

龙滩水电站水轮发电机组结构特点与性能参数

徐立佳 何银芝

(中南勘测设计研究院, 湖南 长沙 410014)

摘要 龙滩水电站共装设9台单机容量700MW的水轮发电机组,水头变幅达82m,在电力系统中担任调峰、调频和事故备用,机组设计、制造难度已达到甚至超过当今世界水平。本文对水轮发电机组主要特点和性能参数等进行了分析、概括和总结,可供各位同仁参考。

关键词 龙滩水电站 水轮发电机组 特点 参数

1 概述

龙滩水电站位于广西天峨县,距天峨县城15km,是红水河梯级开发中最大的水电工程。工程于2001年7月正式开工兴建,计划2007年第一台机组投产发电。电站前期按正常蓄水位375m建设,最小水头97m,最大水头154m,装机7台,单机容量700MW;后期按正常蓄水位400m设计,最小水头107m,最大水头179m,增加2台机组。机组招标文件于2002年3月发售,2002年9月开标,经过评审和报国家有关部门批准,东方电机股份有限公司/VOITH SIEMENS水电公司中标7台套水轮机及其附属设备,哈尔滨电机厂有限责任公司/ALSTOM公司中标7台套发电机及其附属设备。

2 龙滩机组设计难点

由于龙滩水电站机组单机容量大,并且有前期375m和后期400m两种水位,前期水头运行范围为97~154m,后期水头运行范围为107~179m,要求水轮机在不更换转轮的前提下能适应前后期的运行要求。因此,龙滩机组设计主要存在以下难点:

(1) 水头变幅大。

由于工程分前、后两期建设,其水库库容大,水库消落深度前期达45m,后期达60m。常规混流式水轮机运行范围一般为 $H_{\max}=(1.2\sim 1.25)H_r$, $H_r=(0.9\sim 0.95)H_{\text{av}}$,而龙滩工程 $H_{\max}=1.232 H_r$ (前期)~ $1.292 H_r$ (后期), $H_r=0.9 H_{\text{av}}$ (前期)~ $0.866 H_{\text{av}}$ (后期),偏离常规运行范围。

(2) 负荷变幅大。

龙滩水电站机组单机容量大,在系统中担任调频、调峰、事故备用等。由于负荷变化剧烈,机组开、停机频繁,而且有时需在低负荷区稳定、长时间运行,即要求水轮机具有良好的变负荷适应性。

(3) 下游水位变幅大。

龙滩水电站下游水位洪枯两季变化达40m,部分负荷运行时向水轮机补气困难,对机组安全稳定运行影响较大。

由于龙滩水电站具有上述特点,又要求水轮机在较大的水头变化和较大的负荷变化范围内均有较高的效率,良好的抗空蚀性能和良好的稳定性,因此,对水轮机参数选择具有相当大的难度。

3 龙滩机组的特点

3.1 结构特点

(1) 结构型式。

龙滩水轮发电机组为设有上导、下导和水导三导轴承的半伞式结构,推力轴承布置在下机架上,水轮机和发电机采用两根轴,机组旋转方向为俯视逆时针。

(2) 水轮机整体转轮。

根据运输条件,招标文件中规定,水轮机转轮采取将加工好的上冠、下环、叶片等部件运至工地,现场进行组装、焊接,在工地整体交货的方式。买方提供转轮现场组装所需的场地,由卖方专业人员进行现场组焊。

龙滩水轮机转轮直径7900mm、重量271t,东电在投标文件中针对龙滩转轮工地现场加工方案进行了专题研究,在小浪底转轮现场组焊加工方案的基

础上根据龙滩水电站的要求进行了优化。

(3) 发电机采用全空冷方式。

龙滩发电机的冷却方式全空冷与定子水冷均可行。发电机的发热与每极容量有直接关系,龙滩发电机每极容量不超过 13.9MVA, 在世界上已投运的大型发电机中两种冷却方式均有成功的设计、制造和运行经验。经过调研和技术交流,制造厂家认为龙滩发电机采用全空冷方式是合适的。

经咨询后,专家也认为:龙滩发电机应首选全空冷方式,在全空冷方式能满足发电机正常运行时,就尽量不要选用定子水冷方式,同时建议制造厂进行模拟通风试验,以验证通风设计的合理性和正确性。因此,龙滩发电机的冷却方式采用全空冷方式。

