

三峡工程巨型水轮发电机组设计与实践

邵建雄, 刘景旺, 袁达夫

(长江水利委员会长江勘测规划设计研究院, 武汉 430010)

[摘要] 分析了三峡水轮发电机组设计中必须考虑的主要问题;总结了所进行的关键技术研究;通过关键技术问题研究,使得三峡水轮发电机组参数达到最优化。机组运行结果表明三峡水轮发电机组性能良好,能够长期安全、稳定、高效运行,从而有效地验证了对三峡巨型水轮发电机组的总体技术设计是科学合理的。

[关键词] 三峡工程;700 MW 级水电机组;单机容量;设计研究;运行稳定性;实践

[中图分类号] TV734;TM312 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)07-0104-07

1 前言

三峡左右岸电站共装设 26 台单机容量为 700 MW 的水轮发电机组,其中左岸电站 14 台,右岸电站 12 台。左岸电站第一批机组于 2003 年投产发电,2005 年全部机组投产发电;右岸电站第一批机组于 2007 年投产发电,2008 年全部机组投产发电。

工程设计单位职责是确定三峡电站的装机规模、选定水轮发电机组的形式及单机容量、确定电站的装机台数,并根据水库调度和电站的运行条件,确定水轮发电机组的性能参数、总体结构及主要部件的材质,明确机组制造厂生产制造水轮发电机组的技术条件,对水轮发电机组安装和调试进行指导,实现电站的科学运行维护,确保机组在电站的各种运行方式下安全稳定运行,获得最大化的发电效益。

2010 年水库水位达到设计蓄水位 175 m,机组运行状况良好,性能稳定。从 2003 年 7 月首批机组投入运行到 2011 年,三峡电站已运行近 7 年,截至 2011 年 5 月 10 日累计发电量达 4 705 亿 kW·h。

2 机组选型与单机容量确定

三峡工程经历了长期的可行性方案论证,电站装设什么形式的水轮发电机组、单机容量选用多大,

始终是设计研究的重大课题之一。

形式:根据三峡工程的总体布置和水库的运行调度,水轮机除了安全可靠外,还必须考虑单机容量大、运行水头变幅大及汛期含一定的泥沙过机等特点,在各种形式的水轮机中,只有混流式水轮机能较好地适应上述要求,因此选用了混流式水轮发电机组。

单机容量:对单机容量选用 300 MW、450 MW、600 MW、800 MW、1 000 MW 等方案作了长期、全面研究。当确定三峡工程正常蓄水位为 175 m、额定水头为 80.6 m 后,又重点对 3 个方案,即电站装设 26 台单机容量为 680 MW、700 MW、720 MW 的发电机组,分别从国内外机组和电气设备制造的可行性、枢纽工程布置、大件运输、电站接入电力系统、发电效益和经济指标等方面进行了深入、全面的比选,最后推荐选用单机容量 700 MW,并经国务院长江三峡工程建设委员会初步设计审查批准。

3 700 MW 水轮发电机组总体设计必须考虑的问题

单机容量选定后,如何从机组整体性能最优出发,抓住需要解决的主要技术问题,必须对电站的固有特性有所了解。三峡工程以防洪为主,采取“一级

[收稿日期] 2011-05-20

[作者简介] 邵建雄(1960—),男,浙江宁波市人,教授级高级工程师,主要从事水利水电工程机电设计与研究工作;

E-mail:shaojianxiong@cjwsjy.com.cn

开发,一次建成,分期蓄水,连续移民”的开发方案,形成了三峡电站水轮发电机组特有的复杂运行工况,机组总体设计必须考虑如下特定条件:

1)单机容量大、装机台数多、转轮直径大。三峡左右岸电站装设26台单机容量700 MW的机组,是当时国内选用单机容量最大的机组,也是世界上装机规模最大的电站。国外依泰普等水电站也装有单机容量为700 MW的水轮机组,额定水头为130 m,转轮直径为7.163 m。三峡工程汛期为腾出防洪库容并考虑水能的充分利用,额定水头定为80.6 m,水轮机转轮直径达到9.8 m,机组的尺寸相应加大,增加了机组刚度、强度满足安全稳定运行要求的难度。

