

小型水利发电站的设计原理及效益分析

吴春光

卓资县水利局

DOI:10.32629/hwr.v10i1.6773

[摘要] 小型水利发电站核心设计原理涵盖水能资源转化、主要设备设计及站址选择与总体布置三大维度,水能转化遵循能量守恒与电磁感应定律,设备设计需匹配水文条件,站址选择兼顾资源、工程与环境因素。设计关键技术聚焦效能平衡与稳定性保障,优化策略贯穿全流程,包含定制化设备设计、智能控制引入等,同时需针对不同水文条件制定差异化调整方案。效益评价体系遵循科学、系统等原则,从经济、社会、生态三大维度构建指标体系,经济维度关注投资回报与运营收益,社会维度聚焦能源保障与区域发展,生态维度围绕生态保护与资源可持续利用展开,全面评估电站综合价值。

[关键词] 小型水利发电站; 设计原理; 效益分析

中图分类号: TM624 文献标识码: A

Design Principle and Benefit Analysis of Small-scale Hydropower Station

Chunguang Wu

Zhuozhi County Water Resources

[Abstract] The core design principles of small hydropower stations encompass three key dimensions: hydropower resource conversion, major equipment design, and site selection with overall layout planning. Energy conversion adheres to the laws of energy conservation and electromagnetic induction, while equipment design must align with hydrological conditions. Site selection requires comprehensive consideration of resource availability, engineering feasibility, and environmental factors. Critical design technologies focus on achieving efficiency equilibrium and stability assurance, with optimization strategies implemented throughout the entire process—including customized equipment design and intelligent control integration. Tailored adjustment plans must be developed for varying hydrological conditions. The benefit evaluation system follows scientific and systematic principles, establishing an indicator framework across economic, social, and ecological dimensions. The economic dimension evaluates investment returns and operational profits, the social dimension prioritizes energy security and regional development, and the ecological dimension emphasizes environmental protection and sustainable resource utilization, comprehensively assessing the station's overall value.

[Key words] small hydropower station; design principle; benefit analysis

引言

在全球能源结构转型以及“双碳”目标不断推进的大背景下,清洁能源的开发利用已然成为能源领域发展的关键核心方向。小型水利发电站凭借着投资规模较小、建设周期不长、对环境适应性较强等诸多优势,成为补充区域能源供应以及优化能源结构的关键载体。我国水能资源十分丰富,在偏远山区存在着大量可开发的小型水能资源,但当前小型水利发电站在设计方面仍然面临着水文条件适配性不够、能效转化效率不均衡、生态效益与发电效益协调存在较大难度等问题。随着对能源利用质量以及生态保护要求的提高,迫切需要明确小型水利发电站的设计原理、突破关键技术瓶颈并构建科学的

效益评价体系。

1 小型水利发电站核心设计原理

1.1 水能资源转化基础原理

小型水利发电站运行的核心逻辑在于水能资源的转化,这实际上是将水流的机械能转变为电能的能量传递活动,水流所具有的机械能包括动能与势能,其中势能是由水位落差所形成,而动能则和水流速度存在关联^[1]。在转化过程中要依据能量守恒定律,借助水工建筑物以及发电设备的共同作用,让水流冲击水轮机使其旋转,以此实现机械能的传递与转换。当水轮机将水流机械能转化为旋转机械能后,会驱动发电机转子进行旋转,依据电磁感应原理,使得发电机定子绕组切割磁感线产生感应电

动势，最终输出电能，该转化过程的效率直接由水位落差、水流流量等水文参数与设备性能的匹配程度所决定。

1. 2 主要设备设计原理

主要设备的设计应当以水能资源的具体条件作为依据，以此来保障能量转化的效率以及运行的稳定性。水轮机的设计需要根据电站的水文特征来确定机型，结合水头以及流量参数对转轮叶片型线进行优化，保证水流可顺畅借助并高效地传递能量，还要控制空化与空蚀现象的发生，发电机的设计要与水轮机的转速相匹配，合理选择磁极对数以及定子绕组结构，保障电磁感应的效率，并且兼顾绝缘性能以及散热设计，以此来维持长期运行的可靠性。在辅助设备方面，调速器会依据负荷的变化来调节水轮机的进水量，励磁装置可维持发电机端电压的稳定，配电设备则可以实现电能的汇集、转换以及输送，各个设备的设计都需要契合系统协同运行的要求。

表1 设备类型

设备类型	核心设计要点	设计依据
水轮机	转轮叶片型线优化、空化控制	水头、流量、水文变幅
发电机	磁极对数匹配、绝缘与散热	水轮机转速、额定功率
调速器	负荷响应速度、调节精度	电站负荷波动范围