通风模型比例为 1:5。通风设计由哈电与 ALSTOM 公司共同进行,采用网络法和 Flowmaster 软件,由 ALSTOM 公司对性能保证负责。

(4) 推力轴承布置在下机架上。

龙滩机组的推力轴承可以采用通过推力支架布置在水轮机顶盖上或布置在发电机下机架上,两种结构国内外均有成熟的经验,均能保证机组的安全稳定运行。一般来说,推力轴承布置在水轮机顶盖上,可减小发电机高度,因此,安装于地下厂房的大型机组多采用推力轴承布置在水轮机顶盖上的方式。但对于龙滩工程而言,在满足机电设备布置的条件下,两种结构对厂房高度影响不大;同时龙滩工程水头变幅大、负荷变化剧烈、下游水位变幅大,机组运行时水压脉动不能准确预测,无法预测水压脉动对推力轴承的影响。为确保机组的稳定性,不宜将推力轴承采用顶盖支承方式,同时龙滩机组台数多,设计、制造难度大,根据工程进度安排要满足年投产 3 台的要求,采用下机架布置方式有利于减少水轮机与发电机的协调工作,便于水轮机与发电机的分开授标,通过专题论证和专家咨询后决定采用推力轴承布置在下机架的方式。

推力轴承由 ALSTOM 公司设计,采用弹性小支柱支撑双层钨金瓦结构,镜板泵加外加泵外循环冷却方式,推力负荷 3 100t。

(5) 定子机座满足整体定子(带绕组)起吊的要求。

龙滩为地下厂房,9 台水轮发电机组全部布置在左岸地下,为满足年投产 3 台的要求,招标文件中规定定子机座的设计要求有足够的刚强度,能满足在安装场或发电机机坑组装定子,承受将整体定子(带绕组)从安装场或发电机机坑吊入另一机坑过程中

引起的应力而无变形。

哈电设计的龙滩发电机定子重量 760 t,定子机座外径 17.43m、高度 5.80m,由斜元件支撑,允许铁芯同心膨胀,可避免铁芯变形和翘曲,同时还可避免由于磁拉力引起的椭圆变形和振动。机座分成 6 瓣,运到现场拼焊成整圆;采用能增加刚度、提高铁芯装压质量的大齿压板结构。投标文件中对定子机座进行了各种工况的刚强度计算,定子机座的设计考虑采用辐射型起吊梁与厂房桥机连接,将整体定子(带绕组)从安装间或发电机机坑内安全地吊入所在机坑。

3.2 水轮机主要参数

(1) 水轮机参数选择的原则。

龙滩工程水轮机参数选择的原则是将水轮机稳定性指标放在首位,在保证水轮机的稳定性,尤其是高水头水力稳定性的前提下,再追求水轮机具有较高的加权平均效率。

(2) 导水叶相对高度。

导水叶相对高度 b_0 是水轮机流道的特征尺寸,其大小不但直接影响蜗壳和转轮通道的形状及其过流面积的变化规律,对转轮的水力性能也有较大影响。其选择的原则首先是必须满足过流部件和转轮的刚、强度要求,二是具有尽可能小的水力损失。根据理论分析和运行经验,选取导叶相对高度 $b_0 = 0.23$ 左右。

(3) 比转速及比速系数。

比转速是水轮机的一个基本特征参数,它综合反映了水轮机的能量、空化、效率等特性及水轮机设计制造水平。按统计分析,并结合国内外已建大型混流式水轮发电机组电站的实际运行情况及龙滩水电站机组的实际特点,比速系数 K 值取 2225 左右,相应的比转速 n_s 为 188m·kW 左右。

(4) 单位流量。

水轮机单位流量是水轮机的一个重要能量指标。提高单位流量可以减小水轮机转轮直径,减轻水轮机重量,减小厂房尺寸。但是,过大的单位流量会造成流道内流速增加,空化系数增大,水轮机空化性能降低等不利因素。经计算和综合分析,选取水轮机单位流量为 0.77m³/s。

