

中小型水电站节能增效技术应用实践分析

崔义彪

贵州安顺中水水电开发有限公司

DOI:10.32629/hwr.v10i8.7092

[摘要] 中小型水电站作为清洁能源的重要组成部分,其运行能效直接影响区域电网供电质量与水资源综合利用率。针对当前多数中小型水电站设备老化、效率偏低、调节能力有限等共性问题,本文系统梳理了水轮机改造、电气系统升级、运行方式优化及辅助系统节能四方面的增效技术路径。分析表明,通过转轮优化选型与导水机构改造可显著提升水力转换效率,电气系统增效与辅助系统降耗能有效降低厂用电率,而水库调度与机组组合运行则能从管理层面挖掘节能潜力。各类技术协同应用可综合提升电站发电效益,为同类电站技术改造提供参考。

[关键词] 中小型水电站; 节能增效; 水轮机改造; 电气系统优化; 运行调度

中图分类号: TV742 文献标识码: A

Analysis of the Application Practices of Energy Conservation and Efficiency Improvement Technologies in Small and Medium-Sized Hydropower Stations

Yibiao Cui

Guizhou Anshun Zhongshui Hydropower Development Co., Ltd.

[Abstract] Small and medium-sized hydropower stations, as a vital component of clean energy infrastructure, have their operational efficiency directly impact the power supply quality of regional grids and the overall utilization rate of water resources. Addressing common challenges faced by most small and medium-sized hydropower stations—such as aging equipment, low efficiency, and limited regulation capabilities—this paper systematically reviews four technical approaches to enhance efficiency: turbine retrofitting, electrical system upgrading, operational mode optimization, and auxiliary system energy conservation. The analysis demonstrates that optimizing the selection of runner components and renovating the flow guide mechanism can significantly improve hydraulic conversion efficiency; enhancing the electrical system's efficiency and reducing energy consumption in auxiliary systems can effectively lower the plant electricity consumption rate; while reservoir dispatching and optimal unit grouping can unlock additional energy-saving potential at the management level. The synergistic application of these various technologies can comprehensively improve the power generation performance of the station and provide valuable references for the technical retrofitting of similar hydropower plants.

[Key words] Small and medium-sized hydropower plants; energy conservation and efficiency improvement; hydraulic turbine retrofitting; electrical system optimization; operational dispatching

引言

中小型水电站在我国水电装机中占比显著,但受早期设计制造水平限制,实际运行效率普遍低于设计值,且部分电站长期偏离最优工况区运行,造成水量浪费与电能损失。随着电力市场化改革推进,提高水电站自身能效成为增强竞争力的必然选择。节能增效技术涵盖水力机械、电气设备、控制策略及辅助系统等多个维度,需从系统性角度统筹施策^[1]。本文结合工程实践,按设备升级、系统优化、运行调控三个层级展开论述,以期为中

小型水电站节能改造提供技术思路。

1 水轮机节能改造技术

1.1 转轮优化选型

转轮是水轮机能量转换的主要部分,水力性能的好坏直接影响到机组效率的高低。早期中小型电站大多使用传统的模型转轮,它的叶片型线是根据有限工况点来设计的,在变水头、变负荷的情况下,流道容易出现脱流和漩涡,造成水力损失增大^[2]。现代计算流体动力学技术应用之后,转轮优化选型更加准

确,使用全流道数值模拟可以定量评价不同的转轮方案在电站实际运行水头范围内效率特性。选用高比转速、宽高效区的转轮模型,可以扩大机组的稳定运行范围,使加权平均效率提高3%~5%。选型还要考虑泥沙磨损和空蚀防护,用抗磨蚀涂层或者不锈钢材料铸成转轮,延长转轮检修时间,减少整个寿命周期费用。

1.2 导水机构改造

导水机构起着调节流量和形成环量的作用,它的活动导叶型线、端面间隙以及关闭规律都会影响到水流进入转轮的情况。老旧电站导叶一般为对称型线,进出口安放角不相适应,在一些负荷工况下会出现导叶出口流速分布不均的现象,从而加大尾水管压力脉动。将导叶改为非对称负曲度,同时改进导叶端面间隙密封结构,可以明显改善导叶后面流场的均匀性,减小节流损失。同步进行导叶接力和控制环的磨损修复以及间隙调整工作,消除由于连杆变形所引起的导叶开度不同情况的发生,使各个导叶的动作保持一致^[3]。实际改造案例表明,导水机构综合改造可降低水轮机额定流量下的水力损失约8%,尤其对低水头电站增效显著。

表1 水轮机常用改造措施效果对比

改造部位	主要技术手段	预期效果
转轮	更换高比转速宽高效区转轮	效率提升 3%~5%
导水机构	非对称导叶型线+端面间隙密封优化	水力损失降低约 8%
主轴密封	分段式组合密封或浮动环密封	漏水量降至 2L/min 以内

