

# 狮子滩水电站水轮发电机组改造扩容

朱长华 曾清

(狮子滩水力发电总厂,重庆长寿,401249)

**摘要** 狮子滩水电站结合水轮发电机组老旧设备的改造,通过对水轮机提高效率研究和水轮发电机通风改造,将水轮发电机组单机出力由 12 MW 增至 15 MW,经过四川省电力工业局主持的有关专家的鉴定验收,取得了成功,为国内老旧机组的改造积累了一定的经验。

**关键词** 水力 机组 效率 容量 技术改造

## 1 情况简介

龙溪河梯级电站建于 50 年代末,共有狮子滩、上碛、回龙寨、下碛 4 个电站,总装机容量 104.5 MW,狮子滩电站是龙溪河梯级电站的第一级,首部有库容为 10.28 亿  $m^3$  (有效库容 7.48 亿  $m^3$ ) 的多年调节水库。建成后,梯级电站在重庆系统中担负调频、调相、调峰和事故备用等任务。随着电网的扩大,1975 年四川省形成了统一电网,陆续修建了一批大、中型水电站。但是,网内水电站除龙溪河梯级和我厂大洪河电站(有不完全年调节水库,电站装机 35 MW)外,均为径流式电站,因此,龙溪河梯级电站在系统中担负了对川西径流电站一定的补偿调节作用。

狮子滩水电站是我国第一个五年计划重点建设项目。电站兴建于 1954 年,建成于 1957 年。第一台机组于 1956 年 10 月 1 日并网发电,电站原装有 4 台单机容量为 12 MW 的水轮发电机组,设计年均发电量为 2.06 亿 kW·h,年有效运行小时为 4 290 h,机组立项改造前安装投运以来共发电(截止 1992 年底)63.41 亿 kW·h,有效运行小时(截止 1992 年底)为 65.62 万 h,其中:1 号机运行 17.3 万 h,发电 16.31 亿 kW·h;2 号机运行 15.4 万 h,发电 15.06 亿 kW·h;3 号机运行 16.8 万 h,发电 1.61 亿 kW·h;4 号机运行 16.09 万 h,发电 15.95 亿 kW·h。

狮子滩水库经过长度为 1 462.5 m、直径为 5 m 的压力隧洞、差动式调压井及长度为 133.213 m、直径为 5 m 的压力钢管及 4 根直径为 2.6 m 的钢支管分别引水至各机组。各机组压力水道长度分别为:1 636.18 m(1 号);1 638.978 m(2 号);1 642.131 m(3 号);1 644.83 m(4 号)。机组的主要参数如下:

水轮机:

型 号:HL216-LJ-200;

水 头: $H_p = 64.3$  m; $H_{max} = 71.5$  m;

$H_{min} = 45$  m;

流 量: $Q_r = 25.4$   $m^3/s$ ;

设计出力: $N_r = 13.8$  MW;

吸出高度: $H_s = 0.6$  m;

额定转速: $n_r = 273$  r/min;

飞逸转速: $n_p = 490$  r/min;

接力器直径:400 mm;

接力器工作油压:1.75 ~ 2.0 MPa;

接力器最大行程:240 mm。

发电机:

型 号:TS-425/84-22;

额定容量:15 MVA;

额定出力:12 MW;

额定电压:10.5 kV;

额定电流:827 A;

额定频率:50 Hz;

功率因素:0.8;

静子接线:双 Y;

转子电压:188 V;

转子电流:470 A。

主励磁机:型号:ZLS-99/24-8;

额定出力:125 kW;

副励磁机:型号:ZLS-54/8-6;

额定出力:6.5 kW;

永磁机:型号:TY65/13-16;

额定容量:1.5 kVA;

调速器:

型 号:S-38 型;

工作容量:78.45 kN·m;