2)水轮机需适应蓄水初期和后期两种水头,水头变幅大。三峡水轮机分为初期运行和后期运行两个阶段,初期水头变幅为61~94 m,后期水头变幅达71~113 m,最大水头与最小水头比值为1.85,是目前世界上已投入运行单机容量500 MW以上混流式水轮机运行水头变幅最大的机组。根据三峡水库调度的方式,水轮机在较低水头区(低于78.5 m)和高水头区(100~113 m)运行时间各占全年运行时间在30%以上。要求在两个主要运行区内均有较高的效率和稳定性能,俗称运行特性“双黄蛋”,这偏离了按照常规设计的水轮机运行最优工况区,也难以同时满足上述两运行区的需要,致使水轮机在一年的运行中有较长运行时间偏离最优工况区运行,不仅影响机组效率,也对安全稳定运行产生不利。为此对水轮机提出“枯水期要效率(此时水头高水量少),汛期要出力(此时水头低水量大)”。

3)过机水流中含有泥沙,水轮机过流部件面临泥沙磨损问题。三峡河段天然来水量中多年平均含沙量 1.20 kg/m^3 ,电站建库后,预计水库运用头10年的出库泥沙含量平均值为 0.379 kg/m^3 。

4)电力系统中的骨干电站。三峡电站地处中国腹地,是电力系统中的骨干电站,并依托华中电网实现东、西、南、北跨地区电网的联接,促进全国统一电网的形成;竞价上网是电力市场发展的必然趋势,为此除充分发挥水电是清洁能源、启停快速等优势外,应能根据电力市场需求,在电网中可承担基荷、腰荷、峰荷和事故备用。

5)工程建设依靠发电效益还贷。三峡工程综合效益巨大,但防洪、改善航运等是社会效益,而工程建设需依靠巨大的发电效益取得的经济收入还贷。

三峡工程在国内首次采用700 MW巨型水轮发电机组,从700 MW机组总体设计必须考虑的问题中可以看出,如此大的水头变幅在700 MW巨型水轮发电机组的工程设计中是首次遇到,无先例可循,超出已有的经验和工程技术,工程实践表明,机组的许多技术难题无不与此有关。当国外著名机组制造专家了解到上述特点后,对我们这样说:三峡工程的机电设计不仅是对中国同行的挑战,也是对世界同行的挑战!

4 设计研究主要解决的技术问题

使机组有先进的能量指标、在运行区内不产生汽蚀、尽量减小各种运行方式下的水力脉动并控制在可接受的范围内,始终把机组长期安全、稳定运行放在首位,为实现以上目标,进行了约25个主要技术问题的设计研究。

4.1 机组主要参数的选择

机组主要参数的选择决定了机组的性能,关系到电站在各种运行方式下能否按预想出力安全稳定运行。与国内外著名制造厂进行了多次技术交流,在研究确定机组主要参数时,不是把世界上各同类机组顶尖参数堆积起来,而是求得整体性能的最优,经综合平衡后,该用的高参数必须用。机组参数选择以稳定性为第一,从追求先进的能量指标和汽蚀指标,转为建立适应三峡机组的稳定性指标体系。

4.1.1 水轮机

1)额定水头和加权因子。额定水头和加权因子都是电站水库调度运行的特征参数,影响机组制造难度与运行特性,左岸电站经过多年论证和动能多种方案的计算比选,提出额定水头为80.6 m。三峡左岸电站水轮机模型试验结果表明,稳定性指标均未全面达到合同保证值,在机组正常运行范围内存在着一个较强的压力脉动带,可能影响高水头区机组稳定性能,并使出力调节范围变小,不利于机组的灵活调度。额定水头选取是关系到电站的发电效益、水轮机的水力特性和机组安全稳定运行、机组控制尺寸和重量等方面的一个关键综合参数。为进一步提高三峡右岸电站机组运行的稳定性,从1999年11月开始,对右岸电站机组的额定水头选用80.6 m、83 m、85 m、90 m、95 m五个方案及主要参数再次进行全面论证研究。研究表明:

既要考虑到提高额定水头发电效益有所减少,也要考虑到机组性能改进有利于提高机组运行的稳

定性和增加了发电量,两者相辅相成,以求得电站总体效益最大化进行综合平衡。按照长系列水文资料和左岸电站水轮机运转特性曲线的发电量计算结果表明,由于左岸电站 14 台机组的额定水头已是 80.6 m,当右岸电站 12 台机组的额定水头提高到 85 m,发电量减少不多,对三峡电站的发电效益影响不大。对水轮机效率、进口边空化、叶道涡、特殊压力脉动带等方面进行了研讨,结果表明:结合三峡电站的实际运行工况,提高额定水头有利于提高水轮机运行的稳定性,鉴于此,右岸电站额定水头从 80.6 m 提高到 85 m。

一个水电站根据多年积累的水文资料和水库运行调度原则,一年中机组运行所经历的各种水头的不同频率是客观存在的。据此动能规划计算,在不同蓄水期分别提出水头出现频率的加权因子,作为水轮机最优效率区的设计导向。

2) 水轮机转速选择。根据三峡电站的特征水头,经分析和计算,三峡电站水轮机额定工况比转速应在 $245 \text{ m} \cdot \text{kW}$ 与 $256 \text{ m} \cdot \text{kW}$ 之间,相应的比速系数为 $2\ 200 \sim 2\ 300$ 。在确保机组安全稳定运行的前提下,水轮机参数具有相对的先进性。确定水轮机比速系数在 $2\ 300$ 左右,可供选择的转速有 75 r/min 和 71.4 r/min 。两种转速方案中水轮机参数和性能相近,发电机 75 r/min 方案在电气参数、电磁及结构设计上明显优于 71.4 r/min 方案,且 71.4 r/min 方案与 75 r/min 方案相比,机组重量多 300 t ,因此左岸电站推荐采用 75 r/min 。在右岸电站和地下电站机组招标设计中,通过总结左岸电站机组设计的经验,在分析研究的基础上,确定两种转速对机组设计的影响在本质上差异不大,从充分利用机组制造厂的设计和制造经验出发,招标文件中允许机组制造厂家在 75 r/min 和 71.4 r/min 两种转速中选取,因此右岸和地下电站,哈尔滨电机厂和东方电机有限公司提供的机组转速为 75 r/min ,天津 ALSTON 提供的机组转速为 71.4 r/min 。

3) 空蚀系数和吸出高度。三峡水轮机额定转速 75 r/min ,比转速 $261.725 \text{ m} \cdot \text{kW}$,从有利于水轮机运行区内不产生汽蚀、减少厂房的开挖和混凝土浇筑量出发,并参考已建国内外同类电站水轮机吸出高度的实际值和制造厂对吸出高度的推荐值,并留有一定的裕度,三峡电站水轮机装置空蚀系数为 0.188 ,吸出高度(以导叶中心线计)选用 -5 m ,三峡电站下游最低尾水位为 62 m ,因此水轮机安装高

程为 57 m 。

4) 水轮机效率。效率的高低标志着水轮机能量指标的优劣。若机组的效率增加 0.5% ,三峡电站相当于增加了 9.1 万 kW 的装机,因此提高效率一直是我們追求的目标之一。在 20 世纪 70—80 年代投产发电的 700 MW 级水轮机(如大古力、古力、依泰普等水电站)真机最高效率为 $94.5\% \sim 95.8\%$,模型最高效率为 $91.7\% \sim 93.3\%$,而三峡模型水轮机最高效率达到 94.61% ,真机效率达到 96.5% 。

