

水电改造中发电效率提升的关键技术与实践应用

张堡

国能长源恩施水电开发有限公司

DOI:10.12238/hwr.v9i9.6564

[摘要] 在“双碳”目标与能源结构转型背景下,水电改造成为提升清洁能源利用效率的核心路径。本文系统梳理水电改造中发电效率提升的关键技术体系,涵盖水轮机设备升级、引水系统优化、智能调控升级三大核心领域,深入剖析计算流体动力学(CFD)仿真、5G融合终端、绿电泛微网等技术原理与应用机制。结合浙江景宁小水电集约化改造、山东跋山水库智能化升级等典型案例,阐述技术落地的实施路径与成效——改造后电站发电收益平均提升10%以上,水能利用效率最高提高4.5%,运营成本降低超50%。同时分析政策支持、校地合作、协会赋能等保障体系的构建逻辑,指出当前行业面临的技术适配性不足、投资回收周期长等痛点,并提出针对性解决思路。研究表明,技术创新与系统管理的协同推进是实现水电高效低碳发展的关键,可为老旧电站改造与新型水电建设提供技术参考与实践范式。

[关键词] 水电改造; 发电效率; 智能调控; 集约化运行; 设备升级

中图分类号: TM62 文献标识码: A

Key technologies and practical applications for improving power generation efficiency in hydropower renovation

Bao Zhang

Guoneng Changyuan Enshi Hydropower Development Co., Ltd

[Abstract] In the context of the "dual carbon" goal and energy structure transformation, hydropower transformation has become the core path to improve the efficiency of clean energy utilization. This article systematically summarizes the key technical system for improving power generation efficiency in hydropower transformation, covering three core areas: upgrading of turbine equipment, optimization of water diversion system, and upgrading of intelligent control. It deeply analyzes the technical principles and application mechanisms of computational fluid dynamics (CFD) simulation, 5G fusion terminal, and green power microgrid. Combining typical cases such as the intensive transformation of small hydropower in Jingning, Zhejiang and the intelligent upgrade of Bashan Reservoir in Shandong, this article elaborates on the implementation path and effectiveness of technology implementation — after the transformation, the average power generation revenue of the power station increased by more than 10%, the highest water energy utilization efficiency increased by 4.5%, and the operating cost was reduced by more than 50%. At the same time, analyze the construction logic of the guarantee system such as policy support, school local cooperation, and association empowerment, point out the pain points faced by the industry such as insufficient technological adaptability and long investment recovery cycles, and propose targeted solutions. Research has shown that the coordinated promotion of technological innovation and system management is the key to achieving efficient and low-carbon development of hydropower, and can provide technical references and practical paradigms for the renovation of old power stations and the construction of new hydropower.

[Key words] hydropower renovation; Power generation efficiency; Intelligent regulation; Intensive operation; Equipment upgrade

引言

水电作为我国清洁能源体系的支柱,占全国可再生能源发

电量的50%以上,但存量电站普遍面临设备老化、技术落后等问题。据水利部统计,2005年前建成的水电站中约40%机组效率低

于85%，较国际先进水平低5-8个百分点，年发电量损失超300亿千瓦时。随着“十四五”现代能源体系规划提出“2025年大型水电站能效提升至95%以上”的硬指标，水电改造已从选择性升级转向强制性需求。

当前水电改造的核心矛盾已从单纯的设备更新转向“效率提升-生态保护-成本控制”的协同平衡。浙江景宁、山东跋山水库等实践表明，通过关键技术突破与管理模式创新，可实现发电效率、安全保障与生态效益的同步提升，为行业转型提供了可复制经验。

1 水电改造中发电效率提升的关键技术体系

1.1 水轮机核心设备升级技术

水轮机作为能量转换的核心装置，其性能直接决定发电效率。老旧电站水轮机普遍存在叶片磨损、水力模型落后等问题，通过结构优化、材料革新与智能控制升级可实现效率突破。

在结构设计优化方面，CFD技术的应用实现了水力性能的精准提升。采用多学科优化软件对叶片形状与角度进行仿真调整，识别并消除流场中的涡流损耗点，使转轮效率提升3-5个百分点。材料科学创新为设备长周期高效运行提供保障。推广应用钛合金、复合材料等高强度耐蚀材料，配合纳米涂层技术，可降低叶片磨损率60%以上。智能控制技术的融合实现了工况自适应调节^[1]。

1.2 引水系统能效优化技术

引水系统的能量损耗占水电厂总损耗的15%-25%，通过设计优化、材料升级与智能监测可实现显著节能。

系统设计优化依托智能算法实现全局最优。采用遗传算法与粒子群优化技术，结合地形条件调整引水管道走向与管径参数，降低沿程水头损失。景宁在水电站改造中采用“长距离隧洞+低摩擦管道”组合方案，使引水系统损耗降低12%。对于老旧系统，通过更换高效调压阀、优化管道坡度等改造，可使能量利用率提升8%-10%。

