合能源系统也能 正常运行^[16]。为此,引入了一种改进的 k-medoids 聚类算法的典型日聚类分析方法。该方法能够更加 全面地选择典型日和异常日,以更精确地反映实际 情况,为水电站和综合能源系统的运营、规划和优化 提供更为精准的数据支持。

设: {1,…, N_d } 表示一年中每日的集合, N_d = 365; {1,…, N_h } 表示以 15 min 为时间间隔每日时间 点集合, N_h =24×4; {1,…, N_a } 表示聚类的属性包括本 地负荷、入库流量等的集合, N_a 为 a 属性序号; N_k 表示 预定义的数组; Ω_T = {1,2,…,T} 为一天中的时间段 集合,T 为一天内的总时段数。

1.1 k-medoids 聚类算法

k-medoids 聚类算法旨在从每个簇内选择一个 实际时段作为代表,即中心点。这一问题可以被 形式化为混合整数线性规划(mixed-integer linear programming, MILP)^[17]。初始步骤为计算每对元素 之间的欧几里得距离,计算方式为

$$d_{i,j} = \sqrt{\sum_{h=1}^{N_h} \sum_{a=1}^{N_a} (x_{a,h,i} - x_{a,h,j})^2}, \quad \forall i,j \in \{1, \cdots, N_d\}$$
(1)

式中, $x_{a,h,i}$ 和 $x_{a,h,j}$ 分别为簇中第i,j日h时刻a属性数据。

接下来, MILP 问题可以表述为

$$\min \sum_{i=1}^{N_{\rm d}} \sum_{j=1}^{N_{\rm d}} d_{i,j} \cdot z_{i,j}$$
(2)

约束为

$$\sum_{j=1}^{N_{\rm d}} z_{i,j} = 1, \quad \forall i \in \{1, \cdots, N_{\rm d}\}$$
(3)

$$z_{ij} \leq y_i, \quad \forall i,j \in \{1,\cdots,N_d\}$$
(4)

$$\sum_{i=1}^{a} y_i = N_k \tag{5}$$

式中:*z_{i,j}*为 0-1 变量, 当*j*日被选典型日*i*时,变量 *z_{i,j}*等于 1, 否则为 0; *y_i*为 0-1 变量, 当典型日*i* 被选 为其簇的代表时, 变量 *y_i* 等于 1, 否则为 0。约束(3) 确保每年的每一天对应一个典型日。约束(4) 强制 *j*日只能分配给典型日*i*。约束(5) 保证恰好选择了 *N_d* 天作为典型日。

k-medoids 聚类算法通过从原始时间序列中提 取实际值来定义代表性周期,这一过程保留了季节 性和日相关性等多种属性,从而更准确地反映了实 际情况。然而,根据聚类的规模,代表性周期的重复 出现可能导致任何属性的月度或年度总值与原始数 据集计算的值相差较大,特别是在典型日数量较少 的情况下。这意味着,只有在生成足够多的聚类时, 优化问题中的运行成本才能成为可靠的度量指标。

1.2 改进的 k-medoids 聚类算法

引入一种改进的 k-medoids 聚类算法,旨在同时 识别极端日和典型日。为了能够自动从聚类中排除 特定日期,对 k-medoids 聚类算法的约束条件式(3) 进行了修改,见式(6)。

$$\sum_{j=1}^{N_{\rm d}} z_{i,j} \leq 1, \forall i \in \{1, \cdots, N_{\rm d}\}$$

$$(6)$$

式中,当*j*日被候选*i*日选为代表时,变量*z_{i,j}*等于1, 否则为0。此调整消除了每年的每一天都对应一个 典型日的要求,从而允许识别未聚类的极端日。为 了防止所有日子被分类为极端的平凡解,引入了约 束条件式(7)。

$$\sum_{i=1}^{N_{\rm d}} \sum_{j=1}^{N_{\rm d}} z_{i,j} = N_{\rm d} - N_{\rm ED}$$
(7)

式中,NED为预定的极端日数量。

改进的 k-medoids 聚类算法能够自动识别一年 中最为"非典型"的日子,并将其标记为极端日。这 些非典型的日子往往无法被典型日准确表示,因为 这些非典型日常常包含着与典型日相异的能源系统 特征。

此外,还引入了约束条件式(8),该约束条件确 保对于一些选定的属性 *a* ∈ *A*^{peak},算法选择的至少一 个极端时段包含数据集中的最高峰值(或接近最高 峰值)。

$$\sum_{j=1}^{N_{d}} \mathbf{m}_{a,j} \cdot \mathbf{max}_{h} x_{a,h,j} \ge \lambda_{d}^{\text{PEAK}} \cdot \mathbf{max}_{d,h} x_{a,h,j}, \forall a \in A^{\text{peak}}$$
(8)

式中: λ_{d}^{PEAK} 为实值,表示用极端天数表示的峰值的 比例,可取值 90%~100%。 $m_{a,j}$ 为一个二元变量,当 选择j日作为属性a的极端日时等于 1,否则等于 0;max_h $x_{a,h,j}$ 为第j日中属性a的最大值;max_{d,h} $x_{a,h,j}$ 为一年中属性a的最大值。

总之,式(1)一式(8)共同定义了支持所提改进的 k-medoids 聚类算法。

2 考虑水电制氢的综合能源系统容量 规划模型

2.1 系统架构

结合氢能系统和电力系统,考虑水电制氢的 水-氢综合能源系统基本架构如图1所示。



该系统由电力系统和氢能系统组成。电力系统 包括水电站和电负荷,而氢能系统包括制氢设备 (electrolyzers,EL)、储氢装置(hydrogen storage tank, HST)和燃料电池(hydrogen fuel cells,HFC)等氢气 设施。EL 在直流电的作用下将水分解以制取氢气, HFC 直接将氢燃料的化学能转化为电能。EL 和 HFC 在氢能系统中起着关键作用,实现电能和氢能 的相互转换,并通过 HST 存储产生的氢能。整个系 统的初始能源是水电站,水电站满足日常基本负荷 需求的同时,利用多余的水电进行制氢。制得的氢 能不仅可以作为负荷需求的补充,弥补水力发电不足 的情况,还可以通过氢能市场销售,获取经济利益。

2.2 双层模型

考虑水电制氢的综合能源系统容量规划模型容 量规划模型框架如图 2 所示。



图 2 水-氢综合能源系统容量规划模型框架

该模型上层结构为规划层,目标是最小化总系 统成本;下层结构为运行层,目标是最小化运行负载 损失。该模型的设计流程为:首先,在上层模型中, 根据总系统成本最小化目标,确定系统的容量配置 方案;然后,将得到的方案作为约束条件代入下层模 型中,并在下层模型中,考虑该方案下的负荷损失, 并计算出相应的惩罚成本;接下来,将下层模型的结 果反馈回上层模型,上层模型根据这些结果对容量 配置方案进行修改;随后,再将修改后的方案带入下 层模型中进行计算,如此循环迭代,直到得到使系统 总成本最小的容量配置方案为止。

2.2.1 上层模型

1)目标函数

上层综合考虑 EL、HST 和 HFC 等氢气设施的 建设、运营成本以及负荷损失的惩罚成本,目标函数 为最小化总投资成本。

$$\min C = C_{\rm b} + C_{\rm m} + C_{\rm L} \tag{9}$$

式中: $C_{\rm b}$ 为氢气设施的年度建设成本; $C_{\rm m}$ 为氢气设施的年度运营和维护成本; $C_{\rm L}$ 为负荷损失的年度惩罚成本。

$$C_{\rm b} = \frac{r(1+r)^{y}}{(1+r)^{y} - 1} (C_{\rm el}U^{\rm el} + C_{\rm st}U^{\rm st} + C_{\rm fc}U^{\rm fc})$$
(10)

$$C_{\rm m} = C_{\rm mel} U^{\rm el} + C_{\rm mst} U^{\rm st} + C_{\rm mfc} U^{\rm fc}$$
 (11)

$$C_{\rm L} = D \times \sum_{\iota=1}^{T} P_{\lambda} \times E_{\iota}^{\lambda}$$
(12)

式中:r 为折现率;y 为设施的寿命周期年限; U^{el} 、 U^{st} 和 U^{fe} 分别为 EL、HST 和 HFC 的额定功率或者额定容量; C_{el} 、 C_{st} 和 C_{fe} 分别为 EL、HST 和 HFC 的单位容量建设成本; C_{mel} 、 C_{mst} 和 C_{mfe} 分别为 EL、HFC 和 HST 的单位容量年运行和维护费用; P_{λ} 为惩罚电价; E_{i}^{λ} 为t时刻负荷损失。

2)约束条件

$$0 \le U^{\rm el} \le U^{\rm el}_{\rm max} \tag{13}$$

$$0 \leqslant U^{\rm st} \leqslant U_{\rm max}^{\rm st} \tag{14}$$

$$0 \leqslant U^{\rm fc} \leqslant U^{\rm fc}_{\rm max} \tag{15}$$

式中, $U_{\text{max}}^{\text{el}}$ 、 $U_{\text{max}}^{\text{st}}$ 和 $U_{\text{max}}^{\text{fc}}$ 分别为 EL、HST 和 HFC 的最 大规划功率或容量。

2.2.2 下层模型

1)目标函数

模型下层的目标函数是在典型场景下最小化日常运行负载损失。

$$\min C_{\mathrm{L,d}} = P_{\lambda} \times E_{\lambda} \tag{16}$$

式中, E, 为每日总负荷损失。

$$E_{\lambda} = \sum_{i=1}^{T} E_{i}^{\lambda} \tag{17}$$

$$E_t^{\lambda} = L_t + G_t^{\text{el}} - G_t^{\text{W}} - G_i^{\text{fe}}, \forall t \in \Omega_T \quad (18)$$

$$G_{\iota}^{\mathsf{w}} = \lambda \times h_{\iota} \times Q_{\iota}^{\mathsf{w}}, \forall t \in \Omega_{T}$$

$$(19)$$

$$Q_t^{\rm el} = G^{\rm el} \times \alpha, \, \forall \, t \in \Omega_T \tag{20}$$

$$G_t^{\rm fc} = Q_t^{\rm fc} \times \boldsymbol{\beta}, \, \forall \, t \in \boldsymbol{\Omega}_T \tag{21}$$

式中: G_{ι}^{W} 为t时刻水电出力; λ 为水电系数; h_{ι} 为 t时刻水电站的净水头; Q_{ι}^{W} 为t时刻发电流量; Q_{ι}^{el} 为t时刻 EL 产氢量; G_{ι}^{el} 为t时刻 EL 制氢用电量; α 为 EL 单位耗电量产氢系数; G_{ι}^{fe} 为t时刻 HFC 发 电量; Q_{ι}^{fe} 为t时刻 HFC 耗氢量; β 为 HFC 单位产电 量耗氢系数;L,为预测电负荷。

2) 约束条件

为保证水-氢综合能源系统安全稳定和高效运行, 需要针对水电机组、HFC 和 EL 运行状态进行约束。

①水电站运行状态约束

$$V_{t} = V_{t-1} + 3600 \times (Q_{t}^{N} - Q_{t}^{W} - Q_{t}^{L})\Delta_{T} \quad (22)$$
$$V_{\min} \leq V_{t} \leq V_{\max}, \forall t \in \Omega_{T}, t \neq 1 \quad (23)$$

$$V_0 = V_{24}$$
 (24)

$$Q^{\text{Omin}} \leq Q_t^{W} + Q_t^{L}, \forall t \in \Omega_T$$
(25)

$$G_{\iota}^{W} \leq G^{hy}, \forall t \in \Omega_{T}$$
 (26)

$$P_{\rm rdn} \leqslant G_t^{\rm W} - G_{t-1}^{\rm W} \leqslant P_{\rm rup}, \forall t \in \Omega_T \qquad (27)$$

$$H_t = c_1 V_t + c_2, \forall t \in \Omega_T$$
(28)

$$H_{\min} \leq H_t \leq H_{\max}, \forall t \in \Omega_T$$
(29)

式中: V_t 为 t 时刻的水电站库容; V_{max} 和 V_{min} 分别为 水电站安全运行的最大和最小库容; V_0 和 V_{24} 分别 为初始时刻库容和结束时刻库容,两者相等以保证 水风光系统运行策略的可持续性; Q_t^L 、 Q_t^N 分别为 t 时刻水电站的弃水流量和入库流量预测值; Δ_T 为最 小时间间隔,取 15 min; Q^{0min} 为水电站维持生态环境 所需的最小下泄流量; G^{hy} 为水电站装机功率; P_{rup} 、 P_{rdn} 分别为水电站的向上、向下爬坡速率; H_t 为 t 时 刻水电站的水位; H_{max} 和 H_{min} 为水位的最大和最小 值; c_1 、 c_2 为水电站库容与水位函数关系的系数。

②EL 约束

$$0 \leq G_t^{\rm el} \leq U^{\rm el}, \, \forall \, t \in \Omega_T \tag{30}$$

EL 制氢量小于 EL 的额定容量。

③HFC 约束

$$0 \leq G_t^{\text{fc}} \leq U^{\text{fc}}, \forall t \in \Omega_T \tag{31}$$

与 HFC 的额定功率相比, HFC 每小时产生的功率更少。

④HST 约束

HST 实时的储氢量 S_{ι}^{H} 等于 EL 历次产氢量与 HFC 耗氢量之差的累加。

$$S_{t}^{\mathrm{H}} = \sum_{t=1}^{T} \left(Q_{t}^{\mathrm{el}} - Q_{t}^{\mathrm{fc}} \right), \forall t \in \Omega_{T}$$

$$(32)$$

$$0 \leq Q_t^{\rm el} \leq S_t^{\rm H}, \, \forall t \in \Omega_T \tag{33}$$

$$0 \leq Q_t^{\text{\tiny IC}} \leq S_t^{\text{\tiny H}}, \, \forall t \in \Omega_T \tag{34}$$

EL产氢量以及 HFC 耗氢量少于 HST 实时的储 氢量。

$$S_0^{\rm H} = 0.01 \times U^{\rm st}$$
 (35)

$$0 \leq S_t^{\rm H} \leq U^{\rm st}, \,\forall t \in \Omega_T \tag{36}$$

HST 实时的储氢量少于 HST 的额定容量。

⑤不确定性约束

入库流量和电负荷由于自然资源和用户用电需 求的不确定性,预测值往往与实际存在一定偏差。 因此,需要对预测误差率进行建模,可描述为式(37) 和式(38)。

$$\frac{\dot{\psi}_{t}}{\psi_{t}} = 1 + \varepsilon \times (0.5 - \gamma), \forall t \in \Omega_{T} \quad (37)$$

$$\frac{\dot{\delta}_{t}}{\delta_{t}} = 1 + \varepsilon \times (0.5 - \gamma), \forall t \in \Omega_{T} \quad (38)$$

式中: $\dot{\psi}_{t}$ 和 ψ_{t} 分别为t时刻入库流量的预测值和实际值; γ 为0~1之间的随机数; ε 为设定的入库流量预测误差率,其取值越接近于0表示误差率越小; $\hat{\delta}_{t}$ 和 δ_{t} 分别为t时刻电负荷的预测值和实际值。该式可以对预测值与实际值之间既存在正偏差也存在负偏差的情况进行较好地模拟。

所建模型采用 Python 3.10 与 Gurobi 10.0.1 求 解器进行求解。

3 算例分析

3.1 基础数据

以某流域水电站为例进行算例分析。该水电站 设计装机容量为 2×150 MW,设计多年平均发电量 为 360 GWh,多年平均径流量为 1.425×10⁹ m³,总库 容为 1.82×10⁹ m³,具备年调节能力。该流域参数取 值如表 1 所示。考虑电负荷和水电资源不确定性设 置预测误差为 10%^[18]。

表1 参数取值情况

参数	取值
设备寿命周期 y/a	20
折现率 r	0.067
水电站的爬坡速率 P_{rup} 和 $P_{rdn}/(kW \cdot min^{-1})$	20 000
库容最大值 V _{max} 和最小值 V _{min} /(10 ⁸ m ³)	18.2,5.0
λ	8.6
水电站最小下泄流量 $Q^{0\min}/(m^3 \cdot s^{-1})$	8
水电站水位的最小值 L_{\min}/m	290
库容与水位的函数系数 c_1 、 c_2	3.58×10 ⁻⁴ 229.26
α	6.6
β	6.3
D∕ d	30

为充分了解全年流量变化和负荷变化对长期容量规划的影响,根据历史来水与负荷需求曲线,通过第1.2节中改进的 k-medoids 聚类算法的典型日聚 类分析方法,从每个季度 90 天中选取 3 个典型 日,同时保证每月各有一个典型日代表,共选取 12个典型日,其入库流量数据和本地负荷数据如 图 3 和图 4 所示。





由图 3 可知:从全年来看,该区域入库流量在第 6~7 个典型日达到高峰,处于雨季时期,第1、2 个典 型日入库流量较少;从每天来看,该区域傍晚来水较 多,凌晨时分来水较少。



图 4 典型日负荷曲线

由图 4 可知:1) 从全年来看,6 月为用电高峰 期,此时处于夏季高温期,用电量较大;11 月和 12 月用电量也较多,主要是因为冬季供暖;3、4 月用电 量较少,处于负荷低谷区。2) 从每天来看,10:00— 13:00、15:00—17:00 和 19:00—20:00 为用电负荷 高峰期,0:00—7:00 为用电低谷期,这与工作休息 周期高度重合。

氢设施的成本参数如表2所示。

设置惩罚电价为分时电价的 10 倍^[14-19],根据 该地区分时电价政策得到各典型日各时刻电价 如图 5 所示。

表 2 氢设施的成本参数

项目	投资	运行维护
EL 単位成本/(元・kW ⁻¹)	6300	236
HFC 単位成本/(元・kg ⁻¹)	3000	132
HST 单位成本/(元・kW ⁻¹)	25 000	127



图 5 分时电价

3.2 水-氢综合能源系统容量配置结果

依据第 2.2 节的模型求解得到水-氢综合能源 系统的容量规划结果,如表 3 所示。

表 3 系统规划结果

参数	规划结果
EL 容量/kW	1 921.30
HST 容量/kg	12 680.56
HFC 容量/kW	79 887.55
年度建设成本/万元	5 244.35
年度运营和维护成本/万元	1 260.90
失负荷惩罚成本/万元	192.48
总成本/元	6 697.73
弃水流量/(10 ⁴ m ³)	11 482.70

由表 3 数据可以看出,EL、HST 和 HFC 的规划容 量分别为 1 921.30 kW、12 680.56 kg 和 79 887.55 kW, 系统总成本为 6 697.73 万元。其中建设成本比例为 78.30%,这也是阻碍氢能发展的主要因素。

为了进一步分析水-氢综合能源系统的优势, 对该系统在最佳容量配置下的负荷平衡情况进行了 研究,如图6所示。

由图 6 可知,6 月份水电出力最大,但由于此时 负荷需求也较强,仍需要借助 HFC 发电来满足额外 的负荷需求。水电在中午借助 HFC 发电来满足额 外的负荷需求,在下午来水较多的时候则利用多余的来水进行制氢。



3.3 影响分析

表 4

为分析建立氢能设施的影响,对比建立氢能设 施前后水能利用效率和成本差异,如表4所示。

氢能设施建立前后对比分析

参数	建立后	建立前
年度建设成本/万元	5 244.35	0
年度运营和维护成本/万元	1 260.90	0
失负荷惩罚成本/万元	192.48	8 269.58
总成本/万元	6 697.73	8 269.58
弃水流量/(10 ⁴ m ³)	11 482.70	24 495.34

由表4可得,建立氢能设施后,较好地优化了水 电的出力情况,使得负荷损失减少,使系统成本降低 19.08%。同时,也使得水能利用效率提升,弃水流 量减少53.12%。

计算得到建立氢能设施后水电站库容变化情况 如图 7 所示。



由图 7 可以看出,建立氢能设施后,水库库容年 际变化增强,日变化减少,水电通过水库实现长、短 多时间尺度内的调节互补,水电站的出力变得更稳 定,季度调节能力显著增强。同时,氢能设施的建立 也能够提高水电站的利用效率,主要体现在氢能在 水力匮乏季节和时段补充出力不足,改善了水电丰 枯季节悬殊的特性,使得水库夏季抗洪压力降低、冬 季电力支撑能力提升。

综上可得,建立水-氢综合能源系统,实现水-氢动态联动,能够降低系统成本,同时能够提升水能 利用率,推动水电资源的开发利用。同时,随着氢能 产业的发展以及水电的进一步开发,水-氢综合能 源系统有更加广阔的前景。

4 结 论

上面为应对西南地区提高水电利用率和推动水 电开发的需求,提出了水-氢综合能源系统的基本 架构,并建立了考虑水电制氢的水-氢综合能源系 统容量规划模型。通过实际水电数据的案例仿真和 分析,结果表明,充分利用存量水电的水-氢综合能 源系统相比传统的水电能源系统,可以有效降低系 统总成本、提高水能利用效率,并减少弃水。这为基 于存量水电的综合能源系统建设提供了新的思路。

然而,该模型未综合考虑建立氢能系统的收益, 仅仅考虑了成本因素,对水-氢能源系统的社会效 益考虑不足。随着氢能产业的发展和氢能需求的提 升,相信水-氢能源系统将能够发挥更大的作用。 进一步研究应该综合考虑经济效益、环境效益和社 会效益,以全面评估水-氢能源系统的潜力和优势。

参考文献

- [1] LEBROUHI B E, DJOUPO J J, LAMRANI B, et al. Global hydrogen development - A technological and geopolitical overview [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(11):7016-7048.
- [2] WU L, SUN L, QI P, et al. Energy endowment, industrial structure upgrading, and CO₂ emissions in China: revisiting resource curse in the context of carbon emissions [J].

