

桥巩水电站机组选型设计与实践

黄中良¹ 程云山²

(1.广西方元电力股份有限公司,广西 南宁 530022;2.河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:介绍桥巩水电站机组选型设计情况,分别以能量指标及经济指标对贯流式水轮机和轴流式水轮机进行分析比较,论证了该电站采用灯泡贯流式水轮发电机方案的合理性。介绍机组台数及单机容量的选择情况,分别从技术经济比较结果及机组设计制造的可行性分析结果,论证了该电站适宜采用 8 台单机容量 57 MW 方案。介绍了该电站机组的试运行情况,分别从机组带负荷试验、甩负荷试验、稳定性试验、出力试验等方面论证说明该电站机组运行情况满足设计要求。

关键词:轴流式水轮机;贯流式水轮机;机组选型;桥巩水电站

中图分类号:TK733+.8 文献标识码:B 文章编号:1006-764X(2008)S2-0005-04

桥巩水电站位于广西来宾市境内红水河上,是红水河十级开发方案中的第九级,是一座以发电为主,兼顾航运等综合利用效益的大型水电站。桥巩电站为日调节水电站,装机容量 456 MW,水轮机运行水头范围为 5.5~24.3 m。在进行机型和单机容量的选择时,有过不同的意见及争议,经过与制造厂的多次技术交流和多方面的比较论证,最终确定采用灯泡贯流式水轮发电机组,单机容量为 57 MW。

1 桥巩水电站机组参数选择

1.1 水轮机选型

桥巩电站拟定的水轮机运行水头范围为 5.5~24.3 m,可选用立轴轴流式和灯泡贯流式两种机型。对于水轮机的最大运行水头在 20 m 及以下的径流式水电厂,根据国内外水电工程的实践和运行经验,特别是综合考虑目前世界上已经建成的单机容量 40 MW 及以上大型灯泡贯流式机组(表 1)的选型及实际运行情况,贯流式水轮机已显示出其优良的经济合理性和技术可行性,可优先选用灯泡贯流式水轮机。桥巩电站最大运行水头大于 20 m,须对这 2 种机型进行技术经济比较后选定。

首先对比转速和比速系数选择。现代水轮机设计发展趋势是提高比转速,而比转速的提高受到刚度、强度、加工水平、设计水平及材料开发的限制。低水头水轮机可以选用较高的比转速而不会产生严

表 1 单机容量 40 MW 及以上大型灯泡贯流式水轮机参数

电站	国别	机组台数/台	功率/MW	水头/m	转速/(r·min ⁻¹)	转轮直径/mm	生产厂家
石岛	美国	8	52.9	12.1	85.7	7 400	
科拉斯托姆	葡萄牙	3	40	11.3	83.3	6 800	
只见	日本	1	65		100	6 700	日立
贝莱	法国	4	46.7	17.02	107.1	6 400	GEC
CAKOVEC	南斯拉夫		42	18.9	125	5 400	
尼拉	中国	4	40	12.2	100	5 500	天阿
萨拉托夫	前苏联	2	47.3			7 500	
阿尔滕瓦尔特	奥地利	9	46.7			6 000	伏依特/依林
易卜斯	奥地利	3	46.00			7 500	V. M. S./依林
洪江	中国	5	45.00			5 400	日立/HEC
长洲岛	中国	15	42.94	9.5	75.0	7 500	天阿/东电

重的空蚀破坏,高水头水轮机则反之。一般认为不同水头不同出力的水轮机若比速系数相同,其参数水平就是一致的。而实际上比速系数仍与水头有关。据世界上生产灯泡贯流式水轮机组较多的厂家介绍,以及对已运行的各电站的资料分析(见表 2),目前灯泡贯流式机组的比速系数可达 3 000 左右,但对水头小于 6 m 的水轮机,比速系数则达不到这样大。这是因为比转速的提高受到如前所述的各种因素的限制,最大的比转速在 1 100 m·kW 左右,其参数水平仍可认为是较高的。此外参数水平的选择还要与厂家的设计、制造水平相协调。