4.1.2 水轮发电机

1) 额定电压。额定电压的确定与机组容量、转速、冷却方式、合理的槽电流以及与发电机电压配电装置和主变压器的选择有着密切的关系。全空冷发电机合理的槽电流范围为 $5\ 500 \sim 6\ 500 \text{ A}$;半水内冷则为 $10\ 000 \text{ A}$ 左右。当时世界上已运行发电机的最大槽电流,空冷以二滩发电机最大,为 $6\ 543 \text{ A}$,水冷以大古力 III 发电机最大,为 $9\ 220 \text{ A}$ 。三峡发电机定子槽电流值计算见表 1。

表 1 三峡发电机定子槽电流值
Table 1 Current values of stator slot of Three Gorges Project (TGP) generator

额定容量/最大容量/(MVA)	777.8/840			
额定转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	75			
极数	80			
额定电压/kV	18	20		
额定电流/最大电流/(A)	24 948/26 943	22 453/24 249		
冷却方式	空冷	水冷	空冷	水冷
定子绕组并联支路数	8	5	8	5
定子槽电流/A	6 237/ 6 736	9 979/ 10 777	5 613/ 6 062	8 981/ 9 700

当额定电压采用 20 kV 时,无论是空冷还是水冷方式,槽电流均在合理的范围内。由于发电机设置了最大容量,额定电压采用 20 kV 与 18 kV 相比,大电流封闭母线的电流从 26.97 kA 降为 24.3 kA ,降低了封闭母线制造难度。 20 kV 是国内水轮发电机首次选用的最高额定电压,与采用 18 kV 相比,定子线棒绝缘厚度需适当增加,线棒绝缘成型工艺仍可采用真空压力浸渍(vacuum pressure impregnation, VPI)或多胶模压固化工艺,绝缘耐压可满足要求。综上所述,选用 20 kV 。

2) 额定功率因数选择。发电机功率因数越高,

视在功率越小,消耗的有效材料越小,效率越高。500 kV 交流输电时首端功率因数约 0.95,在三峡工程附近,左、右岸均建有 ± 500 kV 直流输电直流换流站,为满足其无功需要,经计算功率因数为 0.889 2,选用 0.9。

3) 纵轴瞬变电抗 x'_d 、纵轴次瞬变电抗 x''_d 、短路比 SCR。这些电气参数关系到电力系统的稳定、短路电流的大小、过载能力和电压调节性能,需满足电站接入电力系统的要求。而这些参数彼此间又相互制约,影响发电机的造价。综合优选后, x'_d 选用 0.35, x''_d 选用不小于 0.2,SCR 不小于 1.1。

4) 发电机冷却方式选择。大型水轮发电机的冷却方式关系到水轮发电机参数选择、结构设计、重量和造价、是否能长期安全稳定运行等方面。20 世纪 70 年代后投运的 500 MW 以上的水轮发电机,发电机定子多半采用水冷、转子采用空冷的半水冷却方式。考虑到三峡机组启停频繁,为了定子线棒温度分布较均匀并减少铁芯翘曲变形,根据当时技术水平,参照较好的运行经验,三峡左岸电站 14 台水轮发电机全部采用了半水内冷方式。工程实践表明采用半水内冷方式,需增加一套纯水装置和相应的管路系统,占有一定布置空间,在坝后式厂房中,空间较大布置易解决,在地下厂房中空间相对窄小,给布置带来困难。另外安装调试、运行维护相对复杂。鉴于此,随着冷却技术的进步并经论证,三峡右岸电站首次成功选用了由哈电自主开发的全空冷发电机。而我国具有自主知识产权的蒸发冷却技术,在长江三峡集团公司的支持下,经过工业化真机模拟试验,解决了在 700 MW 级水轮发电机上应用的关键技术问题,在三峡地下电站中得以采用。当今世界,巨型水轮发电机可能选用的 3 种冷却方式在三峡电站都得到了使用和研究,这是水轮发电机冷却技术的进步。