Resources Policy, 2021, 74: 102329.

- [3] BAMISILE O, LI J, HUANG Q, et al. Environmental impact of hydrogen production from Southwest China's hydro power water abandonment control [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(46): 25587–25598.
- BODAL E F, KORPAS M. Value of hydro power flexibility for hydrogen production in constrained transmission grids[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(2): 1255-1266.
- [5] 潘光胜,顾钟凡,罗恩博,等.新型电力系统背景下的电制氢技术分析与展望[J/OL].电力系统自动化:1-15
 [2023-05-13].https://kns-cnki-net.webvpn.ncepu.edu.cn/kcms/detail/32.1180.TP.20230208.1033.001.html.
- [6] 刘玮,万燕鸣,熊亚林,等.碳中和目标下电解水制氢
 关键技术及价格平准化分析[J].电工技术学报,
 2022,37(11):2888-2896.
- [7] NADALETI W C, DOS SANTOS G B, LOURENCO V A. The potential and economic viability of hydrogen production from the use of hydroelectric and wind farms surplus energy in Brazil: A national and pioneering analysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(3): 1373-1384.
- [8] GYANWALI K, BHATTARAI A, BAJRACHARYA T R, et al. Assessing green energy growth in Nepal with a hydropower-hydrogen integrated power grid model [J]. International journal of hydrogen energy, 2022, 47(34): 15133-15148.
- [9] BODAL E F, MALLAPRAGADA D, BOTTERUD A, et al. Decarbonization synergies from joint planning of electricity and hydrogen production: a Texas case study[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(58): 32899-32915.
- [10] 蔡高雷,刘桂龙,蔡静静.提高风电并网系统调度计划 可信度的 HESS 经济效益计算[J].四川电力技术, 2023,46(1):30-38.
- [11] YANG Y, MA C, LIAN C, et al. Optimal power reallocation of large-scale grid-connected photovoltaic power station integrated with hydrogen production [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 298: 126830.

[12] 袁铁江,孙传帅,谭捷,等.考虑氢负荷的新型电力系

统电源规划[J].中国电机工程学报,2022,42(17): 6316-6326.

- [13] 王宸,沈培锋,程浩忠,等.新型负荷接入环境下的配电
 网分布式电源规划[J].水电能源科学,2015,33(8):
 178-182.
- [14] HUANG Y S, SHI M S, WANG W Y, et al. A two-stage planning and optimization model for water-hydrogen integrated energy system with isolated grid[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 313: 127889.
- [15] HUANG J S, LI W, WU X Y, et al. A bi-level capacity planning approach of combined hydropower hydrogen system[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 327: 129414.
- [16] MIKOVITS C, WETTERLUND E, WEHRLE S, et al. Stronger together: Multi-annual variability of hydrogen production supported by wind power in Sweden [J]. Applied Energy, 2021, 282: 116082.
- [17] KOTZUR L, MARKEWITZ P, ROBINIUS M, et al. Impact of different time series aggregation methods on optimal energy system design [J]. Renewable energy, 2018, 117: 474-487.
- [18] KONG F, MI J H, WANG Y W. A two-stage distributionally robust optimization model for optimizing water-hydrogen complementary operation under multiple uncertainties[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 378: 134538.
- [19] 熊宇峰,司杨,郑天文,等.考虑热电综合利用的光伏
 储氢独立供能系统容量优化配置[J].中国电力,
 2020,53(10):66-73.

作者简介:

李 华(1999),男,硕士研究生,研究方向为综合能源 系统、供应链管理等;

唐 瑀(1999),女,硕士研究生,研究方向为金融学;

杨欣宇(2000),女,硕士研究生,研究方向为综合能源 系统;

谢传胜(1965),男,硕士生导师,教授,研究方向为综合 能源系统;

张晓春(1972),女,研究生导师,副教授,研究方向为能 源经济及可持续发展、电力市场理论与应用;

曾 博(1987),男,博士生导师,副教授,研究方向为综 合能源系统优化规划、能源互联网等。

计及分布式光伏安装面积限制的配电网 储能系统与线路扩容联合规划

邵晨颖¹,李沛霖¹,杨新婷²,刘友波¹

(1.四川大学电气工程学院,四川 成都 610065;2.国网四川省电力公司经济技术研究院,四川 成都 610041)

摘 要:为应对负荷的增长需求并解决光伏就地消纳和电网规划过投资问题,提出了一种主动配电网多阶段储能配 置与线路扩容联合动态规划方法。从经济性出发,计及联合规划得到的光伏消纳收益及调峰补贴收益,构造规划目 标函数;同时考虑到分布式光伏安装面积限制,基于 Logistic 曲线构建分布式光伏发展模型,预测光伏在各个规划阶 段的装机和出力情况,为储能配置与线路扩容的联合规划提供边界条件;最后,基于相角松弛与二阶锥松弛凸优化潮 流约束,并采用大 M 法凸化储能约束,以实现对模型的高效求解。对比某实际台区算例联合规划前后系统的运行指 标,可见规划后系统的可靠性有大幅提升,且随分布式光伏的不断接入,光伏消纳率不降反升,由此验证了所提联合 规划方法的有效性和实用性。

关键词:分布式光伏;安装面积限制;储能配置;线路扩容;联合规划;多阶段动态规划 中图分类号:TM 715 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)06-0067-08 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230610

Joint Planning for Energy Storage Systems and Line Capacity Enhancement of Distribution Network Considering Installation Area Limits of Distributed Photovoltaic

SHAO Chenying¹, LI Peilin¹, YANG Xinting², LIU Youbo¹

(1. College of Elecrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: In order to solve the problems of photovoltaic on-site consumption and grid over-investment, a joint multi-stage dynamic planning method of energy storage system configuration and line capacity enhancement in active distribution network is proposed to cope with the increasing demand of load. From an economic standpoint, the photovoltaic consumption effect and peak shaving allowance obtained by joint planning are taken into account, and the planning objective function is suggested. At the same time, considering the installation area limits of distributed photovoltaic, a distributed photovoltaic development model is provided based on the Logistic curve, and then the installed capacity and output of photovoltaic in every planning stage can be predicted, which provides boundary conditions for the joint planning of energy storage systems and line capacity enhancement. Finally, phase angle relaxation and second-order cone relaxation are adopted to achieve convex optimization of power flow constraints and big-M approach is employed to obtain convexification of energy storage system constraints, resulting in efficient model solution. Comparing the system operating indicators before and after joint planning in a real distribution area, it can be seen that the system reliability after planning has a great improvement, and with the continuous access of distributed photovoltaic, the photovoltaic absorption rate does not decrease but rises, which verifies the effectiveness and practicality of the proposed joint planning method.

Key words: distributed photovoltaics; installation area limits; energy storage systems configuration; line capacity enhancement; joint planning; multi-stage dynamic planning

0 引 言

为了满足日益增长的负荷需求,配电网需要进 行动态扩容规划,计及政治、经济、地理等因素,在最 小化成本的同时尽可能保证系统的技术指标不受影 响^[1-2]。然而,随着分布式光伏广泛部署在低压配 电网中[3],其随机波动的输出使配电网的光伏支撑 能力趋近饱和,产生弃光等问题,光伏的消纳将成为 新型配电网在规划运行中需要重点研究的问题之 一^[4]。另一方面,储能系统因具有良好的调峰能力 和抑制新能源出力波动的作用,在配电网中得到大 规模应用。从规划角度出发,装设储能系统可以避 免使用增加冗余容量方法解决负荷增长和峰谷差加 剧的问题,有助于提升设备资产利用率,延缓配电网 升级改造,推动电网的高可靠性连续供电发展^[5]。 因此,考虑将优化储能配置同线路扩容结合起来作 为应对负荷增长的规划手段,同时在主动配电网动 态规划过程中计及光伏的消纳情况,这对实现配电 网的清洁、经济、可靠运行非常重要。

配电网扩容规划作为配电网中的一个重要研究 方向,如今已有不少研究成果。文献[6]提出了一 种考虑负荷增长、电价、扩容投资成本、运营成本等 因素的配电网扩容规划方法。文献[7-8]针对电动 汽车负荷的发展,构建了配电网扩容与电动汽车充 电站协调规划模型。文献[9]考虑了配电网投资和 分布式电源投资,文献「10]计及热、电需求和分布 式电源的不确定性,二者都将配电网多阶段扩容规 划问题建模为一个混合整数线性规划优化问题。值 得注意的是,上述研究大多忽略了储能系统接入后 对配电设备利用率的提升作用。因此,储能配置在 电网规划过程中的替代潜力近年来引起了众多学者 的关注。文献[11-12]提出了储能系统接入的经济 效益模型,对储能系统削峰填谷带来的经济效益实 现了度量计算。文献[13]通过潮流灵敏度搜索优 先选择重过载的配电设备进行储能配置。文献[14] 综合考虑了储能系统对电网的削峰填谷作用和经济 成本,提出一种实现储能功率、容量配置及运行调度 的方法。上述文献均只使用储能配置进行单阶段的 规划研究,然而配电网规划过程往往不是独立的,需

要涉及多个阶段进行综合规划,且储能配置的替代 效益是有限的,在实际的规划过程中,传统的扩容规 划需要同储能配置结合起来使用。因此,文献[15] 提出了一种与储能配置相结合的多阶段主动配电网 规划模型,分析了储能系统带来的供电可靠性提升 效果。文献[16]在规划时考虑了负荷的不确定性, 在实现电网安全运行和电网损失最小化的同时,保 证主动配电网能够按照调度计划运行。但储能系统 对提升光伏消纳率、减少弃光方面的效用还没有被 考虑到规划目标中。

因此,下面将储能配置与传统扩容方法结合起 来对主动配电网进行多阶段的动态规划,以经济性 最佳为目标,将光伏消纳转化为环境效益计入目标 函数中,同时利用 Logistic 曲线模拟分布式光伏在一 定安装面积限制下的"S"型发展曲线,实现了考虑 分布式光伏区域容量上界的配电网线路扩容与储能 配置的双重优化,有助于在满足客观电力需求约束 下实现资金的高效利用。

考虑安装面积限制的分布式光伏发 展模型

随着分布式光伏的不断发展,规划区域内可供 分布式光伏铺设的空间日益减少,其装机总量将逐 步趋向饱和^[17]。总体来说,分布式光伏的发展曲线 大致呈"S"型。因此,可以基于 Logistic 曲线构建考 虑安装面积限制的分布式光伏发展模型,预测各规 划阶段的光伏装机容量及出力曲线,作为后续联合 规划的基本边界条件。步骤如下:

1)根据土地利用性质进行分区,分为商业区、 住宅区和工业区,然后根据各区域的屋顶面积,在给 定屋顶有效利用率和单位面积饱和光伏容量密度 下,估计各分区的光伏饱和装机容量。

$$P_{\rm PV,i}^{\rm s} = d_i \eta_i S_i \tag{1}$$

式中: $P_{PV,i}^{s}$ 为区域 i 光伏饱和装机容量; d_i 为区域 i单位面积饱和光伏容量密度; η_i 为区域 i 屋顶有效 利用率; S_i 为区域 i 屋顶面积。

分布式光伏组件型号确定后,单位面积的最大 可装设光伏容量将随之确定,从而得到相应的单位 面积饱和光伏容量密度。同时,不同区域的屋顶有
容量。

效利用率取值如表1所示。

表1 不同区域的屋顶有效利用率

区域	工业区	商业区	住宅区
屋顶有效利用率/%	70	50	40

2)不同区域的分布式光伏发展情况也有所不同,因此采用 Logistic 函数拟合光伏累计安装发展的 "S"曲线。

$$\xi_{i,n} = \frac{a_i}{1 + e^{b_i - c_i n}}$$
(2)

式中: $\xi_{i,n}$ 为区域 i 在第 n 个规划阶段的光伏安装普 及率; a_i, b_i, c_i 均为区域 i 的拟合系数,可以依据该地 区其余网格相应土地性质的光伏发展历史数据或专 家经验来确定。

基于步骤1得到的饱和装机容量,可以计算各 规划阶段的光伏装机容量为

$$P_{\text{PV},i,n} = \xi_{i,n} P_{\text{PV},i}^{\text{S}}$$
(3)
式中, $P_{\text{PV},i,n}$ 为区域 i 在第 n 个规划阶段的光伏装机

3) 记初始年不同场景下的光伏典型出力曲线 为光伏出力基准曲线,则不同区域在不同规划阶段 的各场景下光伏出力曲线可以大致估计为

$$P_{\text{PV},i,n,s}^{\text{CL}} = \sigma_{\text{PV},i,n} P_{\text{PV},0,s}^{\text{CL}}$$
(4)

式中: $P_{PV,i,n,s}^{CL}$ 为区域i在第n个规划阶段第s个场景下的光伏出力; $P_{PV,0,s}^{CL}$ 为初始年第s个场景下的各区域总光伏出力; $\sigma_{PV,i,n}$ 为区域i在第n个规划阶段的分布式光伏装机系数,定义为

$$\sigma_{PV,i,n} = \frac{P_{PV,i,n}}{\sum_{i=1}^{I} P_{PV,i,0}}$$
(5)

式中:P_{PV,i,0}为初始年区域*i*的光伏装机容量;*I*为所 分区域总数。

2 配电网储能配置与线路扩容联合动态规划模型

下面将配电网联合规划经济性最优作为目标, 构建面向典型场景的配电网储能配置与线路扩容联 合动态规划模型。

2.1 目标函数

基于经济性的协调规划目标函数可以表示为:

$$F = \max \sum_{s=1}^{m} \omega_s C_s \tag{6}$$

 $C_s = C_{env,s} + C_{allowance,s} - C_{ESS,s} - C_{Line,s}$ (7) 式中: F 为协调规划的目标; m 为场景数; ω_s 为场景 s 出现概率; C_s 为场景 s 的经济性; $C_{env,s}$ 、 $C_{allowance,s}$ 、 $C_{ESS,s}$ 、 $C_{Line,s}$ 分别为场景 s 下光伏消纳与储能系统接 入带来的环境收益、储能系统削峰填谷补贴收益、储 能成本和线路扩容成本。

2.1.1 环境收益

升级改造线路以扩大线路容量并配置储能系统,有助于提高光伏的消纳率,减少火电机组出力, 降低各类污染物的排放,从而带来一定的环境收益。

$$C_{\text{env},s} = \sum_{t=1}^{T} \left[\gamma_{\text{SOC}} \eta_{\text{dis}} P_{\text{dis},s}(t) + \gamma_{\text{PV}} P_{\text{PV},s}^{\text{XN}}(t) \right]$$
(8)

式中: γ_{soc} 、 γ_{PV} 分别为储能系统放电和光伏消纳环 境收益系数;T为规划周期,即一年 8760 h; η_{dis} 为储 能系统的放电效率; $P_{\text{dis},s}(t)$ 和 $P_{\text{PV},s}^{\text{XN}}(t)$ 分别为场景 s下时刻 t 储能系统的放电功率和光伏消纳值。

2.1.2 补贴收益

储能系统接入后,能通过调整其充放电状态和 功率有效平抑电网的峰谷差,具有削峰填谷的作用。 政府为激励储能系统参与削峰填谷,出台了一系列 政策给予相应补贴,其经济效益可以表示为

$$C_{\text{allowance},s} = \sum_{t=1}^{T} P_{\text{dis},s}(t) \cdot r_{\text{bt}}$$
(9)

式中,r_{bt}为政府对转移单位峰荷给予的补贴。 2.1.3 储能成本

$$C_{\text{ESS},s} = (C_{\text{inv},s} + C_{\text{ope},s}) \cdot \frac{r_{\text{ESS}} \cdot (1 + r_{\text{ESS}})^{L_{\text{ESS}}}}{(1 + r_{\text{ESS}})^{L_{\text{ESS}}} - 1}$$
(10)

$$C_{\text{inv},s} = C_{\text{ESS},P}^{\text{inv}} \cdot P_{\text{ESS},s} + C_{\text{ESS},E}^{\text{inv}} \cdot E_{\text{ESS},s} \quad (11)$$

$$C_{\text{ope},s} = C_{\text{ESS},P}^{\text{ope}} \cdot P_{\text{ESS},s} + C_{\text{ESS},E}^{\text{ope}} \cdot E_{\text{ESS},s} \quad (12)$$

式中: $C_{inv,s}$ 和 $C_{ope,s}$ 分别为场景 s 下储能系统投资成 本和运行成本; $P_{ESS,s}$ 和 $E_{ESS,s}$ 分别为场景 s 下的总储 能功率和容量; $C_{ESS,P}^{inv}$ 、 $C_{ESS,E}^{ope}$ 、 $C_{ESS,E}^{ope}$ 分别为储 能功率、容量的单位投资和运行成本; r_{ESS} 和 L_{ESS} 分 别为储能系统贴现率和使用寿命。

2.1.4 线路扩容成本

参考文献[18],以资本年化率的方式对线路扩 容投资成本进行定义,即

$$C_{\text{Line},s} = \frac{r_{\text{Line}} (1 + r_{\text{Line}})^{L_{\text{Line}}} \sum_{l=1}^{N_{\text{kr},s}} (c_{l,s} \times L_l) \quad (13)$$

式中:r_{Line}和 L_{Line}分别为最低预期资本回收率和规划 年限;N_{kr,s}和 c_{l,s}分别为场景 s 下需要扩容线路数和 (14)

2.2 约束条件

2.2.1 潮流约束

$$\begin{cases}
U_g(t) - U_h(t) = z_{gh}I_{gh}(t) \\
\sum_{k:h \to k} S_{hk}(t) - \sum_{g:g \to h} [S_{gh}(t) - z_{gh}|I_{gh}(t)|^2] = S_h(t) \\
S_{gh}(t) = U_g(t)I_{gh}^*(t)
\end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{h}(t) = u_{h}^{C} P_{h}^{G}(t) + u_{h}^{PV} P_{PV,h}^{NN}(t) + u_{dis,h}(t) P_{dis,h}(t) - \\ u_{ch,h}(t) P_{ch,h}(t) - P_{h}^{Load}(t) \\ Q_{h}(t) = u_{h}^{G} Q_{h}^{G}(t) - Q_{h}^{Load}(t) \end{cases}$$
(15)

式中: $U_g(t)$ 、 $U_h(t)$ 分别为时刻 t 节点 g、h 的电压; z_{gh} 、 $I_{gh}(t)$ 、 $S_{gh}(t)$ 分别为线路 g-h 的阻抗、时刻 t 电 流和功率; $I_{gh}^*(t)$ 为电流的共轭值; $S_{hk}(t)$ 为时刻 t 线 路 h-k 的功率; $S_h(t)$ 、 $P_h(t)$ 、 $Q_h(t)$ 分别为节点 h 时 刻 t 的注入视在功率、有功功率和无功功率; u_h^C 、 u_{hh}^P 反映节点 h 是否为变电站节点或接入光伏, $u_{dis,h}(t)$ 、 $u_{ch,h}(t)$ 表征节点 h 是否配置储能系统及其在时刻 t 的充放电状态,上述变量均为 0-1 变量; $P_{ch,h}(t)$ 、 $P_{dis,h}(t)$ 分别为时刻 t 节点 h 所接储能系统充、放 电功率; $P_{Nh,h}^{NN}(t)$ 为时刻 t 节点 h 光伏的消纳值; $P_h^G(t)$ 、 $Q_h^G(t)$ 、 $P_h^{Load}(t)$ 公别为时刻 t 节点 h 处 变电站输出或负荷所需有功功率、无功功率。

2.2.2 储能约束

储能系统的充放电功率约为

$$\begin{cases} u_{\text{dis},h}(t) P_{\text{dis},h}^{\min} \leq P_{\text{dis},h}(t) \leq u_{\text{dis},h}(t) P_{\text{dis},h}^{\max} \\ u_{\text{ch},h}(t) P_{\text{ch},h}^{\min} \leq P_{\text{ch},h}(t) \leq u_{\text{ch},h}(t) P_{\text{ch},h}^{\max} \\ u_{\text{dis},h}(t) + u_{\text{ch},h}(t) \leq 1 \\ \text{ ldl K 系统的荷电状态约束为} \end{cases}$$
(16)

$$\begin{cases} S_{\text{oc},h}(24) = S_{\text{oc},h}(0) \\ S_{\text{oc},h}(t+1) = S_{\text{oc},h}(t) + P_{\text{ch},h}(t) \eta_{\text{ch},h} - \frac{P_{\text{dis},h}(t)}{\eta_{\text{dis},h}} \\ S_{\text{oc},h}^{\min} \leq S_{\text{oc},h}(t) \leq S_{\text{oc},h}^{\max} \end{cases}$$
(17)