1.3 主轴密封降漏

主轴密封是阻止压力水流从主轴外面流出来的关键部件,传统填料式或者平板橡胶密封在长时间运转之后磨损严重,漏水量逐年增多,不但会直接造成水量的损失,还会给水淹水轴承带来隐患。采用新型端面螺旋泵密封或者浮动环密封结构,在不需要增加复杂的辅助系统的情况下就可以达到动态间隙自动调节的目的,大大降低了停机状态下静水泄漏和运行过程中动态渗漏的发生率。密封面用高分子耐磨材料,并对冷却润滑水路进行优化设计,可以提高密封寿命^[4]。该电站把原来的填料密封改为分段式组合密封之后,实际测得的漏水量从原来的12L/min降到2L/min以下,每年可多发15万kW·h的电,投资回收期不到两年,有节电和安全两方面的益处。

2 电气系统增效技术

2.1 发电机效率提升

发电机效率受到定转子铜损、铁损和杂散损耗三者的共同影响,中小型水轮发电机由于存在绝缘老化、通风散热不好等状况,其实际效率比出厂时低1.5%到2.5%。用低损耗硅钢片代替普通的热轧硅钢片可以降低铁损约20%,使用F级及以上的耐热电磁线,可以增大电流密度,减小导体截面,从而减小铜损。对定子绕组端部做绑扎加固工作,并对通风沟结构加以改良,从而改善径向和轴向的温度分布情况,防止出现局部过热造成附加损耗

的现象发生。在保持机座不动的情况下,用高效磁极线圈和改变磁极形状的方法来提高发电机的额定效率到96%以上,改造费用只有更换整机的三分之一左右,经济性较好。

2.2 励磁系统优化

励磁系统不但是影响发电机端电压稳定的因素,而且是决定无功功率分配以及功率因数调节的关键。传统的模拟式励磁调节器响应慢、控制精度低,并且不能和电网调度信息进行实时交流。采用微机数字式双通道励磁调节器,用PID+电力系统稳定器控制策略来根据有功出力的变化自动调节励磁电流,使发电机工作在最佳功率因数区,减小由于无功环流造成的附加损耗^[5]。励磁功率单元从原来的晶闸管半控整流改为全控型IGBT模块,提高整流效率,降低谐波含量,减小发电机转子绕组的脉振损耗。经过改进之后的励磁系统可以使得机组总的损耗下降0.3%到0.5%,并且大大提高了电力系统动态无功支持的能力。

2.3 变压器降损

主变压器、厂用变压器属于电站电能输送的重要部分,它们的损耗包含空载损耗和负载损耗。对于长时间处于轻载状态下的中小型电站来说,空载损耗所占的比例较大,可以采用非晶合金铁心变压器来代替传统的硅钢片变压器,空载损耗可以减少70%到80%。为了降低负载损耗,用换位导线或者组合导线绕制低压绕组,减小涡流损耗和环流损耗,增大绕组截面减小直流电阻。另外合理调节变压器分接开关的位置,使实际电压保持在额定值附近,防止由于过励磁造成铁心饱和损耗急剧增加。该电站把两台主变更换成节能型之后,一年节省电量大约32万kW·h,厂用电率下降了0.6%,并且变压器运行时温度明显降低,绝缘的老化速度变慢^[6]。

3 运行方式优化

3.1 水库调度优化

水库调度属于水电站发挥综合效益的关键管理手段,传统的调度大多依靠固定的水位或者经验性的规则来执行,不能应对径流的随机性和电力负荷的变动情况。引入中长期水文预报以及短期气象耦合模型,使用动态规划或者粒子群算法来求解最优水位过程线,在保证防洪安全的前提下提高发电水头和蓄水利利用率。优化调度要协调发电、供水、生态等各方面目标,建立以发电量最大或者发电效益最大的目标函数的调度模型,设定水位上下限和下泄流量的约束条件。经由实践证明,把调度周期由月度缩小到日度,并且实施滚动修正,可以使得年均发电量增长4%~7%,并且削减弃水现象,在径流式电站当中效果更加明显。

3.2 机组组合运行

对于多机组电站来说,机组组合方案的好坏会直接影响到整个电厂总的效率以及耗水量。由于不同的机组因为安装精度、磨损的不同而造成效率曲线有偏差,如果盲目地把负荷平均分配给各个机组,那么就会使一部分机组长时间处于低效区。根据实测得到的各个机组的效率特性及振动区边界来建立机组出力

效率的数字模型,并以此为基础进行全厂总流量最优化的负荷经济分配。低水头时先用高效率机组满载运行,不要让很多机组低负荷工作,高水头时用充足的水头增加机组数量、减小单机出力来避开振动区。该电站采用智能负荷分配系统之后,全厂平均耗水率从原来的 $4.12\text{m}^3/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 降到现在的 $3.89\text{m}^3/(\text{kW}\cdot\text{h})$,每年可以节省水量相当于增加发电量超过一百万千瓦时。