5) 推力轴承。推力轴承是支撑机组转动部件的关键设备,20 世纪在国内由于推力轴承发生烧瓦故障而导致机组不能正常运行的情况时有发生。当时世界上已投运机组的最大推力负荷,美国大古力水电站 700 MW 水轮发电机组为 4 700 t,国内最大推力负荷葛洲坝水电站 170 MW 水轮发电机组为 3 800 t。经计算并综合研究了国内外各制造厂提出的推力负荷值,从偏于安全出发,推力负荷按 6 000 t (实际最大推力负荷为 5 290 t) 等级进行攻关。对推力轴承承受的推力负荷、瓦块材料、支撑方式、冷

却系统和推力轴承布置等方面进行了长期的设计研究。根据研究成果,对推力轴承提出全面系统的技术要求,推荐采用钨金瓦,在各种运行方式下瓦温不得大于 80 $^{\circ}\text{C}$ 。

4.2 水轮机运行稳定性

众所周知,由于混流式水轮机叶片不能随运行工况的变化而改变,水轮机只有在最优工况的小范围运行区为无涡区,在该范围内水轮机尾水管内不会出现涡带且压力脉动较小。当偏离最优工况运行时,潜在着产生尾水管涡带、叶道涡流、空化、高水头部分负荷压力脉动带(特殊压力脉动带)等不稳定运行因素,要在电站运行水头范围内,实现调度自如的安全稳定运行,是巨型混流式水轮机的世界性难题。三峡机组具有单机容量大、水头变幅大、过机水流含有一定泥沙等苛刻的运行条件,对于 700 MW 巨型混流式水轮机是首次碰到。若机组不能在三峡电站水头范围内实现安全稳定运行,选用的水轮机是失败的,更谈不上三峡工程巨大的发电效益。因此,机组能否安全稳定运行关系到电力系统安全、电站灵活调度和工程发电效益最大化。三峡机组能否安全稳定运行引起了各方面的关注,我们自始至终将此问题作为设计研究的重中之重,为了攻克该问题,曾研究过变速运行的变极发电机、交流励磁方案、变频方案、设初期和后期转轮等方案。由于单机容量过大,这些方案有的在技术上短时期内不可能成熟,有的使机组制造复杂反而影响了运行可靠性,有的在工程实施中增加更换转轮工序给机组安装和电站运行带来困难,因此都被一一否定。最终方案要求采用一种能适应三峡水库分期蓄水、不同水头段都能安全稳定运行的机组。对影响三峡水轮机稳定性的各种因素进行了研究,提出了提高水轮机稳定运行的措施。

1) 优化水轮机的主要参数、转轮和流道。从提高水轮机稳定性出发,进一步优化水轮机参数的协调配置,如适当提高了右岸电站水轮机的额定水头 H_r ;合理选择和优化水轮机的设计水头 H_d 。 H_d 的选择既需要保证高水头工况的稳定性,又要兼顾低水头的空蚀和泥沙磨损。针对三峡水轮机情况,研究表明,提高 H_d 值有利于水轮机高水头区的稳定运行,因此在设计中打破常规选择,要求 H_d 不小于 98 m,左岸电站两种机组实际分别选用 103 m、101 m。

设计研究表明,转轮及流道的优化,可在不降低

水轮机总体性能的前提下,增加低水头运行的出力,提高高水头运行的稳定性,特别是在导叶、顶盖等流通部件上消除或削弱压力脉动区;减小叶片局部应力集中,提高叶片强度和使用寿命。

2) 建立水轮机稳定性考核体系。在整个运行水头范围内,首次提出了按水头、负荷分区对水轮机尾水管、无叶区等各测量部位压力脉动幅值的量化考核稳定性指标,并在设计中将水轮机模型的稳定性试验首次列为验收试验的项目之一。三峡水轮机招标文件、合同文件对尾水管压力脉动的要求见图1。