1. 3 站址选择与总体布置设计原理

站址的选择需要全面考虑水能资源的禀赋、工程条件以及环境影响等多个方面。在水能资源方面，应当优先挑选水位落差较为集中且流量稳定的河段，借助水文监测所获取的数据来评估资源的可开发量。对于工程条件而言，要契合地形地质稳定、交通便利以及施工场地充足等要求，以此降低工程建设的难度以及成本。在环境影响方面，需要避开生态敏感区域，减少对水域生态系统以及周边居民生产生活所产生的干扰^[2]。总体布置设计要实现各功能区域的合理衔接，主厂房的布置要保证设备安装以及运维的空间，升压站应当靠近主厂房，以便缩短电缆的长度，办公与辅助设施要兼顾实用性与安全性，优化水流通道的的设计，减少能量的损耗。

2 小型水利发电站设计关键技术与优化

2. 1 设计中的关键技术难点

小型水利发电站设计的关键技术难题主要聚焦于多约束条件下的效能平衡以及稳定性保障方面。其一，在中小水头以及变流量工况的情形下，水轮机高效区的匹配存在较大难度，水文径流的季节性波动容易使设备运行偏离最优工况，使得能量转化效率降低。其二，站址大多处于偏远山区，此地的地形地质条件复杂，压力管道的布置以及抗地质灾害设计面临着挑战，需要同时兼顾施工可行性以及结构安全性。其三，小型电站大多时候存在资金以及技术投入有限的状况，如何实现自动化控制系统的简化以及可靠性兼顾成为技术瓶颈所在。其四，生态流量保障与

发电效益的协调设计难度颇高，需要在契合生态需求的基础之上实现发电效益的最大化，防止对水域生态系统造成不可逆转的影响。

2. 2 基于能效提升的设计优化策略

能效提升的设计优化策略要贯穿电站设计整个流程，设备选型时采用定制化水轮机转轮设计，借助CFD数值模拟技术来优化叶片型线，拓宽设备高效运行范围，提高变工况适应性，引水系统优化可运用新型减阻管材并进行合理的断面设计，减少沿程和局部水头损失，还要设置精准的流量调节装置，实现水流按需求分配。发电机系统优化要强化磁路设计以及绕组绝缘性能，降低铁损和铜损，提升电磁感应效率，引入智能控制技术，构建基于实时水文与负荷数据的自适应调控系统，实现水轮机开度与发电机负荷的动态匹配，优化电站总体布置，缩短能量传输路径，减少输电损耗，形成多环节协同的能效提升体系。

2. 3 适应不同水文条件的设计调整方法

为适应不同的水文条件而进行设计调整，需要构建差异化的技术方案体系。在丰水期，流量较大且水头稳定，此时可采用多台机组并联的设计方式，对机组组合运行模式加以优化，以此提升水资源的利用效率，还要强化泄洪设施的设计，保障电站的安全。在枯水期，流量较小且水头波动较大，这种情况下应选用高比速水轮机机型，对转轮过流能力进行优化。并且配套建设小型调节水库，以实现径流调节，保障枯水期的稳定出力，针对季节性冰冻的水文条件，要对引水系统采取保温与防冰设计，选用耐低温的材料与设备，防止冰冻对系统运行产生影响，对于多泥沙河流，需优化泥沙池的结构设计，采用高效排沙装置，减少泥沙对水轮机的磨损。同时选用抗磨蚀性能良好的设备部件，延长设备的使用寿命。

3 小型水利发电站效益评价体系构建

3. 1 效益评价指标选取原则

小型水利发电站效益评价指标的选取要遵循核心原则，该原则是科学性、系统性、可操作性与针对性相结合。科学性原则要求指标体系依据水利工程与能源经济相关理论，准确反映效益的本质属性以及内在规律，防止出现主观臆断的情况，系统性原则强调指标要覆盖经济、社会、生态这三大效益维度，形成层次清晰且相互关联的完整体系，全面考量电站建设运行带来的综合影响。可操作性原则规定指标数据应便于依靠实地调研、统计报表或者监测数据来获取，计算方法简便可行，兼顾数据可得性以及评价效率。针对性原则要求结合小型电站规模小、地域分布分散、受水文条件影响大的特点，选取可精准反映其效益特色的指标，避免套用大型电站评价体系，保证评价结果的真实性与有效性。指标选取还需要兼顾动态性与稳定性，要适应不同时期的发展需求，又要保障评价标准的相对统一。