作者简介:黄中良(1963—),男,广西南宁人,高级工程师,从事流体机械及控制工程研究。

表 2 国内外部分电站参数水平比较

电站	额定水头/m	比转速/(m·kW)	比速系数	国名
皮埃尔	7.8	977	2729	法国
鲁西荣	12.5	847	2994	法国
新乡第二	19.25	628	2755	日本
石 岛	12.1	869	3000	美国
雷 辛	6.2	1 000	2490	美国
只 见	20.7	605	2752	日本
白 垢	6.2	863	2150	中国
安 居	8.0	724	2243	中国
南津渡	14.5	757	2883	中国
马 回	11.4	838	2830	中国
R. B. Parke	7.3~4.9	798	2156	美国
Dawson	6.7~3.7	975	2523	美国
L. M. E	6.4~3.4	1 074	2717	美国
T. C	7.1~5	956	2547	美国
百龙滩	9.7	995	3 099	中国

再对机型进行比较分析,综合分析国内外已建同一水头段电站的水轮机参数和目前各制造厂家提供的可供选择的转轮参数,选择用于恶滩电站的轴流式转轮 ZZA834 及奥地利维奥技术水电公司提供的贯流式转轮进行机组机型比较。在装机容量为 456 MW 的条件下,考虑到当前制造水平及机组安全运行的要求,根据坝址地形条件和枢纽布置条件分析,以 8 台单机容量为 57 MW 的贯流式水轮机(转轮直径为 7.45 m)和 5 台单机容量为 91 MW(转轮直径为 10.4 m)的轴流式水轮机进行机型比较,2 个比较方案的技术经济指标见表 3。

从能量指标方面分析,方案 1(贯流式水轮机方案)比方案 2(轴流式水轮机方案)的多年平均可发电量多 0.2046 亿 kW·h;从厂房布置尺寸和枢纽布置方面分析,方案 1 和方案 2 的机组安装高程分别为 53.66 m 和 60.7 m,流道底板高程分别为 45.385 m 和 36.294 m,厂房段的平面控制尺寸(长×宽)分别为 229.70 m×85.68 m 和 261.15 m×92.10 m,贯流式水轮机方案厂房控制尺寸小,开挖深度小,由于本电站坝址地形较为狭窄,如采用轴流式水轮机组,厂房长度比贯流式水轮机方案长 31.45 m,枢纽布置比较困难。

从经济指标方面比较,方案 1 的静态总投资比方案 2 少 47 699 万元,单位功率投资比方案 2 少 1 066 元/kW,单位电能投资比方案 2 少 0.21 元/(kW·h)。

表 3 机组机型技术经济指标比较

方案	型号	机组数/台	单机容量/MW	转轮直径/m	额定水头/m	额定转速/(r·min ⁻¹)	额定流量/(m ³ ·s ⁻¹)	额定工况吸出高度/m	安装高程①/m	厂房段平面控制尺寸/m		流道底板高程/m	多年平均发电量/(亿 kW·h)	静态总投资/万元	单位功率投资/(元·kW ⁻¹)	单位电能投资/(元·(kW·h) ⁻¹)
										长	宽					
贯流式水轮机	GZJWP-745	8	57	7.45	13.8	83.3	470.3	-11.93	53.66	229.70	85.68	45.385	24.0145	360 740	7 911	1.50
轴流式水轮机	ZZA834-LH-1040	5	91	10.4	13.8	55.5	749.6	-7.66	60.7	261.15	92.10	36.294	23.8099	408 439	8 977	1.72

① 指黄海基面。

从水轮机的运行特性方面分析,贯流式水轮机的高效率区要比轴流式水轮机的高效率区宽广得多,允许的过流能力也比轴流式水轮机大,特别是在额定水头以下的工况,贯流式水轮机过流能力大的优势较为明显,更适合本电站流量大、水头低的特性,可充分利用水能。从水轮机的运行水头范围看,轴流式水轮机的最低运行水头一般在 7 m 左右,水头再低,水轮机因运行工况点严重偏离高效率区,从而造成效率大幅度下降,空化性能恶化,运行不稳定。灯泡贯流式水轮机的最低运行水头可达 4 m 左右,水轮机的能量、空化性能及运行稳定性均优于轴流式水轮机。本电站的运行水头范围为 5.5~24.3 m,从水轮机的运行特性和运行水头范围考虑,采用贯流式水轮机较好。

显然,无论是从能量和经济指标,还是从水轮机的运行特性来看,贯流式水轮机方案均明显优于轴流式水轮机方案。但也有意见认为,单机容量为 91 MW 的轴流式水轮发电机组的制造技术比较成熟,制造难度小,贯流式水轮发电机组方案由于单机容量和转轮直径大,水轮机运行水头高,制造难度较大,因此还是采用轴流式水轮机比较稳妥。

