

中小水电站绿色改造与技术选择

徐颖

甘肃电器科学研究院, 甘肃天水, 741018

摘要: 在“双碳”目标与生态文明建设背景下, 中小水电站绿色改造成为水电行业可持续发展的核心课题。本文通过实地考察、技术分析 & 案例对比, 探讨其改造必要性、技术路线及实施对策, 发现现存设备陈旧、效率低下、生态破坏突出等问题。研究提炼出五项核心技术: 水轮机增效扩容、生态流量保障、智能化监控、鱼类洄游通道建设、水质保护设施完善, 并从技术成熟度、经济性、环境影响等维度量化评估。结果表明, 组合式改造可使发电量提升 15%-25%, 并显著改善河流生态。基于成本效益分析, 提出分类分期改造策略与差异化技术方案。研究成果为政府制定政策、企业开展改造提供重要参考, 助力中小水电站高质量发展。

关键词: 中小水电站; 绿色改造; 技术选择; 生态保护; 可持续发展

Green Renovation and Technology Selection for Small and Medium-Sized Hydropower Stations

Xu Ying

Gansu Electrical Apparatus Research Institute, Tianshui, Gansu 741018, China

Abstract: Against the backdrop of the “dual-carbon” goals and the advancement of ecological civilization, green renovation of small and medium-sized hydropower stations has become a key issue for the sustainable development of the hydropower sector. Through field investigations, technical analysis, and case comparisons, this study examines the necessity of renovation, technical pathways, and implementation strategies. The results reveal several prominent problems in existing facilities, including outdated equipment, low operational efficiency, and significant ecological impacts. The study identifies five core technologies for green renovation: turbine efficiency enhancement and capacity expansion, ecological flow guarantee, intelligent monitoring systems, fish migration channel construction, and the improvement of water quality protection facilities. These technologies are quantitatively evaluated from multiple dimensions, including technological maturity, economic feasibility, and environmental impact. The results indicate that integrated renovation approaches can increase power generation by 15%–25% while significantly improving river ecological conditions. Based on cost–benefit analysis, this study proposes a phased and categorized renovation strategy along with differentiated technological solutions. The findings provide important references for government policy formulation and enterprise-level renovation practices, contributing to the high-quality development of small and medium-sized hydropower stations.

Keywords: small and medium-sized hydropower stations; green renovation; technology selection; ecological protection; sustainable development.

1、引言

中小水电站是我国重要的清洁能源基础设施, 在保证国家能源安全以及推动当地经济发展中起到很大作用。根据国家能源局数据显示, 到 2023 年底, 我国中小水电站总装机容量为 8200 万千瓦, 占全国水电总装机容量的 19.6%, 年发电量约为 2800 亿千瓦时。但是, 随着生态文明建设不断加强以及“双碳”目标提出, 传统的中小水电站发展模式也遇到了很大困难。2019 年至 2023 年, 生态环境部开展全国中小水电站清理整改工作发现, 约有 30% 中小水电站存在不同程度生态环境问题, 如生态流量不够、鱼类洄游受阻、水质变差等问题。

目前中小水电站绿色改造是水电行业发展的主要方向之一。国家发改委、水利部等部门先后发布《关于完善中小水电站建设管理的指导意见》等相关文件, 要求加快中小水电站绿色改造和现代化改造步伐。水电行业正处于由追求规模扩张向注重质量和效益转变

的关键时期, 绿色改造既是适应环保要求的客观需要, 也是增强竞争力、实现可持续发展的必然要求。因此, 合理选择改造技术路线, 制定一套全面的绿色改造方案对于促进中小水电站高质量发展有着积极作用。