材料革新重点突破管道摩擦与腐蚀难题。推广应用超分子量聚乙烯(UHMWPE)、玻璃钢(GFRP)等低摩擦系数材料，其内壁粗糙度仅为传统钢管的1/5，可减少沿程阻力损失30%以上。同时采用阴极保护与纳米涂层复合技术，解决山区高水质硬度导致的管道结垢问题。

智能化监测体系实现损耗精准管控。建立涵盖流量、压力、水质参数的实时监测平台，通过物联网传感器采集数据，结合机器学习算法预测管道泄漏与堵塞风险。

1.3 智能调控与系统集成技术

智能化升级是实现水电高效运行的核心支撑，通过调度优化、网源协同与多能互补构建高效能源系统。

智能调度系统突破传统经验决策模式。基于大数据与人工智能算法，构建融合水位、流量、气象等多因素的调度模型，实现发电效益与生态需求的平衡。景宁搭建的流域智能化管理平台，可根据短期降雨预报调整水库蓄水策略^[2]，使汛期弃水率降低18%，年度增加水电消纳110.86兆瓦时。该系统还具备自学习

能力，通过积累运行数据持续优化调度策略。

5G与物联网技术赋能远程精准控制。“多合一5G融合终端”实现了发电系统与电网调度的直接数据交互，其集成的纵向加密与刚性控制功能，可在100毫秒内完成故障机组的一键切除，同时通过柔性调节算法优化电网电压与无功平衡。

多能互补系统拓展效率提升边界。构建“水电+光伏+储能”的绿电泛微网，利用水电库容调节能力平抑光伏出力波动。景宁在“绿电100%泛微网”建设中，以调节能力强的小水电为核心(占比近2/3)，搭配分布式储能系统，实现县域长时段100%绿电供应，同时通过汛期网络重构减少弃水损失。试点建设的小型抽水蓄能电站，进一步提升了系统调峰能力与能源存储效率。

2 发电效率提升技术的实践应用案例

2.1 浙江景宁小水电集约化改造工程

景宁畲族自治县作为“中国农村小水电之乡”，拥有152座小水电站，改造前普遍存在设备老化、管理粗放等问题。2023年启动的绿色改造工程，通过“规划引领+技术升级+模式创新”路径，实现了行业提质增效。

在技术应用方面，重点推进智能化与集约化改造。委托专业机构编制改造规划，投入490余万元对鸬鹚水电站实施经营性租赁改造，更换智能水轮机与调控系统，配套建设集约化运行平台。改造后该电站水能利用效率提高4.5%，年增发电量266万千瓦时，运营成本降低53%。全县已建成2个集约化平台，完成50座电站的智能化改造，15座实现“集约化运行+物业化管理”。

创新机制破解改造瓶颈。针对增容审批难题，推出“村集体入股”模式，郑坑乡吴布电站由150千瓦增容至800千瓦，1000万元投资全部来自4个行政村，新增收益归村集体所有，实现了企业增效与乡村振兴的双赢。^[3]通过“备案制”竣工验收试点，解决了145座老旧电站的历史遗留问题，验收率从23%提升至95%，为技术改造扫清障碍。

校地合作与协会赋能提供支撑。与浙江同济科技职业学院共建“山海协作水利职教共同体”，开展两期技能培训班，覆盖取水许可、智能改造等关键内容。小水电协会搭建全省首个智能运维云平台，组建专业运行、养护、检修三支队伍，解决了技术力量不足与人员老龄化问题。

2.2 山东跋山水库智能化升级项目

跋山水库的跋山、湖埠西两座水电站总装机7000千瓦，改造前存在设备老化、监控滞后等安全隐患。2024年实施的“5G赋能+设备更新”改造工程，打造了智能安全水电站样板。

核心技术应用聚焦数字化与安全性。湖埠西水电站加装“多合一5G融合终端”，实现发电量、水能利用率等指标的实时远程监控，通过大数据分析完成设备健康度数字化评价，使检修模式从“计划检修”转向“状态检修”。跋山水电站更换4套DN1750液控蝶阀，提升了系统运行稳定性；湖埠西电站全面更新水轮机、发电机等核心设备，配套建设微机调速系统与智能监控柜。

系统改造实现全链条效率提升。水工建筑物方面，加固前池底板并增设反滤排水设施；辅助系统新增回转式清污机与潜水

取水泵,减少了引水系统堵塞风险。电气系统重新布局高低压配电柜、变压器等设备,装设氧化锌避雷器保障供电安全。改造后两座电站水资源利用效率提升15%,安全事故响应时间缩短至秒级。

安全管理体系同步升级。以安全生产标准化二级创建为抓手,深化风险分级管控与隐患排查治理,其“六项机制”实施经验获临沂市推广。通过“党建+安全”模式与电网企业开展技术合作,实现网源协同运维,进一步提升了电力设施稳定性。

