

农村水电增效扩容改造实践及成效分析

何良超

(中国大唐集团科学技术研究总院有限公司 水电科学研究院, 南宁 530033)

摘要:目前中小水电增效扩容改造的研究多聚焦于项目全过程管理、改造技术研究以及改造方案的选择制定,而鲜有对增效扩容改造前、后电站及机组状况的分析。以安徽纪村水电站增效扩容实践为对象,对比分析增效扩容改造后机组的性能变化、水能利用变化及经济效益情况。实践表明,农村水电增效扩容改造要综合考虑各种因素,分析利弊,选择合适方案,以达到改造技术先进、方案合理、经济的目标。

关键词:增效扩容;运行效率;水能利用;耗水率

中图分类号:TV74 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)07-0183-05

农村水电是我国农村经济社会发展的重要基础设施。对老旧小水电站进行增效扩容改造,使水能资源得到充分利用,促进电站发挥更多社会、经济作用^[1]。2011 年中央一号文件的出台,为农村小电站增效扩容提供了一个良好的发展契机,在不改变水工结构、投资相对较小的情况下,可充分利用水能资源,提高发电量,减少碳排放,同时又解决了小水电人员多、资金受限的困境,提高了经济效益和安全生产的可靠度^[2]。

为进一步促进节能减排和可再生能源产业发展,2016 年 2 月财政部、水利部印发《关于继续实施农村水电增效扩容改造的通知》,决定通过中央财政支持,以河流为单元继续实施农村水电增效扩容改造。这项工作 2016 年启动,2019 年年底全面完成^[3]。随着增效扩容项目的推进,针对农村水电站增效扩容改造的研究也大量开展。苗苗和盛雷^[4]从农村经济发展效益、工程安全及投资收益、低碳减排环保效用、生态效益与产业带动等方面对山东省农村水增效扩容改造进行了分析总结;潘丽枫等^[5]从项目前中期管理方面分析了缙云县“十三五”农村水电增效扩容改造主要做法及经验;肖妮等^[6]介绍了浙江省增效扩容改造项目完成情况及效果,总结经验,并对其特色、亮点进行分析。徐学章和张之韬^[7]从资金管理、全过程项目建设管理、验收管理等方面回顾了河北省“十三五”农村水电增效扩容改造情况。薛鹏等^[8]将中小型水电站的改造工作按照具体问题进行了分类研究,分析了不同改造类型中

存在的问题并给出相应的解决方案。叶永等^[9]对一库多级式小型水电站在改造设计过程中的设计思路进行了探讨研究,使两级电站的效益最大化。原文林等^[10]针对设计中电站装机容量的扩容幅度、水轮机选型及适应性分析等关键技术问题,结合我国增效扩容改造项目相关技术规范进行了分析。肖建军等^[11]分析了进水口拦污栅水头损失的特征,提出了一种机组优化结合进水口结构优化达到电站增效扩容效益最大化的改造新思路,丰富了中小电站增效扩容方法,对后续类似电站的增效扩容提供了可靠经验。

综上所述,目前中小水电增效扩容的研究多聚焦于项目全过程管理、改造技术研究以及改造方案的选择制定,鲜有对增效扩容改造后电站及机组运行状况的分析。针对这一问题,结合安徽纪村水电站增效扩容项目,详细分析了电站改造后机组的性能变化、电站水能利用变化及经济效益情况,为今后电站进行机组改造可行性研究及改造方案的制定提供参考。

1 电站概况

纪村水电站位于青弋江灌区总干渠末端,通过总干渠引上一级水电站尾水发电,属径流式日调节水电站,上游总干渠来水量,由上一级水库的调节下泄流量和区间径流量组成,电站具有发电、灌溉等综合利用效益。电站建成于 20 世纪 70 年代,电站装机 2 台,单机容量 17 MW,为轴流转桨式机组,压力前池正常水位 54.8 m,相应库容 21.7 万 m³,电站保证出力 5 700 kW。

收稿日期:2022-11-08

作者简介:何良超(1977—),男,湖北汉川人,中国大唐集团科学技术研究总院有限公司水电科学研究院,高级工程师,硕士,研究方向为水电站机电设备管理、测试及故障诊断。