式中: $P_{ch,h}^{min}$ 、 $P_{dis,h}^{min}$ 分别为节点h所接储能系统的最小充、放电功率; $P_{ch,h}^{max}$ 、 $P_{dis,h}^{max}$ 分别为节点h所接储能系统的最大充、放电功率; $S_{OC,h}(t)$ 为时刻t节点h所接储能系统的荷电状态; $S_{OC,h}^{max}$ 和 $S_{OC,h}^{min}$ 分别为节点h所接储能系统的最大、最小荷电状态; $\eta_{ch,h}$ 、 $\eta_{dis,h}$ 分

别为节点 h 所接储能系统的充放电效率。

2.2.3 网络运行约束

$$\begin{cases} I_{gh,\max} = \sum_{j \in J} I_{j,\max} u^{j}_{\text{line},gh} \\ 0 \leq I^{2}_{gh} \leq I^{2}_{gh,\max} \\ \sum_{j \in J} u^{j}_{\text{line},gh} = 1 \\ U^{2}_{\min} \leq U^{2}_{h} \leq U^{2}_{\max} \\ 0 \leq P^{\text{XN}}_{\text{PV},h}(t) \leq P^{\text{CL}}_{\text{PV},h}(t) \end{cases}$$
(18)

式中: $u_{\text{line},gh}^{j}$ 为线路 g-h 的型号表征 0-1 变量,装设 型号为 j 时取 1; $I_{j,\text{max}}$ 为型号 j 对应的线路电流上限; I_{gh} 、 $I_{gh,\text{max}}$ 分别为线路 g-h 的电流及其上限值; U_{max} 、 U_{\min} 分别为节点电压上、下限; $P_{\text{PV},h}^{\text{CL}}(t)$ 为时刻 t 节点 h 光伏的出力值。

2.2.4 规划连续性约束

$$\begin{cases} E_{\text{ESS},h,n} \ge E_{\text{ESS},h,n-1} \\ I_{gh,\max,n} \ge I_{gh,\max,n-1} \end{cases}$$
(19)

式中: *E*_{ESS,*h*,*n*}和 *E*_{ESS,*h*,*n*-1}分别为第*n*个和第*n*-1个 规划阶段下节点*h*处储能系统的配置容量; *I*_{*gh*,max,*n*} 和 *I*_{*gh*,max,*n*-1}分别为第*n*个和第*n*-1个规划阶段下线 路 *g*-*h*的电流上限。

3 凸松弛优化的联合规划模型及其 求解

第2章构建的联合规划模型中存在决策变量的 乘积和平方项,导致规划模型因非凸非线性而难以 求解。基于此,采用大M法、相角松弛与二阶锥松 弛,将模型中所有非凸约束进行凸化处理,最终将原 始问题转化为混合整数二阶锥规划问题,从而便于 使用Gurobi等商业求解器求解。

3.1 潮流约束凸松弛

通过相角松弛去掉电流、电压的相角,保留幅 值,同时进行二阶锥松弛扩大可行域,可以得到潮 流约束式(14)的凸化形式^[19],如式(20)—式(22) 所示。

$$\begin{cases} P_{h}(t) = \sum_{k:h \to k} P_{hk}(t) - \sum_{g:g \to h} [P_{gh}(t) - r_{gh}A_{gh}(t)] \\ Q_{h}(t) = \sum_{k:h \to k} Q_{hk}(t) - \sum_{g:g \to h} [Q_{gh}(t) - x_{gh}A_{gh}(t)] \end{cases}$$
(20)

$$V_{h}(t) = V_{g}(t) - 2 [r_{gh}P_{gh}(t) + x_{gh}Q_{gh}(t)] + (r_{gh}^{2} + x_{gh}^{2})A_{gh}(t)$$
(21)
$$\left\| 2P_{gh}(t) \\ 2Q_{gh}(t) \\ A_{gh}(t) - V_{g}(t) \right\|_{2} \leq A_{gh}(t) + V_{g}(t)$$
(22)

式中: r_{gh} 和 x_{gh} 分别为线路 g-h 的电阻、电抗; $V_h(t)$ 、 $V_g(t)$ 分别为时刻 t 节点 h 和 g 的电压幅值的平方; $A_{gh}(t)$ 为时刻 t线路 g-h 的电流幅值的平方。

3.2 储能约束凸松弛

基于大 M 法对式(16)的储能系统充放电功率 约束进行松弛,可得:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\mathrm{dis},h}(t) \leq P_{\mathrm{dis},h}^{\mathrm{max}} \\ 0 \leq P_{\mathrm{dis},h}(t) \leq M \cdot u_{\mathrm{dis},h}(t) \\ 0 \leq P_{\mathrm{ch},h}(t) \leq P_{\mathrm{ch},h}^{\mathrm{max}} \\ 0 \leq P_{\mathrm{ch},h}(t) \leq M \cdot u_{\mathrm{ch},h}(t) \\ u_{\mathrm{dis},h}(t) + u_{\mathrm{ch},h}(t) \leq 1 \end{cases}$$

$$(23)$$

式中, M为一个足够大的数, 此处取 99 999。

4 算例分析

4.1 算例基本数据

下面以四川省某实际网格下3条10kV线路组成的网络为规划区域,验证所提规划方法的效果。 经过实际调研,基于台区下所带用户的土地性质对 待规划线路进行分区,如图1所示。





该网格的光伏出力和负荷典型场景如图 2 所示, 3 个场景可以大致认为是晴天(场景 1)、多云(场景 2) 和阴雨(场景 3)天气下的光伏出力和负荷典型日曲线。 3 种场景比例分别为 15%、60%和 25%。

假设2026年该网格分布式光伏容量达饱和,以



图 2 光伏出力和负荷典型场景

2021年为现状年,估计 2022—2026年期间的光伏 容量发展情况。首先对该规划线路远景年分布式光 伏饱和装机容量进行预测,由调研得到的各区域屋 顶面积,根据式(1),取单位面积饱和光伏容量密度 为 202.3 W/m²,可知各区域分布式光伏饱和装机容 量如表 2 所示。

表 2 各区域屋顶面积及分布式光伏饱和装机容量

区域	屋顶 面积/m ²	屋顶有效 利用率/%	光伏饱和装机 容量/kW
工业区	10 250.698	70	1 451.601
商业区	7 961.977	50	805.354
住宅区	15 484.979	40	1 253.045

接着由饱和装机容量求取各规划阶段装机容量,计及不同区域的土地性质,用不同 Logistic 曲线 模拟不同区域的光伏发展情况。

$$\xi_{\text{industrial},n} = \frac{1.014}{1 + e^{4.117 - 2.044n}}$$
(24)

$$\xi_{\text{commercial},n} = \frac{0.998}{1 + e^{3.596 - 1.622n}}$$
(25)

$$\xi_{\text{residential},n} = \frac{1.038}{1 + e^{3.464 - 1.357n}}$$
(26)

式中, $\xi_{industrial,n}$ 、 $\xi_{commercial,n}$ 、 $\xi_{residential,n}$ 分别为工业区、商业区、住宅区在第n个规划阶段的光伏安装普及率。

计及上述分布式光伏的发展情况,考虑工业区、 商业区和住宅区负荷分别按10%、8%、5%的年增长 率进行增长,在此基础上进行线路扩容和储能配置 的联合规划。可供选择的储能配置与线路扩容的参 数如表3所示,所建模型中的投资和收益计算相关 参数取值如表4所示。

4.2 联合规划结果

由于需要对该网格进行为期5年的规划,可以 将规划过程以年为单位分成5个规划阶段,利用 Matlab+Gurobi对每个规划阶段进行一次模型求解。 由于使用了二阶锥松弛,通过计算二阶锥误差可以 判断结果的可信度,二阶锥误差计算方式为

$$\varepsilon = P_{gh}^2 + Q_{gh}^2 - A_{gh}V_g \tag{27}$$

式中, ε 为二阶锥误差。

表 3 可供选择储能配置与线路扩容参数

配置 编号	储能容量/ kWh	最大充放电 功率/kW	线路 型号	线路容量/ MW	线路单位投资/ (万元・km ⁻¹)
1	200	50	LGJ-35	2.650	40
2	400	100	LGJ-70	4.287	80
3	600	150	LGJ-120	5.923	100
4	800	200			

表 4 模型相关参数

参数	取值
储能系统折现率	0.07
储能系统使用寿命/年	10
线路最低预期资本回收率	0.06
储能系统放电环境收益系数/(元・(kWh) ⁻¹)	0.031 4
光伏消纳环境收益系数/(元・(kWh) ⁻¹)	0.08
储能系统单位功率运行成本/(元・kW ⁻¹)	25
储能系统单位容量运行成本/(元・(kWh) ⁻¹)	0.05
储能系统单位功率投资成本/(元·kW ⁻¹)	2400
储能系统单位容量投资成本/(元・(kWh) ⁻¹)	2000
储能系统削峰填谷补贴/(元・(kWh) ⁻¹)	0.55
储能系统充放电效率/%	95
储能系统荷电状态上下限	0.1~0.9

优化后的二阶锥误差如图 3 所示,可以看出,二 阶锥误差非常小。这说明二阶锥松弛后该模型的优 化结果是足够可信的。

经求解得到的各阶段的储能配置和线路平均容 量规划结果如表 5 所示。其中,规划前线路的平均 容量为 2.823 6 MW。线路平均容量的计算公式为



$$\overline{P} = \frac{\sum_{l=1}^{N_{\text{Line},l}} P_{\text{Line},l} L_l}{\sum_{l=1}^{N_{\text{Line}}} L_l}$$
(28)

式中: \overline{P} 为线路平均容量; N_{Line} 为线路数; $P_{\text{Line},l}$ 为线路l的容量。

表 5 各阶段的储能优化配置和线路平均容量规划结果

规划年	配置节点	储能容量/kWh	线路平均容量/MW
	20	200	
2022	63/64	400	2.947 6
	66	800	
	20/33/52	200	
2023	64	400	3 071 6
2025	63/65	600	5.071 0
	66	800	
2024	20/33/52	200	2 146 0
2024	63/64/65/66	800	5.140 0
	33/52/54/61	200	
2025	20/62	400	3.220 4
	63/64/65/66	800	
	33/49/54/58	200	
2026	52	400	
	61	600	3.270 1
	20/62/63/64/	800	

各阶段的线路扩容方案如图 4 所示。





图 4 各阶段的线路扩容方案

从规划结果可以看出:随着规划年限的增长,需 要配置储能的节点越多,相应地,储能配置容量也越 大;与此同时,线路的平均容量也因部分线路的扩容 在逐年提高。

4.3 联合规划效果验证

为了证明联合规划对配电网可靠性的提升作 用,选用系统平均停电持续时间指标(system average interruption duration index,SAIDI)、系统平均停电频 率指标(system average interruption frequency index, SAIFI)和系统平均供电可用率指标(average service availability index,ASAI)来评估系统的可靠性^[20-21], 并采用序贯蒙特卡洛法进行可靠性的计算。同时, 以峰谷差率为指标,体现储能配置带来的削峰填谷 效用,其计算公式为

$$\varphi_{\rm fg} = \frac{\max_{t} \left[\sum_{h=1}^{N_{\rm bus}} P_{h}^{\rm Load}(t) \right] - \min_{t} \left[\sum_{h=1}^{N_{\rm bus}} P_{h}^{\rm Load}(t) \right]}{\max_{t} \left[\sum_{h=1}^{N_{\rm bus}} P_{h}^{\rm Load}(t) \right]}$$
(29)

式中: φ_{fg} 为峰谷差率; N_{bus} 为节点数。

将所提线路扩容与储能配置的联合规划方法和 仅进行线路扩容的传统规划方法效果进行对比,结 果如表6、表7所示。

表 6 传统规划后系统的可靠性与峰谷差率

规划年	SAIFI⁄ (次・户 ⁻¹ ・a ⁻¹)	SAIDI∕ (h・户 ⁻¹ ・a ⁻¹)	ASAI/%	峰谷差率/ %
初始年	1.196	13.928	99.841	29.50
2022	1.125	13.666	99.844	31.19
2023	1.004	12.965	99.852	33.86
2024	0.959	11.826	99.865	35.27
2025	0.897	11.301	99.871	36.81
2026	0.858	10.162	99.884	37.13

表 7 助	合规划	后系统	的可靠	性与峰	谷差率	窲
-------	-----	-----	-----	-----	-----	---

规划年	SAIFI/ (次・户 ⁻¹ ・a ⁻¹)	SAIDI/ (h・户 ⁻¹ ・a ⁻¹)	ASAI/%	峰谷差率/ %
初始年	1.196	13.928	99.841	29.50
2022	1.085	13.227	99.849	27.47
2023	0.943	12.614	99.856	25.11
2024	0.876	10.687	99.878	22.68
2025	0.794	9.636	99.890	21.23
2026	0.742	7.796	99.911	20.08

由表 6、表 7 可知,无论是进行传统规划还是联 合规划后,配电网的 SAIFI、SAIDI 指标都随着线路 的扩容和储能配置容量增大而不断下降,ASAI 则不 断提升,说明了系统的可靠性在不断提高。然而,仅 进行线路扩容的传统规划的可靠性提升水平低于联 合规划,且联合规划后系统的峰谷差率明显有所降 低,峰谷差变小,而传统规划并不能保证这一点。

另外,考虑到所建模型将光伏消纳的环境收益 耦合到了目标函数中,故对比了联合规划前后各个 规划阶段下的光伏消纳率,计算方法如式(30)所 示,计算结果如表8所示。

$$\eta_{\rm PV} = \frac{\sum_{t=1}^{T} \sum_{h=1}^{N_{\rm bus}} P_{\rm PV,h}^{\rm XN}(t)}{\sum_{t=1}^{T} \sum_{h=1}^{N_{\rm bus}} P_{\rm PV,h}^{\rm CL}(t)} \times 100\%$$
(30)

式中,η_{PV}为光伏渗透率。

表 8 联合规划前后系统的光伏消纳率对比

规划年 —	光伏消纳率/%			
	联合规划前	联合规划后		
初始年	66.86	66.86		
2022	60.53	100.00		
2023	53.31	100.00		
2024	41.19	95.81		
2025	28.56	96.23		
2026	22.43	98.98		

显然,随着光伏的不断接入,未进行联合规划时 配电网对光伏的消纳率将逐步下降;但经过线路的 扩容和储能系统的优化配置,配电网的光伏消纳率 不仅没有降低,反而有大幅提升,甚至能够保证超过 95%,从而证明了所提联合规划在促进配电网对分 布式光伏的消纳方面效果十分显著。

因此,在负荷的不断发展和光伏的陆续接入下, 通过储能配置与线路扩容的联合规划,在部分节点 配置一定容量的储能系统,并对部分线路进行扩容 操作,有助于实现配电网的经济可靠运行。

5 结 论

上面综合考虑了光伏安装面积限制、配电网运 行约束、多阶段规划连续性约束等,以规划成本最低 为目标,建立含分布式光伏的配电网储能配置与线 路扩容多阶段联合规划模型;同时通过相角松弛和 二阶锥松弛凸化潮流约束,使用大 M 法凸化储能系 统充放电功率约束,降低了原始非凸非线性动态规 划模型的求解难度。实际算例表明,协同规划后,配 电网运行指标如光伏消纳率和配电网可靠性都有显 著提升,验证了所提分布式储能和线路容量联合规 划方法的有效性。

参考文献

- BORGES C L T, MARTINS V F. Multistage expansion planning for active distribution networks under demand and distributed generation uncertainties [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 36(1): 107-116.
- [2] 肖白,郭蓓.配电网规划研究综述与展望[J].电力自动 化设备,2018,38(12):200-211.
- [3] TORQUATO R, SALLES D, PEREIRA C O, et al. A comprehensive assessment of PV hosting capacity on lowvoltage distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2): 1002-1012.
- [4] LIU Junyong, CHAI Yanxin, XIANG Yue, et al. Clean energy consumption of power systems towards smart agriculture: roadmap, bottlenecks and technologies [J].
 CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(3): 273-282.
- [5] 齐宁,程林,田立亭,等.考虑柔性负荷接入的配电
 网规划研究综述与展望[J].电力系统自动化,2020,
 44(10):193-207.
- [6] AHMADIGORJI M, AMJADY N, DEHGHAN S. A robust model for multiyear distribution network reinforcement planning based on information-Gap decision theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1339-1351.
- [7] 曾博,罗旸凡,周吟雨,等.公交枢纽灵活性赋能的高可 靠城市配电网多层协同优化规划方法[J/OL].中国电 机工程学报:1-18[2023-05-23].http://kns.cnki.net/ kcms/detail/11.2107.TM.20220817.1458.007.html.
- [8] EHSAN A, YANG Qiang. Active distribution system reinforcement planning with EV charging stations—Part I: Uncertainty modeling and problem formulation [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(2): 970-978.
- [9] DELGADO G M, CONTRERAS J, ARROYO J M. Joint expansion planning of distributed generation and distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2579-2590.
- [10] JOOSHAKI M, FARZIN H, ABBASPOUR A, et al. A model for stochastic planning of distribution network and autonomous DG units [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(6): 3685-3696.
- [11] 修晓青,李建林,惠东.用于电网削峰填谷的储能系统容

量配置及经济性评估[J].电力建设,2013,34(2):1-5.

- [12] 郭莉,薛贵元,吴晨,等.储能系统应用于削峰填谷的
 经济效益分析研究[J].电力需求侧管理,2019,21(5):
 31-34.
- [13] 程瑜,黄森,刘瑞丰.面向配电网设备利用率提升的分 布式储能优化配置[J].智慧电力,2021,49(8):8-14.
- [14] 潘宇航,王青松,陈力.应用于电网侧削峰填谷的储
 能系统配置及日出力优化策略[J].供用电,2022, 39(7):9-16.
- [15] SHEN Xinwei, SHAHIDEHPOUR M, HAN Yingduo, et al. Expansion planning of active distribution networks with centralized and distributed energy storage systems [J].
 IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(1): 126–134.
- [16] YI J H, CHERKAOUI R, PAOLONE M, et al. Optimal co-planning of ESSs and line reinforcement considering the dispatchability of active distribution networks [J].
 IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(3): 2485-2499.
- [17] 符杨,田灿,李振坤,等.考虑空间容量饱和的分布 式光伏时空分布预测[J].电网技术,2017,41(12): 3917-3925.
- [18] 储琳琳,宗明,李轶立,等.计及多种需求侧资源协同 参与的配电网扩展规划[J].电器与能效管理技术,
 2020(12):89-98.
- [19] 李争博,刘友波,任鹏哲,等.考虑地理信息聚类分区
 的配电网多阶段动态规划方法[J].电力系统自动化,
 2022,46(14):38-45.
- [20] LIU Youbo, SU Yunche, XIANG Yue, et al. Operational reliability assessment for gas-electric integrated distribution feeders[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1):1091-1100.
- [21] YIN Hang, WANG Zeqi, LIU Youbo, et al. Operational reliability assessment of distribution network with energy storage systems[J]. IEEE Systems Journal, 2023,17(1): 629-639.

作者简介:

邵晨颖(2001),女,硕士研究生,研究方向为配电网规 划、配电网状态估计:

李沛霖(2000),男,硕士研究生,研究方向为配电网规 划与可靠性;

杨新婷(1992),女,硕士,工程师,从事配电网规划工作。 (收稿日期:2023-05-23)

75

基于深度强化学习的微电网源-荷低碳调度优化研究

冯文韬¹,李龙胜¹,曾 愚¹,潘可佳¹,张子闻¹,景致远²

(1. 国网四川省电力公司信息通信公司,四川成都 610041;2. 电子科技大学

机械与电气工程学院,四川成都 611731)

摘 要:提升可再生能源在能源供给中的比例成为实现低碳经济的重要举措之一。为减少碳排放量并降低用电成 本,提出了一种基于深度强化学习的微电网低碳经济优化调度模型。首先,介绍了碳排放流理论并基于此构建了碳 计量模型以及阶梯碳价模型;其次,将低碳经济优化问题转换为一个马尔科夫决策;最后,利用深度强化学习对该多 目标优化问题求解。实验结果表明,所提方法通过控制发电机组的出力以及负荷的转移,有效地提升了系统经济性 并降低了碳排放量。

关键词:碳排放流理论;阶梯碳价模型;深度强化学习 中图分类号:TM 73 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)06-0075-08 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230611

Research on Source-load Low-carbon Optimal Dispatching for Microgrid Based on Deep Reinforcement Learning

FENG Wentao¹, LI Longsheng¹, ZENG Yu¹, PAN Kejia¹, ZHANG Ziwen¹, JING Zhiyuan²

(1. State Grid Sichuan Information and Communication Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and

Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China)

Abstract: Enhancing the proportion of renewable energy sources in energy supply becomes a significant initiative to realize a low-carbon economy. A model based on deep reinforcement learning (DRL) for optimal allocation of low-carbon economy in microgrid is proposed to mitigate carbon emission and decrease electricity cost. Firstly, carbon emission flow theory is introduced on which a carbon measurement model and a stepped carbon price model are constructed. Secondly, the low-carbon economy optimization problem is converted into a Markov decision. Finally, the multi-objective optimization issue can be addressed utilizing DRL. The experimental results demonstrate that the proposed approach is effective in boosting system economy and mitigating carbon emissions by regulating the capacity of generating units and shifting the load.