3 效率提升技术落地的保障体系构建

3.1 政策与标准支撑体系

顶层设计为改造提供方向指引。国家层面通过“十四五”水电发展规划明确能效提升硬指标,地方层面如浙江丽水推出“备案制”验收试点,将设备更新、标准化建设作为验收必要条件,破解了老旧电站改造的合规性难题。资金补助政策同样关键,景宁通过省级资金支持,以国有电站为龙头带动行业改造,降低了企业初期投入压力。

标准规范建设推动技术标准化应用。水利部质量标准研究所编制的《水电站绿色改造和现代化提升规划》,为设备选型、改造流程提供了统一标准。行业协会主导的智能化改造技术指南,规范了集控平台建设 with 数据交互接口,确保不同电站改造的兼容性。

3.2 技术创新与人才保障体系

校地合作搭建技术转化桥梁。景宁与浙江同济科技职业学院的战略合作,实现了水利工程、机电一体化等专业技术与产业需求的精准对接。通过联合培训、技术攻关等形式,既解决了企业技术人员短缺问题,又推动了实验室技术的工程化应用。

专业服务队伍提供运维支撑。景宁小水电协会组建的运行管理、维修养护、检修三支专业队伍,按流域开展集中管控与设备维护,使设备故障率降低40%。这种“专业队伍+集控平台”的模式,有效弥补了中小型电站技术力量不足的短板。

3.3 市场与商业模式创新体系

多元化投融资模式破解资金难题。“村集体入股”“经营性租赁”等创新模式,既拓宽了改造资金来源,又实现了收益共享。景宁吴布电站的村集体投融资模式,以及鸬鹚电站的经营性租赁改造,为不同规模电站提供了可适配的资金解决方案。

绿电交易与碳资产管理拓展收益空间。景宁“绿电100%泛微网”通过绿电认证与交易,提升了电能附加值;碳减排量核算与交易,则为企业带来额外收益,缩短了投资回收周期。这种“发电收益+碳收益”的模式,提高了企业改造积极性。

4 行业现存问题与解决路径

4.1 主要痛点分析

技术供需错配问题突出。高校研发的节能技术中仅18%实现规模化应用,大量先进技术因缺乏工程验证与适配性改造,难以满足老旧电站复杂工况需求。中小型电站改造面临“技术选择难、效果评估难”的双重困境,易导致投资效益不达预期。

投资回收周期长制约积极性。中小型水电企业改造平均投资回收期达7.5年,远超5年的合理阈值。对于装机容量低于1000千瓦的电站,单靠发电收益难以覆盖改造成本,企业投入意愿不足。

生态约束与效率提升平衡难度大。部分电站改造中存在生态流量保障不足问题,而过度强调生态保护又可能限制发电潜力,如何实现二者协同成为行业共性难题。

4.2 解决路径探索

构建技术适配性评价体系。由行业协会牵头,建立涵盖电站规模、水文条件、设备状况的数据库,开发技术选型智能匹配系统。借鉴景宁“一电站一方案”的改造经验,为不同类型电站提供定制化技术组合方案。

完善激励政策与市场机制。延长改造项目税收优惠期限,对能效提升超5%的项目给予额外补贴。扩大绿电交易与碳市场覆盖范围,建立水电碳减排核算标准,通过市场化手段增加企业收益。

推广生态友好型改造技术。采用“生态流量优先”的调度算法,在智能调度系统中嵌入生态需求参数。试点“水电+生态修复”一体化改造模式,如在引水口设置鱼类通道,实现发电与生态的双赢。

5 结论与展望

水电改造中发电效率提升是一项系统工程,需依靠水轮机设备升级、引水系统优化、智能调控升级三大核心技术的协同突破,辅以政策支撑、人才保障与市场创新的多维赋能。浙江景宁的集约化改造与山东跋山水库的智能化升级实践表明,通过“技术创新+模式重构”,可实现发电效率提升10%以上、运营成本降低50%以上的显著成效。

未来,随着5G、人工智能、储能等技术的深度融合,水电改造将向“全域智能化、多能协同化、生态友好化”方向发展。重点方向包括:构建跨流域智能调度平台,实现水电与风光的精准互补;研发超高效水轮机材料与结构,推动机组效率向98%突破;建立“发电-储能-消费”闭环系统,提升能源利用全链条效率。通过持续的技术创新与制度完善,水电将在新型电力系统中发挥更重要的基荷与调峰作用,为“双碳”目标实现提供坚实支撑。

[参考文献]

- [1]廖国欣.改造梯级水电站功能增强水电灵活性的可行性分析[J].云南水力发电,2025,41(05):1-6.
- [2]田海平,王辉斌,周立华,等.大型混流式水电机组宽负荷灵活调节技术改造研究[J].湖南电力,2025,45(02):69-73.
- [3]刘海晨.桓仁电站水电机组压油装置改造研究[J].水电站机电技术,2025,48(01):82-84.

作者简介:

张堡(1986—),男,土家族,湖北恩施人,本科,助理工程师,电气值班员高级工,研究方向:水电站运行与维护。