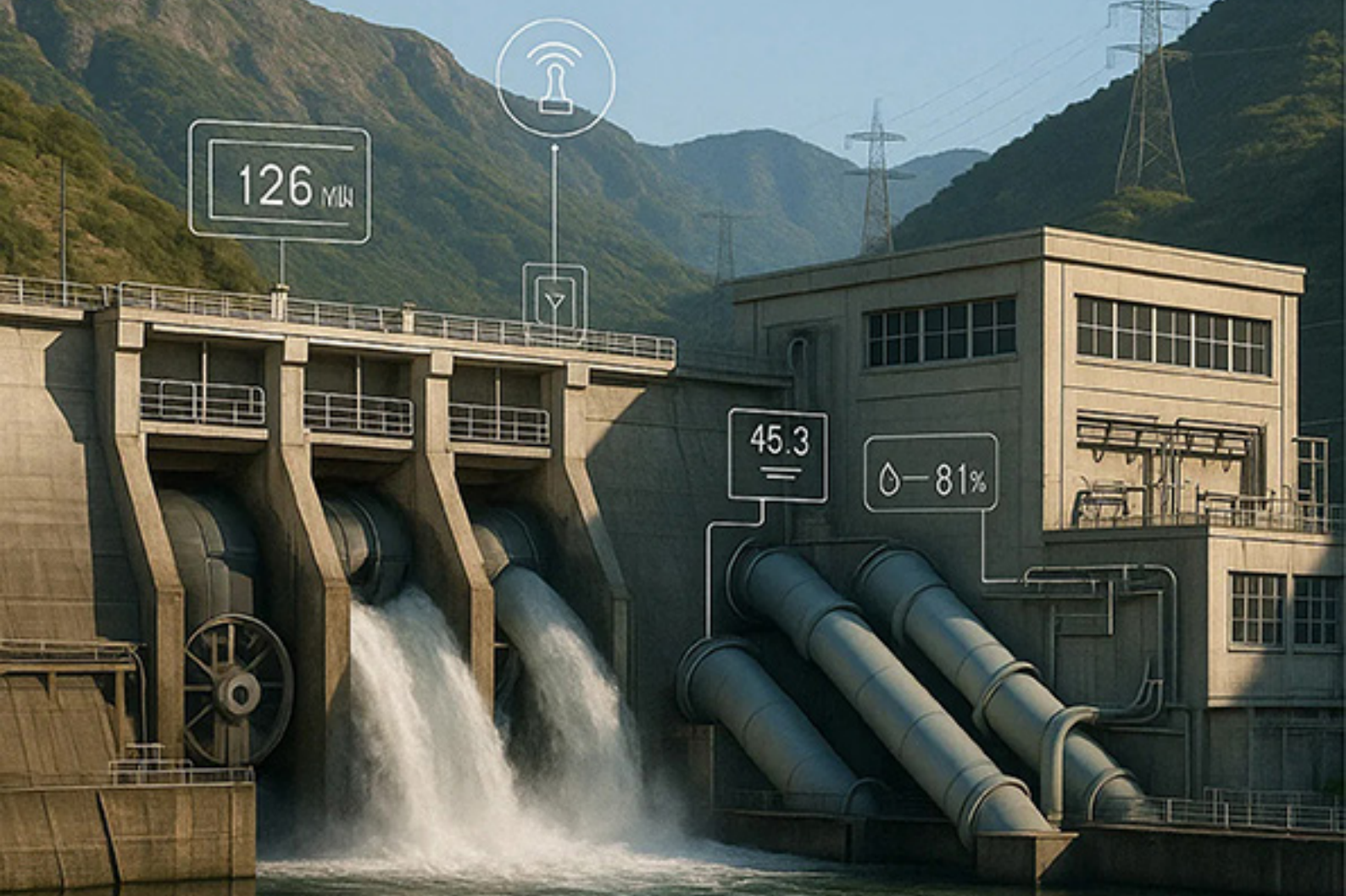


智慧水电 与工程信息学报

Intelligent Hydropower and Engineering Systems



2025-1月

HONG KONG
STAR SOURCE PUBLISHING
香港星源出版社

第1期



STAR SOURCE PUBLISHING
香港星源出版社



智慧水电与工程信息学报

Intelligent Hydropower
and Engineering Systems

2025年 第1卷 第1期

主管：香港星源出版社

主办单位：香港星源出版社

主编：黄凌志

执行主编：徐小燕

社内编辑：

李文轩 李楠 张琪 张晓峰
王磊 许天翼 李美佺 刘志强
陈晨 赵天宇 刘洋 黄晓彤
周文博 吴静怡 徐浩然

网址：<https://www.ssxin.com>

电话：+852 6855 8145

邮箱：info@ssxin.com

刊期：季刊

本刊声明

本刊致力于推动商业管理与战略创新研究，所有收录论文均经过严格的学术审查，旨在为管理者、学者及行业专家提供高质量的理论支持与实践指导。除特别标注外，本刊所刊登内容仅代表作者个人观点，不代表本刊立场。未经授权，任何组织或个人不得以任何形式复制、转载或用于商业用途。

本期概述

随着“双碳”战略的持续深化与能源系统数智化转型进程的加快，水电作为我国能源结构中最具调节能力的清洁能源，其在多能互补体系中的作用愈加凸显。数字孪生、人工智能、BIM/CIM等新一代信息技术正广泛嵌入水电、水利与能源工程的各个环节，为智能水能系统的建模、调度、运维与管理带来了前所未有的重塑机遇。

《智慧水电与工程信息学报》2025年第1卷第1期以“智慧水能系统的融合创新”为主题，精选30篇原创研究论文，聚焦于智能化水电系统构建、工程信息建模技术、智能调度算法与系统集成应用等关键领域，涵盖理论研究、方法创新与工程实践三大维度，充分展现了当前水能智能化研究的广度与深度。