Key words: carbon emission flow theory; stepped carbon price model; deep reinforcement learning

0 引 言

近年来,随着各国 GDP 和科学技术的飞速发展,化石能源消耗急剧增长。近几十年里,化石能源 的高消耗造成大气中 CO₂ 浓度猛增。为有效降低 CO₂增长比例,各国开始研究利用可再生能源替代 化石能源以此实现低碳生活^[1-2]。

基金项目:国网四川省电力公司科技项目(B7194723R001)

中国在 2020 年提出了"碳中和、碳达峰"目标, 旨在通过加强对风力、光伏等可再生能源的发展,降 低化石能源在微电网体系的比例,从而实现减少碳 排放的目标^[3]。然而可再生能源存在的随机性、间 歇性等缺点导致其在微电网中的比例难以有效提 升。此外,能源需求的飞速增长也给当前微电网能 源供给优化带来了一定的压力。因此,未来十几年 内化石能源依旧会在微电网中占据较大的比例。当 前人们面临着如何优化能源管理策略同时满足能源 需求与实现系统低碳化的难题。电力行业中发电侧 使用能源最多的依旧是燃煤等化石能源,在发电的 同时增加了碳排放。碳排放与发电侧密切关联,因 此,众多学者对发电侧碳排放进行了相应的研究。

文献[4]构建了一种考虑碳减排合作机制和引 入风力发电的微电网低碳调度模型,利用碳捕捉装 置有效地吸收燃煤轮机产生的 CO₂,从而实现系统 低碳经济运行^[5-6]。文献[7]设计和规划了一个多 能载体微电网,利用能源系统中二氧化碳流的建模 技术估计能源系统中分布的碳量,提出了配电系统 层面多载能系统的优化方法。文献[8]为研究不同 的低碳技术对微电网经济调度的影响,构建了一个 基于机会约束的两阶段随机优化调度模型。然而, 随着微电网规模逐渐庞大化、系统结构逐渐复杂化、 控制变量多元化,上述方法难以快速有效地获取最 优低碳经济策略。

随着 AI 技术的快速发展,具有记忆能力的强化 学习(reinforcement learning, RL)方法广泛地应用于 微电网电压控制、运行优化等领域[9]。文献[10]基 于深度Q网络(deep Q network, DQN)构建了一种 低碳家庭微电网能源动态管理模型,摆脱了源荷不 确定性对系统低碳经济运行的影响。然而,上述方 法在面对微电网中连续多目标实时控制问题,难以 快速获得最优策略。文献[11]利用深度强化学习 (deep reinforcement learning, DRL)构建了一种超参 数自适应的多能供给微电网优化调度模型,可以实 时制定系统中多元件最优出力策略,实现微电网低 碳经济运行。文献[12]利用 DRL 建立了一种电动汽 车充电能源管理策略。基于 DRL 的先进性,下面采 用深度确定性策略梯度算法(deep deterministic policy gradient, DDPG)搭建了一种同时将微电网的经济 性和低碳性作为优化目标的调度模型。首先,介绍 了碳排放理论流重点概念,并基于此构建了一种更 能反映实际情况的阶梯碳价计算模型:然后,利用 DDPG 建立了一个微电网低碳经济运行优化模型, 通过考虑负荷需求响应实现降低系统运行成本和减 少碳排放量的目标;最后,建立了一个实时调度模 型,能够根据微电网最新的信息实时制定最优策略。

1 碳排放流理论研究

1.1 碳排放理论概述

当利用煤炭等化石能源发电时,燃烧过程中会 释放大量的 CO₂,从而产生碳排放。假定产生的 CO₂并不是直接从发电厂释放到大气层中,而是随 着电能的传输直至用户。用户在使用电能的同时, 需要支付发电造成的碳排放成本。因此碳排放成本 并不单单由发电侧承担,用户也具有一定的责任。 据此,提出了碳排放流方法用以研究碳排放在发电 侧到用户之间的关系,如图 1 所示^[13-14]。在计算过 程中应该从用户侧讨论碳排放责任划分,而碳排放流 理论能够有效地将发电侧的碳排放任务分给用户。



1.2 碳排放流理论相关定义

1.2.1 碳排放流率

碳排放流率表示单位时间内系统某一节点通过 的 CO₂流量^[15],t/h。

$$M_{\rm CEF} = \frac{\mathrm{d}C_{\rm CEF}}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

式中: M_{CEF} 为碳排放流率; C_{CEF} 为碳排放的流量;t为时间。

1.2.2 支路碳流密度

碳排放流主要依靠电力系统中的有功潮流,支路消耗单位电量导致发电侧产生 CO₂的数值称之为支路碳流密度^[15],t/kWh。

$$I_{\text{BCE}l} = \frac{M_{\text{BCE}F}}{P_l} \tag{2}$$

式中: I_{BCEI} 为支路l的碳流密度; P_l 为支路l的有功功率。

1.2.3 节点碳势

节点碳势主要描述节点消耗单位电量导致发电

侧产生 CO_2 的数值, 一般也可叫做节点碳流密度, 用 I_{NCEi} 表示^[15], t/kWh_{\circ}

$$I_{\text{NCE}i} = \frac{\sum_{l \in N^{+}} P_{l} I_{\text{BCE}l}}{\sum_{l \in N^{+}} P_{l}} = \frac{\sum_{l \in N^{+}} M_{l}}{\sum_{l \in N^{+}} P_{l}}$$
(3)

式中,N⁺为所有与节点 *i* 相连接的支路。

1.3 碳排放流计算方法

以图 1 的节点 2 为例,节点 2 的碳势 I_{NCE2}^[16]为

$$I_{\text{NCE2}} = \frac{\sum_{l \in N^{+}} P_{l} I_{\text{BCE}l} + P_{2} I_{\text{NCEg}_{2}}}{\sum_{l \in N^{+}} P_{l} + P_{2}} = \frac{P_{l} I_{\text{BCE}l_{2}} + P_{2} I_{\text{NCEg}_{2}}}{P_{l} + P_{2}}$$
(4)

式中: P_2 为节点 2 的有功功率; $I_{NCE_{g_2}}$ 为发电机在节 点 2 的碳势。

根据碳排放流理论求解过程,支路中碳流密度 由本支路中首个节点的碳流密度决定,即

$$I_{\text{BCE}l_2} = I_{\text{NCE}2} \tag{5}$$

根据各个发电机组在每个节点的碳势以及系统 各个节点的负荷量即可求解出各节点的碳排放量。

$$B_{\rm emi} = I_{\rm NCEdi} \cdot D_i \tag{6}$$

式中: B_{emi} 为节点 i 的碳排放量; I_{NCEdi} 为负荷节点 i的碳势; D_i 为节点 i的负荷量。

2 碳计量模型以及阶梯碳价计算模型

2.1 发电机组碳排放计量模型

在传统的计算过程中,发电机组的碳排放量计 算时总是采取固定因子,即碳排放量与发电量之间 存在着线性关系,该方法在长时间的计算过程中精 确度较低,难以真实有效地评估发电机组长时间运 作碳排放量。因此采用了一种动态碳排放计算模 型,该模型将发电机组的出力分为了几个区间,随着 机组出力的增加,区间数目逐渐增大,区间碳排放强 度值增长趋势将逐渐减缓。求解每个机组总碳排放 量时,首先计算每个区间的碳排放量,即区间碳排放 强度值与机组出力之间的乘积;最后将所有区间的 碳排量相加即为总碳排放量。动态碳排放计算模 型^[14]为

$$B(i,t) = \begin{cases} \psi_{1} \left[P(i,t) - P_{0} \right], \min(P_{\min,i}, P_{0}) \leq P(i,t) < P_{0} + p \\ \psi_{1} \left[P(i,t) - P_{0} \right] + \psi_{1} \left[P(i,t) - P_{0} - p \right] \xi_{1}, \\ P_{0} + p \leq P(i,t) < P_{0} + 2p \\ \psi_{1} \left[P(i,t) - P_{0} \right] + \psi_{1} \left[P(i,t) - P_{0} - p \right] \xi_{1} + \\ \psi_{1} \left[P(i,t) - P_{0} - 2p \right] \xi_{2}, \\ P_{0} + 2p \leq P(i,t) < P_{0} + 3p \\ \vdots \\ \psi_{1} \left[P(i,t) - P_{0} \right] + \dots + \psi_{1} \left[P(i,t) - P_{0} - p \right] \xi_{n}, \\ P_{0} + (n-1)p \leq P(i,t) < \min(P_{0} + np, P_{\max,i}) \end{cases}$$

$$(7)$$

式中:B(i,t)为机组 *i* 在时刻 *t* 的总碳排放量;P(i,t)为机组 *i* 在时刻 *t* 的功率输出;*p* 为区间长度; $P_{\min,i}$ 和 $P_{\max,i}$ 分别为机组 *i* 最小和最大输出功率; P_0 为机 组最低输出功率; ψ_1 为碳排放强度的基准值; ξ_1,ξ_2, \dots,ξ_n 为碳排放强度的增长系数,随着碳排放的逐 渐增加,该值逐渐降低。

2.2 阶梯碳价计算模型

为有效降低节点碳排放量,将各节点每个时刻 的碳排放量分为了几个区间,主要包括免费区间、低 碳区间、中碳区间等。随着区间的上升,碳价具有一 定的涨幅,计算总碳排放成本为各区间碳价与碳排 放的乘积之和。阶梯式碳价的计算模型^[17]为

$$C_{\text{emi},i,t} = \begin{cases} \psi_2 \left[B(i,t) - B_c \right] , B(i,t) < B_c + b \\ \psi_2 \left[B(i,t) - B_c \right] + \psi_2 \left[B(i,t) - B_c - b \right] \omega, \\ B_c + b \leq B(i,t) < B_c + 2b \\ \psi_2 \left[B(i,t) - B_c \right] + \psi_2 \left[B(i,t) - B_c - b \right] \omega + \\ \psi_2 \left[B(i,t) - B_c - 2b \right] \omega, \\ B_c + 2b \leq B(i,t) < B_c + 3b \\ \vdots \end{cases}$$
(8)

式中: $C_{\text{emi},i,t}$ 为机组 *i* 在时刻 *t* 的总碳排放成本; ψ_2 为 碳排放成本基准值; B_e 为机组免费碳排放额度;*b* 为 区间长度; ω 为区间之间的碳交易价格涨幅,一般取 值较小。

3 问题建模

3.1 优化模型

该模型的优化目标函数为最小化系统发电成 本、碳排放成本以及负荷转移成本。

$$\min \sum_{t=1}^{T} \left[\left(C_{g,t} + C_{wind,t} \right) + \sum_{i=1}^{N} \left(C_{em,i,t} + C_{load,i,t} \right) \right]$$
(9)

式中: $C_{g,i}$ 为火力发电机组在时刻t的成本; $C_{wind,i}$ 为风力发电机组在时刻t的成本; $C_{load,i,i}$ 为负荷响应产生的成本。

各成本的计算方式为:

$$C_{g,t} = c_g \cdot P_{g,t} \tag{10}$$

$$C_{\text{wind},t} = c_{\text{wind}} \cdot P_{\text{wind},t} \tag{11}$$

$$C_{\text{load } i t} = c_{\text{load } i t} \cdot P_{\text{load } i t} \tag{12}$$

式中: c_g 为火力机组发电成本系数; $P_{g,t}$ 为火力机组 在时刻 t 的发电功率; c_{wind} 为风力机组发电成本系 数; $P_{wind,t}$ 为风力机组在时刻 t 的发电功率; $c_{load,i,t}$ 为 节点 i 在时刻 t 的负荷转移系数, $P_{load,i,t}$ 为节点 i 在 时刻 t 的负荷转移功率。

3.2 马尔科夫决策建模

将微电网低碳经济优化调度问题构建为一个马 尔可夫决策,即:

环境:微电网网络。

智能体:深度强化学习算法。

状态:时刻 t 微电网中各节点用电负荷功率、时刻 t 各发电机组最大出力和碳排放系数、时刻 t 风电预测功率和发电机组时刻 t 碳价。

动作:时刻 t 火力发电功率、时刻 t 各节点负荷 转移功率和时刻 t 风电接入系统功率。

奖励值:智能体针对当前状态选择执行的动作 所获得的奖励。

3.3 相关约束

$$P_{i,t} = P_{\exp,i,t} - P_{\text{wind},t} - P_{g,t}, \ i \in N$$
(13)

$$Q_{i,t} = Q_{\exp,i,t} - Q_{g,t}, \ i \in N$$
 (14)

$$P_{a\min} \le P_{a,t} \le P_{a\max} \tag{15}$$

$$P_{\text{wind,min}} \leqslant P_{\text{wind},t} \leqslant P_{\text{wind,max}} \tag{16}$$

$$\zeta = 0 \tag{17}$$

 $\Delta P_{g,\min} \leq P_{g,t} - P_{g,t-1} \leq \Delta P_{g,\max}, t > 2$ (18) 式中: $P_{i,t}$ 和 $Q_{i,t}$ 分别为节点*i*在时刻*t*净流入有功功 率和无功功率; $P_{\exp,i,t}$ 和 $Q_{\exp,i,t}$ 分别为时刻*t*节点*i* 负荷预测维持系统平衡所需有功功率和无功功率; $P_{g,\min}$ 和 $P_{g,\max}$ 分别为发电机组出力的最小值与最大 值; $P_{\text{wind,min}}$ 和 $P_{\text{wind,max}}$ 为风电机组出力的最小值与最 大值; $\zeta_{re,t}$ 为平衡节点时刻*t*相角约束; $\Delta P_{g,\min}$ 和 $\Delta P_{g,max}$ 为发电机组功率爬坡限制。

4 深度强化学习方法

在监督或无监督学习中,学习过程是基于现有 数据的,但强化学习采用了完全不同的方法,其通过 不断的试错获得最优的结果。经过训练的智能体在 其环境中以一系列时间离散步骤 *t*=1,2…,*T*移动。 在每个时间步长,智能体感知其状态并选择一个动 作 *a*_t。根据动作智能体移动到下一个状态 *s*_{t+1},它接 收到来自环境的评估反馈,这表明它的决策是以目 标为导向的。通过这种方式定义奖励 *r*_t,如此反复 训练直至结果收敛,如图 2 所示。



图 2 智能体与环境交互

4.1 评价网络

DDPG 算法的评价网络包括了计算 Q 值的评价 函数^[18]。

 $K_{\iota} = r_{\iota} + \sigma \min Q'(s_{\iota+1}, a_{\iota+1} | \vartheta')$ (19) 式中: K_{ι} 为目标评价函数的数值; σ 为折扣系数; $Q'(\cdot)$ 为目标评价函数; ϑ' 为目标评价函数中的参 数合集。

评价网络参数的损失函数为

$$L(\vartheta) = E\{ [K_t - Q(s_t, a_t | \vartheta)]^2 \}$$
(20)

式中, $E(\cdot)$ 为数学期望; $Q(\cdot)$ 为评价函数。

其梯度下降求解方法为:

$$\nabla_{\vartheta} J(\vartheta) = E\{ [K_t - Q(s_t, a_t | \vartheta)]^2 \cdot \nabla_{\vartheta} Q(s_t, a_t | \vartheta) \}$$

$$\vartheta_{\iota+1} = \vartheta_{\iota} - \delta \nabla_{\vartheta} J(\vartheta) \tag{22}$$

式中: $\nabla_{\vartheta} J(\vartheta)$ 为梯度下降方向; δ 为评价网络的学 习率; $\nabla_{\vartheta} Q(\cdot)$ 为评价函数的下降梯度。

4.2 动作网络

动作网络中 t+1 时刻的动作函数^[19]为

$$a_{t+1} = \pi_{\theta}(s_{t+1} \mid \theta) \tag{23}$$

式中: $\pi_{\theta}(\cdot)$ 为动作函数; θ 为动作函数的参数。 梯度 $\nabla_{\theta}J(\theta)$ 表示为:

$$\nabla_{\theta} J(\theta) = E \left[\nabla_{a} Q(s_{\iota}, a_{\iota} | \vartheta) \cdot \nabla_{\theta} \pi_{\theta}(s_{\iota}) \right]$$
(24)

$$\theta_{i+1} = \theta_i - \varepsilon \,\nabla_\theta J(\theta) \tag{25}$$

式中, *ε* 为动作网络的学习率。目标动作函数的计 算公式为

$$a' = \pi_{\vartheta'}(s'_{\iota+1} | \vartheta') \tag{26}$$

针对目标动作函数和目标评价函数的参数,选 用了一个较小的平滑系数实现软更新。

$$\vartheta_{\iota+1}' = \lambda \vartheta_{\iota} - (1 - \lambda) \vartheta_{\iota}'$$
 (27)

$$\theta_{i+1}' = \lambda \theta_i - (1 - \lambda) \theta_i'$$
(28)

式中:θ'为目标动作函数参数合集;λ 为平滑系数; θ'为目标评价函数参数合集。

所提方法的流程如图3所示。



5 算例分析

在 PJM-5 节点系统上验证试验,结构如图 4 所示,该节点系统主要包括了 6 条输电线路、5 种不同 类型的发电机组以及 3 个用电负荷,其中风力发电机 组接在节点 E,各节点参数来源于参考文献[20]。所 提算法选用了 python 进行程序编撰与运行。

系统各时刻用电负荷以及风力发电机组出力如 图 5 所示。从图中可以看出风力机组在 1:00— 8:00、13:00—16:00、22:00—24:00 都维持了较高 的出力。9:00—12:00、17:00—21:00 出力较低。 负荷在 7:00—21:00 之间功率较高。除了 4:00— 6:00 以外,每个时刻的用电负荷都大于风电出力。



图 4 PJM-5 节点系统



图 5 风力机组出力及用电负荷

各节点机组参数设置如表1所示,各发电机组 碳排放系数求解方法参考文献[21]。粒子群算法、 DQN 算法以及所提算法中各参数设置分别如表2 和表3所示。

为验证所提方法的有效性,选取了粒子群算法 以及 DQN 算法作为对比。粒子群算法是一种基于 个体之间信息交流和合作的优化算法,DQN 算法是

衣 1 反电机组相大参数 反 量					
机组	发电	最大出力/	成本系数/	碳排放系数/	
编号	米源	MW	(美元・MW-1)	$(t \cdot MW^{-1})$	
1	风电	预测值	10	0.04	
2	天然气	100	15	0.6	
3	煤炭	110	14	1.4	
4	煤炭	500	30	1.4	
5	煤炭	190	26	1.4	
	表	2 粒子群算	法相关参数设置	a L	
	参数	k	数(值	
	粒子	数	15	0	
粒子维度			120		
迭代次数		30 000			
惯性权重			1.2		

1 发电机组相关参数设置

表	B DQN	和	DDPG	相关参数设置
---	-------	---	------	--------

2

2

学习因子 c1

学习因子 c2

会业	数值	
麥奴	DQN	DDPG
记忆库容量	24 000	24 000
奖励值折扣因子	0.98	0.95
批处理数量	64	128
训练次数	10 000	10 000
软更新因子	0.002	0.002
动作网络学习率	0.000 1	0.000 3
评价网络学习率	0.000 2	0.000 3

Q-learning 算法的升级版,其采用深度神经网络来近 似 Q 值函数。各方法在测试集上的结果如表 4 所 示。从表 4 中可以看出,虽然粒子群算法的风机发 电成本以及负荷响应成本都低于其他两个方法,但 是其碳排放成本以及机组发电成本都高于其他两种 方法。这是因为其策略负荷需求响应较低,难以有 效地开发风力发电机组的潜力。DQN 算法相较粒 子群方法有了一定提升,但是最终的总成本依旧低 于 DDPG 算法。DDPG 算法的总成本相较粒子群算 法降低了 12.68%,相较 DQN 算法降低了 5.16%。

表 4	各算法在测试集上的成本对比	单位:美元
-----	---------------	-------

项目	粒子群算法	DQN	DDPG
机组发电成本	3.52×10^{4}	3.14×10^{4}	2.71×10^{4}
风机出力成本	1.32×10^{4}	1.45×10^{4}	1.88×10^{4}
碳排放成本	3.11×10 ⁴	2.65×10^{4}	2.36×10^{4}
负荷响应成本	2468	3056	4218
总成本	8.2×10^{4}	7.55×10^{4}	7.16×10^4

需求响应前后风电出力对比和负荷变化对比情况分别如图 6 和图 7 所示。从图 6 中可以看出,在风电出力较高的时刻,如1:00—7:00、15:00—16:00、22:00—24:00,考虑负荷响应以后,系统消纳风电的功率有所增加。这是因为通过负荷转移,该时段的负荷有所增加,从而提升了负荷需求随着风电消纳的增加,系统中火力发电相应减少,减少了碳排放量与用电成本。





图 7 需求响应前后负荷变化对比

考虑需求响应前后系统整体发电成本以及碳排 放成本如表 5 所示。从表中可以看出,考虑负荷 需求响应后,系统在负荷可调节的范围内对负荷 进行了再分配。将负荷转移至富余风力发电时 刻从而提升了风电出力权重,减少碳排放较大的 火力发电机组出力,降低系统运行成本的同时实现 碳减排。考虑负荷需求响应以后系统发电成本降低 了 2300 美元,碳排放成本降低了 7600 美元。节点 通过负荷响应加大对风电的消纳,减少了碳排放量, 如表 6 所示。从表 6 中可以看出,各节点经过需求

表 5	考虑	需求响应前后成本	对比 单	位:美元
状态		发电成本	碳排放成	本
需求响应前	2.94×10 ⁴ 3.12×10		3.12×10 ⁴	1
需求响应后		2.71×10^{4}	2.36×10 ⁴	1
	表 6	各节点碳排放量		单位:t
节点	需求	:响应前	需求响应后	
F	2 859.64		2 568.92	
G	4 325.16		4 008.56	
Н	3 768.25		3 395.74	
总碳排放量	1.068×10^{4}		9.973×10 ³	

6 结 论

上面提出了一种以系统经济性和低碳为目标的 考虑需求响应的优化调度模型,利用碳排放理论流 构建了阶梯碳价模型。通过实验验证表明:1)所提 方法能有效地求解包括系统经济性与碳排放在内的 多目标优化问题,总运营成本相较粒子群算法降低 了 12.68%,相较 DQN 算法降低了 5.16%;2)通过考 虑负荷需求响应,成功地提升了风电消纳比例并降 低了碳排放量;3)所提优化调度模型基于 DRL 算法 的快速响应能力能够实时做出决策。

参考文献

- [1] 储兆诤,张晓悦,王涛.碳中和背景下可再生能源发 电产业研究[J].能源与节能,2023,212(5):16-19.
- [2] 宋鹏飞,张超,侯建国,等.可再生能源制零碳天然气助力我国实现碳中和[J/OL].现代化工:1-11.
- [3] 李晖,刘栋,姚丹阳.面向碳达峰碳中和目标的中国
 电力系统发展研判[J].中国电机工程学报,2021,41(18):6245-6259.
- [4] JIN J L, WEN Q L , ZHAO L Y, et al. Measuring environmental performance of power dispatch influenced by low-carbon approaches[J]. Renewable Energy, 2023, 209: 325–339.
- [5] WU L Q, LI C X. Modeling and operation optimization of hydrogen-based integrated energy system with refined power-to-gas and carbon-capture-storage technologies under carbon trading[J]. Energy, 2023, 270: 126832.
- [6] ZHENG W D, XU Z H, SHAO Z G, et al. Optimal dispatch of nearly-zero carbon integrated energy system considering waste incineration plant-carbon capture system and market

mechanisms [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023,48(69):27013-27031.