(5) 额定转速。

机组转速是确定电站其它参数的基础,它不仅影响水轮机的参数和性能,而且还与发电机定子线圈的槽电流、支路数、冷却方式、发电机尺寸、重量密切相关,同时还受厂房土建尺寸的制约。经计算,龙

滩工程机组可供选择的转速有 111.1 r/min 和 107.1 r/min。经与国内外制造厂家广泛交流,并请有关制造厂家及高等院校进行水轮机模型 CFD 分析研究,最终确定机组同步转速为 107.1 r/min。

(6)稳定性指标。

通过调查表明,近段时期在我国投运的转轮直径 6m 以上、功率 248MW 至 620MW 的巨型水轮机,虽然都是用先进的水力设计和现代刚强度设计软件方法设计,但大多数都发生了不同程度的压力脉动和振动问题,且在运行初期就出现了转轮裂纹,使电站的经济效益受到一定的影响。因此,龙滩工程在水轮机参数选择中始终将稳定性放在首位,从参数选择、水力设计、结构设计等方面加强对水轮机稳定性的研究,采取切实措施确保龙滩工程巨型水轮机有很好的稳定性和可靠性。最终确定稳定性指标如下。

1)尾水管压力脉动限制值。

龙滩工程水轮机在所有水头不同功率下尾水管压力脉动限制值见表 1。

表 1 各水头、功率下尾水管压力脉动限制值

| 水头(m) | 功率 | $\Delta H/H(\%)$ |
|---------|-------------------|------------------|
| 107~125 | 各水头下 70%~100%预想功率 | 4 |
| 125~140 | 499MW~714MW | 3 |
| 140~160 | 499MW~714MW | 3 |
| 160~179 | 499MW~714MW | 5 |
| 其它运行工况 | | 8 |

2)水轮机在规定的运行区域内,无论任何工况,原型水轮机顶盖上测得的垂直振动和径向振动双振幅值分别不超过 0.12mm 和 0.15mm。水导轴承处测得的大轴绝对摆度双振幅值不超过 0.25mm

3)在水轮机运行区域不出现卡门涡、叶道涡,不允许发生共振。

(7)水轮机主要参数汇总(表 2)。

3.3 发电机主要参数

(1)功率因数。

发电机的功率因数取决于电站接入系统方式、

表 2 水轮机主要参数表

| | | |
|------------------------|--------------------------|--------------------|
| 最小水头 | 97.0 m(前期) | 107.0 m(后期) |
| 最大水头 | 154.0 m(前期) | 179.0 m(后期) |
| 加权平均水头 | 131.65 m(前期) | 156.72 m(后期) |
| 功率 | 612MW(水头 125.0m) | 714MW(水头 140.0m) |
| 额定转速 | 107.1 r/min | |
| 飞逸转速 | 214r/min | |
| 加权平均效率 | $\geq 94.64\%$ | |
| 最高效率 | $\geq 96.33\%$ | |
| 导叶相对高度(b_0) | 0.23 | |
| 比转速(n_s) | 200.5m·kW(水头 125m) | 188.0m·kW(水头 140m) |
| 比速系数(K) | 2242 | 2225 |
| 额定点单位流量(Q_{1max}): | 0.77 m ³ /s | |
| 单位转速(n_1) | 72 r/min | |
| 额定流量(Q) | 554.52 m ³ /s | |
| 装置空化系数(σ_p) | 0.152(水头 125m) | 0.136(水头 140m) |
| 转轮标称直径(D_1) | 7 900mm | |
| 转轮叶片数 | 13 | |
| 安装高程 | 215.0 m | |
| 转轮重量 | 271t | |
| 水轮机总重 | 2 255 t | |

运行方式、无功功率平衡、发电机的造价和运行的经济性等。其值的确定应考虑对造价和系统稳定的影响以及电力系统无功补偿的需要。龙滩发电机的额定功率因数可在 0.9~0.95 之间选取,为了满足电力系统远景规划的要求,同时也使发电机造价在一个合理的范围内,经比较,发电机功率因数取 0.9。