电站1号机扩容改造工程于2016年10月开工,全部工程于2017年4月完工。电站2号机扩容改造工程于2017年10月开工,全部工程于2018年3月完工。水轮机转轮型号由ZZ587-LJ-330改为ZZ550F-LJ-330,同时对导水机构、转轮室等过流部件也进行了改造。

2 存在的主要问题

2.1 水轮机运行效率问题

由于历史原因,向电站供水的总干渠达不到设计水位,电站运行水头一直低于水轮机设计水头,水轮机偏离高效率区运行,机组效率低,长期达不到额定出力。

电站水轮机型号为ZZ587-LJ-330,转轮模型是20世纪60年代产品,模型效率低,气蚀性能差,且限于当时的材料及制造水平,造成转轮整体效率不高。该转轮气蚀性能差,设计吸出高度 -4.9 m ,实际吸出高度 -1.9 m ,水轮机淹没严重不足,水轮机转轮及转轮室气蚀破坏严重。

水轮机额定水头 28.5 m ,额定流量 $71.1\text{ m}^3/\text{s}$,额定出力 $17\,750\text{ kW}$,通过对机组运行的毛水头统计,机组70%时间运行在毛水头 $27.50\sim 28.00\text{ m}$,最大毛水头 29.7 m ,最小毛水头 25.9 m ,加权平均毛水头 28.3 m ,电站水头基本无法达到水轮机额定水头,水轮机长期偏离最优工况运行,机组出力达不到额定出力。

2.2 电气设备老化问题

经过40多年的运行,除电机和部分电气设备改造外,其他主要机电设备等均存在不同程度的老化和损坏现象。机组高压开关柜和互感器柜元器件老化,可靠性较差;各机电设备均存在超期服役、陈旧老化、配件难以购买等问题;电站自动化元件配置不全,自动化系统采用继电器式系统,陈旧老化,损坏较多,维修工作量大;已不能满足电站高效、安全、稳定运行要求。

电站机组控制以现地单元PCC(可编程计算机控制)为顺控、数据采集的设施为主,没有装设全厂计算机监控系统,不能全面对全厂机组运行工况、电气设备的实际运行状态和负荷分布进行监控,不能实现对全厂设备及保护装置的有效监控,机组控制操作难度较大,现场操作复杂。

2.3 水能利用问题

总干渠上游水草多、来污量大,造成发电进水口拦污栅水头损失大,经测量水头损失 $1\sim 2\text{ m}$,每台机减少出力约 $1\,000\text{ kW}$,由于污物量大,为了清污采用打开泄洪闸门冲污及停机人工清污相结合,每年要多次打开泄洪闸门进行冲污,年耗水约

100 万 m^3 ,年均停机清污36次,每次均需停机2 h以上,影响电站正常运行。

3 改造关键内容

3.1 水轮机改造

针对电站存在的问题选用效率高抗气蚀性能好且所需流道与电站接近的转轮对现有水轮机进行更换,并对水轮机内外顶盖、活动导叶、底环、转轮室进行更换,水轮机叶片、导叶及转轮室采用不锈钢材料。改造后的水轮机型号为ZZ550F-LJ-330,设计水头 27.7 m ,设计流量 $73.07\text{ m}^3/\text{s}$,额定出力 $18\,557\text{ kW}$,机组出力 $18\,000\text{ kW}$,吸出高度 -2.83 m ,运行水头范围变为 $26.2\sim 28.72\text{ m}$,较原转轮的 $24.5\sim 36.0\text{ m}$,有大幅的缩小,提高了转轮的高效率运行范围,预计效率可提高5%以上。

3.2 电气设备更换

电站电气主接线已经经过改造,本次不再进行改造。电气设备主要更换开关站 110 kV 断路器、 35 kV 高压开关柜、发电机 6.3 kV 机压开关柜以及高压柜与发电机之间、高压柜与主变压器之间连接的铝排;更换主变中压侧 35 kV 电缆等部分电缆;更新改造电站与系统的通信设备;更新电站直流系统设备;更新电站部分接地网以及发电进水口启闭机房电气设备等。

