

安谷水电站 190 MW 轴流式水轮发电机的设计

郑 觉 平， 李 声 宝

(东芝水电设备(杭州)有限公司,浙江 杭州 300200)

摘 要:以四川大渡河安谷水电站 4×190 MW 大容量轴流式水轮发电机设计为例,介绍了大容量轴流式水轮发电机整体设计情况,可为类似机组设计提供参考。

关键词:大容量;轴流式水轮发电机;安谷水电站;设计

中图分类号:TV7;TV734;TV22 文献标识码: B 文章编号:1001-2184(2018)01-0097-04

1 概 述

安谷水电站工程的开发任务为发电、防洪、航运、灌溉和供水等。电站装机容量为 772 MW,装设 4 台、单机容量为 190 MW 的轴流转桨式水轮发电机组和 1 台单机容量为 12 MW 的轴流转桨式水轮发电机组。

笔者以四川大渡河安谷水电站 4×190 MW 大容量轴流式水轮发电机设计为例,介绍了大容量轴流式水轮发电机的设计特点,可为类似机组设计提供参考。

2 发电机电磁设计

安谷水电站发电机的电磁设计在体现机组性能先进性的同时,更追求的是发电机整体参数的协调搭配、合理裕度设计以及发电机整体性能的稳定、可靠,以确保机组能长期、安全、稳定地运行。

在具体的电磁参数选择上,根据合同规范和设计理念以及相关基准,从电抗、温升、损耗、振动、波形、励磁参数、时间常数、过渡过程等参数的综合对比(特别是保证事项中的电抗值: $X_{du} < 1\text{ pu}$ 、 $X_{du}' < 0.35\text{ pu}$ 、 $X_{du}'' \geq 0.2\text{ pu}$),选择相对较低的电磁负荷并在设计值的基础上保留了一定的裕度。在冷却参数的配置及有效材料的利用上均以保证发电机运行的稳定性、可靠性为电磁设计的前提条件。

对于安谷水电站 217.14 MVA-68P-13.8 kV 的发电机,其每极容量为 3.2 MVA,较为合适的槽电流为 4 000~5 000 A。因安谷水电站发电机额定电流为 9 085 A,并考虑三相绕组对称,选

择定子绕组并联支路数为 4 时槽电流为 4 543 A 较为合理,该电流值的定子线圈制造难度亦适中。

考虑到安谷水电站厂房布置的要求,希望在发电机机坑的风洞内径尽可能小于 18.1 m 的同时又要满足发电机的 GD^2 ,对 4 支路对应的优选槽数的电磁方案进行了设计,优选的定子槽数为 612,每极每相槽数为整数槽 3,从而避免了由谐波引起的分数次谐波振动现象。

主要电磁参数见表 1。

表 1 主要电磁参数表

主要参数	设计值
额定容量 /MVA	217.14
额定电压 /kV	13.8
额定功率因数(滞后)	0.875
额定电流 /A	9 085
额定励磁电压 /V	475
额定励磁电流 /A	1 750
极数	68
额定转速 /r·min ⁻¹	88.2
飞逸转数	250
$GD^2\text{ t} \cdot \text{m}^2$	≥73 000
槽数	612
每极每相槽数	3
槽电流/A	4 543
电负荷/A·cm ⁻¹	669
电流密度/A·mm ⁻²	3.5
定子铁心内径 /mm	13 220
定子铁心外径 /mm	14 000
铁心长 /mm	1 700
气隙长 /mm	20
短路比计算值	1.15
直轴不饱和同步电抗 X_d	0.95
直轴不饱和瞬态电抗 X_d'	0.29
直轴不饱和超瞬态电抗 X_d''	0.23
额定效率 /%	98.4

安谷水电站电磁设计方案满足所有保证值的

要求,且发电机效率等性能及空间利用率比较合理,可谓是比较合适的设计方案。

3 发电机总体结构

安谷水电站发电机为立轴半伞式、密闭自循环空气冷却的三相凸极同步发电机,主要由定子、转子、上下导轴承及推力轴承、上下机架等组成,总体结构形式见图 1。

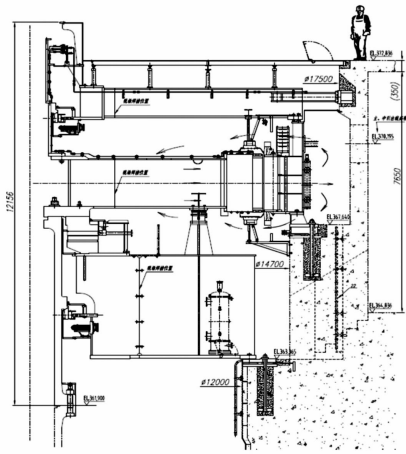


图 1 发电机剖面图

3.1 定子

定子由定子机座、定子铁心、定子线圈等组成。

定子机座由钢板焊接而成,呈正二十四边形,对边尺寸为 15 500 mm,高 2 880 mm。为方便运输,分成 6 瓣,现场焊接成整体。下齿压板上的穿心螺杆孔在现场组焊后配钻。