- [7] NASIRI T, MOEINI-AGHTAIC M, FOROUGHI M, et al. Energy optimization of multi-carrier energy systems to achieve a low carbon community [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 390: 136154.
- [8] XIANG Y, WU G, SHEN X D, et al. Low-carbon economic dispatch of electricity-gas systems [J]. Energy, 2021, 226: 120267.
- [9] 胡维昊,曹迪,黄琦,等.深度强化学习在配电网优化 运行中的应用[J].电力系统自动化,2023,47(14): 174-191.
- [10] HOU H, GE X D, CHEN Y, et al. Model-free dynamic management strategy for low-carbon home energy based on deep reinforcement learning accommodating stochastic environments [J]. Energy and Buildings, 2023, 278: 112594.
- [11] ALABI T M, LAWRENCE N P, LU L, et al. Automated deep reinforcement learning for real-time scheduling strategy of multi-energy system integrated with post-carbon and direct-air carbon captured system[J]. Applied Energy, 2023, 333: 120633.
- [12] WAN Z Q, LI H P, HE H B, et al. Model-free real-time EV charging scheduling based on deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 10(5): 5246-5257.
- [13] LI J F, HE X T, LI W D, et al. Low-carbon optimal learning scheduling of the power system based on carbon capture system and carbon emission flow theory[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 218: 109215.
- [14] 陈家兴,王春玲,刘春明.基于改进碳排放流理论的 电力系统动态低碳调度方法[J].中国电力,2023, 56(3):162-172.
- [15] 周天睿,康重庆,徐乾耀,等.电力系统碳排放流分析 理论初探[J].电力系统自动化,2012,36(7):38-43.
- [16] 周天睿,康重庆,徐乾耀,等.电力系统碳排放流的 计算方法初探[J].电力系统自动化,2012,36(11): 44-49.
- [17] 崔杨,曾鹏,仲悟之,等.考虑阶梯式碳交易的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J].电力自动化 设备,2021,41(3):10-17.
- [18] 杨挺,赵黎媛,刘亚闯,等.基于深度强化学习的综合能源系统动态经济调度[J].电力系统自动化,2021,45(5):39-47.
- [19] ZHU J Y L, HU W H, XU X, et al. Optimal scheduling of a wind energy dominated distribution network via a

deep reinforcement learning approach [J]. Renewable Energy, 2022, 201: 792-801.

- [20] LI G Q, ZHANG R F, JIANG T, et al. Optimal dispatch strategy for integrated energy systems with CCHP and wind power [J]. Applied Energy, 2017, 192:408-419.
- 王泽森,石岩,唐艳梅,等.考虑 LCA 能源链与碳 [21] 交易机制的综合能源系统低碳经济运行及能效分 析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6):1614-1626.

作者简介:

冯文韬(1996),男,硕士,研究方向为新型电力系统:

(上接第27页)

- [13] CHEN Y B, ZHANG Z, LIU Z Y, et al. Robust N-k CCUC modelconsidering the fault outage probability of units and transmission lines [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(17): 3782-3791.
- [14] 周任军, 闵雄帮, 童小娇, 等. 电力环保经济调度矩 不确定分布鲁棒优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3248-3256.
- 季峰, 蔡兴国, 王超柱. 基于弱鲁棒优化的含风电 [15] 电力系统调度方法[J].中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4600-4609.
- SHANG C, YOU F Q. Distributionally robust optimization [16] for planning and scheduling under uncertainty [J]. Computers & Chemical Engineering, 2018, 110: 53-68.
- [17] 钱峰,白津阳,刘俊磊,等.基于弱鲁棒控制的风电降 载调度模型[J].电气自动化, 2020, 42(4): 11-13.
- 孙泽锋,李渤,王磊.计及风电相关性的电力系统 [18] 数据驱动分布鲁棒优化调度[J].中国测试, 2023, 49(8): 93-103.
- 吉兴全,郝晴,张玉敏,等.分布不确定性条件下的 [19] N-k 分布鲁棒优化机组组合[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(2): 56-64.
- 吴孟雪, 房方. 计及风光不确定性的电-热-氢综合 [20] 能源系统分布鲁棒优化[J]. 电工技术学报,2023, 38(13):3473-3485.
- [21] DELAGE E, YE Y. Distributionally robust optimization under moment rncertainty with application to data-driven problems [J]. Operations Research, 2010, 58(3): 595–612.
- [22] BERTSIMAS D, DUNN J. Optimal classification trees [J]. Machine Learning, 2017, 106(7): 1039-1082.
- SUAREZ A, LUTSKO J F. Globally optimal fuzzy decision [23] trees for classification and regression [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(12): 1297-1311.

李龙胜(1976),男,硕士,高级工程师,研究方向为新型 电力系统;

曾 愚(1986),男,硕士,高级工程师,研究方向为新型 电力系统:

潘可佳(1982),男,硕士,高级工程师,研究方向为新型 电力系统;

张子闻(1994),女,硕士,研究方向为电力大数据分析; 景致远(1999),男,硕士,研究方向为电子信息、智能电网。 (收稿日期:2023-06-27)

- [24] BERTSIMAS D, DUNN J, PASCHALIDIS A. Regression and classification using optimal decision trees [C]// 2017 IEEE MIT Undergraduate Research Technology Conference (URTC), IEEE, 2017: 1-4.
- 高红均,刘俊勇,魏震波,等.基于极限场景集的 [25] 风电机组安全调度决策模型[J].电网技术, 2013, 37(6): 1590-1595.
- ZHAO C Y, GUAN Y P. Data-driven stochastic unit [26] commitment for integrating wind generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2587-2596.
- [27] DING T, YANG Q R, YANG Y H, et al. A data-driven stochastic reactive power optimization considering uncertainties in active distribution networks and decomposition method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4994-5004.
- [28] 李兵,韩睿,何怡刚,等.改进随机森林算法在电机 轴承故障诊断中的应用[J].中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1310-1319.
- [29] 申建建,张楠男,程春田,等.基于聚类分析和决策 树的"一库多级"水电站日调度方法[J]. 中国电机工 程学报, 2019, 39(3): 652-663.
- [30] 石访, 张林林, 胡熊伟, 等. 基于多属性决策树的电 网暂态稳定规则提取方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(11): 2364-2374.
- [31] 甄永赞, 阮程. 基于代价敏感支持向量机和多变量决 策树的分级自适应暂态电压稳定评估[J/OL].电网 技术: 1-14.[2023-09-13].DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0074.

作者简介:

彭浩晋(2000),男,硕士研究生,研究方向为数据驱动 的电力系统运行规划:

邱 高(1994),男,博士,副研究员,研究方向为电力系 统人工智能应用。

(收稿日期:2023-06-11)

基于多智能体强化学习的电-碳-绿证 多市场均衡研究

马天男¹,向明旭²,魏 阳³,刘 畅^{1,4},陈玉敏³

(1. 国网四川省电力公司经济技术研究院,四川成都 610041; 2. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044; 3. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川成都 610041;

4. 四川省新型电力系统研究院,四川成都 610041)

摘 要:面向"双碳"目标及新型电力系统建设要求,电力市场机制设计对于减少碳排放、促进绿色低碳发展具有重要 意义。碳市场与绿证市场建设是促进电力系统节能减排的有效手段,研究电力市场、碳市场、绿证市场之间的耦合关 系,对于设计3个市场间的衔接机制、促进电力系统碳减排与清洁能源发展具有重要的指导意义。为此,针对碳市场 与绿证市场对电力市场均衡的耦合影响展开研究。首先,根据碳市场与绿证市场的交易规则分别建立了电-碳市场、 电-绿证市场和电-碳-绿证市场的双层优化模型;然后,利用多智能体深度强化学习算法对上述均衡模型进行求解; 最后,在修改后的 IEEE 30 节点系统上进行算例仿真,分析了碳市场和绿证市场对发电商报价策略、电力市场出清电 价等的影响以及碳市场和绿证市场之间的耦合关系。

关键词:电力市场;碳市场;绿证市场;多智能体深度强化学习

中图分类号:TP 273 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)06-0083-08

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230612

Research on Multi-market Equilibrium of Electricity-Carbon-Green Certificates Based on Multi-agent Reinforcement Learning

MA Tiannan¹, XIANG Mingxu², WEI Yang³, LIU Chang^{1,4}, CHEN Yumin³

(1. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 4. Sichuan New Electric

Power System Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Towards the target of "carbon peak and carbon neutrality" and the development of new power systems dominated by the renewables, the design of electricity market mechanisms plays a significant role in reducing carbon emissions and promoting green and low-carbon development. The construction of carbon market and green certificate market is regarded as an effective means to promote energy conservation and emission reduction in power systems. Researches on the coupling relationship among electricity market, carbon market and green certificate market are of great guiding significance for designing cohesive mechanisms of different markets and promoting carbon reduction and development of the renewables. With this in mind, the coupling impact of carbon market and green certificate market on the equilibrium of electricity market is studied. Firstly, based on the transaction rules of carbon market and green certificate market, bi-level optimization models for electricity-carbon market, electricity-green certificate market and electricity-carbon-green certificate market are established respectively. Then, the multi-agent deep reinforcement learning algorithm is utilized to solve the aforementioned equilibrium models. Finally, simulations are conducted on the modified IEEE 30-bus system. The influence of carbon market and green certificate market on the bidding strategies of generation companies and the electricity market prices are analyzed as well as the coupling relationship between carbon market and green certificate market.

Key words: electricity market; carbon market; green certificate market; multi-agent deep reinforcement learning

0 引 言

电力市场机制设计对于推进碳交易市场参与的 电力市场建设并加速以绿电为主体的高比例清洁能 源电力系统建设具有重要作用,是构建新型电力系 统、推进"双碳"战略目标的关键途径^[1-2]。中国在 2017 年发布了《全国碳排放权交易市场建设方案 (发电行业)》,指出"按照国家生态文明建设和控制 温室气体排放的总体要求,在不影响经济平稳健康 发展的前提下,分阶段、有步骤地推进碳市场建 设"^[3]。同时,发布了一系列的工作方案和管理办 法在全国范围内试行绿证交易^[4-6]。

电力市场、碳市场与绿证市场之间通过市场机制的作用深刻影响市场主体决策,通过价格联动和 供需关系等产生交互影响。3个市场在核心产品属 性、政策、技术、市场定位等方面联系密切,机制层面 的有效协同将有利于形成合力,共同推动清洁能源 发展和行业社会碳减排^[7]。因此,研究电力市场、 碳市场、绿证市场等各市场之间的耦合分析对于中 国电力市场的建设具有重大意义。

电力市场均衡分析方法常采用以市场主体利润 最大化为目标的报价决策模型和以社会福利最大化 为目标的市场出清模型共同构成的电力市场双层均 衡模型^[8]。该模型的求解方法为:先基于下层模型 的卡罗需-库恩-塔克(Karush-Kuhn-Tucher,KKT) 条件和线性化手段,将双层均衡模型转化为带均 衡约束的均衡优化模型(equilibrium problem with equilibrium constraints, EPEC);再将模型中的各非 线性项线性化处理后进行求解^[9]。此外,还可以使 用对角化算法求解上述 EPEC 模型^[10-12]。上述模 型驱动方法在求解线性模型的电力现货市场均衡解 方面取得了显著成效。

然而,在新型电力系统建设背景下,现有的均衡 分析模型与求解方法难以满足电力市场机制设计的 更高要求。现有的均衡分析方法,特别是 EPEC 方 法,受 KKT 条件的限制,其建模过程难以考虑发电 机组成本和运行特性的非凸性,并且模型线性化过 程中产生的互补松弛条件数量随系统规模和机制复 杂程度的增加而迅速增长,导致该方法在解决大规 模系统和复杂机制下的市场均衡问题时面临巨大挑战。同时,上述模型本质上是一种完全信息博弈问题,每个市场主体都知晓其他主体以及市场出清的 全部信息,这与实际电力市场的有限信息环境不符。 因此,亟需改进和完善均衡分析方法,以有效解决电 力市场建设面临的复杂机制设计问题。

为此,有学者尝试使用数据驱动的强化学习算 法求解电力市场均衡问题^[13-14]。强化学习方法的 无模型、自主学习等特征与电力市场均衡分析的研 究需求相契合,市场主体可以通过与出清环境的不 断交互,逐渐学习其最佳策略,不依赖对市场出清环 境和其他市场主体策略的了解,只依赖于自身运行 特性和观测到的市场出清结果^[15],从而避免了模型 构建与转化的复杂过程。

下面采用多智能体深度强化学习作为电力市场 均衡分析方法,来探讨碳市场与绿证市场交易机制 对电力市场均衡的影响。首先,对电力市场均衡模 型进行阐述,并采用以最小化购电成本为目标的电 力市场双层优化模型,为后续分析碳市场与绿电市 场对电力市场的耦合影响奠定模型基础;然后,建立 了电力市场与碳市场的联合出清模型、电力市场与 绿证市场的联合出清模型以及电-碳-绿证多市场 的联合出清模型;最后,提出了基于多智能体深度强 化学习的电力市场均衡求解算法,经过验证可有效 获取市场均衡解。

1 电-碳-绿证市场均衡研究

1.1 电-碳市场双层优化模型

碳市场的建设会对电力系统产生较大影响。考 虑碳市场耦合的电力市场均衡研究是市场机制设计 的重要一环,对此提出了电-碳市场双层优化模型。

碳交易市场的参与主体仅包含常规能源发电 商,不包含可再生能源发电商。所提模型中,可再生 能源发电商仅参与电力日前市场获取收益,常规能 源发电商同时参与电力日前市场和碳市场获取收 益。因此,电-碳市场双层优化模型包含可再生能 源利润最大化模型、常规能源发电商利润最大化模 型和日前电力市场出清模型3个部分。 1.1.1 上层模型 1:可再生能源发电商利润最大化

目标函数为最大化可再生能源发电商的利润, 即日前市场出清的收益减去其发电成本,约束为限 制发电商的报价范围。

$$\max \left[\lambda_{\phi_n^{\text{RC}}} P - \left(\frac{1}{2} a (P^2 + bP) \right] \right]$$

s.t. $b \leq b_{\text{bid}} \leq b_{\text{max}}$ (1)

式中: $\lambda_{\Phi_n^{\rm RC}}$ 为可再生能源机组在下层日前市场出清 模型计算出的节点电价, $\Phi_n^{\rm RC}$ 为在节点 n上的可再 生能源机组集合,这里假设 1 个发电商只拥有 1 个 机组;P 为机组的出力;a 和 b 分别为机组边际成本 的斜率和截距,在日前市场报价时,发电商可以通过 策略性上报边际成本的斜率和截距来增加自己的收 益; $b_{\rm bid}$ 为发电商上报的价格; $b_{\rm max}$ 为发电商上报价格 的上限。

1.1.2 上层模型 2:常规能源发电商利润最大化

常规能源机组发电过程中会产生二氧化碳排 放,其碳排放量由式(2)计算,机组的碳排放成本由 式(3)计算。若机组的碳排放大于免费碳配额,即 碳排放成本为正,则发电商需要从碳排放权市场中 购买所需的碳排放权;若机组的碳排放小于免费碳 配额,即碳排放成本为负,则发电商可在碳排放权市 场中出售剩余的碳排放权。

$$e = \varphi P \tag{2}$$

$$C_{\rm CET} = p_{\rm CET}(e - e_{\rm f}) \tag{3}$$

式中:e、φ、C_{CET}分别为常规能源机组的碳排放量、碳 排放强度和碳排放成本;p_{CET}为碳排放权市场中的 碳价;e_f为免费碳排放配额。

常规能源发电商的利润最大化模型如式(4)所示,目标函数为最大化常规能源发电商的利润,即日前市场出清的收益减去其发电成本和碳排放成本,约束为限制发电商的报价范围。

$$\max\left[\lambda_{\varPhi_{n}^{NG}}P - \left(\frac{1}{2}aP^{2} + bP\right) - p_{CET}(e - e_{f})\right]$$

s.t $b \leq b_{bid} \leq b_{max}$ (4)

式中: $\lambda_{\boldsymbol{\sigma}_{n}^{NG}}$ 为常规能源机组在下层日前市场出清模型计算出的节点电价, $\boldsymbol{\Phi}_{n}^{NG}$ 为在节点n上的常规能源机组集合。

1.1.3 下层模型:日前电力市场出清

日前电力市场出清模型如式(5)一式(8)所示。

目标函数式(5)为最小化总发电成本,也称作最大 化社会福利;式(6)为节点功率平衡约束;式(7)为 机组出力上下限约束;式(8)为支路潮流约束。

$$\min \sum_{c} \left(\frac{1}{2} a_{c} P_{c}^{2} + b_{c} P_{c} \right), c \in \Phi_{n}^{\mathrm{RG}} \cup \Phi_{n}^{\mathrm{NG}}$$
(5)
$$\sum_{c} P_{c} - \sum_{d} P_{d} - \sum_{m} B_{n,m} (\theta_{n} - \theta_{m}) = 0$$

$$d \in \Phi_n^{\mathrm{D}}, m \in \Omega_n \tag{6}$$

$$P_c^{\min} \le P_c \le P_c^{\max} \tag{7}$$

$$-S_{n,m} \leq B_{n,m}(\theta_n - \theta_m) \leq S_{n,m}$$
(8)

式中:c代表第c个发电商,发电商包括常规能源发 电商和可再生能源发电商;d代表第d个负荷;n和 m为节点号; $\Phi_n^{\rm D}$ 为在节点n上的负荷集合; Ω_n 为与 节点n相连的节点集合; P_d 为负荷d的功率需求; θ_n 和 θ_m 分别为节点n和节点m的相角; $B_{n,m}$ 为连 接节点n和节点m的支路电纳; $B_{n,m}(\theta_n - \theta_m)$ 为该支 路上的功率; $S_{n,m}$ 为该支路的容量上限。

1.2 电-绿证市场双层优化模型

考虑绿证市场耦合的电力市场均衡研究是市场 机制设计的重要一环,因此提出了电-绿证市场双 层优化模型。

绿证交易市场的参与主体仅包含可再生能源发 电商,常规能源发电商不参与其中。所提模型中,常 规能源发电商仅参与电力日前市场获取收益,可再 生能源发电商同时参与电力日前市场和绿证市场获 取收益。因此,电-绿证市场双层优化模型包含可 再生能源利润最大化模型、常规能源发电商利润最 大化模型和日前电力市场出清模型3个部分。

1.2.1 上层模型1:可再生能源发电商利润最大化

在电力市场中出清后,根据可再生能源发电商 的发电量为其颁发相同数量的绿证,可再生能源发 电商可在绿证市场中将其出售,出售绿证获得的收 益由式(9)计算。

$$R_{\rm TGC} = p_{\rm TGC} P \tag{9}$$

式中:R_{TCC}为可再生能源发电商出售绿证获得的收益;P_{TCC}为绿证价格。

可再生能源发电商的利润最大化模型如式(10)所示,目标函数为最大化可再生能源发电商的利润,即日前市场出清的收益加上在绿证市场交易的收益减去其发电成本,约束为限制发电商的报价范围。