新增电站计算机监控系统和电站火灾报警系统,以顺应系统调度和提高自动化水平的要求;按“无人值班,少人值守”方式设计,采用集中监控方式。在设计中,对计算机监控系统采用分层、分布开放式的网络结构,分电站控制层和现地控制层,上下层之间采用工业以太网通信。主要实现对全厂设备实现自动监视与记录,由计算机监控系统自动完成全厂设备数据采集、处理及设备运行状况自动监视与记录。对电站设备实现自动控制,根据电站运行方式要求,对电站设备进行操作或调节。实现电站运行管理自动化,实现运行报表自动生成,运行操作自动记录,电站设备参数或整定值记录与保存,所有报表均可自动或召唤打印。实现与调度的通信。对发电机、主变、母线、线路等主设备及辅助设备保护与监控。

3.3 土建工程改造

土建工程主要是在电站大坝上游 220 m 处新建一座拦污进水闸、总干渠疏浚和主、副厂房缺陷处理。拦污进水闸上设置拦污栅和清污机,以解决发电进水口拦污栅水头损失大及停机人工清污等造成的水能利用降低问题。进水闸设计流量为 $160\text{ m}^3/\text{s}$,与总干渠设计流量相同。进水闸底槛高程 48.7 m ,分为

5 孔,每孔净宽 8.4 m,闸室顺水流方向长 10 m、垂直水流方向总宽为 50.6 m,墩顶高程 56.2 m,上设 6 m 宽度交通桥。进水闸上、下游两岸设钢筋混凝土扶壁式挡墙,上、下游钢筋混凝土护坦长度分别为 50.5、65.5 m,两侧为混凝土预制块护坡。在闸室右端新建一条 430 m 交通道路至右坝头对岸。

4 改造前后机组性能变化分析

4.1 改造前后水轮机效率对比

水轮机效率特性是评价水轮机性能的一个重要指标,对水轮发电机组进行原型水轮机效率特性试验具有十分重要的意义^[12]。通过电站效率在线监测系统,保持上下游水位不变,采用固定导叶开度、调整桨叶开度,寻找最优效率。改造前、后测试了电站 2 号机组在 60%、70%、75%、80%、85% 共 5 个导叶开度下的最优效率值,效率测试数据见表 1。对比不同开度下的机组最优效率,改造后机组效率普遍高于改造前机组效率,改造前机组在各导叶开度下的最优效率为 83%~85%,改造后,在相同导叶开度下,机组的最优效率为 89%~90%,效率值平均增加接近 5%,与改造前的预计值一致,水轮机改造基本到达了预期效果。

表 1 改造前后 2 号机组上游 54.40 m 水位效率测试数据

导叶开度/%	改造前			改造后		
	桨叶开度/%	最优效率/%	机组出力/MW	桨叶开度/%	最优效率/%	机组出力/MW
60	90.10	85.15	10.48	67.20	90.3	11.87
70	80.10	85.65	13.64	63.00	90.57	13.17
75	66.10	85.58	14.89	54.10	90.82	14.50
80	57.10	84.91	16.47	45.10	90.09	15.70
85	32.10	83.19	17.64	41.30	89.35	16.43

4.2 改造前后机组出力-导叶开度曲线对比

水轮机组的调速系统是一个复杂的非线性系统,机组导叶开度与功率之间的关系整体呈一个非线性函数关系^[13]。开度与功率的非线性对机组的调节品质有较大影响,通过校正可使开度与功率呈线性关系,以提高机组的调节品质。根据改造前后对机组出力进行试验的结果,新机组出力基本是随导叶开度增加线性增加,而旧机组出力随导叶开度增加呈反抛物线增加,具体如图 1 所示。在低于 75%导叶开度,相同导叶开度下,新机组带负荷能力高于旧机组。在 75%~90%导叶开度,考虑到新机组效率特性,新机组带负荷能力低于旧机组。在 90%导叶开度以上,新机组仍可进一步提升负荷,但旧机组在 90%导叶开度时桨叶开度已达 100%,机组提升负荷能力受限。