对贯流式水轮发电机组的设计制造难度进行进一步的分析论证,认为制造 57 MW 的灯泡贯流式水轮发电机组是可行的。根据方案的比较结果,认为贯流式水轮机方案在机组运行特性、枢纽布置、能量指标、机组质量、工程量和经济指标等方面均比轴流式水轮机方案占有比较明显的优势,因此推荐采用贯流式水轮发电机组方案。

1.2 机组台数及单机容量的选择

方案拟订及技术经济比较综合考虑国内外水轮发电机组制造厂家的设计制造能力及电站枢纽整体布置的要求,在装机容量基本相同的条件下,拟定了机组台数分别为 7 台、8 台、9 台、10 台 4 个方案进行比较,结果见表 4。

对于 7 台机方案,单机容量达 65 MW,转轮直径达 7.9 m,目前国内外尚未制造过如此大容量、大转轮直径的灯泡贯流式机组,为规避制造风险,降低制造难度,考虑不予推荐,将比较的重点放在 8 台机和 10 台机这 2 个方案上。

表 4 机组台数技术经济指标比较

方案	机组参数								发电效益(亿 kW·h)		工程投资/万元	经济指标		
	机组数/台	装机容量/MW	转轮直径/m	额定容量/MW	额定转速/(r·min ⁻¹)	额定水头/m	额定流量/(m ³ ·s ⁻¹)	安装高程/m	多年平均可发电量	施工期发电量		单位功率投资/(元·kW)	单位电能投资/(元·(kW·h) ⁻¹)	补充单位电能投资/(元·(kW·h) ⁻¹)
I	7	455	7.9	65	79.0	13.8	536.8	53.34	23.979 8	30.055 6	336 071	7 386	1.401	1.18
II	8	456	7.45	57	83.3	13.8	470.3	53.66	24.059 0	28.642 6	337 002	7 390	1.401	11.47
III	9	459	7.05	51	88.2	13.8	420.9	53.94	24.075 7	27.229 6	338 917	7 384	1.408	14.81
IV	10	460	6.7	46	93.8	13.8	379.8	54.20	24.083 1	25.731 7	340 013	7 392	1.412	

a. 从能量指标、正常运行后的发电效益、单位功率投资和单位电能投资等方面分析 ,各方案相差不大。

b. 从施工期发电效益方面分析 ,每台机组安装的工期计划为 3 个月 ,故台数多的方案机组全部投产所需的工期较长 ,在同一工期下投产的容量相对较少 ,因此 ,施工期发电量也相应减少。10 台机比 8 台机方案施工期的电量减少 2.9109 亿 kW·h ,按上网价 0.26 元/(kW·h)计 ,发电收入减少 7 568 万元。可见 ,8 台机组方案施工期发电效益较为显著。

c. 从土建工程量方面分析 ,8 台机和 10 台机厂房段的平面控制尺寸(长×宽)分别为 214.20 m×85.98 m 和 236.0 m×80.44 m ,10 台机方案比 8 台机方案厂房总长度增加 21.8 m。根据坝址地形条件和枢纽布置的要求 ,由于厂房长度增加 ,整个枢纽布置需要向右岸延伸 ,而右岸为地势较高的台地 ,故 10 台机组方案比 8 台机组方案的土建工程量增加较多。

d. 从工程投资及经济指标方面分析 ,随着机组台数的增加 ,工程投资也逐步增加 ,8 台机方案与 10 台机方案相比静态总投资增加 3 011 万元 ,建设期利息增加 2 319 万元 ,工程总投资增加 5 334 万元 ,8 台机方案明显优于 10 台机方案。从补充单位电能投资看 ,也是 8 台机方案较优。

e. 从机组的设计制造方面分析 ,无论是 10×46 MW 方案还是 8×57 MW 方案 ,都属于大型灯泡流式机组 ,机组的总体设计制造难度指标均已达世界级水平。对于 10 台单机容量 46 MW 方案 ,机组的设计、制造难度与国内现已投产或正在制造的大型灯泡贯流式机组水平大体相当 ,生产厂家已具备比较成熟的设计制造经验。对于 8 台机方案 ,无论从转轮直径(7.45 m)还是从单机容量(57 MW)来看 ,均位列世界前茅 ,特别是单机容量目前在世界上排名第二。机组的设计制造具有一定的难度 ,其中发电机的通风散热和轴系支撑布置形式是最大的难题 ,是机组设计制造能否成功的关键所在 ,具有一定的技术风险。近 10 年来 ,通过技术引进和合作生产 ,我国在灯泡贯流式机组的设计和制造方面取得了长足的进步和发展。哈尔滨电机厂有限责任公司与日立