3.3 变频调速应用

常规水轮发电机组在定转速运行时,如果水头发生变化,导叶开度调节范围就会受到限制,偏离最优转速会使得水力效率降低。采用全功率变频调速技术,用交—直—交变频器调节发电机定子频率来改变机组转速,在不同的水头下使水轮机一直保持最优单位转速运行。变频调速还可以在发电工况和水泵工况之间自由转换,对抽水蓄能型中小电站有特别的意义。但是要注意变频器本身也会产生一定的谐波损耗和冷却能耗,需要考虑净收益。对于水头变化大的电站,变频调速可以使得年加权效率提高6%~10%,动态调节响应时间由原来的秒级变为毫秒级,大大提高了电能质量。

4 辅助系统节能

4.1 冷却水系统改造

水轮发电机推力轴承、上导轴承和空气冷却器都需要连续供应冷却水,传统的冷却水系统用的是直流供水的方式,大量的清洁水被直接排放出去,造成水资源的极大浪费。将直流冷却改为循环冷却系统,在冷却塔或者板式换热器上加装水质净化装置,使冷却水循环利用率达到95%以上。循环水系统用变频调速泵代替定速泵,按照轴承温度和环境气温来自动调节供水流量和压力,防止过多供水造成能量的浪费。同时改善冷却管路的布置,减小弯头、阀门的数量从而减小沿程阻力。该电站经过改造之后,冷却水泵每年耗电量减少42%,补水流量减少了大约80%,厂用电率降低了0.25个百分点。

4.2 油气系统降耗

透平油系统、压缩空气系统属于水电站必不可少的辅助设备,它的能耗经常被忽略。透平油系统担负着调速器的操作以及轴承的润滑工作,传统的油泵一直以工频运转为主,溢流阀不断泄油从而产生大量的能量损耗。用油泵间歇工作加蓄能器保压的方式进行控制,在压力到达上限的时候会自动停止泵的工作,蓄能器来保持系统的压力,可以大大减少油泵的工作时间达到60%以上。压缩空气系统用来做制动、调相和检修吹扫等用途,泄漏率一般比较高,定期检测管路接头、阀门的密封情况,并及

时更换老化密封件,另外把露点温度设定值调到合理的范围内,可以减小干燥器再生耗气量。两项改造一共可以削减辅助能耗大约30%。

4.3 厂用电优化

厂用电率属于衡量电站经济性的关键指标,它所包含的范围有照明、通风、排水、充电以及控制设备等诸多方面。对厂用电负荷清单进行全面梳理,把高耗能、低效的机电产品淘汰掉,比如用LED灯取代荧光灯,并加上智能感应开关,给通风机装上温度自动启停控制系统。直流系统充电机用高频开关电源模块代替工频整流电源,效率从原来的75%提高到现在的92%。创建厂用电能耗监测平台,对各个支路的用电实施即时的计量和统计分析工作,从而找出异常能耗情况并加以解决。采用精细的管理以及更新设备的方式,可以使中小型水电站厂用电率下降0.4到0.8个百分点,进而使上网电量得到提升。

5 结语

中小型水电站节能增效要从水轮机改造、电气更新、运行改善以及辅助节能这四个方面来考虑。转轮、导叶的改造可以提高水力效率,电气系统的更新可以降低损耗,水库调度和机组组合可以挖掘出管理上的节能潜力,辅助系统改造也可以压缩厂用电。各个电站应该根据自身的水头、机组特点来选择合适的组合方案,先做回收期短的项目,然后逐步采用数字化监测和智能控制的方式推进中小水电的高效化、智慧化发展。

[参考文献]

- [1]庄海波.一级水电站增效扩容改造方案及节能效果评估[J].水上安全,2025,(21):107-109.
- [2]沙芳宇.贯流式机组在水电站运行中的节能优化策略[J].电力设备管理,2025,(19):244-246.
- [3]苏磊.大数据驱动的水电站运行能耗分析与节能技术应用[J].应用能源技术,2025,(5):88-90.
- [4]邓家平.水电站运行管理节能措施及运用效果分析[J].小水电,2024,(5):38-40.
- [5]蓝辉.水电站运行管理节能措施分析及运用效果[J].城市建设理论研究(电子版),2023,(22):205-207.
- [6]侯铁铮.爱河流域农村水电增效扩容改造效益分析[J].地下水,2021,43(5):256-257+277.

作者简介:

崔义彪(1995--),男,汉族,云南省曲靖市人,本科,职称:助理工程师,从事的研究方向或工作领域:电力工程、水利水电。