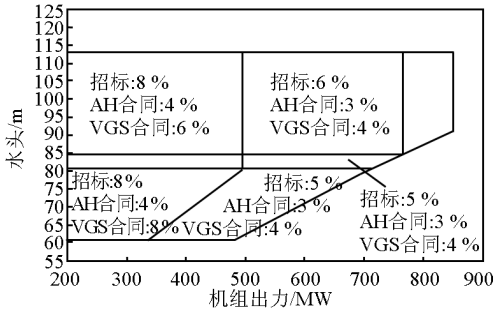


图1 三峡水轮机招标文件、合同文件对尾水管压力脉动的要求

Fig. 1 Requirements of draft tube pressure pulsation mentioned in bidding and contract document

3) 设置发电机最大容量。由于水头变幅很大,水轮机在高水头发额定出力时,导叶开度仅为55%。国内外大型机组运行实践表明,在60%开度以上运行时稳定性较好,在小开度运行时易出现水力不稳定现象。如大古力电站和伊泰普电站在30%~60%开度区域出现明显振动。为改善水轮机高水头运行的稳定性,提出了发电机组设置最大容量的问题,并对最大容量设置增加6%、9%、12%三个方案进行了分析研究。

在高水头区(水头为113 m)水轮机出力与导叶开度的关系见表2。

表2 在各工况下的水轮机开度值
Table 2 Opening values of turbine in various operating conditions

方案	1	2
70 % P	42.2	41.0
84.5 % P	50.6	出力 44.7
100 % P	57.5	55.0
106 % P	61.0	56.4
109 % P	62.5	57.1
112 % P	64.4	60.0

注:P为机组出力

从表2可以看出,与发额定容量700 MW相比,设置最大容量可适当增加导叶的开度,设置的容量越大,对提高水轮机稳定运行越有利,但受发电机容量增大导致尺寸、重量、造价增加的制约;另外,发电机容量的增加使发电机电压配电装置的额定电流和短路电流增加,不仅增加造价且使制造难度大大增加。经综合比选后,确定发电机容量增加8%的方案,即发电机的视在容量从777.8 MVA增至840 MVA。

4) 机组划分安全稳定运行区。目前水轮机技术制造水平不可能做到在任何水头和预想出力下都能安全稳定运行。混流式水轮机有一压力脉动过大的部分负荷区,经对国内已投运9个水电站大型水轮发电机组实际运行情况调查表明,为满足电力系统的要求,机组长期在不良工况中运行,导致这些机组在运行时振动过大,叶片产生裂缝,某些部件易损坏,修复后转轮依然产生裂纹,无法收敛。造成这些原因固然有水力设计、结构设计、制造工艺等方面的原因,但运行方式不良是重要的原因之一。可见,科学的运行管理是提高水轮发电机组安全稳定运行的措施之一。根据合同规定的运行区并经过真机运行的验证,将机组运行划分为安全运行区、许可运行区、禁止运行区,严禁在禁止运行区运行。

5) 机组与厂房结构相关问题的研究。机组靠厂房结构支撑,为了机组安全稳定运行,必须研究机组在运行时与厂房结构密切相关的问题。

电站抗震研究:国内个别水电站运行中发生过由于水轮机的水力脉动激发发电机层楼板的振动,导致布置在发电机层楼板上的电气设备不能安全运行。在左岸电站水轮机模型验收试验中发现,在高水头区部分负荷时存在压力脉动峰值带,过大的水力脉动是否会激发厂房结构局部较强振动,运行中人员经常出现的部位,振动幅值是否会危及运行人员健康和设备的安全运行,都必须考虑。为此,在国内首次对厂房结构的动力响应影响进行了仿真计算,并在135~156 m水位,在机组运行工况下对厂房结构振动进行了实测,结果表明动力影响的计算结果与监测结果基本一致,振动应力和位移都在设计的安全范围内,且不会产生共振。

蜗壳埋设方式:三峡电站蜗壳最大断面直径达12.4 m,HD值达1773 m²(H为水头,D为蜗壳进口直径),蜗壳外径34.83 m,容积约6000 m³,是世界上最大的混流式水轮机蜗壳。流道和蜗壳外围混凝土结构受力复杂,而钢蜗壳的埋设方式关系到水轮