公司合作 ,为湖南省洪江电站设计制造了转轮直径 5.2 m、单机容量 45 MW、最大水头 27.3 m 的灯泡贯流式机组 ,东方电机股份有限公司为四川省桐子壕电站设计制造了转轮直径 6.8 m、单机容量 36 MW、最大水头 14.8 m 的灯泡贯流式机组 ,天津阿尔斯通为青海省尼那电站设计制造了转轮直径 6.0 m、单机容量 40 MW、最大水头 18.1 m 的灯泡贯流式机组等均已投产发电。康扬、红花、紫兰坝、直岗拉瓦和长洲等电站的大型灯泡贯流式机组正在设计制造中。在制造上述大型灯泡贯流式机组的基础上 ,考虑与国外制造厂进行合作 ,制造桥巩水电站这样的灯泡贯流式机组完全是可行的。

根据技术经济比较结果和机组设计制造可行性分析结果 ,最终确定采用 8 台机组方案。桥巩水电站最终确定参数如下 :水轮机型号 GA-WP-745 ,装机容量 45.6 MW ,电站装机数 8 台 ,转轮直径 7450 mm ,额定水头 13.8 m ,最大水头 24.3 m ,最小水头 5.50 m ,额定转速 83.3 r/min ,额定流量 470.3 m³/s ,额定工况吸出高度 -11.93 m ,安装高程 53.66 m(黄海基面)。

2 桥巩水电站试运行情况

桥巩水电站首台机已经通过 72 h 试运行 ,并已进入商业发电阶段。72 h 试运行主要进行了下列试验和测试 :充水试验 ;机组首次开机 ;机组空转运行下调速系统试验 ;超速试验 ;无励磁自动开机和自动停机试验 ;发电机升流试验 ;发电机带主变及开关站一次设备零起升压试验 ;220 kV 设备及主变冲击受电试验 ;机组空载试验 ;机组同期并网试验 ;机组带负荷试验 ;机组甩负荷试验 ;机组 72 h 试运行。

2.1 机组带负荷试验

由于水头的限制 ,带负荷试验最高带 42 MW 负荷进行试验 ,试验结果满足设计要求 ,机组各部位的振动、摆度满足设计要求 ,定子绕组温度、推力瓦和导轴瓦、定子铁心、空气冷却器等部位温度值 ,以及主变油温等温升稳定 ,无明显变化 ,停机检查未发现异常。

2.2 机组甩负荷试验

甩负荷试验进行 3 次 ,分别为 10 MW、20 MW 和 36 MW(见表 5) ,由于受水头限制 ,1 号机组未按照

表 5 机组甩负荷试验中各参数测量结果

项目	负荷/ MW	导叶 开度/%	桨叶 开度/%	最高转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	进口流道 水压/MPa	转轮室径向 振动/mm	正推最高 瓦温/ $^{\circ}\text{C}$	反推最高 瓦温/ $^{\circ}\text{C}$	径向最高 瓦温/ $^{\circ}\text{C}$	水导最高 瓦温/ $^{\circ}\text{C}$
1	10	44.37	2.65	91.3	0.375	0.33	35	53	51	46
2	20	69.99	34.25	103.27	0.375	0.37	35.5	53	51	46
3	36	86.97	67.00	112.6	0.415	0.40	35.5	54	51	46

100%的要求进行甩负荷试验,试验过程中机组记录接力器不动时间小于 0.2 s,水轮机调速器系统的动态调节性能满足设计要求,导叶接力器两段关闭规律、转速上升率、水压上升率等符合设计要求。试验过程中对瓦温进行观测,结果表明瓦温稳定,无异常变化,转轮室径向振动满足设计要求,试验结束后对机组内部转动部分进行检查,未发现异常情况。