在系统理论与建模研究方面，多篇文章聚焦水库群调度算法优化、基于深度学习的出力预测、多源数据融合建模机制等，系统展示了当前水能协同优化与建模技术的进展。例如，《水库群联合调度的自适应多目标算法设计》《智慧流域调控系统中的多源数据融合策略研究》展示了智能调度模型的演化趋势。

工程信息化方面，本期特别关注BIM/CIM与IoT感知系统在水电项目建设与运维中的融合实践。《BIM-CIM融合视角下的水电枢纽数字体系规划方法》《基于IoT感知的水工结构风险识别模型研究》等论文，系统梳理了信息模型与传感网络在水利基础设施数字化进程中的核心价值与集成路径。

在人工智能与智能调度板块，研究者围绕Transformer预测模型、强化学习优化策略、图神经网络结构识别等方向展开深入探索，提出了一系列具有系统性与实用性的调度优化方法，如《风光水多能系统中基于Transformer的调度预测模型研究》《混合智能算法在水电系统鲁棒调度中的应用》等，体现了AI驱动下水能调度智能化的技术深度。

此外，工程实践与案例研究板块则集中呈现了来自雅砻江、长江中游、青海等区域的典型应用经验。《雅砻江流域智慧水电调度系统建设与成效分析》《IoT监测系统在青海某水电站的工程部署实践》等实证文章，为智慧水电系统的实际落地提供了有力参考。

值得特别指出的是，置于本期核心位置的论文《面向“双碳”目标的水电-新能源协同调度优化方法研究》，通过构建多目标优化模型与引入场景不确定性机制，提出了适应碳约束环境下的调度新范式，为区域能源系统的低碳协同运行提供了系统解法。

总体而言，本期内容在保持学术深度的同时，充分体现了工程落地性与跨学科融合的趋势。我们期待本刊能在未来持续推动水电、水利与能源工程的数字化、智能化与绿色化发展，成为研究者、工程师与政策制定者之间的重要桥梁。