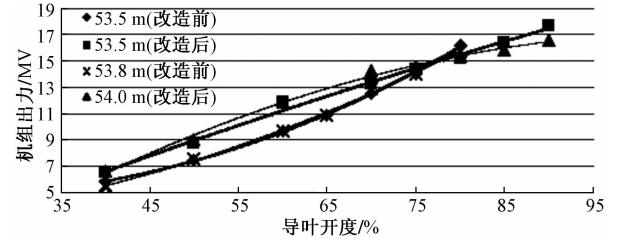


图 1 改造前后机组出力特性曲线

根据历史数据,旧机组总负荷最高带到近 18 MW(17.92 MW),此时上游水位 54.54 m、下游水位 27.20 m,导叶开度 98%,桨叶开度 100%,为旧机组最大带负荷能力。新机组在现协联关系 90%导叶开度下可带负荷 18 MW 左右,具备进一步带负荷能力。经试验,在上游水位 54.30 m、下游水位 26.66 m,导叶开度 99%,桨叶开度 96%,新机组带负荷 18.8 MW,而效率试验过程中机组负荷曾超过 19 MW,新机组带负荷能力高于旧机组。

4.3 改造前后机组耗水率对比

通过安装在机组上的机组效率在线监测装置,统计分析 2011—2019 年度 1 号和 2 号机组年耗水率,具体数据见表 2。1 号机组在未增效扩容改造前机组年平均耗水率为 16.35 m³/(kW·h),增效扩容改造后机组年平均耗水率为 15.73 m³/(kW·h),增容改造后 1 号机组年平均耗水率下降 3.82%。

2 号机组在未增效扩容改造前机组耗水率平均约 16.36 m³/(kW·h),增效扩容改造后机组耗水率平均约 15.59 m³/(kW·h),增容改造后 2 号机组耗水率平均下降 4.69%。

表 2 2011—2019 年机组耗水率

年份	耗水率/[m ³ ·(kW·h) ⁻¹]	
	1 号机组	2 号机组
2011	16.63	16.56
2012	16.38	16.53
2013	16.16	16.24
2014	16.23	16.34
2015	16.18	16.20
2016	16.51	16.37
2017	15.70	16.32
2018	15.64	15.40
2019	15.82	15.74

4.4 改造前后机组空蚀现象对比

增效扩容改造前,1 号和 2 号机组水轮机转轮叶片、导叶均存在不同程度的空蚀破坏。转轮室和尾水管进口部位空蚀现象尤为严重,个别部位已经脱空至混凝土层,在金属内壁内形成多处空腔,每年都需要对这些空蚀部位进行补焊、打磨等防空蚀措施,但空蚀现象依然在不断加剧。

改造后,1 号和 2 号机组空蚀损坏很小,已不需要每年进行处理。

4.5 改造前后机组运行稳定性对比

由于增效扩容改造前后,未针对性进行机组稳定测试,无法比较改造前后机组的运行稳定性指标。但根据部分运行数据。改造前,机组发导摆度大约 0.03 mm,水导摆度大约为 0.10 mm,机架振动大约为 0.03 mm,顶盖振动大约为 0.11 mm;改造后,机组发导摆度大约 0.02 mm,水导摆度大约为 0.08 mm,机架振动大约为 0.02 mm,顶盖振动大约为 0.09 mm。考虑到机组运行稳定性和运行水头及机组安装水平有较大关系,总体上看,改造前后,机组运行稳定性差异不大。

4.6 改造前后机组其他运行指标对比

各部轴承温度:改造前,44 ℃(推力)、43 ℃(上导)、38 ℃(水导);改造后,43 ℃(推力)、41 ℃(上导)、37 ℃(水导)。

水轮机压力脉动:改造前,额定出力下压力脉动双振幅 0.6 m;改造后,额定出力下压力脉动双振幅 0.6 m。

各典型部位噪声:改造前,水轮机机坑踏板上方 1.0 m 处的噪声大于 85 dB。改造后,水轮机正常运行时,距水轮机室靠里衬的踏板上方 1 m 处和距尾水管进人门 1 m 处的噪声分别为 81 dB 和 85 dB。