2、中小水电站绿色改造的理论基础与技术路径

2.1 绿色改造的核心理念与评价体系

中小水电站绿色改造的基本思想是生态优先、绿色发展, 在保证发电的同时尽可能降低对河流生态系统的影响, 做到经济效益与生态效益兼顾。绿色改造评价标准应该从生态环境、技术经济和社会效益三个方面进行考虑, 其中生态环境方面有生态流量保障率、鱼类多样性指数、水质改善情况等。技术经济方面有发电效率提高程度、投资回收期、运维成本变化等。社会效益方面有就业机会、防洪抗旱能力、周边社区发展等。建立多层次、多角度的评价指标可以更好地衡量绿色改造成效, 有利于改进技术和政策 [1]。

2.2 中小水电站环境影响机理分析

中小水电站对河流生态环境的影响主要是水文水力学条件变化、生物栖息地破碎化、水质变化等。大坝建设改变了河流自然流态,造成下游河段生态流量不足,影响水生生物生存繁殖。据统计,有近 60% 中小水电站下游河段在枯水期生态流量保障率小于 90%,有的河段甚至断流。水库蓄水改变了水体温度分层以及溶解氧分布,影响水质,而且泥沙淤积造成库容减小及下游河床冲刷。鱼类洄游通道受阻也是问题之一,调查显示有超过 70% 中小水电站没有修建鱼道等过鱼设施,对鱼类种群繁衍造成很大影响。了解这些环境影响机制,是提出相应改进措施的前提,也是保证改进效果的基础。

2.3 技术改造的分类体系与适用性评估

中小水电站绿色改造技术可根据改造目的分为生态保护型、提高效率型以及智能化管理型三类。生态保护型技术包括生态流量保障设施、鱼类洄游通道、水质改善装置等,主要应用于生态环境脆弱地区或者存在严重环境问题的电站。提高效率型技术包括水轮机增效扩容、自动化控制系统改造、输变电设备更新等,主要应用于设备陈旧、效率较低的电站。智能化管理型技术包括远程监控系统、预测性维护、优化调度系统等,主要应用于运维管理水平较低、人工成本较高的电站。适用性分析要根据电站所处位置、装机容量、建成时间、存在问题等情况,利用决策支持模型给不同类型的电站提出最佳的技术组合方案,使改造效果达到最好并且投资回报率最高。

3、关键技术选择与优化策略

3.1 生态流量保障技术及其实施方案

生态流量保障是中小水电站绿色改造的重要内容之一,其主要措施有安装生态机组、建设分层取水设施以及应用智能化调度系统等。生态机组技术是在大坝底部或者侧面安装小型发电机组,在保证下游生态流量的前提下进行发电,适合库容较大、落差适中的中小水电站 [2]。从近几年的工程实例来看,生态机组的装机容量一般为主机组的 10%-20%,年利用小时数可以达到 6000-8000 小时,投资回收期大约为 8-12 年。分层取水技术是在不同的位置设置取水口,可以有效地改善下游水温及水质情况,非常适合于深水库容型电站。

智能化调度系统融合水文预报、生态需水计算、发电优化等模块,在保证生态流量的基础上实现最大化的发电收益。系统利用多目标优化方法求解最佳闸门开度及机组出力使下游河段生态流量保证率大于 95%,而具体实施方案需结合河流特点以及电站情况来制定,其中生态流量标准应根据河流生态需水量来确定,一般取多年平均流量的 10%-30% 作为基准值并考虑季节性和极端天气的影响,在技术上要有一套完整的监测系统,在坝址上下游设置流量监测断面,对