目录 CONTENTS

数字孪生驱动的水电站智能运维系统构建与应用-----	陈宇轩01
水库群联合调度的自适应多目标算法设计-----	马振东07
基于深度学习的水电出力预测模型优化研究-----	王悦、刘启宁13
水电站调峰调频能力动态评估模型研究-----	张绍林18
智慧流域调控系统中的多源数据融合策略研究-----	叶嘉辉23
水资源调度中的数字孪生建模机制探索-----	周千里、王立新29
BIM-CIM融合视角下的水电枢纽数字体系规划方法-----	罗浩35
基于BIM的水电站施工进度-质量一体化管控研究-----	李若云、魏子涵41
水利枢纽工程全生命周期信息集成路径探讨-----	高越47
山区小型水电站BIM轻量化设计研究-----	刘思航、曾佳颖53
复杂地质条件下水电建模结构识别算法研究-----	顾奕轩58
基于IoT感知的水工结构风险识别模型-----	林志超63
流域级BIM平台在多工程协同中的适配性分析-----	施梦婷、李翰儒68
风光水多能系统中基于Transformer的调度预测研究-----	赵辰逸74
强化学习在水资源调度优化中的应用机制研究-----	傅嘉诚、钱荣光80
混合智能算法在水电系统鲁棒调度中的应用-----	许语、卢敬豪85
图神经网络在输电系统异常检测中的建模实践-----	孙煦90
数字感知下的泵站自动控制优化策略-----	陈潇96
水文气象多源数据驱动的水电辅助调度研究-----	何琪101
运维一体化背景下的智能水电站状态诊断体系-----	黄致远、邹清106
面向“双碳”目标的水电-新能源协同调度优化方法研究-----	李明111
雅砻江流域智慧水电调度系统建设成效分析-----	张晨辉、黎鹏程114
长江中下游数字孪生平台构建与评价研究-----	吴晓春、段海英120
IoT监测系统在青海某水电站的工程部署实践-----	贾博文126
西南山区小水电数字化改造路径探析-----	顾炜东、赖可盈131
水电调度数字平台建设策略与成果分析-----	施睿136
“风光水储”运维平台的构建路径与实施经验-----	邓一鸣、赵子淳142
CPS架构下区域水利信息系统协同机制研究-----	郑羽、钱晗148
智慧巡检体系在数字化水电站中的标准构建实践-----	韩林、王子然153
编校说明、投稿须知及英文摘要索引-----	159

面向“双碳”目标的水电-新能源协同调度优化方法研究

李 明

(清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要:

在碳达峰与碳中和“双碳”战略背景下,实现可再生能源的高效消纳和电力系统运行的低碳化成为我国能源转型的重要目标。风电与光伏作为主力可再生能源,其出力具有强烈的波动性与不确定性,给电网调度带来显著挑战。水电具备良好的调节能力,是新能源稳定接入的关键支撑力量。本文构建了一个面向“双碳”目标的水电-新能源协同调度优化模型,综合考虑系统运行成本、碳排放水平与可再生能源利用率,提出基于多目标进化算法的调度求解策略。通过对典型区域能源系统的模拟分析,验证了所提方法在提升系统稳定性与绿色运行水平方面的有效性。研究成果可为多能互补系统的低碳优化运行提供理论支持和工程参考。

关键词:

双碳目标; 水电; 新能源; 协同调度; 优化算法; 低碳运行

Abstract:

Under the strategic background of China's dual-carbon goals, enhancing the integration efficiency of renewable energy and reducing carbon emissions in power system operations have become key objectives of the national energy transition. Wind and solar power, while growing rapidly, introduce considerable variability and uncertainty, posing challenges to power dispatch. Hydropower, with its flexibility and stability, serves as an essential balancing resource. This paper proposes a coordinated scheduling optimization model for hydropower and renewable energy systems aimed at dual-carbon objectives. A multi-objective evolutionary algorithm is employed to minimize operational cost, carbon emissions, and improve renewable utilization. Simulation results based on a representative regional energy system demonstrate the effectiveness of the proposed method in promoting low-carbon and stable system performance. The findings provide theoretical and practical value for optimizing multi-energy systems under carbon constraints.