工作压力:1.75 ~ 2.0 MPa。

## 2 改造增容研究过程

### 2.1 改造增容的提出

狮子滩电站机组及辅助设备运行至 1992 年已有 36~37 年,除少数辅助设备进行过更换外,主要设备均未更换。由于运行年久,设备日益老化,都需要有计划地进行改造、更新。针对 50 年代制造投入的水轮机效率低,设计时考虑机组运行方式与目前实际运行情况有较大的变化等情况,省局在 1990 年组织了科研、运行单位共同研究了机组设备状况和系统运行方式后,提出机组改造增容的要求。并要求对水轮机转轮改(选)型和利用发电机残余寿命增容至 15 MW 等工作立即开展可行性研究。

### 2.2 改造增容可行性研究

1990 年 9 月初,狮子滩水力发电总厂成立了龙溪河梯级电站改造增容工作领导小组及各专业工作组,遵照省局的指示,我厂在四川省电力试验研究院(以下简称试研院)、东方电机厂科协、四川省水力发电学会咨询部等单位的帮助和配合下,重点对水轮机转轮改(选)型和利用发电机残余寿命增容等工作展开可行性研究。

#### 2.2.1 发电机试验研究

在有关单位配合下,进行了发电机一系列试验、研究工作,并分别提出了试验报告(东方电机厂:“发电机电磁计算”、“机械强度计算”、“发电机通风试验”、“发电机气隙磁密测算”;试研院:“发电机静子老化鉴定试验”、“发电机温升试验”)。试验表明:静子绝缘无老化特征,绝缘尚有较高的电气强度和绝缘裕度,通过发电机通风改造,发电机可增容至 15 MW 有功运行。

#### 2.2.2 水轮机提高效率的研究

机组能否增容,提高水机出力是需要解决的第一个关键问题。1990 年 11 月,试研院提出“龙溪河梯级电站的增容改造设想及狮子滩电站增容改造的可行性研究”的规划性报告,鉴于国内尚无完全适合狮站增容用的转轮,故在 1990 年 12 月,在省电力局主持下,我厂与试研院正式签订了“狮子滩电站增容改造用新型水轮机转轮的研制协议”。要求在狮子滩电站对其水轮机转轮进行模型设计、试验研究中,在保持狮子滩电站水工部分及水轮机埋设部件不大动的条件下,要求水轮机改造达到以下目标:

- (1) 提高水轮机过流能力 15% 以上;
- (2) 提高水轮机平均运行效率 2% 以上;

- (3) 提高机组出力 2 000~3 000 kW;
- (4) 原水轮机功率摆动大,新机应予以改进;
- (5) 要求新机具有良好的抗气蚀性能及运行可靠性。

之后,试研院与四川省机械设计研究院水力发电设备研究所(以下简称机械院)合作,联合研制狮子滩电站专用改型转轮,经优选后,机械院委托东电电器公司制造模型水轮机及模型转轮,并确定模型转轮的定型试验在水利水电科学院机电所(以下简称水科院)低水头能量台上进行。上述单位通力合作,在 1991 年 11 月,完成了 3 个水轮机新转轮和两个改型转轮,共计 5 个转轮及模型机的设计制造及试验工作,其中包括完成了 S10、S20 以及改型转轮 S11 的能量性能对比试验和 S20、S21、S30,3 个新转轮在水科院低水头能量台上定型试验,将试验结果与国内已研制成功的  $b_o = 0.2$ ,  $Q_{\max} < 1\ 000\text{ L/s}$  的优秀转轮 A10、A232 的参数比较,见表 1。

表 1  $b_o = 0.2$ ,  $Q_{\max} > 1\ 000\text{ L/s}$  的优秀转轮主要参数对比表

转轮名称	最大单位流量 $Q_{\max}$ / $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	单位转速 $n_{\text{out}}$	最高效率 $\eta_{\max}$ / %	备注
A10-25	1 080	68	88.2	用标准尾水管、低水头台试验,当转轮换算为 350 mm 时, $\eta_{\max} = 89\%$ 。
A232-35	1 040	69.5	90.7	用标准尾水管,在高水头试验台试验,按 IEC 公式换算为低水头时 $\eta_{\max} = 89.8\%$ 。
S30-35	1 020	70	89.5	(1) 尾水管主要流道面积仅为标准管的 74.7%~81%。 (2) 转轮出口尺寸为前者的 89.7%。 (3) 在低水头试验台上试验。 (4) 按计算,在相同流量下,尾水管损失增加使水轮机效率下降约 1.47%~1.87%。