机座下环底部设置了 12 处基础板,通过松螺栓与基础连接,通过径向销定位并传递扭矩,该结构可适应机座热变形以及铁心的径向热胀冷缩,从而有效避免了铁心产生“翘曲”现象。

定子铁心外径为 14 000 mm,内径为 13 220 mm,高 1 700 mm。冲片采用 0.5 mm 厚的 50 A250 硅钢片冲制而成。冲片双面涂 F 级绝缘漆以减少涡流损耗。通风沟高 6 mm,通风槽钢采用非磁性不锈钢材质。铁心压紧采用分块式上齿压板加下部大齿压板结构,依靠双鸽尾筋精确可靠定位,通过铁心轭部的穿心螺杆压紧固定。为防止机组长期运行后铁心松动,在铁心上端设置碟形弹簧,以吸收机组长期运行后铁心漆膜收缩,保证漆膜收缩后铁心仍有足够的安全面压。

定子线圈为双层条式波线圈、4 支路 Y 形连

接。绝缘等级为 F 级,定子线圈采用“VPR”-真空液压成型多胶绝缘体系(东芝专利技术)。VPR 技术是一种线圈绝缘采用真空干燥、压力罐内液体热压成型工艺制作的技术。

3.2 转 子

转子由磁极铁心、磁极线圈、转子磁轭和转子支架组成。

为了减小磁极表面的涡流损失,磁极铁心采用 1 mm 厚的 WDEL250 高强度专用冷轧钢板冲片叠压而成,用拉紧螺杆把合成整体。通过应力分析,磁极采用单鸽尾与磁轭连接,利用楔形键牢固地将磁极固定在磁轭上。

磁极线圈采用 F 级绝缘,由异形的铜排焊接而成,异形铜排使线圈表面的散热面积加大。为提高故障状态下的稳定性,磁极设有阻尼绕组。阻尼绕组为连续连接型式并牢固地连接,以减小发电机故障时的电压畸变,具有低电阻率的性能。

由于安谷水电站机组飞逸转速为额定转速的 2.83 倍,飞逸状态下转子离心力非常大,考虑到应力和 GD^2 的要求,磁轭材料采用 4.5 mm 厚低合金高强度钢板 WDER700。磁轭钢板采用激光切割制作,在现场叠压而成,利用铰制螺杆把合成整体。现场叠装无需铰孔,从而减少了现场工作量。

转子支架为圆盘式结构,由中心体和 17 个支臂等组成。根据有限元解析结果,飞逸工况下 Von Mises 的最大应力值为 151 MPa,位于上圆盘根部与上法兰连接处,为局部点的集中应力。其余区域的应力值均在 101 MPa 以下(图 2)。根据计算结果选择上圆盘厚度为 30 mm,下圆盘厚度为 45 mm,立筋高度为 1 988 mm。上下圆盘开有适当的通风孔,以使发电机在运行时产生需要的风量。



图 2 飞逸工况下转子支架应力示意图

磁轭及磁极的重力作用在转子支架外缘的主立筋上,将使转子支架产生垂直向下的轴向挠度,主合同要求转子支架轴向挠度小于 1.5 mm。根据有限元解析结果,转子支架最大挠度值为 1.16 mm(图 3)。