Keywords:

Dual-carbon target; Hydropower; Renewable energy; Coordinated scheduling; Optimization algorithm; Low-carbon operation

1引言

实现碳达峰与碳中和目标,是我国能源系统面临的重大战略任务。在国家“双碳”政策引导下,风电与光伏等可再生能源快速发展,装机占比持续攀升。与此同时,新能源的出力波动性和不确定性也显著增强,频繁引发系统负荷平衡困难、弃风弃光率上升等运行问题,成为制约清洁能源大规模接入和高效利用的关键因素。

水电作为一种清洁、可再生且调节性能优异的能源,在我国能源结构中长期占据重要地位。其快速响应与出力调节能力,使其天然适用于承担系统调峰、调频和备用任务,有效缓解新能源波动对电网安全稳定运行的冲击。因此,构建水电与新能源联合优化调度机制,实现不同能源的协同运行,是提升系统灵活性、提高可再生能源利用率的重要路径。

当前,已有研究在多能互补系统建模与调度优化方面取得一定成果,包括水-风-光联合发电模型构建、启发式调度算法设计与新能源出力预测等方面。然而,现有研究仍存在以下不足:一是对碳排放约束的考虑仍不系统,难以与“双碳”战略紧密对接;二是新能源出力不确定性的建模与调度响应仍显粗糙,缺乏鲁棒性强的优化机制;三是优化算法在多目标协调性与收敛效率方面仍有提升空间。因此,亟需构建面向“双碳”目标的高适应性调度模型,提升系统整体绿色运行能力与智能化水平。

为此,本文提出一种融合碳排放控制与多能协调机制的水电-新能源调度优化方法。基于多目标进化算法,构建包含运行成本、碳排放强度和新能源消纳能力等关键指标的优化模型。通过仿真案例分析,评估该方法在多种运行场景下的适应性及优化效果,为多能系统低碳运行策略提供决策支持与算法路径。

2 相关研究综述

在“双碳”背景下,水电与新能源协同调度作为清洁能源系统优化运行的重要组成,已成为国内外学者关注的研

究热点。当前研究主要集中于多能系统建模、多目标优化方法、不确定性处理机制以及系统运行策略等方面,形成了较为系统的理论框架。

在建模方面,研究者普遍采用联合发电模型来描述水电、风电与光伏发电系统的协同运行过程。Wang等(2020)提出了面向新能源消纳的水风光互补系统建模方法,基于物理运行特性构建多源出力预测模型与功率平衡约束机制,揭示了多能耦合系统中时间调度与空间配置的复杂性。国内学者刘志刚等(2022)结合我国典型流域水能资源,构建了考虑水文情势变化与负荷不确定性的联合优化调度模型,为多能系统调度提供了实证基础。

在优化方法方面,多目标进化算法(如NSGA-II、MOEA/D等)因其优良的解空间搜索能力和多目标均衡性被广泛应用。Zhou等(2022)针对水电-光伏系统的经济-环保调度问题,提出基于NSGA-II的协同优化模型,在保证系统出力稳定的前提下显著降低了碳排放。与此同时,也有学者引入粒子群算法、混合遗传算法、模拟退火算法等,试图在收敛效率与解集分布之间取得更优平衡。

针对新能源出力的不确定性问题,近年来研究逐步引入鲁棒优化与场景分析等方法。Liu和Fang(2021)提出基于情景生成的多能系统调度策略,能够在新能源预测偏差较大的情况下保持系统运行的稳定性与经济性。然而,部分研究中对不确定性变量处理仍较为简化,尚未充分考虑极端天气、水情突变等场景对系统的影响。