2.3 机组稳定性试验

试验水头 7.8 ~ 8.9 m,平均水头 8.5 m。水导瓦总间隙 0.35 mm。

2.3.1 变转速试验

变转速试验中,随机组转速从 52 Hz,50 Hz,48 Hz,46 Hz 逐步降低,机组水导摆度基本保持不变,所有振动测点随转速降低而明显下降。但从频谱上看,在机组转速下降过程中,转频分量振动也随转速下降而降低,但机组振动的转频分量所占比例很小,约为混频的 1/5 ~ 1/6,机组振动频谱中大量存在的是低于 1 Hz 以下的低频水力振动。可见,机组存在一定的质量不平衡,但机组的质量不平衡量对机组的转动部分影响较小,在机组转速变化过程中的振动变化主要由机组的水力因素引起。

2.3.2 变励磁试验

变励磁试验中,机端电压由 10% U_e 上升到 110% U_e ,从试验结果的数据汇总可以看出,随机组机端电压的逐步升高,除灯泡头水平振动和水导 + Y 轴向振动随机端电压的升高呈起伏变化外,其他的摆度和振动测点基本保持不变。说明机组的电磁不平衡力较小,对机组的振动和摆度影响较小。

2.3.3 变负荷试验

从机组带不同负荷的情况看,随着负荷的增加,除机组水导摆度基本保持不变、推力轴承 + X 径向振动略有上升外,其他测点振动都有大幅度增加,最大负荷下的振动基本为不带负荷时的 2 倍。在最大负荷时,水导摆度 110 μm ,推力轴承 + X 径向水平振动 60 μm ,满足相关标准的要求,而灯泡头水平振动、水导 + Y 轴向水平振动和组合轴承 + Y 轴向水平振动分别达到了 280 μm ,343 μm 和 183 μm ;水导 + Y 径向垂直振动和推力轴承 + Y 径向垂直振动分别达到 223 μm 和 172 μm ;水导 + X 径向水平振动达到 368 μm ,已经超出相关标准很多。

2.4 机组出力试验

机组在一定水头下带负荷运行时,使机组出力由小到大逐渐增加,每个负荷下测试其导叶开度、导叶接力器行程、工作水头、机组出力等参数,进而换算出机组在额定水头下的出力(见表 6)。经初步换算,桥巩 1 号机组在额定水头 13.8 m 的条件下,机组出力可以达到 57 MW,满足设计要求。

表 6 机组出力试验参数

序号	导叶开度/%	导叶接力器行程/mm	工作水头/m	机组有功功率/MW	换算到计算水头 13.8 m 的机组出力/MW
1	21.0	415	8.9	0.8	1.54
2	24.0	465	8.8	3.5	6.87
3	31.0	570	8.7	5.9	11.79
4	42.0	740	8.6	10.0	20.33
5	60.5	1025	8.5	12.7	26.27
6	69.0	1160	8.5	16.6	34.34
7	79.0	1335	8.2	18.0	39.30
8	85.0	1450	8.1	20.7	46.03
9	90.5	1560	8.0	23.4	53.02
10	96.5	1715	7.8	24.5	57.66

3 结 语

桥巩水电站特大型灯泡贯流式水轮发电机组选型和实践表明,在水头超过 20 m 时,水轮机机型不一定要选用轴流式机组,完全可以选用高效率区域更为宽广的灯泡贯流式机组。随着我国水电机组制造水平的不断提高,大容量的灯泡贯流式机组制造难度已经被克服,桥巩水电站的商业化运行表明,我国在选用和设计制造大容量的灯泡贯流式水轮发电机组方面又跨上一个新台阶,进入世界先进行列。桥巩水电站灯泡贯流式水轮发电机组的选用和设计制造是我国水电发展史上一个里程碑。

参考文献:

[1] 郑彪.桥巩机组的选择及其制造难度分析[J].水电站机电技术,2006,29(6):10-14.
[2] 梁洪波.灯泡贯流式水轮发电机组的选择[J].甘肃水利水电技术,2007,43(3):188-189.
[3] 黄幼驰.白沙水电站灯泡贯流式机组缺陷及改进措施[J].水力发电,2003,29(9):45-47.
[4] 殷继明.尼那水电站灯泡贯流式机组特点及安装难点[J].红水河,2004,23(3).
[5] 陶红,姜剑锋.大中型灯泡贯流式水轮机结构简介[J].电站系统工程,2003,19(6).

(收稿日期 2008-11-28 编辑 高建群)