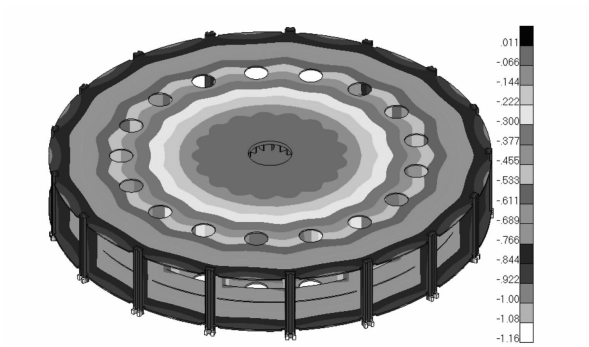


图 3 转子支架轴向挠度示意图

为便于运输,转子支架外环件分成 4 瓣,在现场与中心体焊接成整体。为了防止现场焊接变形,转子支架的焊接顺序采用先焊立缝,再焊环缝,最后焊径向缝。同时,由于立筋弦距较大,选择在上下圆板、两立筋之间设置支撑钢管。虽然转子支架组装焊接时采取了控制变形的措施,但焊后的尺寸仍然可能满足不了叠装磁轭冲片的要求。为消除焊接变形带来的影响和保证立筋上的键槽与磁轭键槽对应精确的需要,安谷水电站机组转子支架的立筋采用了主副立筋结构,副立筋根据现场测量的尺寸进行配刨焊接。

磁轭与支架之间采用径切向复合键连接,其径向键的预紧力能保证机组转速为 1.25 倍额定转速时转子支架与磁轭不发生分离,能保证正常运行时磁轭的圆度并有效地传递扭矩,使叠片磁轭具有更佳的整体性。

转子与发电机大轴采用 12 个 M140 的螺栓 + 销套进行连接。现场盘车后镗孔,以保证销套与销孔的配合精度,能够安全可靠地传递运行过程中的扭矩,把合时通过液压拉伸器拉紧。

3.3 推力轴承

推力轴承是水轮发电机组中最重要的部件之一,其性能不仅直接关系到机组安全运行,而且还影响机组的出力和效率。作为轴流转桨式发电机,其推力负荷较大,安谷水电站机组总推力负荷达 2 980 t(正常运行时最大水推力作用下),增加了设计的难度。根据东芝设计基准,安谷水电站推力轴承的设计参数见表 2。

表 2 推力轴承设计参数表

主要参数	设计值
推力负荷 /t	2 980
额定转速 /rpm	88.2
润滑油	ISO - VG46
推力瓦内径 /mm	2 100
推力瓦外径 /mm	3 900
分块数	12
面压 /kg · cm ⁻²	39.7
周速 /m · s ⁻¹	13.85
PV 值 /kg (cm ² · m · s ⁻¹)	549.8
瓦温 /℃	< 60
设计油温 /℃	< 40
最小油膜厚度 /μm	65
损耗 /kW	317.6

为验证上述设计数据,我们利用东芝专有的解析程序对安谷水电站推力轴承进行了详细解析,解析结果满足设计要求,具体结果见图 4、5、6。

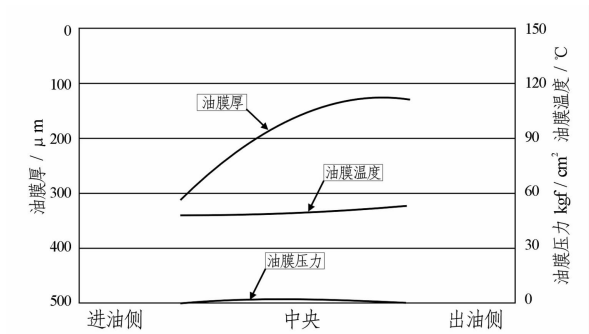


图 4 圆周方面分布(内径侧倒角处)示意图

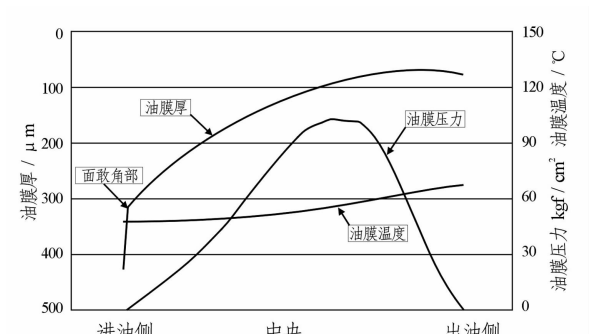


图 5 圆周方向分布(中央部)示意图

推力轴承采用东芝传统的弹簧簇支承结构。支撑弹簧根据载荷分布、油膜形成的需要布置在推力瓦下的适当区域,使推力轴承具有自调节功能,推力瓦受力更加均匀,提高了推力轴承的运行稳定性。另外,采用多支点弹簧支撑方式,推力瓦