四川电力技术

$$\begin{bmatrix} \lambda_{\Phi_n^{\text{RC}}} P + p_{\text{TGC}} P - (\frac{1}{2}aP^2 + bP) \end{bmatrix}$$

s.t. $b \le b_{\text{bid}} \le b_{\text{max}}$ (10)

1.2.2 上层模型 2:常规能源发电商利润最大化

目标函数为最大化常规能源发电商的利润,即 日前市场出清的收益减去其发电成本,约束为限制 发电商的报价范围。

$$\max \left[\lambda_{\Phi_n^{\rm NC}} P - \left(\frac{1}{2} a P^2 + b P \right) \right]$$

s.t. $b \leq b_{\rm bid} \leq b_{\rm max}$ (11)
1.2.3 下层模型:日前电力市场出清

电-绿证市场双层优化模型的下层模型同第 1.1.3节。

1.3 电-碳-绿证市场双层优化模型

所建的电-碳-绿证市场双层优化模型如图 1 所示:上层为发电商利润最大化模型,求解得到发电 商在日前市场中的报价策略传递给下层模型;下层 为日前市场、碳市场、绿证市场出清模型,求解得到 日前市场的节点电价和各发电商出清电量、可再生 能源发电商颁发绿证数量、常规能源发电商碳排放 量等市场出清结果传递给上层模型。在所建模型 中,可再生能源发电商参与电力日前市场和绿证市 场获取收益,常规能源发电商参与电力日前市场和 碳市场获取收益。因此,电-碳-绿证市场双层优化 模型包含可再生能源利润最大化模型、常规能源发电 商利润最大化模型和日前电力市场出清模型 3 个部 分。



图 1 电力市场双层优化模型

 1.3.1 上层模型1:可再生能源发电商利润最大化 目标函数为最大化可再生能源发电商的利润, 即日前市场出清的收益加上绿证市场的收益减去其 发电成本,约束为限制发电商的报价范围。

$$\max \left[\lambda_{\varphi_{n}^{\text{RC}}} P + p_{\text{TCC}} P - \left(\frac{1}{2}aP^{2} + bP\right) \right]$$

s.t. $b \leq b_{\text{bid}} \leq b_{\text{max}}$ (12)

1.3.2 上层模型 2:常规能源发电商利润最大化

目标函数为最大化常规能源发电商的利润,即 日前市场出清的收益减去其发电成本和碳排放成 本,约束为限制发电商的报价范围。

$$\max\left[\lambda_{\phi_{n}^{NG}}P - \left(\frac{1}{2}aP^{2} + bP\right) - p_{CET}(e - e_{f})\right]$$

s.t. $b \leq b_{hid} \leq b_{max}$ (13)

电-碳-绿证市场双层优化模型的下层模型同 为第1.1.3节,此处不再赘述。

2 基于多智能体深度强化学习的电力 市场均衡求解方法

2.1 多智能体双延迟深度确定性策略梯度算法

在电力市场均衡问题中,每个市场参与主体都 被建模为智能体,因此在系统中存在多个智能体,各 智能体之间的行为会相互影响,共同推动整个系统 的演化。为了解决电力市场中的多智能体系统演化 问题,多智能体强化学习(multi-agent reinforcement learning)方法被广泛采用。多智能体双延迟深度确定 性策略梯度(multi-agent twin delayed deep deterministic policy gradient, MATD3)算法是一类多智能体强化 学习方法。智能体系统中,多个智能体处于相同的 环境中,它们分别独立与环境交互,利用环境的反馈 奖励更新自身策略。MATD3T 算法在解决电力市场 的多智能体系统问题中表现出了较好的性能。 MATD3 算法包括策略网络和价值网络。其中,策略 网络的输入是智能体 i 对环境的观测 oⁱ 及决策变量 θ^{i} ,输出动作 $a^{i} = \mu(o^{i}; \theta^{i})$ 控制智能体 i 的行为。价 值网络的输入是所有 k 个智能体的观测,即全局状 态 $s = \{o^1, o^2, \dots, o^k\}$, 输出 $q(s, a; \omega^i)$ 用于评价智能 体 i 动作的优劣,可以指导策略网络改进其策略。 MATD3 算法分别训练策略网络与价值网络,训练数 据是从经验回放池中取出 t 时段的四元组(s_1, a_2, r_1 , *s*₍₊₁), 如式(14)—式(17) 所示。

$$s_{t} = \{o_{t}^{1}, o_{t}^{2}, \cdots, o_{t}^{k}\}$$
(14)

max

$$a_{t} = \{a_{t}^{1}, a_{t}^{2}, \cdots, a_{t}^{k}\}$$
(15)

$$r_{i} = \{r_{i}^{1}, r_{i}^{2}, \cdots, r_{i}^{k}\}$$
(16)

$$s_{t+1} = \{o_{t+1}^1, o_{t+1}^2, \cdots, o_{t+1}^k\}$$
(17)

式中: s_i 为t时段的全局状态; a_i 为t时段的输出动作; r_i 为t时段的奖励回报。

训练策略网络 $\mu(o^{i};\theta^{i})$ 的目标是提高价值网 络,对智能体*i*的打分 $q(s,a;\omega^{i})$,如式(18)所示。 对策略网络的目标做蒙特卡洛近似并求梯度,然后 做梯度上升更新参数 θ^{i} ,如式(19)—式(20)所示。 $J^{i}(\theta^{1},...,\theta^{k}) =$

$$E_{s}\left\{q\left[S,\left\{\mu(o^{1};\theta^{1}),\ldots,\mu(o^{k};\theta^{k})\right\};\omega^{i}\right]\right\}$$
(18)

$$g_{\theta}^{\iota} = \nabla_{\theta^{\iota}} q \left[s_{\iota}, \left\{ \mu(o^{1}; \theta^{1}), \dots, \mu(o^{k}; \theta^{k}) \right\}; \omega^{\iota} \right]$$

$$(19)$$

$$\theta^{\iota} \leftarrow \theta^{\iota} + \beta \cdot g^{\iota}_{\theta} \tag{20}$$

式中: J^{i} 为智能体 i 的策略网络目标函数; E_{s} 为状态 s 的期望;S 为状态 s 的随机变量; ω^{i} 为智能体 i 的策略网络参数; g_{θ}^{i} 为智能体 i 的策略梯度; β 为策略网络的学习率。

训练价值网络的目标是使其对智能体 *i* 动作的 打分 $q(s,a;\omega^i)$ 更加接近动作价值函数 $Q^i_{\pi}(s,a)$ 。 从经验回放池中抽取四元组 (s_i, a_i, r_i, s_{i+1}) ,使用各 智能体的策略网络输出 t+1 时刻所有智能体的动作 $a_{t+1} = \{a^1_{t+1}, a^2_{t+1}, \dots, a^k_{t+1}\}$,然后计算目标和误差,如 式(21)—式(22)所示;最后,做梯度下降更新参数 ω^i ,如式(23)所示,使价值网络的打分更加接近目标。

$$\boldsymbol{y}_{t}^{i} = \boldsymbol{r}_{t}^{i} + \boldsymbol{\gamma} \cdot \boldsymbol{q}(\boldsymbol{s}_{t+1}, \boldsymbol{a}_{t+1}; \boldsymbol{\omega}^{i})$$
(21)

$$\boldsymbol{\delta}_{t}^{i} = q(\boldsymbol{s}_{t}, \boldsymbol{a}_{t}; \boldsymbol{\omega}^{i}) - \boldsymbol{y}_{t}^{i}$$
(22)

$$\boldsymbol{\omega}^{i} \leftarrow \boldsymbol{\omega}^{i} - \boldsymbol{\alpha} \cdot \boldsymbol{\delta}_{\iota}^{i} \cdot \nabla_{\boldsymbol{\omega}^{i}} q(\boldsymbol{s}_{\iota}, \boldsymbol{a}_{\iota}; \boldsymbol{\omega}^{i}) \qquad (23)$$

式中: y_i^i 为智能体 *i* 在 *t* 时段的价值网络时序差分 (temporal difference, TD)目标; δ_i^i 为价值网络的 TD 误差; γ 为折扣率: α 为价值网络的学习率。

2.2 基于多智能体深度强化学习算法的模型求解 算法

使用 MATD3 算法求解电力市场均衡,电力市场环境下的强化学习要素设置如下:

1)智能体(Agent):参与电力市场的所有发电 商都被设置为智能体,假设系统中共有 k 个发电商。

2)环境(Environment):将环境定义为电力市场 的出清过程,在发电商报价后电力市场进行出清并 将出清结果反馈给发电商。

3) 观测(Observation): 定义环境反馈给发电商

的市场出清结果为发电商 $c \neq t$ 时段的本地局部观 测 o_t^c 。

4) 状态(State): 定义状态 $s_t = \{o_t^1, ..., o_t^e, ..., o_t^k\}$ 为 所有发电商 t 时段局部观测的集合。

5)动作(Action):定义发电商 $c \neq t$ 时段策略性 报价为动作 a_t^c ,所有发电商在 t 时段的动作集合为 $a_t = \{a_t^1, ..., a_t^c, ..., a_t^k\}$ 。

6)奖励(Reward):定义奖励为 t 时段电力市场 出清中发电商 c 的收益 r_{t}^{e} ,所有发电商在 t 时段的奖 励集合为 $r_{t} = \{r_{t}^{1}, ..., r_{t}^{e}\}$ 。

基于 MATD3 算法求解电力市场均衡模型的具体步骤如下:

1)初始化各发电商智能体的策略网络 θ 、价值 网络 ω_a 和 ω_b 、目标策略 θ_{target} 网络以及目标价值网 络 $\omega_{a,target}^c$ 和 $\omega_{b,target}^c$ 等参数。

2)各发电商对当前环境进行观测,并向市场 环境上报价格 $b_{bid} = \{b_1^{bid}, ..., b_e^{bid}, ..., b_k^{bid}\}$ 。中央 控制器收集所有发电商在 t 时段的状态观测 $s_i = \{o_t^1, ..., o_t^c, ..., o_i^k\}$,执行市场出清程序,并将奖励 $r_i = \{r_t^1, ..., r_t^c, ..., r_i^k\}$ 反馈给各发电商,储存本次的状态转 移矩阵四元组 (s_t, a_t, r_t, s_{t+1}) 。

3)按照训练频率定期更新网络参数。从经验 回放池中随机抽样一个四元组的 mini-batch,对于各 发电商计算其目标策略网络和目标价值网络的输 出,并根据目标网络对价值网络和策略网络的参数 ω_a、ω_b、θ进行更新。

4)按照软更新频率定期更新目标网络参数。 根据步骤 3 中计算得到的目标策略网络和目标价值 网络输出,对目标网络参数 ω^c_{a,target}、ω^c_{b,target}、θ^c_{target}进行 软更新。

5)输出电力市场均衡状态下各发电商的报价 策略 $b_{bid} = \{b_1^{bid}, \dots, b_c^{bid}, \dots, b_k^{bid}\}$ 。

3 算例研究

3.1 多智能体强化学习算法有效性验证

采用经过修改的 IEEE 30 节点测试系统进行分 析验证。该系统有 30 个节点、41 条支路、20 处负荷 和 6 台发电机组,其中:机组 G1 和 G2 为风电机组, 由可再生能源发电商持有;机组 G3—G6 为常规能 源机组,由常规能源发电商持有。发电机组参数见 表 1。

表1 发电机组参数

发电	接入	发电	发电	成本
机组	节点	容量/MW	<i>a/</i> (美元・MW ⁻²)	<i>b/</i> (美元・MW ⁻¹)
G1	1	60	0.100	18.0
G2	2	60	0.100	20.0
G3	13	40	0.200	24.0
G4	22	50	0.175	25.0
G5	23	30	0.250	30.0
G6	27	55	0.250	32.5

使用第 1.2 节中双层优化模型和强化学习算法 对测试系统的市场均衡进行求解,训练过程如图 2 所示。训练过程共 30 000 步,前 10 000 步为随机生 成动作,以获得尽可能多的观测状态作为策略网络 和价值网络的训练数据;后 20 000 步智能体根据策 略网络生成报价动作,智能体的价值网络和策略网 络不断训练更新,策略网络逐渐学习到最优报价策 略,最后生成稳定的报价动作。从图 2 可以看出随 着训练进行各智能体的报价逐渐趋于收敛。



3.2 运行结果分析

3.2.1 碳排放配额及碳价对市场均衡点的影响

为探究碳配额对市场均衡点的影响,设置 e_f 为 30 t、20 t、10 t 分别对应碳配额宽松、碳配额适度收 紧和碳配额严重收紧 3 种场景。同时,为探究碳价 对市场均衡点的影响,设置 p_{CET}从 0 至 20 美元/t 以 步长 2 美元/t 递增。

碳配额和碳价对市场出清电价的影响如图 3 所示,其中场景 1、场景 2、场景 3 分别对应于碳配额宽松、碳配额适度收紧和碳配额严重收紧的场景。

从图 3 中可以看出,出清电价随碳价的升高呈 上升趋势。这是因为随着碳价的升高,高排放机组 发电需要花费更高的成本从碳市场中购买碳排放 权,其总利润降低,因此持有高排放机组的发电商希 望通过上报高于发电成本的价格以提高日前电力市 场出清电价,从而增加其在电力市场中获得的利润。



图 3 不同碳配额和碳价下的市场出清电价

在3个碳配额场景中:碳配额适度收紧时,市场 出清电价的抬升相对较小,仅高排放机组有动力虚 报成本;碳配额严重收紧时,低排放机组也需要购买 碳排放权,同时高排放机组的发电利润甚至可能小 于购买碳排放权的成本,因此,在该场景的仿真中常 规能源发电商都存在虚报成本的行为,电价抬升较 大;碳配额宽松时,碳市场对机组的发电约束较小, 在碳价较低时碳市场对发电商的报价影响不大,而 在碳价较高时发电商可从碳市场中交易获得较高利 润,因此在该场景的仿真中,发电商倾向于在碳市场 中交易,均选择在电力市场中虚报成本,导致出清电 价急剧抬升。

3.2.2 绿证价格对市场均衡点的影响

为探究绿证价格对市场均衡点的影响,设置 p_{TCC}从0至10美元/张以步长1美元/张递增。不同 绿证价格下可再生能源发电商报价以及市场出清电 价如图4所示。由图4可以看出,随着绿证价格的 上升,可再生能源发电商的报价逐渐降低,最终趋于 上报真实发电成本。其主要原因是可再生能源发电 商在绿证市场中的收益取决于其实际发电量,若上 报较高的价格,可能会使其成为边际机组导致发电 量减少,从而也导致其在绿证市场的收益减少。



图 4 不同绿证价格下的可再生能源发电商报价

3.2.3 碳价与绿证价格对市场均衡点的耦合影响 为探究碳价和绿证价格对市场均衡点的影响, 设置碳价从0至20美元/t以步长5美元/t递增,设置 p_{TCC}从0至10美元/张以步长2.5美元/张递增, 设置碳配额为适度收紧场景。

碳价和绿证价格对市场均衡点的影响如图 5 所 示。可以看出,市场出清电价随碳价上升而升高,随 绿证价格上升而降低。



图 5 不同碳价和绿证价格下的市场出清电价



图 6 不同碳价和绿证价格下的可再生能源机组报价

为了进一步研究碳价与绿电价格对发电商报价 策略的耦合影响,仿真分析了不同碳价与绿证价格 下可再生能源机组 G1、低排放机组 C5 和高排放机 组 G3 的报价,如图 6—图 8 所示。在高碳价场景 下,低排放机组倾向于在碳市场中获利,高排放机组 希望抬升出清电价以增加利润,因此常规能源机组 都有动力上报更高的价格。常规能源机组虚报成本 使得可再生能源机组也具有上报更高价格的倾向, 此时绿证市场的参与增加了可再生能源机组对自身 发电量削减的风险厌恶程度,消除了其上报高价的 倾向。由此得出,碳市场的参与增加了发电商在电 力市场报价中使用市场力的倾向,绿证市场的参与降 低了发电商在电力市场报价中使用市场力的倾向。



图 7 不同碳价和绿证价格下的低排放机组报价



图 8 不同碳价和绿证价格下的高排放机组报价

4 结 论

上面在电力市场环境下,根据碳市场与绿证市场 的交易规则分别建立了电-碳市场、电-绿证市场和 电-碳-绿证市场的双层优化模型,采用强化学习方法 对市场均衡进行求解,并就碳市场和绿证市场对电力 市场运行的影响进行了探讨。所得主要结论如下:

1)设置适度收紧的碳配额以及适当的碳价能 够增加低排放机组的利润,有效激励低排放机组的 发电意愿,对电力系统的减排作用较大;严重收紧或 宽松的碳配额不能有效激励低排放机组发电,对电 力系统的减排作用较小。此外,过高的碳价会导致 电价飙升,扰乱电力市场运营秩序。

2)绿证市场的参与可以增加可再生能源发电 商的利润,激励可再生能源机组发电,放弃其在电力 市场中的市场力,从而降低市场出清电价。

3)市场出清电价和碳价成呈正相关,和绿证价 格呈负相关,当前电力系统环境下电价受碳价的影 响相对较大;碳市场的参与促进发电商在电力市场 中使用市场力,而绿证市场的参与限制发电商在电 力市场报价中使用市场力。

参考文献

- [1] 崔东君,和敬涵,程晓春,等.考虑可再生能源配额分 配的电力零售市场设计[J].四川电力技术,2021, 44(1):70-76.
- [2] 陈雪,李健华,武云霞,等.水风光互补系统碳电打捆
 交易技术及闭环回购策略 [J].四川电力技术,2023,46(3):35-40.
- [3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展改 革委关于印发《全国碳排放权交易市场建设方案(发 电行业)》的通知[EB/OL].[2017-12-18].https:// www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/201712/t20171220_ 960930_ext.html.
- [4] 国家能源局.国家发改委、财政部、国家能源局联合印 发《关于做好可再生能源绿色电力证书全覆盖工作促进 可再生能源电力消费的通知》[EB/OL].[2023-07-25]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2023-07/25/c_1310735434.htm.
- [5] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.还原绿色电 力属性,助力"双碳"目标达成——《绿色电力交易试 点工作方案》解读[EB/OL].[2021-09-27].https:// www.ndrc.gov.cn/fggz/fgzy/xmtjd/202109/t20210927_ 1297840.html.
- [6] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.国家发展改革 委、国家统计局、国家能源局联合印发《关于进一步做 好新增可再生能源消费不纳入能源消费总量控制有关 工作的通知》[EB/OL].[2012-11-16]. https://www. ndrc.gov.cn/xxgk/jd/jd/202211/t20221116_1341436.html.
- [7] 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.
- [8] 舒畅,钟海旺,夏清.基于优化理论市场化的日前电力市 场机制设计[J].电力系统自动化,2016,40(2):55-62.
- [9] GUO H Y, CHEN Q Z, XIA Q, et al. Electricity wholesale market equilibrium analysis integrating individual risk-averse features of generation companies [J]. Applied

Energy, 2019, 252: 113443.

- [10] WANG C, WEI W, WANG J H, et al. Strategic offering and equilibrium in coupled gas and electricity Markets [J].
 IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 290-306.
- [11] DAI T, QIAO W. Finding equilibria in the pool-based electricity market with strategic wind power producers and network constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 389-399.
- [12] YE Y J, PAPADASKALOPOULOS D, STRBAC G. Investigating the ability of demand shifting to mitigate electricity producers' market power[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 3800-3811.
- [13] RAHIMIYAN M, MASHHADI H R. An Adaptive Q-Learning algorithm developed for agent-based computational modeling of electricity market [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 2010, 40(5): 547-556.
- [14] 樊东,毛锐,文旭,等.新型电力系统背景下可再生能 源参与电力市场交易策略研究[J].四川电力技术, 2021,44(5):64-70.
- [15] DU Y, LI F, ZANDI H, et al. Approximating Nash equilibrium in cay-ahead electricity market bidding with multi-agent deep reinforcement Learning[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(3): 534-544.