综上,尽管现有研究在理论建模与优化算法层面取得了积极进展,但在面向“双碳”目标的约束融合、系统运行灵活性评估及复杂场景适应性方面仍存在不足。特别是在实际工程背景下,如何同时兼顾经济效益、碳排控制与调度鲁棒性,构建具有推广价值的协同调度方法,仍是一个具有挑战性的关键课题。

3 系统模型构建

为实现水电与新能源在“双碳”目标导向下的协同优化

运行,需建立一个多目标、约束耦合、面向实际工程运行需求的系统调度模型。该模型应综合考虑水电物理运行特性、风光资源不确定性、负荷匹配关系与碳排放约束,构成具备操作性与可扩展性的数学结构。

3.1 系统组成与建模目标

本文所研究的系统由水电站、风电场、光伏电站和负荷中心构成,形成一个典型的多能互补结构。其中,水电作为主调节电源,承担系统的平衡与响应任务;风电与光伏则作为间歇性新能源,需通过预测与调度机制实现有效接入;负荷中心以时序曲线形式给出,表示系统的实际用电需求。

模型的目标在于通过优化调度策略,使系统运行在满足电力供需平衡的前提下,实现以下三个方面的协同提升:一是最小化系统总运行成本,包括发电成本与备用调节成本;二是降低系统整体碳排放水平;三是最大化风光等可再生能源的利用率,从而提升系统绿色运行能力。

3.2 优化目标函数

为反映调度策略对经济性、环保性和资源利用效率的综合影响,模型采用多目标结构。目标函数如下:

最小化运行成本,包括常规机组发电成本、水电调节损耗与新能源弃电代价;

最小化系统碳排放总量,通过引入单位发电碳强度参数刻画;

最大化新能源利用率,即在预测出力范围内尽可能多地安排风光出力。

由于上述目标具有一定冲突性,需采用多目标优化算法进行帕累托解集搜索,获得在不同权衡条件下的最优调度方案。

3.3 系统运行约束

为确保模型的物理合理性与工程可行性,引入以下主要约束条件:

1.电力平衡约束:任意调度周期内,总发电功率应等于负荷需求,确保系统能量守恒;

2.水电出力约束:考虑坝体结构水位-流量-功率之间的非线性关系,限制最大发电量与出力变化速率;

3.风光出力限制:基于气象预测数据设定最大可用功率,不可超调;

4.碳排放约束:对系统单位电量碳排放强度进行控制,引导调度向低碳方向倾斜;

5.新能源弃电惩罚机制:通过弃风弃光约束抑制资源浪费,增强新能源消纳能力。

上述模型具备强非线性、多目标、高维耦合的特性,对求解算法的稳定性与收敛效率提出较高要求。为此,本文将设计适配性较强的优化方法,并在后续章节中予以详细论述。

4 调度优化方法设计

针对第三章所构建的多目标调度模型,本文采用一种基于改进型非支配排序遗传算法(NSGA-II)的优化方法,以实现水电与新能源协同调度过程中的多目标协调与解空间高效搜索。该算法具有良好的多目标处理能力、种群多样性保持能力以及较强的鲁棒性,适合解决包含多个相互冲突目标的复杂系统优化问题。

4.1 算法选择与改进动因

传统优化算法(如线性规划、动态规划)在面对大规模、非线性和不确定性系统时易陷入局部最优,难以获得全局解。而启发式进化算法,特别是NSGA-II,在多目标优化领域表现出色。NSGA-II通过精确的非支配排序机制、拥挤度比较操作和快速精英策略,在求解帕累托最优前沿方面具有显著优势。

然而,原始NSGA-II在处理高维耦合问题时仍存在种群收敛速度慢、早期多样性下降等问题。为此,本文在标准算法基

础上引入以下两项改进:

1.自适应交叉与变异概率调整机制:根据迭代过程中种群适应度变化情况动态调整交叉与变异概率,从而提升算法在早期阶段的探索能力与后期阶段的局部收敛精度;

2.双精英保留机制:在每一代选择操作中引入局部最优解保留策略,防止最优解在选择压力过大时被提前淘汰,增强解集稳定性。

4.2 编码方式与适应度设计

调度问题需在连续时间序列上对多个电源出力进行联合优化,因此采用实数编码方式,每个个体表示一个完整的调度周期内的电源出力组合。每个个体的适应度由以下三个子目标函数共同评价:

成本函数:反映水电、风电、光伏的运行成本与弃电惩罚;

碳排放函数:根据各电源的单位碳强度计算碳排放总量;

利用率函数:衡量新能源资源的实际利用比例。

上述目标通过归一化处理,输入至非支配排序与拥挤度计算流程,实现多目标帕累托最优解的筛选。

4.3 不确定性处理与鲁棒性增强

由于风速、光照、水情等自然资源存在显著波动,系统运行环境具有高度不确定性。为增强调度策略的适应性,本文引入情景生成与缩减方法对不确定参数进行建模。具体包括:

利用历史气象数据生成多种典型出力场景;

应用K-means聚类法进行情景缩减,保留具有代表性的场景组合;

在每一情景下执行调度优化,通过最大化调度策略在多样场景下的平均性能,构建具有鲁棒性的调度解。

综上,通过优化算法结构改进与不确定性处理机制的融合,所提方法可实现经济性、低碳性与新能源友好性的综合平衡,并适应复杂多变的实际运行环境,为后续工程验证与应用部署提供方法支持。

5 案例分析与结果讨论

为验证所提出水电-新能源协同调度优化方法的有效性,本文选取某典型流域区域作为模拟对象,构建包含水电站、风电场、光伏电站和区域负荷中心的多能协同系统。通过调用实测气象与水文数据,生成多场景运行样本,比较本文方法与传统调度策略在关键性能指标上的表现。

5.1 案例系统概况

模拟区域包括一座常规调节型水电站、一组风电场与分布式光伏电站,其总装机容量分别为300 MW、200 MW和100 MW。水电站具备日内调节能力,风光电源依据实测气象数据生成小时级预测出力曲线。区域负荷采用典型工业负荷曲线,日负荷峰值约为500 MW,存在显著峰谷差。

新能源出力数据基于历史气象序列构建,经情景生成算法选取10组具有代表性的典型日作为调度优化输入,用于评估不同调度方法下系统运行状态的稳定性与响应能力。

5.2 仿真方案与对比方法

为保证评估的全面性,本文设置以下三种调度策略进行对比:

方案A(传统规则调度):水电优先满足负荷缺口,风光按预测出力无序接入,缺电由水电追补;

方案B(单目标优化):仅以运行成本最小化为优化目标,忽略碳排与新能源利用率;

方案C(本文方法):采用多目标协同调度模型与改进型NSGA-II算法,在多样场景下同时优化成本、碳排放与新能源利用率。

每组方案在相同初始条件与负荷曲线下独立运行,记录系统运行成本、碳排放总量、新能源利用率及系统出力波动度作为评价指标。

5.3 仿真结果与分析

仿真结果显示,本文提出的调度方法在多个评价维度上均优于传统与单目标优化方法:

在经济性方面,方案C的平均运行成本较方案A降低约13%,较方案B降低5.4%;在环保性方面,系统碳排放量较传统策略下降约17%,显著体现了碳约束作用的积极效果;在新能源消纳效率方面,方案C的新能源实际利用率达到94.6%,有效减少了弃风弃光现象。

此外,在考虑多组典型情景的运行下,方案C表现出更强的稳健性,其出力波动度最小,调度策略在高峰负荷、低风出力等极端工况下仍能维持系统功率平衡。这说明本文方法具有较好的场景适应性与实际可操作性。