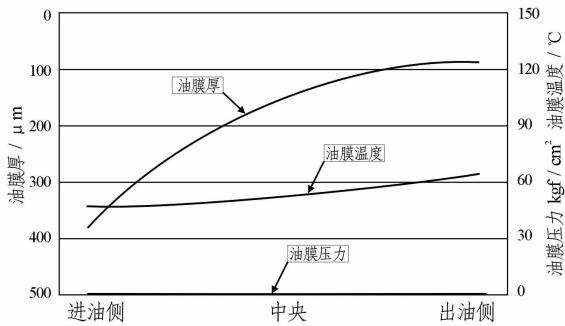


图 6 圆周方向分布(外径侧)示意图

的热变形和弹性变形方向相反,可以互相补偿,使推力瓦在运行过程中基本保持平面,从而有效地提高了推力轴承的润滑性能和承载能力。

推力头和轴为分开结构。推力镜板用碳素锻钢制成,为单一环状结构,通过螺栓把合到推力头上。推力轴承的冷却采用安全可靠、维护简单的镜板泵+外置油冷器方式,其具体结构见图 7。

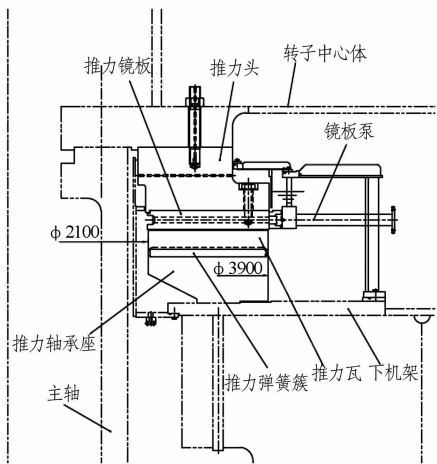


图 7 推力轴承结构图

为了保证机组在启动时可以很好地形成油膜,在推力轴承上设置了高压油顶起装置。推力瓦的布置能在顶起转子、卸除轴承负荷时,在不干扰定子、转子的条件下便于轴瓦的调整、拆卸和组装,油槽壁开有推力瓦检修窗,可以方便地进行推力瓦的装拆作业。

4 发电机的通风设计

安谷水电站发电机采用结构简单、通风冷却效果好的密闭自循环径向通风冷却方式。整个风路风量分布均匀,循环路径如图 1 所示。

在发电机定子机座外壁周围均匀地布置了 12 只空气冷却器。空冷器的设计满足在 15% 冷却容量的空冷器(至少一台)退出运行的条件下

仍然可以满足机组的安全稳定运行。同时,在转子支架上、下圆板上都开有适当数量的通风孔。冷风通过这些风孔并在转子自身运转产生的离心力的作用下强制地通过转子磁轭上的风道(图 8)。

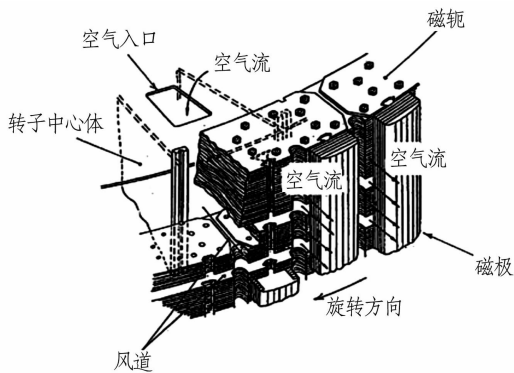


图 8 风道示意图

气流的分布设计在整个发电机的长度方向上均匀一致,采用双路通风,考虑到冷却效果,其上端风量与下端风量按比例分配,其风路为:

- (1)上端风量为总风量的 55% 左右:冷风→定子线圈上端部→中心体上圆盘通风孔→转子磁轭→定子→空冷器冷却。
- (2)下端风量为总风量的 45% 左右:冷风→定子支墩空间→定子线圈下端部→转子中心体下圆盘通风孔→转子磁轭→定子→空冷器冷却。

空气通过上述风路完成一次循环。

通过采用通风计算软件进行分析计算以及已有的电站运行经验,最终确定安谷水电站的通风结构是安全可靠的结构。

5 发电机运行情况

2014 年 12 月 11 日 2 时,安谷水电站 1#机组圆满完成 72 h 试运行,成功投产发电,正式进入商业运行,2#-4#机组相继投入商业运行。机组运行稳定,性能优良,各项运行指标均达到或优于设计要求。1#机组运行数据见表 3。

表 3 1#机组运行数据(出力 192 MW)表

项目	振 动 值		
	水平 / μm	垂直 / μm	
上机架	40	—	
下机架	5	18	
瓦温 / $^{\circ}\text{C}$	上导瓦 35	下导瓦 33	推力瓦 61
温升 / K	定子铁心 23.4		定子线圈 44.1