考虑到 S30 特殊流道带来的不利影响,应该说转轮的综合能量指标高于 A10 及 A272,是近年来国内研制的  $b_o = 0.2$  且具有大过流能力的优秀转轮之一,属国内先进水平。经换算,新研制的 S30 转轮用于狮站时,其各项指标均达到和超过合同要求。

#### 2.2.3 提出可行性报告

在前期大量试验、研究的基础上,我厂于 1991 年底完成了狮子滩电站改造增容的可行性研究工作,提出了改造增容的前提条件为:(1) 尽可能不动原已建的水工建筑物,并要求改造增容工期尽可能短;(2) 引用流量增加是有一定限度的;(3) 狮库按优化调度 10 年的统计,运行年均毛水头为 64.39 m。

在经过水轮机提高效率研究及发电机一系列电气试验后,我厂提出了狮子滩电站改造增容可行性报告,由省局主持召开了有9个单位的工程技术人员共45人参加的审查会。审查意见指出:“从5个模型转轮中推荐采用的S30型转轮,其资料和数据是通过全模拟试验获得的,可以用作真机出力效率换算的依据。转轮试验是在水工建筑物基本不变,水轮机主轴不予更换的条件下进行的,难度大,其增容幅度达25%,且具有较高的能量指标,在短短1年内研制完成是很不容易的。狮子滩电站换为该转轮后,在相同设计水头下,水轮机单机出力可由12MW增至15MW以上,模型最高效率89.5%,预计真机效率为92.0%,满足四川省电力科试所与长寿发电厂签订的各项技术指标”。会议同意以S30型转轮作为狮子滩电站改造增容更换用的转轮。

审查会议同意将对称型活动导叶改为非对称导叶。鉴于顶盖、底环的止漏环,抗磨板等已严重磨损,为有利于制作和安装,同意更换。水轮机仍使用橡胶轴承。尾水管直锥段按模型试验尺寸予以扩大。

发电机(2号发电机)经过电磁计算和静子绝缘老化鉴定以及温升试验表明,静子绝缘无老化特征,绝缘尚有较高的电气强度和绝缘裕度,在进风温度为30℃、功率因素0.85、定子电压10.5kV、定子电流970.6A、转子电流497A时,发电机可带15MW有功运行。

励磁系统经测算和试验能满足发电机15MW,无功11.25MVAR,功率因素0.8条件下运行。

主变压器多年运行工况较好,常规试验数据正常,近期内短时超负荷运行基本可以承受。110kV、10kV开关遮断容量严重不足,应予全部更换。

可行性方案审查后,省局要求我厂“尽快完成初步设计,并上报我局审查,抓紧落实选择水轮机制造厂订货工作”。

### 2.3 完成初步设计

根据省局要求,我厂组织有关技术力量提出了初步设计报告。1992年在我厂提出初步设计报告后,省局又再次组织了对初步设计的审查。初步设计报告对狮子滩电站改造增容从几个方面进行了分析和论证:(1)对狮子滩电站改造增容技术上的可行性,经济上的合理性进行了论证;(2)对下一阶段设备改造的技术设计和施工设计明确了任务,提出了要求;(3)计算并提出了狮子滩近期改造增容的总概算;(4)对改造增容的经济效益进行了计算分析,省

局审查后同意了初步设计报告,下达了狮站改造增容的第一批费用及形象进度要求。

## 3 机组改造施工、试验及运行情况

### 3.1 首台机组改造施工和鉴定验收

1992年12月,在东电器公司将水轮机需更换的加工件已按合同要求完成,我厂已按初步设计要求完成了狮子滩电站2号机组各项技术和施工准备,主要准备工作有:水工建筑、水力机械、发电机通风系统改造施工图及“发电机通风系统改造施工工艺”、“机械部分改造施工工艺”、“水工部分改造施工工艺”、“改造增容综合施工进度网络图”等报告文件,于10月11日开始了狮子滩电站2号水轮发电机组的改造增容施工工作,并结合改造增容进行了机组大修。由于我厂对此项工作缺乏经验,也由于水轮机设计制造上的一些问题,如:导叶平面密封不良、转轮标高低5mm、顶盖漏水等,使施工工期超过预计工期。直到1993年3月12日机组空车启动试运行开始,接着又与电力科试所共同进行了发电机通风系统改造后的通风温升试验,至3月19日甩负荷试验后,机组才正式交调度管理,整个机组施工期长达99d。改造后对机组进行了通风,温升试验;运行稳定性试验,效率试验及电站引水系统水头损失试验,并提出了相应的试验报告。