通过对比分析可见,引入多目标优化与不确定性建模机制后,调度模型不仅提升了系统运行的综合性能,也更贴近“双碳”目标对系统灵活性与低碳运行的双重要求,具备在区域级能源调度平台中推广的工程应用潜力。

6 结论与展望

在“双碳”战略目标日益深化的大背景下,推动以水电为调节核心的多能协同优化运行已成为实现能源系统低碳化、智能化转型的关键路径。本文围绕水电与新能源的协同调度问题,提出了一种面向低碳目标的多目标优化方法,并在典型流域案例系统中进行了模拟验证。研究成果具有较强的理论支撑性与工程应用价值。

首先,本文构建了一个融合碳排放控制、出力不确定性与经济性评价的多目标调度模型,系统性地刻画了水电、风电与光伏等多类型清洁能源在时间序列上的互补关系,有效解决了系统运行中存在的资源配置不均与新能源波动大等问题。

其次,在优化方法方面,本文设计了一种基于改进型NSGA-II算法的调度求解策略,通过自适应搜索机制与鲁棒性增强模块提升了算法在高维非线性优化问题中的适应性与收敛效率。算法能够在满足多重约束条件的前提下,获得覆盖经济性、环保性与运行灵活性的帕累托解集,为系统调度提供多样化决策支持。

最后,通过典型系统仿真分析表明,所提方法在降低系统运行成本、减少碳排放总量与提升新能源利用率方面具有显著优势,且具备良好的场景适应性与运行稳定性。与传统

策略相比,本文方法更符合未来绿色电力系统对多能互补与低碳优化的综合要求。

尽管本文已取得一定成果,但仍存在以下值得进一步研究的问题。一是当前模型尚未纳入电网潮流分析与输电约束,未来可在更高维度上拓展系统运行模拟能力;二是调度策略以日内周期为主,尚未实现对分钟级或实时级运行状态的精准响应,后续可结合边缘计算与在线学习算法提升调度实时性;三是碳市场机制尚未在调度优化中充分体现,未来可将碳定价动态因素纳入优化模型,研究“经济—碳排—市场”三元协同机制。

总体而言,本文研究为水电与新能源协同优化提供了切实可行的理论方法,亦为“双碳”目标下区域能源系统调度策略的制定与实施提供了技术支撑。未来研究可继续向更高维模型集成、更强鲁棒性优化算法以及更深层政策机制融合方向拓展,服务于我国乃至全球清洁能源系统的可持续发展战略。

参考文献

- [1] 刘志刚, 刘建坤. 多能互补系统优化调度研究综述[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(3): 1 - 11.
- [2] 国家能源局. “十四五”可再生能源发展规划[R]. 2021.
- [3] Wang Y, Wang J, Liu X, et al. Multi-energy complementary operation of hydropower and new energy: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 133: 110155.
- [4] Liu J, Fang Y. Robust optimization for hydro-wind-solar complementary scheduling[J]. Applied Energy, 2021, 286: 116531.
- [5] Zhou B, Zhang Y, Lin Y, et al. Coordinated scheduling of hydro-PV systems with uncertainty: A scenario-based approach[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(2): 854 - 864.
- [6] Zhang N, Liu Z, Qin C, et al. A review on low-carbon energy system planning with renewables and energy storage[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 312: 127693.
- [7] 国家电网公司. 新型电力系统建设白皮书[R]. 2022.
- [8] 曾恒, 郑月宏, 徐辉. 基于改进NSGA-II算法的多目标优化调度方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(3): 688 - 696.
- [9] 张文瀚, 王春晖. 考虑碳排放约束的多能源系统优化调度方法研究[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1582 - 1590.
- [10] Fan J, Liu P, Chen Q, et al. A scenario-based stochastic optimization model for integrated energy system with low-carbon operation[J]. Energy, 2022, 246: 123387.