3. 2 经济效益评价指标体系

小型水利发电站经济效益评价指标体系以投资回报、运营收益以及资源利用效率这三个核心维度为中心进行构建，投资回报类指标包含静态投资回收期、动态投资回收期、投资利润

率以及内部收益率,其中静态投资回收期 and 动态投资回收期体现的是项目回收初始投资所需的时间周期,动态指标在体现资金时间价值方面更具优势,投资利润率和内部收益率则直接对项目的盈利水平给予衡量。运营收益类指标有年发电量、年售电收入、单位发电量成本以及售电单价,年发电量和售电收入可以直观地反映出项目的收益规模,单位发电量成本用于衡量运营效率,售电单价与收益水平直接相关,资源利用效率类指标主要是水能资源利用率,也就是实际发电量与理论最大发电量的比值,它反映了对水能资源的开发利用程度。此外,还可以将资产负债率等偿债能力指标纳入其中,以此全面评估项目的经济可行性以及可持续运营能力。

3.3 社会效益评价指标体系

小型水利发电站社会效益评价指标体系主要关注能源保障、区域发展、就业促进以及公共福利这四个关键领域。能源保障类指标有供电可靠性、区域能源自给率以及清洁能源替代量,供电可靠性用于衡量电站为周边用户供电的稳定状况,区域能源自给率能反映其对区域能源供应的支撑作用,清洁能源替代量则可体现对传统化石能源的替代成效,可推动节能减排。区域发展类指标包含对地方GDP的贡献率、基础设施配套完善程度以及产业带动系数,电站的建设与运营可拉动建材、施工等相关产业的发展。同时完善区域交通、通信等基础设施,就业促进类指标包括直接就业岗位数量、间接就业岗位数量以及当地劳动力吸纳比例,直接就业岗位是为电站运营维护所提供的岗位,间接就业岗位是产业链相关环节创造的岗位,当地劳动力吸纳比例可体现对地方就业的带动作用。公共福利类指标包括居民收入增长幅度、教育医疗资源改善程度,电站的税收收入可以帮助地方公共服务设施建设,提升居民的生活质量。

3.4 生态效益评价指标体系

小型水利发电站生态效益评价指标体系围绕生态保护、环境改善以及资源可持续利用展开,其核心内容涉及水文生态、水环境质量、生物多样性以及气候调节这四大维度。其中水文生态类指标包含生态流量保障率、下游河道径流调节系数以及地下水补给量,生态流量保障率对于维持下游河道生态功能而言

非常关键,它可以保证水生生物生存所必需的基本水流条件。而径流调节系数则体现了对河道径流时空分布的优化作用,水环境质量类指标有水体溶解氧含量、COD去除率以及悬浮物沉降率,电站在引水与拦蓄过程中可推动水体循环,降低污染物浓度,使水质得到改善,生物多样性类指标包括水生生物物种数量变化率、陆生植被覆盖度以及栖息地完整性指数。凭借合理的工程设计,可以减少对生物栖息地的破坏,以此维护生态系统的平衡,气候调节类指标主要是碳减排量与碳汇增量。小型水电站作为清洁能源项目,可减少因化石能源燃烧而产生的二氧化碳排放,库区周边植被的恢复可以增加碳汇,可应对气候变化。此外,还可以将水土流失治理面积等指标纳入其中,用于评估对区域生态环境的综合改善成效。

4 结语

小型水利发电站若要实现高效且可持续的运行,合理设计以及科学评价是极为关键的保障,核心设计原理为电站建设奠定了基础遵循方向,针对不同水文条件所制定的技术优化策略,切实有效地解决了效能平衡以及稳定性方面的难题,而多维度效益评价体系达成了对电站综合价值的全面考量。小型水利发电站实现健康发展,可充分挖掘水能资源的潜力,保障区域的能源供应,而且还可以推动区域经济的发展以及生态环境的改善。未来需要加强技术创新与实践应用的结合,持续优化设计方案以及评价指标,提升电站对复杂环境的适配能力,帮助清洁能源产业实现高质量发展,为能源结构转型与生态保护协同推进提供更为有力的支撑。

[参考文献]

[1]祁复兴.水利水电发电站的优化运行与调度策略分析[J].中国战略新兴产业,2025,(17):162-164.

[2]魏永键.生态修复在小水电站建设中的应用[J].绿色环保建材,2021,(06):174-175.

作者简介:

吴春光(1982--),男,汉族,内蒙古自治区乌兰察布市人,本科,毕业于北京工业大学,工程师,主要从事水利水电工程方面研究。