为了给改造增容鉴定提供更完整的资料,经我厂研究决定:于1993年7月26日、27日、31日三次由狮子滩电站作2号机组带15MW负荷试验。当时由于环境温度较高,空冷器供水量已超过设计值,冷风温度及线圈温度均超过允许值。为了能得到准确的定量试验结果,8月11日,由厂组织有关专业技术人员并邀请了电力科试所有关同志一道,使用符合试验精度要求的仪表再次进行了机组带15MW试验。1993年9月,由四川省电力工业局主持,组织有关专家进行了现场鉴定验收,与会专家一致认为:狮子滩电站2号机组改造增容是成功的,后续3台机可参照2号机进行改造。鉴定验收意见如下:

(1)提供的技术文件资料齐全,论据可靠,内容和测试数据可信;

(2)按狮子滩水轮机实际流道条件研制的S30型水轮机转轮,在 $b_0/D_1=0.2$ , $Q_1>1000\text{L/s}$ 的条件下,其能量指标具有国内先进水平;

(3)现场试验及实际运行表明,改造后的机组各部位振动摆度值符合国标要求,运行稳定性良好;

(4) 改进后的机组单台增容 3 MW,增容率为 25%,且水轮机效率提高,与原旧转轮相比,平均运行效率约提高 4%,实测在水头 55.25 m(设计水头 58 m)及满负荷运行条件下,水轮机效率达 91%,过流能力提高 21%;

(5) 发电机通风改造后,冷却总风量增加 5%,改善了发电机内的风量分布,下端进风量增加 15%,在相同运行条件下,其定子线圈各部温度特别是原高温区——线圈上、下端部,均有较大幅度降低;

(6) 狮子滩电站其余尚未改造的相同 3 台机组参照 2 号机改造后,可增加电网调峰容量 12 MW,有利于减少高峰时段电网对用户的限电和增加电网的备用容量,提高电网的供电可靠性和电能质量,按照过去 10 年水文资料测算,全站年均增发电量 1 000 万 kW·h,本梯级其它水电站减少弃水损失电量 200 万 kW·h,在丰水期以其增加的 12 MW 容量替代相等容量的火电,其增加的容量在高峰时段工作,电网逐流式电站担负其它段的负荷,每年丰水期可使逐流水电站减少弃水,增发电量约 1 100 万 kW·h,总计电网年增发电量约为 2 300 万 kW·h,经济与社会效益十分显著:

(7) 狮子滩电站 2 号水轮发电机组改造增容研究工作全面达到了预期效果,其改造是成功的,为该厂几个梯级电站机组改造增容工作提供了可靠的依据,在国内同型机组的改造增容中可以推广应用。

### 3.2 后续机组的改造施工及试验

在 2 号机组改造增容成功的基础上,四川省电力工业局要求我厂立即着手进行后续 3 台机的改造增容工作,下达了项目计划通知。为保证后续机组改造增容的成功,我厂着重抓了以下几方面的工作:

(1) 在 1993 年 7 月 12 日~14 日,我厂与科研、设计、制造单位一起就狮子滩电站 1、3、4 号机改造增容水机部分有关技术进行了研究,对 2 号机改造中存在的问题从底环、顶盖、导叶、双连壁、转轮等各方面提出了 30 条修改意见,补签了技术协议,使改造方案更加合理、完善。

(2) 对改造中新、旧部件的配合,改造与未改造部分的联接过渡,请设计部门现场核实,研究落实方案,对送到制造厂加工的设备,制定详细的措施。

(3) 从新修订改造的施工工艺,在总结 2 号机改造增容的基础上,对施工工艺中存在的问题进行修订,制订了切实可行的工艺措施,如尾水管直锥段新里衬安装,浇二期混凝土,由原来分 3 段浇筑改为 4