机流道、外围混凝土结构和厂房整体结构的动、静力特性,对结构安全、机组稳定运行等有着直接影响。对巨型蜗壳的埋设方式有3种,即保压浇筑蜗外围砼、蜗壳表面敷设弹性垫层浇筑外围砼和蜗壳直接浇筑外围砼。究竟采用何种浇筑方式。国内各方专家意见不一。对左岸电站14台蜗壳借鉴国外工程实践经验,从有利于减小机组振动出发,采用了保温保压浇筑方式。工程实践表明,这种浇筑方式在施工过程中需增加闷头、密封环、保温保压装置等辅助设施,施工程序多,既延长直线工期又增加费用,在地下厂房中要实施该方案将会遇到更大的困难。为了适应三峡地下电站和金沙江一批大型地下电站建设的需要,需研究巨型蜗壳采用弹性垫层、直埋的埋设方式。在长江三峡集团公司的支持下,长江勘测规划设计研究院会同有关高校、研究所和机组制造厂,从总结和提高保压方案的设计理论与施工技术入手,对保压、垫层、直埋等方案的结构动、静力特性进行同等深度的对比研究,按线弹性和非线性对直埋方案的配筋进行计算,并进行了物理模型试验。通过上述试验研究解决了巨型蜗壳3种埋设方式存在的关键技术问题,提出了垫层和直埋相结合的组合新型埋设方式,探清了机组在运行中减小振动摆渡与蜗壳埋设方式的关系,提出确保机组稳定运行座环周围混凝土柔度,允许发电机下机架不对称上抬量的设计指标。

6) 补压缩空气。为了提高机组的运行稳定性,特别是部分负荷运行方式下的稳定性,除通过发电机轴顶部向转轮下方补入自然补气系统外,还对设置向顶盖、底环、基础环强迫补气进行了研究,比选了单机单元补气、成组单元补气、综合补气等方式,结合厂房布置和结构,选用了单机单元补气方式。

7) 转轮叶片出水边进行修型。国内已投运部分水轮机的运行表明,在某个运行区出现异常噪声,停机检查叶片出水边发生多条裂纹,是由于在转轮叶片的出水边产生卡门涡列与叶片产生共振所致。要求机组制造厂对此问题进行复核并应消除转轮叶片与上冠交接处应力集中、降低平均应力和提高坑疲劳能力,为此有的制造厂在现场对转轮叶片出水边进行了修型。

综上所述,对涉及机组安全稳定运行的相关因素进行了全面系统的设计研究,将研究成果应用在三峡机组设计制造、电厂运行中,解决了高水头部分负荷区水力脉动过大的世界难题,确保了三峡

700 MW巨型水轮发电机组在各种运行工况下的长期安全稳定运行。

4.3 机组总体结构及主要控制尺寸的确定

三峡左、右岸电站布置在泄水建筑物两侧,特别是左岸电站有6台机组位于岸坡,可以先期开挖施工,但前提条件是必须确定机组的控制尺寸,问题在于土建开挖的时间与机组招标时间相距甚远,此时,制造厂不可能提供精确的机组控制尺寸。另外,机组控制尺寸也制约了大坝体型的确定(引水钢管的间距受制于机组段的宽度)。三峡电站机组台数多,电厂的前沿长度较长,机组段的尺寸对坝线的前沿布置影响颇大。为不误施工,通过与国内外各有关制造厂的沟通,制定了统一的规则和布置要求,并留有适当余地,提出了机组主要控制尺寸。

4.3.1 机组总体结构的确定

三峡水轮发电机组总体结构方式确定为:发电机为半伞式结构,定子机座采用可吸收径向和切向变形的结构,发电机转子采用无轴结构,发电机下导轴承与推力轴承结合布置在承重下机架中,推力轴承采用巴士合金瓦,冷却方式左岸电站发电机为半水内冷,右岸电站发电机为半水内冷和全空冷两种均可行,地下电站发电机则半水内冷、全空冷和蒸发冷却3种方式均可接受,制动方式采用电气制动与机械制动联合,主轴分为水轮机轴和发电机轴两部分。水轮机为混流式机型,蜗壳采用全圆蜗壳,采用两个直缸接力器,水导轴承布置在顶盖内,设有主轴中心自然补气系统,并预留强迫补气接口,水导轴承为分块瓦结构,采用外循环冷却。