生态流量进行监测。

3.2 水库水质改善与沉积物管理技术

水库水质改善技术主要有增氧、生态浮岛、底泥疏浚等方法来解决中小水电站普遍存在的水体富营养化、溶氧不足、底泥淤积等问题。人工增氧是通过在水库内设置曝气机或者喷泉等方式提高水体含氧量从而改善水质,尤其适合于水深较浅、水流缓慢的水库。生态浮岛是利用水生植物净化作用,在水库中建立人工湿地生态系统,可以去除水体中的氮磷等营养物质,净化效果可以达到 30%-50%。沉积物管理是通过定期清淤以及生态清淤相结合的方法,既要清除有害淤泥又要保证底栖生物生存空间,清淤周期一般为 5-10 年,每次清淤量依据淤积速度以及库容损失而定,一般占总库容 2%-5%。多种技术联合运用可形成协同增效的治理模式,将人工增氧、生态浮岛与底泥疏浚进行组合实施,能更稳定地控制水体富营养化进程。实际应用中需结合水库水文条件、污染源及运行需求,制定分期分步的改善方案,在提升水质的同时维护水生生态平衡,实现中小水电站生态与经济效益双赢。

3.3 发电效率提升与能耗降低技术路径

发电效率提高的技术主要是通过对水轮机增效扩容、励磁系统改造、自动化控制改进等方式来实现。其中水轮机增效扩容是最直接有效的方法,通过对水轮机进行改造如更换高效率叶片、优化流道设计、提高加工精度等,可以使水轮机效率由原来的 80%-85% 提高到 90%-93%,发电量增加 15%-25%。励磁系统改造是用数字化励磁代替传统的模拟式励磁,使系统反应更快更准确,同时减少了维修工作量以及故障率。自动化控制系统利用先进的监控算法及优化策略对机组启停、负荷分配、水位控制等进行智能化管理,在确保电站安全可靠的基础上尽可能多地利用水能资源,使综合发电效率提高 8%-15%。降低能耗的方法有 LED 照明改造、高效水泵使用、余热回收利用等节能措施,通过对整个工厂进行节能改造,可以使厂用电率从 4%-6% 降低到 2%-3%,每年节约电量为总发电量的 2%-4% [3]。

4、绿色改造技术的经济性与环境效益评估

4.1 不同技术方案的成本效益分析模型

中小水电站绿色改造技术方案经济性评价要进行全方位的成本效益分析,包括投资成本、运行成本、收益以及风险等。水轮机增效扩容改造是主要的技术手段之一,其投资一般占全部改造投资的 40%-50%,但是可以提高发电效率,投资回收期一般为 5-8 年。生态流量保障系统以及鱼类洄游通道建设虽然前期投入较大,但是可以减少生态补偿费用并且有政府补贴。智能化监控管理系统投入较少,但是可以大大节约人工维护费用,提高设备使用率。

成本效益分析模型利用净现值法以及内部收益

率法对项目的经济效益进行评估,在此基础上还考虑到碳交易收益、生态补偿减免、政府补贴等外部收益。该模型是基于全生命周期成本理论建立起来的,把改造技术带来的经济效益分为直接经济效益和间接经济效益两个方面,其中直接经济效益主要是由于发电量增加、运营成本下降以及设备寿命延长所带来的收益,而间接经济效益主要是由于生态环境改善、企业形象提升以及政策风险减少所带来的收益。通过对于不同的技术组合方案进行敏感性分析可以看出,电价水平、设备利用小时数以及改造投资成本是影响项目经济效益的主要因素,从而可以对技术方案进行优化选择。

4.2 环境效益量化评估方法与指标体系

环境效益量化评估以生态系统服务价值理论为基础,结合环境经济学相关方法,建立包括水文调节、生物多样性保护、水质净化以及碳减排等在内的综合性指标。生态流量保障技术通过对河道进行一定量的补水,可以有效改善下游河段生态环境质量,其环境效益主要体现在水生生物栖息地恢复、河流自净能力提高以及生态系统稳定性增强等方面。鱼类洄游通道建设大大提高了鱼类种群数量及遗传多样性,从近五年监测结果来看,在进行了改造后的水电站下游鱼类种类平均增加了 20-30%,生物量提高了 40-60%。水质保护设施的完善有效地减少了工业废水和生活污水对河流的影响,化学需氧量和氨氮浓度分别下降了 15-25% 和 10-20%。环境效益的货币化评估采用替代成本法、机会成本法和条件价值评估法等方法,把生态服务功能换算成经济价值,对绿色改造技术进行全面评价。