(2) 额定电压。

发电机额定电压应由发电机整体方案等多种因素决定,是一个综合性参数,直接影响到发电机的结构和变压器、大电流母线、发电机电压配电装置等的选择,并与发电机的容量、冷却方式、合理的槽电流和额定转速等有关。龙滩发电机的额定电压可选 15.75 kV、18 kV 或 20 kV。就发电机本身而言,额定电压越低价格越便宜,绝缘水平越容易保证。但当采用 15.75 kV 时,额定工作电流超过 28kA,发电机电压配电装置选型困难,电气设备造价增加。而采用 20kV 对绝缘材料和防晕措施要求较高,机组制造、运输、安装难度相对较大。从经济合理的槽电流和提高槽满率考虑,额定电压采用 18 kV 相对合理。因此发电机额定电压采用 18 kV。

(3) 纵轴暂态电抗(X_d')。

发电机的 X_d' 主要是由定子绕组和励磁绕组的漏抗值确定, X_d' 的大小影响到电力系统的稳定和发电机的造价, X_d' 越小,动稳定极限越大,瞬态电压变化率越小,但减小 X_d' 值将增加定子铁芯直径或长度,导致发电机尺寸和重量及造价增加。机组造价与 X_d' 的平方根是反比关系,从降低造价考虑 X_d' 值应增大,但同时必须满足电力系统运行要求,考虑到目前 500kV 电网网架和机组采用快速励磁措施, X_d' 在合理参数范围内可相对取大一点。综合考虑最终确定 X_d' 不大于 0.33。

(4) 纵轴次暂态电抗(X_d'')。

X_d'' 主要取决于阻尼绕组的漏抗,也与定子绕组和励磁绕组的漏抗有关。 X_d'' 的大小主要影响短路电流值,涉及到电气设备选择和接地系统设计, X_d'' 越大,短路冲击电流幅值越小,从电气设备选择和接地系统设计考虑, X_d'' 应大一点。但 X_d'' 是由阻尼绕组漏

抗决定的,增大比较困难,从发电机制造角度考虑,不宜取得过高。综合考虑最终确定 X_d'' 不小于 0.24。

(5) 短路比(SCR)。

短路比是指空载额定电压时励磁电流与三相稳态短路电流为额定值时的励磁电流之比。短路比除与发电机的设计有关外,还需由电力系统的具体情况决定。一般情况下,大的短路比可提高发电机在系统中运行的静态稳定,但将使发电机的造价增加。综合考虑最终确定 SCR 不小于 1.11。

(6) 飞轮转矩(GD^2)。

飞轮转矩是发电机转动部分重量与其惯性直径平方的乘积。飞轮转矩直接影响到各种工况下突然丢负荷时机组速率上升以及输水系统压力的上升,并且影响电力系统的暂态稳定,还与机组的造价密切相关。一般来说,飞轮转矩越大,机组的惯性时间常数越大,对电力系统的暂态稳定越有利,但同时将增加机组尺寸或重量,提高机组的造价。通过委托高校进行调节保证计算,并考虑电力系统的稳定要求以及招标情况等,最终确定 GD^2 不小于 220 000 tm^2 。

(7) 发电机主要参数汇总(表 3)。

表 3 发电机主要参数表

| | |
|----------------------------|-----------------------------------|
| 型号 | SF700-56/16090 |
| 额定容量 | 777.8 MVA |
| 额定电压 | 18 kV |
| 额定功率因数(滞后) | 0.9 |
| 额定转速 | 107.1 r/min |
| 纵轴暂态电抗 X_d' (不饱和值) 不大于 | 33 % |
| 纵轴次暂态电抗 X_d'' (不饱和值) 不小于 | 24 % |
| 短路比不小于 | 1.11 |
| 额定效率 | 98.67 % |
| 推力负荷 | 3 100 t |
| 飞轮力矩 (GD^2) | 220 000 $\text{t}\cdot\text{m}^2$ |
| 定子重量 | 760 t |
| 转子重量 | 1 618 t |
| 发电机总重量 | 3 028 t |

作者简介

徐立佳(1965~),女,湖南人,教授级高级工程师,中南勘测设计研究院副总工程师,龙滩水电站设计副总工程师。从事水电工程电气设计及技术管理工作。

何银芝(1963~),男,湖南人,教授级高级工程师,中南勘测设计研究院水机室主任。从事水电工程水力机械设计工作。