4.3.2 机组主要控制尺寸的确定

1) 水轮机蜗壳控制尺寸的确定。水轮机蜗壳尺寸是主厂房设计最关键的尺寸之一,各制造厂推荐的蜗壳总宽度均不大于34.325 m,为留有余地并结合电站总体布置的可行性,确定蜗壳宽度控制在34.325 m以内,并由此确定的机组段宽度为38.3 m。蜗壳Y方向的尺寸直接影响电站主厂房的宽度,研究认为,将该值控制在17.6 m以内是合适的。

为满足电站厂房和厂坝段压力钢管的平面布置、大坝分缝与厂房相对位置的设计需要,必须确定蜗壳进口轴线至Y轴的距离,根据大坝厂坝段与电站主厂房在总体布置上的需要,并考虑便于压力钢管和蜗壳连接,确定为12.5 m,为留有余地,在土建设计上采取措施允许在12~13 m变动。

2)尾水管主要控制尺寸。按我国传统的设计,三峡电站水轮机尾水管高度为 $2.7D_1$ (D_1 为水轮机转轮的进口直径),长度为 $4.5D_1$,这样的设计没有充分认识到尾水管对水轮机稳定性能的影响,不满足三峡电站的设计要求。在大古力电站尾水管的基础上进行的对比试验表明,加高尾水管锥管高度及加大锥角的尾水管,水轮机效率和稳定性有较大的提高。从有利于提高机组的稳定性能出发,比选后并对土建结构进行分析,研究确定,以导叶中心计的尾水管高度为30 m,长度为50 m,出口宽度(含两个中墩)为32 m。

3)发电机控制尺寸的确定。三峡发电机控制尺寸决定了主厂房上游侧所需要的宽度,各制造厂商推荐的控制尺寸相差较大,为适应今后机组的招标,并为机组的运行维护提供较为便利的条件,确定发电机坑直径为25 m。

除上述课题研究外,还对电站装机进度、是否采用临时转轮、机组总体结构及推力轴承布置、励磁与

调速器系统、电站机电联调试及安全措施、如何解决机组调试中出现的问题等进行了设计研究,提出了专题报告。

5 结语

三峡电站2003年7月首批机组投产发电以来,至今经过135 m、145 m、156 m、172.8 m、175 m各水位的部分负荷和全负荷运行实践表明,机组运行稳定性良好;对三峡电站5个品种的机组进行了真机验证试验考核,长江三峡集团公司邀请参加机电设备可行性论证和机电单项技术设计审查专家组的专家到现场,对真机考核试验结果进行评审,一致认为:水轮发电机组运行安全稳定,能量、空蚀和电气等性能良好,主要性能指针达到或优于合同要求。运行试验表明,工程设计对机组提出的总体技术要求,以及机组在设计、制造、安装调试过程中所采取的技术措施是先进合理的,满足了三峡电站运行条件的要求。

The design and practice of giant hydro-turbine generating units of Three Gorges Project

Shao Jianxiong, Liu Jingwang, Yuan Dafu

(Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research,
Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

[Abstract] In view of the specified design conditions of Three Gorges Project (TGP), the main technical problems that should be considered in the design of hydro-turbine generating units are analyzed. The key technical researches performed are summarized and the parameters of hydro-turbine generating units are optimized through the study on key technical problems. The unit operation results indicate that the performance of the hydro-turbine generating units is excellent, and the units can operate in a safe, stable and highly efficient mode for a long term. Therefore, it is verified effectively that the general technical design of giant hydro-turbine generating units is scientific and rational.

[Key words] Three Gorges Project; 700 MW hydro-turbine generating unit; unit capacity; design and research; operation stability; practice