4.3 技术选择的多目标优化决策框架

中小水电站绿色改造是一个复杂的过程,涉及到多种技术的应用,需要从经济性、环保性、安全性等方面进行取舍 [4]。采用层次分析法和模糊综合评价的方法,建立一个由效益层、准则层、方案层组成的三层决策模型。效益层有三个目标函数:经济效益最大化、环境影响最小化、技术风险可控化,权重依次为 0.4、0.35、0.25。准则层有 12 个指标:投资回收期、年化净收益、生态流量保障度、水质改善指数、技术成熟度、实施复杂度等。方案层包括水轮机增效扩容、生态流量保障、智能监控、鱼道建设、水质保护等单项技术和其组合方案。

决策框架基于改进 TOPSIS 法对方案进行排序,在建立标准化决策矩阵的基础上,求出每个方案与理想解之间的相对贴近度从而对技术方案进行量化比较。根据不同的水电站类型特点,制定相应的决策规则:对于装机容量小于 5MW 的小型水电站,优选投资少、见效快的增效改造和智能监控技术组合。对于装机容量在 5-25MW 之间的中型水电站,优选以生态流

量保障及鱼道建设为主的综合改造方案。对于装机容量在 25-50MW 之间的大型中小型水电站,优选全面绿色改造技术集成方案。经蒙特卡洛仿真实验表明,此决策框架具有较好的鲁棒性,在不确定条件下能够给出合理建议,是中小水电站绿色改造技术选择的有效辅助工具。

5、结论

中小水电站绿色改造是实现“双碳”目标、推进生态文明建设的重要手段,也是我国水电行业转型升级的必由之路。本文通过对我国中小水电站现状以及存在问题进行详细分析的基础上,提出了绿色改造技术选择方案,对行业发展起到积极促进作用。从技术角度出发,水轮机增效扩容改造、生态流量保障系统、智能化监控管理、鱼类洄游通道建设和水质保护设施完善等五个方面是目前中小水电站绿色改造主要方向,可以较好地解决中小水电站设备老化、效率低下、对生态环境影响大等问题,在此基础上采取一系列措施进行改造,可以使中小水电站发电效率提高 15%-25%,并且可以大幅度改善河流生态环境。

从技术成熟度、经济性、环境效益以及实施难易程度等方面进行综合考虑,本文提出的分类分批实施策略以及差异化技术选择方案,可以针对不同类型、不同规模的中小水电站提出相应的绿色改造方案 [5]。这对于政府相关部门出台相关政策具有重要的指导意义,同时对于水电企业如何选择合适的技术进行改造以及如何合理安排资金也有一定的借鉴作用。而随着绿色改造技术的发展和完善,我国中小水电站在保证能源供应的同时,也能够更好地发挥其在环境保护方面的作用,为建设一个清洁低碳、安全高效的现代能源体系作出积极贡献。

参考文献

- [1] 杨祖鸽. 农村小水电站建设和改造中应注意的问题 [J]. 中国战略新兴产业 (理论版), 2019, (12): 0015-0015.
- [2] 王嗣超. 常规监控下的中小水电站运行值班模式探索 [J]. 智能城市, 2021, 7(2): 93-94. DOI:10.19301/j.cnki.zncs.2021.02.042.
- [3] 魏子轩. 中小型水电站增效扩容改造实施策略 [J]. 智慧中国, 2025, (S1): 116-117.
- [4] 陈晓明, 高纯杰. 中小水电站集控系统建设改造探讨 [J]. 水电与新能源, 2020, 34(8): 18-19. DOI:10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.08.004.
- [5] 秦俊虹, 谢琴. 政策先行 标准引领 综合改造 常态监管——丽水市水电绿色发展建设实践 [J]. 小水电, 2019, (3): 9-10.