作者简介:

马天男(1992),男,博士,高级工程师,主要从事能源电 力规划、电力市场、电力技术经济等领域研究;

向明旭(1994),男,博士,助理研究员,主要从事电力系统运行优化、电力市场等领域研究;

魏 阳(1987),女,硕士,高级经济师,主要从事电力低 碳经济、大数据应用研究。

(收稿日期:2023-07-12)

欢迎投稿

欢迎订阅



上一家, 毛玉校, 翊强 二等奖 基于击穿间隙与可变电阻的配电网弧光接地故障建模分析 李世龙, 张华, 龙星, 高乙文, 苏学能 山区输电线路微型桩模块化钻机的研制 並太, 范荣全, 贺前, 王杰, 李何钰秋 生 500 kV干式平波电抗器抗震性能分析 朱旺, 任阿阳, 薛志航, 谢强 山又条件下35 kV输电线路故障信号特征试验研究 李唯佳, 杨宇航, 杨佳才, 张星海, 范松海, 陈: 三等 2 抽水蓄能在四川电网的应用前景展望 陈刚, 丁理杰, 韩晓言, 王亮, 李甘, 史华勃 基于配电网一二次融合成套设备的接地故障处理方案研究 曹先锋, 任百群, 朱兵, 石勇, 朱中华 基于家庭学习的电力作业人员行为识别技术 王鸿, 邓元实, 常政威, 吴杰, 陈明举 城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 的分析 魏德, 刘畅, 徐琳 基于徽柳匹配的配电网题路故障区段定位方法 南之文, 龙星, 苏学能, 石银, 南红均 基于徽柳匹配配配电网级路故障区段定位方法 南之文, 龙星, 苏学能, 石银, 南红均 基于徽称声电检测的变正器现场局部放电诊断及定伯	特高压换流变压器套管电连接结	构地震累积效应评估方法研究
 生的 kV干式平波电抗器抗震性能分析 生 800 kV干式平波电抗器抗震性能分析 朱 部 年, 龙星, 高艺文, 苏学能 山区输电线路微型桩模块化钻机的研制 盐杰, 范荣全, 贺前, 王杰, 李何钰秋 上久条件下35 kV输电线路故障信号特征试验研究 李哐佳,杨宇航,杨佳才,张星海,范松海,陈 上久条件下35 kV输电线路故障信号特征试验研究 李哐佳,杨宇航,杨佳才,张星海,范松海,陈 如火条件下35 kV输电线路故障信号特征试验研究 李哐佳,杨宇航,杨佳才,张星海,范松海,陈 如火条件下35 kV输电线路故障信号特征试验研究 李哐佳,杨宇航,杨佳才,张星海,范松海,陈 基于条件风险价值风险控制的多电源虚拟电厂机组动态 优化模型 刘国新,吴杰康,蔡志宏,王瑞东,蔡翰健,张 基于家庭学习的电力作业人员行为识别技术 王鸿,邓元实,常政威,吴杰,陈明举 基于深度学习的电力作业人员行为识别技术 王鸿,邓元实,常政威,吴杰,陈明举 城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 的分析 强铬、强巍,刘畅,徐琳 基于镍糊匹配的配电网短路故障区段定位方法 高艺文,龙星,苏学能,石碱,高红均 基于電频带声电检测的变压器现场局部放电诊断及定估 	上一家,毛雪	臣仪, 财独
 生 800 kV干式平波电抗器抗震性能分析 李世龙,张华,龙星,高艺文,苏学能 山区输电线路微型桩模块化钻机的研制 董杰,范荣全,贺前,王杰,李何钰秋 生 800 kV干式平波电抗器抗震性能分析 朱旺,任阿阳,薛志航,谢强 山火条件下35 kV输电线路故障信号特征试验研究 李哇佳,杨宇航,杨佳才,张星海,范松海,陈; 三等 三等 注 北木蓄能在四川电网的应用前景展望 陈刚,丁理杰,韩晓言,王亮,李甘,史华勃 基于配电网一二次融合成套设备的接地故障处理方案研究 曾先锋,任百群,宋兵,石勇,朱中华 基于配电网一二次融合成套设备的接地故障处理方案研究 曾先锋,任百群,宋兵,石勇,朱中华 基于家庭学习的电力作业人员行为识别技术 王湾,邓元实,常政威,吴杰,陈明举 城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 的分析 魏巍,刘畅,徐琳 基于操制匹配的配电网短路故障区段定位方法 高艺文,龙星,苏学能,石钺,高红均 基于操制匹配的配电网短路故障区段定位方法 高艺文,龙星,苏学能,石钺,高红均 基于面抗重塑的集中式光伏电站谐波抑制策略研究 书表表示表示表示表表示表示表示表示表示表表示表示表示表表示之。 "要定案,带声电检测的变压器现场局部放电诊断及定位 书表表示表示表示表表示表表示表表示表示表示表表示表示表示表示表示		
基于击穿间隙与可变电阻的配电网狐光接地故障建模分析 ± 800 kV干式平波电抗器抗震性能分析 李世龙,张华,龙星,高艺文,苏学能 山火条件下35 kV输电线路故障信号特征试验研究 查太,范荣全,贺前,王杰,李何钰秋 山火条件下35 kV输电线路故障信号特征试验研究 李唯佳,杨宇航,杨佳才,张星海,范松海,陈 少唯佳,杨宇航,杨佳才,张星海,范松海,陈 三等 之 加水蓄能在四川电网的应用前景展望 陈刚,丁理杰,韩晓言,王亮,李甘,史华勃 基于条件风险价值风险控制的多电源虚拟电厂机组动态 基于配电网一二次融合成套设备的接地故障处理方案研究 第六人人人人行为识别技术 基子深度学习的电力作业人员行为识别技术 四川地区大规模水电集群停机避峰特征分析及管理系织 徐涛,杜成锐,王金龙,黄山松,王丽莉,王驾起 基于深度学习的电力作业人员行为识别技术 四川地区大规模水电集群停机避峰特征分析及管理系织 徐涛,杜成锐,王金龙,黄山松,王丽莉,王驾起 城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 空联愈合剂/环氧树脂界面相容性分子动力学研究 尔利,范松海,张榆,罗东辉,穆舟,夏亚龙 二千秋,范松海,张榆,罗东辉,穆舟,夏亚龙 城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 空联愈合剂/环氧树脂界面相容性分子动力学研究 第千秋,范松海,秋榆,罗东辉,穆舟,夏亚龙 二千秋,范松海,张榆,罗东辉,穆舟,夏亚龙 基于模糊匹配的配电网短路故障区段定位方法 500 kV交流海底电缆金属护层冲击感应电压研究 高艺文,龙星,苏学能,石钺,高红均 基于宽频带声电检测的变压器现场局部放电诊断及定位		奖
李世龙,张华,龙星,高艺文,苏学能 朱旺,任阿阳,薛志航,谢强 山区输电线路微型桩模块化钻机的研制 山火条件下35 kV输电线路故障信号特征试验研究 董杰,范荣全,贺前,王杰,李何钰秋 二次条件下35 kV输电线路故障信号特征试验研究 董杰,范荣全,贺前,王杰,李何钰秋 三等奖 加水蓄能在四川电网的应用前景展望 医子外风险价值风险控制的多电源虚拟电厂机组动态 陈刚,丁理杰,韩晓言,王亮,李甘,史华勃 基于条件风险价值风险控制的多电源虚拟电厂机组动态 基于配电网一二次融合成套设备的接地故障处理方案研究 四川地区大规模水电集群停机避峰特征分析及管理系约 曾先锋,任百群,宋兵,石勇,朱中华 基丁家度学习的电力作业人员行为识别技术 王湾,邓元实,常政威,吴杰,陈明举 四川地区大规模水电集群停机避峰特征分析及管理系约 城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 四川地区大规模水电集群停机避峰特征分析及管理系约 城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 交联愈合剂/环氧树脂界面相容性分子动力学研究 谢谷桃,微巍,刘畅,徐琳 温热气候变电站防腐工程设计与防腐工程实践 基于模糊匹配的配电网短路故障区段定位方法高之、黄红,龙星,苏学能,石钺,高红均 500 kV交流海底电缆金属护层冲击感应电压研究 基于或频带声电检测的变压器现场局部放电诊断及定位 基于宽频带声电检测的变压器现场局部放电诊断及定位	基于击穿间隙与可变电阻的配电网弧光接地故障建模分析	±800 kV干式平波电抗器抗震性能分析
山 区输电线路微型桩模块化钻机的研制 董杰,范荣全,贺前,王杰,李何钰秋 山火条件下35 kV输电线路故障信号特征试验研究 李唯佳,杨宇航,杨佳才,张星海,范松海,陈: 三等奖 抽水蓄能在四川电网的应用前景展望 陈刚,丁理杰,韩晓言,王亮,李甘,史华勃 基于配电网一二次融合成套设备的接地故障处理方案研究 曾先锋,任百群,朱兵,石勇,朱中华 基于配电网一二次融合成套设备的接地故障处理方案研究 曾先锋,任百群,朱兵,石勇,朱中华 基于深度学习的电力作业人员行为识别技术 王鸿,邓元实,常政威,吴杰,陈明举 城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响的分析 残镕池,魏巍,刘畅,徐琳 基于模糊匹配的配电网短路故障区段定位方法 高艺文,龙星,苏学能,石戫,高红均 基于跟抗重塑的集中式光伏电站谐波抑制策略研究	李世龙,张华,龙呈,高艺文,苏学能	朱旺,任阿阳,薛志航,谢强
董杰,范荣全,贺前,王杰,李何钰秋 李唯佳,杨宇航,杨佳才,张星海,范松海,陈 三等奖 抽水蓄能在四川电网的应用前景展望 基丁条件风险价值风险控制的多电源虚拟电厂机组动态 陈刚,丁理杰,韩晓言,王亮,李甘,史华勃 基丁条件风险价值风险控制的多电源虚拟电厂机组动态 基于配电网一二次融合成套设备的接地故障处理方案研究 南诺,吴杰康,蔡志宏,王瑞东,蔡锦健,张 曹先锋,任百群,宋兵,石勇,朱中华 四川地区大规模水电集群停机避峰特征分析及管理系约 基于深度学习的电力作业人员行为识别技术 四川地区大规模水电集群停机避峰特征分析及管理系约 其常,燕龙滨,常政威,吴杰,陈明举 四川地区大规模水电集群停机避峰特征分析及管理系约 城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 四北地区大规模水电集群停机避峰特征分析及管理系约 城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 空联愈合剂/环氧树脂界面相容性分子动力学研究 碳市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 四千秋,范松海,张榆,罗东辉,穆舟,夏亚龙 域市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 基扎气候变电站防腐工程设计与防腐工程实践 李成鑫,王志高,安政,耿植,王方强 500 kV交流海底电缆金属护层冲击感应电压研究 吴高波,岳浩,李健,罗楚军,吴庆华 基于宽频带声电检测的变压器现场局部放电诊断及定值	山区输电线路微型桩模块化钻机的研制	山火条件下35 kV输电线路故障信号特征试验研究
建等奖 抽水蓄能在四川电网的应用前景展望 陈刚,丁理杰,韩晓言,王亮,李甘,史华勃 基于配电网一二次融合成套设备的接地故障处理方案研究 曹先锋,任百群,宋兵,石勇,朱中华 基于深度学习的电力作业人员行为识别技术 王鸿,邓元实,常政威,吴杰,陈明举 均面新,吴杰康,蔡志宏,王瑞东,蔡锦健,张 四川地区大规模水电集群停机避峰特征分析及管理系约 你涛,杜成锐,王金龙,黄山松,王丽莉,王穹山 基于深度学习的电力作业人员行为识别技术 王鸿,邓元实,常政威,吴杰,陈明举 域市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 的分析 魏铭池,魏巍,刘畅,徐琳 基于模糊匹配的配电网短路故障区段定位方法 高艺文,龙星,苏学能,石鳅,高红均 基于理抗重塑的集中式光伏电站谐波抑制策略研究	董杰,范荣全,贺前,王杰,李何钰秋	李唯佳,杨宇航,杨佳才,张星海,范松海,陈天
主等奖 抽水蓄能在四川电网的应用前景展望 陈刚,丁理杰,韩晓言,王亮,李甘,史华勃 基于条件风险价值风险控制的多电源虚拟电厂机组动态 优化模型 刘国新,吴杰康,蔡志宏,王瑞东,蔡锦健,张 基于配电网一二次融合成套设备的接地故障处理方案研究 曾先锋,任百群,宋兵,石勇,朱中华 基于深度学习的电力作业人员行为识别技术 王鸿,邓元实,常政威,吴杰,陈明举 域市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 的分析 魏铭池,魏巍,刘畅,徐琳 基于模糊匹配的配电网短路故障区段定位方法 高艺文,龙呈,苏学能,石碱,高红均 基于理抗重塑的集中式光伏电站谐波抑制策略研究 基子宽频带声电检测的变压器现场局部放电诊断及定位		
抽水蓄能在四川电网的应用前景展望 基于条件风险价值风险控制的多电源虚拟电厂机组动态 陈刚,丁理杰,韩晓言,王亮,李甘,史华勃 刘国新,吴杰康,蔡志宏,王瑞东,蔡锦健,张 基于配电网一二次融合成套设备的接地故障处理方案研究 刘国新,吴杰康,蔡志宏,王瑞东,蔡锦健,张 基于配电网一二次融合成套设备的接地故障处理方案研究 四川地区大规模水电集群停机避峰特征分析及管理系约 增先锋,任百群,宋兵,石勇,朱中华 四川地区大规模水电集群停机避峰特征分析及管理系约 基于深度学习的电力作业人员行为识别技术 四川地区大规模水电集群停机避峰特征分析及管理系约 其言演,邓元实,常政威,吴杰,陈明举 交联愈合剂/环氧树脂界面相容性分子动力学研究 城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 邓千秋,范松海,张榆,罗东辉,穆舟,夏亚龙 城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 超热气候变电站防腐工程设计与防腐工程实践 爽縮池,魏巍,刘畅,徐琳 基大魔物匹配的配电网短路故障区段定位方法 嘉艺文,龙星,苏学能,石鳅,高红均 500 kV交流海底电缆金属护层冲击感应电压研究 基于宽频带声电检测的变压器现场局部放电诊断及定价 基于宽频带声电检测的变压器现场局部放电诊断及定价	三等	奖
抽水蓄能在四川电网的应用前景展望 基于条件风险价值风险控制的多电源虚拟电厂机组动态 陈刚,丁理杰,韩晓言,王亮,李甘,史华勃 刘国新,吴杰康,蔡志宏,王瑞东,蔡锦健,张 基于配电网一二次融合成套设备的接地故障处理方案研究 刘国新,吴杰康,蔡志宏,王瑞东,蔡锦健,张 曹先锋,任百群,宋兵,石勇,朱中华 四川地区大规模水电集群停机避峰特征分析及管理系约 基于深度学习的电力作业人员行为识别技术 王鸿,邓元实,常政威,吴杰,陈明举 基于深度学习的电力作业人员行为识别技术 文联愈合剂/环氧树脂界面相容性分子动力学研究 城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 の分析 魏铭池,魏巍,刘畅,徐琳 湿热气候变电站防腐工程设计与防腐工程实践 李成鑫,王志高,安政,耿植,王方强 多0 kV交流海底电缆金属护层冲击感应电压研究 喜子模糊匹配的配电网短路故障区段定位方法 500 kV交流海底电缆金属护层冲击感应电压研究 高艺文,龙星,苏学能,石铖,高红均 基于宽频带声电检测的变压器现场局部放电诊断及定位		
陈刚,丁理杰,韩晓言,王亮,李甘,史华勃 优化模型 基于配电网一二次融合成套设备的接地故障处理方案研究 刘国新,吴杰康,蔡志宏,王瑞东,蔡锦健,张 基于配电网一二次融合成套设备的接地故障处理方案研究 四川地区大规模水电集群停机避峰特征分析及管理系绍 管先锋,任百群,宋兵,石勇,朱中华 四川地区大规模水电集群停机避峰特征分析及管理系绍 基于深度学习的电力作业人员行为识别技术 四川地区大规模水电集群停机避峰特征分析及管理系绍 基子藻皮学习的电力作业人员行为识别技术 交联愈合剂/环氧树脂界面相容性分子动力学研究 斯韦轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 交联愈合剂/环氧树脂界面相容性分子动力学研究 财行机 湿热气候变电站防腐工程设计与防腐工程实践 魏铭池,魏巍,刘畅,徐琳 湿热气候变电站防腐工程设计与防腐工程实践 基于模糊匹配的配电网短路故障区段定位方法 500 kV交流海底电缆金属护层冲击感应电压研究 高艺文,龙呈,苏学能,石瓴,高红均 基丁宽频带声电检测的变压器现场局部放电诊断及定体	抽水蓄能在四川电网的应用前景展望	基于条件风险价值风险控制的多电源虚拟电厂机组动态
基于配电网一二次融合成套设备的接地故障处理方案研究 刘国新, 吴杰康, 蔡志宏, 王瑞东, 蔡锦健, 张 基于配电网一二次融合成套设备的接地故障处理方案研究 四川地区大规模水电集群停机避峰特征分析及管理系织 曾先锋, 任百群, 宋兵, 石勇, 朱中华 四川地区大规模水电集群停机避峰特征分析及管理系织 基于深度学习的电力作业人员行为识别技术 王湾, 邓元实, 常政威, 吴杰, 陈明举 基市, 邓元实, 常政威, 吴杰, 陈明举 交联愈合剂/环氧树脂界面相容性分子动力学研究 城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 的分析 魏铭池, 魏巍, 刘畅, 徐琳 湿热气候变电站防腐工程设计与防腐工程实践 基于模糊匹配的配电网短路故障区段定位方法 500 kV交流海底电缆金属护层冲击感应电压研究 高之文, 龙呈, 苏学能, 石铖, 高红均 500 kV交流海底电缆金属护层冲击感应电压研究 基于面抗重塑的集中式光伏电站谐波抑制策略研究 基于宽频带声电检测的变压器现场局部放电诊断及定位	陈刚, 丁理杰, 韩晓言, 王亮, 李甘, 史华勃	优化模型
基于配电网一二次融合成套设备的接地故障处理方案研究 四川地区大规模水电集群停机避峰特征分析及管理系约 曾先锋,任百群,宋兵,石勇,朱中华 四川地区大规模水电集群停机避峰特征分析及管理系约 基于深度学习的电力作业人员行为识别技术 天歌,常政威,吴杰,陈明举 王鸿,邓元实,常政威,吴杰,陈明举 交联愈合剂/环氧树脂界面相容性分子动力学研究 邵千秋,范松海,张榆,罗东辉,穆舟,夏亚龙 城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 的分析 魏铭池,魏巍,刘畅,徐琳 逸热气候变电站防腐工程设计与防腐工程实践 李成鑫,王志高,安政,耿植,王方强 基于模糊匹配的配电网短路故障区段定位方法 高艺文,龙呈,苏学能,石碱,高红均 500 kV交流海底电缆金属护层冲击感应电压研究 吴高波,岳浩,李健,罗楚军,吴庆华 基于阻抗重塑的集中式光伏电站谐波抑制策略研究 基于宽频带声电检测的变压器现场局部放电诊断及定位		刘国新,吴杰康,蔡志宏,王瑞东,蔡锦健,张兄
 曾先锋,任百群,宋兵,石勇,朱中华 四川地区大规模水电集群停机避峰特征分析及管理系约 徐涛,杜成锐,王金龙,黄山松,王丽莉,王穹静 基于深度学习的电力作业人员行为识别技术 王鸿,邓元实,常政威,吴杰,陈明举 交联愈合剂/环氧树脂界面相容性分子动力学研究 邵千秋,范松海,张榆,罗东辉,穆舟,夏亚龙 城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 的分析 魏铭池,魏巍,刘畅,徐琳 基于模糊匹配的配电网短路故障区段定位方法 高艺文,龙呈,苏学能,石铖,高红均 基于宽频带声电检测的变压器现场局部放电诊断及定位 	基于配电网一二次融合成套设备的接地故障处理方案研究	
 基于深度学习的电力作业人员行为识别技术 王湾,邓元实,常政威,吴杰,陈明举 城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 的分析 魏铭池,魏巍,刘畅,徐琳 基于模糊匹配的配电网短路故障区段定位方法 高艺文,龙星,苏学能,石铖,高红均 基于阻抗重塑的集中式光伏电站谐波抑制策略研究 	曾先锋,任百群,宋兵,石勇,朱中华	四川地区大规模水由集群信机避修特征分析及管理系统
基于深度学习的电力作业人员行为识别技术 交联愈合剂/环氧树脂界面相容性分子动力学研究 王鸿,邓元实,常政威,吴杰,陈明举 交联愈合剂/环氧树脂界面相容性分子动力学研究 城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 邓千秋,范松海,张榆,罗东辉,穆舟,夏亚龙 均分析 湿热气候变电站防腐工程设计与防腐工程实践 魏铭池,魏巍,刘畅,徐琳 鉴式處,王志高,安政,耿植,王方强 基于模糊匹配的配电网短路故障区段定位方法 500 kV交流海底电缆金属护层冲击感应电压研究 高艺文,龙呈,苏学能,石铖,高红均 基于宽频带声电检测的变压器现场局部放电诊断及定位		口川也已入外展不已来非异心起降时正力们又自至不可
王鸿,邓元实,常政威,吴杰,陈明举 交联愈合剂/环氧树脂界面相容性分子动力学研究 城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 邱千秋,范松海,张榆,罗东辉,穆舟,夏亚龙 城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 湿热气候变电站防腐工程设计与防腐工程实践 爽路池,魏巍,刘畅,徐琳 湿热气候变电站防腐工程设计与防腐工程实践 基于模糊匹配的配电网短路故障区段定位方法 500 kV交流海底电缆金属护层冲击感应电压研究 高艺文,龙呈,苏学能,石铖,高红均 500 kV交流海底电缆金属护层冲击感应电压研究 基于面抗重塑的集中式光伏电站谐波抑制策略研究 基于宽频带声电检测的变压器现场局部放电诊断及定位		徐涛,杜成锐,王金龙,黄山松,王丽莉,王穹踞
城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响的分析 邵千秋,范松海,张榆,罗东辉,穆舟,夏亚龙 魏铭池,魏巍,刘畅,徐琳 湿热气候变电站防腐工程设计与防腐工程实践 孝成鑫,王志高,安政,耿植,王方强 基于模糊匹配的配电网短路故障区段定位方法 高艺文,龙呈,苏学能,石铖,高红均 基于阻抗重塑的集中式光伏电站谐波抑制策略研究 基于宽频带声电检测的变压器现场局部放电诊断及定位	基于深度学习的电力作业人员行为识别技术	徐涛,杜成锐,王金龙,黄山松,王丽莉,王穹踞
城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 的分析 魏铭池,魏巍,刘畅,徐琳 基于模糊匹配的配电网短路故障区段定位方法 高艺文,龙呈,苏学能,石铖,高红均 基于阻抗重塑的集中式光伏电站谐波抑制策略研究	基于深度学习的电力作业人员行为识别技术 王鸿,邓元实,常政威,吴杰,陈明举	徐涛,杜成锐,王金龙,黄山松,王丽莉,王穹跟 交联愈合剂/环氧树脂界面相容性分子动力学研究
的分析 湿热气候变电站防腐工程设计与防腐工程实践 魏铭池,魏巍,刘畅,徐琳 李成鑫,王志高,安政,耿植,王方强 基于模糊匹配的配电网短路故障区段定位方法 500 kV交流海底电缆金属护层冲击感应电压研究 高艺文,龙呈,苏学能,石铖,高红均 与高波,岳浩,李健,罗楚军,吴庆华 基于阻抗重塑的集中式光伏电站谐波抑制策略研究 基于宽频带声电检测的变压器现场局部放电诊断及定位	基于深度学习的电力作业人员行为识别技术 王鸿,邓元实,常政威,吴杰,陈明举	徐涛,杜成锐,王金龙,黄山松,王丽莉,王穹跟 交联愈合剂/环氧树脂界面相容性分子动力学研究 邵千秋,范松海,张榆,罗东辉,穆舟,夏亚龙
 魏铭池,魏巍,刘畅,徐琳 李成鑫,王志高,安政,耿植,王方强 基于模糊匹配的配电网短路故障区段定位方法 高艺文,龙呈,苏学能,石铖,高红均 基于阻抗重塑的集中式光伏电站谐波抑制策略研究 本成金,王志高,安政,耿植,王方强 500 kV交流海底电缆金属护层冲击感应电压研究 吴高波,岳浩,李健,罗楚军,吴庆华 基于宽频带声电检测的变压器现场局部放电诊断及定位 	基于深度学习的电力作业人员行为识别技术 王鸿,邓元实,常政威,吴杰,陈明举 城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响	徐涛,杜成锐,王金龙,黄山松,王丽莉,王穹跟 交联愈合剂/环氧树脂界面相容性分子动力学研究 邵千秋,范松海,张榆,罗东辉,穆舟,夏亚龙
基于模糊匹配的配电网短路故障区段定位方法 高艺文,龙呈,苏学能,石铖,高红均 基于阻抗重塑的集中式光伏电站谐波抑制策略研究	基于深度学习的电力作业人员行为识别技术 王鸿,邓元实,常政威,吴杰,陈明举 城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 的分析	徐涛,杜成锐,王金龙,黄山松,王丽莉,王穹跟 交联愈合剂/环氧树脂界面相容性分子动力学研究 邵千秋,范松海,张榆,罗东辉,穆舟,夏亚龙 湿热气候变电站防腐工程设计与防腐工程实践
基于模糊匹配的配电网短路故障区段定位方法 500 kV交流海底电缆金属护层冲击感应电压研究 高艺文,龙呈,苏学能,石钺,高红均 吴高波,岳浩,李健,罗楚军,吴庆华 基于照抗重塑的集中式光伏电站谐波抑制策略研究 基于宽频带声电检测的变压器现场局部放电诊断及定位	基于深度学习的电力作业人员行为识别技术 王鸿,邓元实,常政威,吴杰,陈明举 城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 的分析 魏铭池,魏巍,刘畅,徐琳	 (济涛, 杜成锐, 王金龙, 黄山松, 王丽莉, 王穹野 交联愈合剂/环氧树脂界面相容性分子动力学研究 邵千秋, 范松海, 张榆, 罗东辉, 穆舟, 夏亚龙 湿热气候变电站防腐工程设计与防腐工程实践 李成鑫, 王志高, 安政, 耿植, 王方强
高艺文,龙呈,苏学能,石钺,高红均 吴高波,岳浩,李健,罗楚军,吴庆华 基于阻抗重塑的集中式光伏电站谐波抑制策略研究 基于宽频带声电检测的变压器现场局部放电诊断及定位	基于深度学习的电力作业人员行为识别技术 王鸿,邓元实,常政威,吴杰,陈明举 城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 的分析 魏铭池,魏巍,刘畅,徐琳	 (徐涛,杜成锐,王金龙,黄山松,王丽莉,王穹跟 交联愈合剂/环氧树脂界面相容性分子动力学研究 邵千秋,范松海,张榆,罗东辉,穆舟,夏亚龙 湿热气候变电站防腐工程设计与防腐工程实践 李成鑫,王志高,安政,耿植,王方强
基于阻抗重塑的集中式光伏电站谐波抑制策略研究 基于宽频带声电检测的变压器现场局部放电诊断及定位	基于深度学习的电力作业人员行为识别技术 王鸿,邓元实,常政威,吴杰,陈明举 城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 的分析 魏铭池,魏巍,刘畅,徐琳 基于模糊匹配的配电网短路故障区段定位方法	 (涂涛,杜成锐,王金龙,黄山松,王丽莉,王穹跟 交联愈合剂/环氧树脂界面相容性分子动力学研究 邵千秋,范松海,张榆,罗东辉,穆舟,夏亚龙 湿热气候变电站防腐工程设计与防腐工程实践 李成鑫,王志高,安政,耿植,王方强 500 kV交流海底电缆金属护层冲击感应电压研究
基于阻抗重塑的集中式光伏电站谐波抑制策略研究 基于宽频带声电检测的变压器现场局部放电诊断及定位	基于深度学习的电力作业人员行为识别技术 王鸿,邓元实,常政威,吴杰,陈明举 城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 的分析 魏铭池,魏巍,刘畅,徐琳 基于模糊匹配的配电网短路故障区段定位方法 高艺文,龙呈,苏学能,石铖,高红均	 冷涛,杜成锐,王金龙,黄山松,王丽莉,王穹跟 交联愈合剂/环氧树脂界面相容性分子动力学研究 邵千秋,范松海,张榆,罗东辉,穆舟,夏亚龙 湿热气候变电站防腐工程设计与防腐工程实践 李成鑫,王志高,安政,耿植,王方强 500 kV交流海底电缆金属护层冲击感应电压研究 吴高波,岳浩,李健,罗楚军,吴庆华
	基于深度学习的电力作业人员行为识别技术 王鸿,邓元实,常政威,吴杰,陈明举 城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量影响 的分析 魏铭池,魏巍,刘畅,徐琳 基于模糊匹配的配电网短路故障区段定位方法 高艺文,龙呈,苏学能,石铖,高红均	 福州市住民公式的使用电探机将10年4月11日为40次首至东京和 徐涛,杜成锐,王金龙,黄山松,王丽莉,王穹跟 交联愈合剂/环氧树脂界面相容性分子动力学研究 邵千秋,范松海,张榆,罗东辉,穆舟,夏亚龙 湿热气候变电站防腐工程设计与防腐工程实践 李成鑫,王志高,安政,耿植,王方强 500 kV交流海底电缆金属护层冲击感应电压研究 吴高波,岳浩,李健,罗楚军,吴庆华