总体上,各部轴承温度、水轮机压力脉动和典型部位噪声在改造前后基本一致。

4.7 机组停机清污

2016 年末电站坝上前池开始安装拦污闸,2018 年初坝前拦污闸安装完毕。拦污闸投运前,每年需要数十次停机进行清污,清污情况统计具体见表 3。投运初期,因新设备使用不熟练及清污频次不合理,导致必须要将机组停机清污,后期拦污闸清污工作已无须将机组停机,极大地减少了人员操作工作量及降低了作业人员落水的风险。每日通过清除附着在拦污闸上的垃圾,减少了拦污闸及拦污栅的水头损失。同时,由于清污不用停机,大大提高了机组的发电量,电站年发电量提高 50 万~150 万 kW·h,效益十分明显。

表 3 2015—2019 年机组停机清污统计

年份	清污频率/(次·年 ⁻¹)	
	1 号机组	2 号机组
2015	12	20
2016	28	47
2017	12	16
2018	2	4
2019	0	0

5 改造后机组投资效益分析

5.1 改造项目电站水能利用变化情况分析

电站改造后,由于电站装机容量增大,相应地导致电站水能利用情况发生改变,对于机组运行水能利用有经济效益统计情况,主要指标见表 4。

改造后,电站装机容量由 34 MW 提高到 36 MW,多年平均发电量增加 1 384 万 kW·h,机组发电耗水率降低 4.4 m³/(kW·h),装机年利用小时提高 384 h。增发收益 546.68 万元。可见,改造后,水资源的利用率得到了提高,增发的电量提高了电厂的经济效益。

表 4 改造前后主要水能利用指标

指标	改造前	设计值	实际值	改造实际增加值
装机容量/MW	34	36	36	2
多年平均发电量/(万 kW·h)	13 916	17 483	15 300	1 384
发电耗水率/[m ³ ·(kW·h) ⁻¹]	20.5	16.3	16.1	- 4.4
装机年利用小时/h	3 866	4 856	4 250	384
水量利用率/%	100	—	100	0

5.2 改造项目财务投资收益分析

目前有较多有于效益测算方法的研究,主要使用的理论与方法有模糊分析法、博弈论、层次分析法和灰色关联分析法等^[14]。依据《小水电建设项目经济评价规程》^[15],改建、扩建项目的经济评价可用“有无对比法”,即计算改建、扩建与不改建、不扩建相对应的增量费用与增量效益,分析项目的增量部分的评价指标。

增效扩容改造项目得到国家和地方对小水电的扶持和补贴,对增效扩容改造实际增发容量及增发电量效益进行财务评价,费用投资采用电厂实付资金,不计入国家和地方的补贴资金,从电厂的角度评估,暂按增效扩容改造后正常运行 20 年、基准收益率按 8%计。复核改造的财务指标,电厂的财务内部收益率分别为 13.46%,均大基准收益率 8%,电厂进行改造的财务指标是可行的,可分别获得财务净现值 1 207 万元、投资回收期分别为 7.76 年。

在有财政补贴的情况下,本改造项目的财务评价指标较好。若无财政补贴,上述财务指标将明显变差,如财务投资回收期会上升至 15.22 年。投资回收期明显变长,投资效益明显下降。

从另一方面看,相较于一般小水电增效扩容改造以机电设备改造为主要内容,本项目多了较大的

土建工程改造,即新增拦污进水闸水工建筑及金属结构、总干渠疏浚和主、副厂房缺陷处理,本部分投资实际费用达到1 400多万,占到整个改造项目的23%,极大地降低了项目的投资效益。

从上面的分析可知,小水电增效扩容改造项目容易投资回收期较长,投资收益较差,因此,国家和地方对小水电增效扩容改造项目进行了近50%总费用的补贴和支持,使得增效扩容改造项目具有良好的投资收益,极大提高了小水电改造的积极性,整体提升了我国小水电的安全运行水平。同时,小水电要进行类似改造,若要得到较好的改造投资收益,则应在改造时严格控制改造范围,做好改造技术方案比较,严控改造投资。