段浇筑,每段浇筑一次,保证了混凝土的密实、可靠;导叶部分预组装改为导叶全部整体预装,保证了顶盖、底环、导叶几大部件安装的正确性;减少工作时间等等,使施工工艺更好的指导施工。

(4) 制订详细周密的施工计划、施工安全、技术组织措施,施工网络进度图,使施工管理更加科学化,减少盲目性。

(5) 施工中以工艺措施为指导,按施工网络进度图控制施工进度,精心组织、合理安排,努力克服施工中的各种不利因素,保证施工的正常进行。

(6) 通过各台机组发电机改造前通风温升试验,找出各台发电机影响增容的关键问题。制订出每台发电机通风系统改造的方案,对症下药。针对发电机空气冷却器容量已不能满足增容后夏天运行的要求,研究增大 1~4 号机的空冷器的热交换容量技术措施,将 4 台机的空冷器更换为热交换率较高的新型针刺式空气冷却器。

(7) 施工中强化质量意识,加强责任制落实,严格厂、车间、班组三级验收责任制,建立健全了检修任务书,采取激励竞争机制,充分调动广大职工和工程技术人员的工作积极性。对重点技术难题、难点,厂组织有关人员进行技术攻关,不断提高施工管理质量和施工质量。如针对 2 号机改造后,转轮标高比固定部分标高下沉 5 mm 的问题,经研究对后续 3 台机改造时,拆机后对转动及固定部分标高进行核实,具体定出每台机的加工尺寸,保证了每台机转轮的标高正确;后续 3 台机施工中,在中心复核时,发现发电机静子中心与顶盖、底环中心相差较多,经讨论认为发电机静子中心不易变动,而采用调整新顶盖、底环安装中心的办法,解决了这一技术问题。

狮子滩电站后续 3 台机改造增容,在省局、电力科试所领导支持下,在厂精心组织领导下,经广大职工、工程技术人员共同努力,施工 1 台,总结 1 台,不断提高施工质量和管理水平,不断缩短施工工期。3 号机施工从 1994 年 11 月 12 日至 1995 年 1 月 31 日正式交付调度运行,历时 80 d,比 2 号机施工工期缩短 19 d;4 号机施工从 1995 年 3 月 8 日至 1995 年 5 月 23 日正式交付调度运行,历时 76 d,比 2 号机施工工期缩短 23 d;1 号机施工与 1 号主变及 10 kV 段改造施工同步,由于受主变更换及 10 kV 段开关改造的影响,施工从 1995 年 9 月 18 日至 1995 年 12 月 2 日正式交付调度运行,比 2 号机施工时间缩短大约 1/4,改造后机组投入系统运行正常。为保证增容改造后机组能发挥效益及安全运行,在机组改造的同时,对发电机开关及 1 号、2 号变压器也作了

更新增容。

1996年7月11日至18日,由四川省电力科学研究院与我厂一道对改造后的3、4、1号机组进行了效率试验和稳定性试验,并提出了“狮子滩水力发电总厂狮子滩电站1号、3号、4号机组效率试验报告”和“狮子滩电站1号、4号机组改造增容后,运行稳定性试验总结”报告。在此之前,于1995年3月,对3号机组进行了运行稳定性试验,提出了“狮子滩电站3号机组改造增容后运行稳定性试验报告”。

1995年2月11日~16日,1995年12月18日~21日,四川省电力试验研究院与我厂共同对改造后的3号机组、1号机组进行通风、温升试验,分别提出了狮子滩电站1号、3号、4号机组改造增容后通风、温升总结报告,经改造前试验,4号机组不需通风改造,故未再作改造后的试验。

从机组的稳定情况试验及效率试验看,1号、2号、3号机组在各运行工况稳定性良好,振动摆幅均符合国家有关规范,但2号机组在特定工况区存在有由尾水管偏心涡带产生的低频压力脉动而导致机组低频振动及功率摆动问题。4号机组运行稳定性相对较差,存在一定程度的动力不平衡和磁力平衡现象,摆幅值超过国家标准,尾水管存在明显的压力脉动现象,对机组的运行稳定性存在较大的影响。