2023 年《四川电力技术》总目录

第1期

±500 kV 德宝线大档距线路段防振方案试验研究
刘敬华,赵 彬,邹 赫,李 鹏,李孟轩,汉京善,杨 知(1)
滑坡对输电线路的危害及防治措施
于强,郭艳军,包涛,刘泉,刘福海(6)
10 kV 线路防雷用反冲多间隙结构灭弧装置理论与试验
研究 唐佳雄(12)
极端自然环境下配电网快速复电弹性研究
樊国旗,汪 科,李 剑,周金辉,林 振,李 鹏(18)
基于综合协调优化的两阶段配电网动态重构研究
提高风电并网系统调度计划可信度的 HESS 经济效益计
蔡高雷,刘桂龙,蔡静静(30)
市场环境下的区域电网安全校核方法
熊志杰,张大伟,王彦沣,邓志森,杨 茜(39)
多端柔性直流输电系统交流故障穿越仿真研究
张世豪,石若林,丁义轩(43)
变压器局部放电检测声阻抗匹配研究
涂彦明,张 劲,何宇航,薛志航,姚 晓,丁登伟(50)
基于短时互相关的低压脉冲法电缆故障定位
周 涛,万子逸,段永生,吴辰阳,钱 琪(54)
CQ6 型气动操动机构断路器合后即分故障分析
黄楷敏(59)
一种高精度优化 Faster-RCNN 变电站安全帽检测方法
基于机器视觉的瓦斯继电器油位异常检测
蒙媛,莫钦森,陈坤(69)
一起变压器铁芯油道堵塞导致过热的缺陷分析与治理
李馨博(73)
一起 220 kV 主变压器有载分接开关触头烧损缺陷分析
梁弘毅,吴 雄,吴晓晖,骆欣瑜,刘 睿(78)
一种基于图像的配电网单相接地故障选线方法

第2期

大风地区支柱类设备风振响应研究综述
刘敬华,李 鹏,汉京善,李丹煜,刘 彬,高春辉(1)
关于电力系统极端外部灾害主动防御技术的评述
郁 琛,常 康,刘韶峰,黄 燕,王 辉,薛 峰(8)
极端环境下 MMC 子模块故障高可靠旁路保护策略
卜祥航,付峥争,范松海,朱 轲,张宗喜,崔 涛,赵福平(15)
高比例新能源接入下送端电网直流闭锁过电压分析与
抑制策略 史华勃,丁理杰,焦浩然,金 萧,年 珩(22)
全功率变速抽水蓄能机组保护配置及整定方法
周文越,史华勃,陈 刚(28)
基于数字孪生的区域气象关联风电预测模型
代佳琨,向 月,刘俊勇,张 新(32)
基于改进樽海鞘群算法的区域综合能源系统优化调度
万 锴,刘 闯,陈 磊(39)
一种基于智慧热电能源系统源端的协调控制方案
一种适用于微电网的分散式自适应过电流保护
糟伟红,祁晓笑,董雪涛,李德存,职凯华(52)
±800 kV 雅砻江换流站 BP13 高压电容器不平衡电流及过
电压分析
刘 磊,李小鹏,张 纯,黄 宇,张 曾,张华杰,曾雪洋(59)
基于避雷器尾端电流监测的电力系统过电压反演
胡思宇,黄佐流,刘守豹,郭海霞,王世旭,张 丰(64)
基于 HCM5000 的混合级联直流输电仿真系统实现与应用
肖 鲲,李传西,吴庆范,刘旭辉,宋延涛,滕尚甫,李桂举(70)
基于 apFFT 和带约束条件的最小二乘拟合的间谐波检测
算法 王天行,舒 勤(76)

500 k	V 变I	电站正	 重流日	电源系统	级差	配合	·特性	分析	F及到	建议	
	•••••					•••••			•••••	董汉彬	
י אב	비패	古	++	大洲大	ш	<u>.</u>	*	н	구클	₹ ⊟ / ० 4	`

张明丽,蒋 枝,李淑琦,罗 洋,李 晶,王嘉易(84) 叶根法兰螺栓松动位移变化仿真分析与监测方案优化 …… 邬伟骏,林家敏,魏东苑,程庆阳,王东利,李洪任(89)

第3期

新型配电系统分布式源网荷储资源广域电压自趋优管控 方法 ………… 卢 宇,向 月,刘俊勇,曾平良(1) PMSG 风机直流电容虚拟惯性控制及虚拟惯性影响因素 分析 ……… 曾雪洋,李小鹏,陈 刚,张华杰,张 纯(9) 数据-物理联合驱动的大电网频率安全智能评估 ………… 陈 振,王 曦,陈 刚,石 鹏,范成围,王永灿,史华勃(16) 基于负载再分配的边缘计算任务均衡调度策略………… ……谢 欢,杜 书,陈少磊,马 玫,张秋铭,邓冰妍(20) 西藏高原地区光伏配套储能系统设计及运行研究……… ······· 粟 刚,李科峰,王 辉,郎春雷,晏小彬(27) 水风光互补系统碳电打捆交易技术及闭环回购策略……… …………… 陈 雪,李健华,武云霞,付 浩(35) 考虑振动区和水-电耦合的现货市场出清模型 ………… 碳电市场环境下火电厂市场竞价策略及交易技术 ………… ·············李健华,陈 雪,付 浩,武云霞,白智丹(46) 油纸绝缘套管内部压强监测中温度的影响及抑制措施研究 龙震泽,王志川,朱 鑫,刘 强,蒋 伟,陈 凌(53) 张北柔性直流输电工程接地系统监测技术研究 ………… ······· 黄 宇,吴金波,唐世雄,陈香香,朱生辉(58) 输电线路谐波过电压保护实现方法 …………………… …………………………… 丁宣文,朱 鑫,周文越(66) 变压器油色谱检测数据误差来源浅析……………… …… 田倩倩,兰新生,王 杰,胡仕红,董仲明,王 燕(71) 基于 IEEE 1459 标准的非线性负载有功功率测量研究 …… 曹 庆, 王 灿, 刘 锐, 李骁睿, 周柬成(74) 某 GIS 设备黄铜三通阀法兰失效分析 ……………… 某变电站直流电源阀控式铅酸蓄电池失效分析………… …… 王志高,董汉彬,陈家慧,王方强,许光达(85) 一起换流变压器真空有载分接开关乙炔异常分析……… …… 骆欣瑜,廖文龙,刘 睿,李龙蛟,任阿阳(90)

第4期

环保型 C, F10 混合气体设备研制现状与展望 …… 夏亚龙, 李富祥,兰新生,廖丽娟,易选泽,张晨萌,谢施君,刘 涛(1) 弧后 C₄F₇N/N, 混合气体复原过程研究 …………… ……… 庚振新,张 孟,张 佳,夏亚龙,林 莘,刘祥峰(7) 环保绝缘气体设备研发与应用进展………………… ……… 靳梦磊,夏亚龙,肖 淞,李 祎,唐 炬,张晓星(12) C₅F₁₀O 分解气体在 Cu 修饰 NiS₂ 表面的吸附机理研究 … 基于傅里叶分析的高压直流输电次同步振荡控制研究…… 自并励励磁系统灭磁容量计算与仿真分析 …………… ……杨玲,许其品,朱宏超,谢燕军,林元飞,李厚俊(31) 电力负荷预测研究综述 …… 钱育树,孔钰婷,黄 聪(37) 模块化微型桩钻机的研制及工程应用 ………… 马 宁, 林 峰,江 雷,狄锡颖,李 欣,张恒武,宋青杰,李欣伟(44) 柔性直流输电技术在江北电网中的应用研究…………… ……………………………………………… 雷 宇(48) 变压器空载电流非线性变化原因研究 ……………… 500 kV 输电线路导线检修作业平台固定架设计 ………… 敏感用户工业过程的过程免疫时间曲线刻画方法 ………… ······ 马 骏,景 源,易 见,周之松,徐方维,龙晨瑞(63) 220 kV 线路并联电抗器工程应用研究 ……………… 四川电力辅助服务市场建设的思考………………… 毕节新能源送出电网故障分析及送电能力提高措施分析 ……………明杰,王国松,梅涛(81) 一起 10 kV 谐振接地系统连续故障分析 ……………

卫佳奇,袁明哲,陈	翔,令狐静波,曹	柯,许立志(85)
一起 110 kV 电流互感器	器跳闸事故原因分析	
刘圆方,国金明,陆晓彬,	胡 林,郑荣锋,吴挧	运],袁瑞宜(91)

第5期

隔直装置安装位置对电网主变压器直流偏磁电流分布影响 研究 …………… 李小鹏,张华杰,吴嘉煜, 周文越(1) 土壤直埋 110 kV 电缆中间接头稳态载流量仿真研究 …… 邹福强,吴 冲,钟 帆,李卫兰,刘 毅,张胜飞(12) 基于发射光谱法的氩等离子体射流诊断研究…………… 基于联合模型的短期电力负荷预测方法……………… 蔡君懿,李琪林,严 平(27) 考虑储能峰谷价差套利的综合能源系统策略性经济配置 …… 蔡含虎,孙建伟,谢彦祥,蒋艾町,夏 雪,肖 汉(35) 海上风电柔性直流送出换流站 MMC 换流阀损耗研究 …… 李浩原,彭开军,王江天,刘 超,李文津,周思远,周国梁(43) 角钢塔连接螺栓考虑预紧力的拉剪计算方法研究 ………… ………… 鄢秀庆,龚 涛,刘翔云,蒲 凡,李 钟(51) 基于 LSTM 模型的四川省建筑业电气化率预测研究 ……… ……魏 阳,胡彭超,刘洪利,陈玉敏,刘雪原,刘 畅(56) 强震区电网降雨型地质灾害暴发识别模型研究…… 卜祥航. 刘 凡,曹永兴, 范松海, 陈 凌, 吴 驰, 朱 轲, 薛志航(62) 自主可控新一代变电站辅助系统联控策略研究与发展…… …………… 马驰弈,吴 杰,常政威,熊兴中,刘 骏(68) 电力作业现场智能安全监督研究与应用 …………… ……… 权 杰,李富祥,常政威,丁宣文,杜春忠(75) 电力企业安全风险控制能力评价模型构建与应用 …… 周 林,徐昌前,李富祥,邓元实,刘 涛,杨 琳(81) 某 110 kV GIS 盆式绝缘子局部放电检测与解体分析 …… 高 竣.邱 炜. 蔡 川,刘 鑫,郭 超,石凯萌,陈星宇,何 凯,陈 佳(86)

一台变压器绕组变形故障的检测及分析…	•••••	•••••
李	林,谢	茜(91)

第6期

刊首语 衣立东(1)
专刊寄语 胡海舰(2)
高比例水电新型电力系统理论模型探索
王永平,刘 畅,胥威汀,潘 婷,陈雨帆,胡雅璐(3)
"双碳"目标下新型电力系统典型特征与发展挑战综述 …
汛限水位动态控制对水电-新能源互补能力的提升研究
张阳博,张 帅,朱燕梅,黄炜斌,邓靖微,曹敏琦(15)
基于最优决策树的多能系统快速鲁棒优化调度
彭浩晋,邱 高,税 月(21)
基于 COOT-SVM 的短期光伏发电功率预测 陈晓华,
王志平,吴杰康,许海文,陈盛语,张勋祥,龙泳丞,谢明钊(28)
考虑控制模式影响的多电压等级直流电网潮流计算方法
考虑分布式煤改电负荷接入的配电网运行柔性控制策略
研究
侯泽东,王晓园,朱 洪,菅东祥,谢文成,段德毅(41)
考虑热网潮流的区域热-电综合能源系统协同优化配置
研究 邓靖微,曹敏琦,晁化伟,陈大为,胡 涛(50)
考虑水电制氢的水-氢综合能源系统容量规划
李 华,唐 瑀,杨欣宇,谢传胜,张晓春,曾 博(59)
计及分布式光伏安装面积限制的配电网储能与线路扩容
联合规划 邵晨颖,李沛霖,杨新婷,刘友波(67)
基于深度强化学习的微电网源-荷低碳调度优化研究
冯文韬,李龙胜,曾 愚,潘可佳,张子闻,景致远(75)
基于多智能体强化学习的电-碳-绿证多市场均衡研究
马天男,向明旭,魏 阳,刘 畅,陈玉敏(83)
《四川电力技术》2022 年度优秀论文获奖名单 (91)
2023 年《四川电力技术》总目录

国家电投集团西南能源研究院 四 川 省 能 源 发 展 研 究 中 心

国家电投集团西南能源研究院有限公司(简称西南能源研究 院)注册成立于2020年11月,是国家电力投资集团有限公司(简 称国家电投集团)的二级法人单位,是双碳背景下,新型电力系 统、源网荷储一体化的能源智库。



西南能源研究院在四川天府新区成立,国家电投集团钱智 民董事长、四川省相关领导为研究院现场揭牌。

落实新时代西部大开发战略 中央企业合作发展座谈会暨项目 2020年11月17日

作为七家央企在川新设二级机构,时任四川省委彭清华书 记、时任国务院国资委郝鹏书记共同为西南能源研究院集中 揭牌。

创新的基因

2020年12月,由四川省发展与改革委员 会、四川省能源局加挂"四川省能源发展 研究中心"。依托国家电投集团能源全产 业链及科技创新的雄厚优势,打造西南区 域首个"源网荷储一体化"融合创新研究 平台,服务能源高质量发展。



重点业务



创新的构架

按照共建共享共赢的理念,联合川渝国资国企旗舰企业、高校、科研院所等单位合作共建,致力于建成国内外具有影响力的一流能源智库。

设立储能、绿电转化、用户侧综合智慧能源、抽水蓄能、碳管理、清洁供暖、农村清洁能 源综合利用等业务板块,与国家电投四川公司一体两翼、创新驱动、协同发展,加快新型 能源体系规划建设,推动国家电投集团"2035一流战略"在川落地,助力四川建设国家 清洁能源示范省。



新型电力系统研究中心

面向国家战略紧扣四川特色

助力新型电力系统从图景到现实

研究中心围绕能源电力碳中和主战场开展新型 电力系统的理论研究、技术创新、平台建设、 人才培养。探索低碳绿色新型电力系统的四川 解决方案。 交流合作 028-60667707 加入我们 office@tfyxlab.cn