(下转第 106 页)

流管理的正常实施。

3.4 提高水利水电工程项目员工的素质

精准物流管理对任务团队的责任要求每个员工都能对组织的要求有一定的认识和理解,但目前水利水电行业低素质的员工还占到很大的比例,因此,对员工职业素质的培训、职业技能提高的培训是每个水利水电工程企业不容忽视的课题。所以,必须逐步把精准物流管理的理念在全社会范围内、尤其是工程建设单位加以推广,渗透性地影响员工,促使员工对主动提升素质的意识



(上接第 88 页)

方的质量管理得以强化。设备监理拓展到工厂设计、现场安装,不留监理漏洞,对保证设备质量,保障投资效益具有十分重要的作用。设备监理的拓展和延伸将会是设备监理的发展之路。

作者简介:

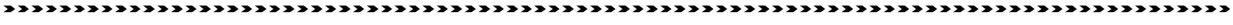
何其维(1950-),男,四川成都人,国家注册设备监理师,总監理工



(上接第 100 页)

6 结 语

安谷水电站大型轴流式水轮发电机组自投入商业运行以来,运行平稳、振动小、噪声低,各部分温度低,达到或优于合同中各项保证值的要求。发电机结构设计合理,技术先进,性能指标优良,受到用户好评,其结果表明我公司大容量轴流式水轮发电机设计和制造水平上了一个新的台阶,



两河口电站大坝心墙提前 36 天完成年度目标

2017 年 11 月 24 日,两河口水电站大坝心墙填筑至 2 648 米高程,提前 36 天完成年度填筑目标。

经统计,在心墙填筑达到高峰期间,日平均填筑施工运输砾石土料约 301 车,反滤料约 45 车,现场施工的设备达到 18 台,作业人员达到 58 人。2017 年,两河口施工区气候异常,冬季气候恶劣、雨季时间延长了两个月,使得大坝心墙顺利实现年度目标困难增加。为了确保年度目标顺利实现,125 联合体通过工期倒排、细化工程量及对资金投入等方面进行分析,从组织管理、技术管理、经济管理、施工管理、后勤管理等各方面对大坝心墙填筑进行补强,坝料生产、运输、碾压、检测各环节无缝衔接,大坝心墙填筑屡次实现 24 小时分仓流水作业达到 2 层高峰填筑纪录且安全质量可控,为大坝心墙填筑提前 36 天完成年度合同填筑目标提供了有力的保障。

伊泰普水电站累计发电量达 25 亿兆瓦时

截至 2017 年 11 月 22 日凌晨,伊泰普水电站自 1984 年建成以来的累计发电量达到了 25 亿兆瓦时,创全球最高纪录。2017 年,尽管巴西的降雨量低于历史平均水平,但预计伊泰普的发电量能够达到 9 400 万至 9 500 万兆瓦时,成为历史上第五高的数值。2016 年,在伊泰普水电站 1.03 亿兆瓦时的发电量中,巴西消耗的电量约为 9 100 万。伊泰普水电站或将从 2021 年或者 2022 年开始进行现代化更新,包括更新现有的管理技术等。更新计划的预算约为 5 亿美元。

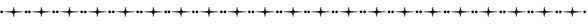
日益增强。

4 结 语

综上所述,水利水电工程物资管理的优化措施既能控制消耗,减少浪费,还可以提高低值易耗品的利用率,能够直接降低项目建设的运行成本,通过经济、行政、技术等手段降低工程物资成本,保证工程收益。

作者简介:

涂 亮(1982-),男,湖南桃江人,工程师,学士,从事水利水电工程物资管理工作。(责任编辑:李燕辉)



程师,从事火力发电、水力发电运行管理工作以及火力发电、水力发电制造监理工作;

陈 晓(1957-),男,四川内江人,副主任,从事机电设备材料管理工作;

张俊川(1972-),男,四川乐山人,助理工程师,从事机电设备管理工作。

(责任编辑:李燕辉)



达到了国内先进水平,亦为今后超大容量发电机设计和制造积累了宝贵的经验。

作者简介:

郑觉平(1978-),男,安徽潜山人,部长,高级工程师,学士,从事水轮发电机设计工作;

李声宝(1978-),男,安徽铜陵人,工程师,学士,从事水轮发电机设计工作。

(责任编辑:李燕辉)