从水轮机的效率测试看,1号机真机最高效率可达92.33%(相对值),2号机最高效率可达91.5%,3号机最高效率可达92%(相对值),4号机最高效率为91%,高效区在11~13 MW,平均运转效率约89%,改造后机组的效率提高较多,平均运转效率提高约4%。

通风温升试验情况表明:通风改造非常成功,1~3号机组改造后总风量有了较大幅度的增加,增加了4%~7%,风量分配也趋合理,下端部分的进风量比改前增加14%~18%,风速分布,风压分布也更趋合理。改后发电机定子线圈的温升有了明显下降,1~2号机下端鼻部一般下降了1~18 K,渐开线部分一般下降1~25 K,槽部降低1~6 K,但3号机较改造前增加,4号机组根据改造前试验情况,通风系统未作改造,仅更换了空气冷却器,从4台机组通风温升试验情况看,发电机能够满足改造后安全稳定运行的要求。

### 3.3 改造后机组和电站出力特性

1996年10月10日,我厂对改造后机组和电站的出力特性进行了测量,并对水轮机汽蚀情况作了检查,编写了“狮子滩电站改造增容机组运行报告”。

从电站的出力特性试验及现场汽蚀情况检查看,电站毛水头在63.73 m也即上游水位在341 m左右,电站单台机和两台机组同时运行,尚可达到单

机出力1.5万 kW的增容目标,3台机组和4台机组同时运行,单机出力最大只能达到13.8 MW和13.3 MW。从电站运行记录看,1995年7月30日,电站几乎在最高水位运行时,电站在接近防洪限制水位时段运行(即345~346 m),电站实测最大出力56.2 MW。从引水系统水头损失试验看,引水损失与引用流量成平方关系,随着引用流量增加,引水系统总的水头损失成平方增加。改造后,电站在哪些情况能够达到4台机组满出力运行的增容目标,还需进一步试验测量。同时也需进一步分析水系统损失对电站出力的影响。从现场汽蚀检查的情况看,水轮机叶片存在严重的翼型汽蚀,当机组运行有8500 h以上,叶片就开始发生汽蚀,且各块叶片的汽蚀情况不同,说明同一转轮叶片翼型控制不一致。

## 4 改造增容效益分析

(1)由于水轮机效率提高了约4%,狮子滩4台机组改造增容后,在与改造前相同运行条件下,机组效率提高将增加发电量;又因引用流量增加,可减少汛期弃水,增发洪水电能,原狮子滩与梯级年均增发电量分别为1000万 kW·h及1165万 kW·h。

(2)龙溪河梯级增发发电量及增加调峰容量对系统有显著的经济效益。

(a)狮子滩电站机组改造增容后,在水库高水位情况下,电网最大可增加调峰容量或备用容量约12 MW,在当时电网严重缺乏高峰容量的情况下,可减少高峰时段电网对用户的限电,提高电网供电的可靠性,有利于国民经济的发展。

(b)狮子滩电站改造增容,在丰水期电网以其增加的近12 MW的调峰容量,代替系统等容量的火电调峰,可减少火电调峰损失,由于狮子滩水库具有多年调节能力,汛期可以让网内径流式电站大发,减少弃水,这样,每年丰水期可使径流式水电站减少弃水,增加发电量1100万 kW·h。

(c)狮子滩电站改造增容后,为龙溪河梯级电站机组改造增容工作提供了依据。也使电站旧的设备得到了改造。其改造增容的实践可供国内老旧机组改造时借鉴。

总之,狮子滩电站水轮机在使用37年以后,利用机组设备改造的机会,更换了效率较高,过流量较大的水轮机进行了改造增容,其结果投入少、工期短、收效快,有一定的经济和社会效益。

作者简介

朱长华 男 狮子滩水力发电总厂 副厂长 工程师

曾清 男 狮子滩水力发电总厂生技处 副处长 高级工程师

(收稿日期:1997-02-08)