6 结论

1)电站增效扩容技改项目,通过更换水轮机、发电机及其他控制设备,扩大了机组容量,提升了水轮机的出力和运行效率,增加发电用水量和发电量;部分老旧辅助设备也得到更新,自动化运行水平也得到一定提高,机组整体运行水平得到提升,提高了机组的安全性。

2)从投资收益上分析,得益于财政补贴政策,电站增效扩容改造项目具有很好财务投资收益,投资回收期短;若无补贴,则应做好改造技术方案比较,控制改造范围和改造投资。

3)增效扩容的水电站改造要综合考虑机组主设备、电气设备及土建工程等各种因素,分析利弊,选择合适方案,达到整体方案的合理性、经济性及先进性。

4)完成增效扩容改造的机组,应做好改造前、后机组的运行性能、水能利用及投资经济效益情况的分析,以评价改造的效果。

参考文献

[1] 叶永,牟玉池.农村水电站增效扩容改造设计探讨[J].中国农村水利水电,2016(7):184-186.

[2] 穆建军.农村水电站增效扩容改造关键技术问题的探讨[J].小水电,2012(5):6-8.

[3] 温毓繁,田承伟,彭勃,等.江西省农村水电站增效扩容改造项目管理与思考[J].江西水利科技,2021,47(2):135-138.

[4] 苗苗,盛雷.山东农村水电增效扩容改造项目成效分析.山东水利,2015(6):36-37.

[5] 潘丽枫,周丽娜,徐海霞.缙云县“十三五”农村水电增效扩容改造成效分析[J].小水电,2020(5):46-49.

[6] 肖妮,干超,俞恩惠.浙江省农村水电增效扩容改造成效及思考与建议[J].浙江水利科技,2021,49(3):47-50.

[7] 徐学章,张之韬.河北省“十三五”农村水电增效扩容改造回顾[J].小水电,2020(5):1-4.

[8] 薛鹏,王鑫,田娅娟,等.中小水电站增效扩容改造的主要问题及解决方案[J].中国农村水利水电,2014(2):133-136,141.

[9] 叶永,周胜,牟玉池,等.小型水电站增效扩容改造方案研究[J].人民长江,2017,48(7):88-91.

[10] 原文林,万芳,马跃先.农村小型水电站增效扩容改造关键应用技术研究[J].中国农村水利水电,2015(10):190-193.

[11] 肖建军,钱圣,康爱卿.低水头大流量电站增效扩容改造方案研究[J].中国农村水利水电,2019(9):216-219,223.

[12] 杨宇鑫,严新军,夏庆成,等.小型水电站扩容后水轮机原型效能分析[J].科学技术与工程,2021,21(24):10472-10477.

[13] 高东磊,刘友宽,苏杰,等.反函数在水轮机组开度非线性校正中的应用[J].科学技术与工程,2014,14(10):210-215.

[14] 宋倩芸,郑洁云,倪识远,等.基于综合能源优化配置的增量配电网工程投资效益测算方法[J].科学技术与工程,2020,20(36):14961-14966.

[15] 中华人民共和国水利部.小水电建设项目经济评价规程:SL/T16—2019[S].北京:中国水利水电出版社,2019.

The Practice and Effect of Efficiency Increase and Capacity Improving of Rural Hydropower Stations

HE Liangchao

(China Datang Corporation Science & Technology General Research Institute Hydropower Branch, Nanning 530033, China)

Abstract: At present, the research on efficiency enhancement, capacity expansion and reconstruction of small and medium-sized hydropower stations mostly focuses on the whole process management of the project, the research on reconstruction technology and the selection and formulation of reconstruction schemes, while the analysis on the status of power stations and units before and after the efficiency enhancement, capacity expansion and reconstruction is rare. Taking the efficiency increase and capacity expansion practice of Jicun Hydropower Station in Anhui Province as an example, the performance change, water energy utilization change and economic benefit of the units after efficiency increase and capacity expansion transformation are analyzed. The practice shows that, in order to increase the efficiency and expand the capacity of rural hydropower, it is necessary to comprehensively consider various factors, analyze the advantages and disadvantages, and select an appropriate scheme to achieve the goal of advanced technology and reasonable and economic scheme.

Keywords: efficiency improving and capacity increasing; operating efficiency; water energy utilization; water consumption rate