

高海拔、大、中容量水轮发电机的开发设计

付佩贤, 张 翀, 祁腊梅

(东方电气集团东风电机有限公司,四川 乐山 614000)

摘要:为保证水轮发电机组在高海拔条件下运行时的安全可靠,降低发电机设计制造成本,东风电机公司通过大量的研究分析并结合西藏旁多水电站的实际情况,成功开发出了经济、实用、安全、可靠的新技术。这些技术的开发应用,有效地解决了高海拔条件下水轮发电机材料的选取、通风冷却计算、绝缘防晕及电气性能等技术难题。

关键词:旁多水电站;高海拔;结构设计;弹簧束支撑

中图分类号:TK73;TB857+.3

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2015)05-0148-04

1 概述

西藏旁多水利枢纽工程是国家西部大开发10周年确定的23个重点建设项目之一,也是西藏地区和平解放以来投资规模最大的水利枢纽工程,被誉为西藏三峡。目前,该项目创造了多个行业之最:防渗墙世界最深、高海拔地区库容最大、高海拔地区单机容量最大、高海拔地区输水隧洞最长、水头变幅亚洲第一。工程地处海拔高度4 000 m以上的拉萨河流域中游,坝址位于西藏自治区林周县旁多乡下游1.5 km,距拉萨市直线距

离63 km,是拉萨河流域的骨干性控制工程,也是拉萨河干流水电梯级开发的龙头水库。工程以灌溉、发电为主,兼顾防洪及供水。由国家水利部、西藏自治区水利厅及西藏自治区旁多水利枢纽管理局开发,工程总投资45.69亿元,水库总库容11.74亿m³。工程安装4台总装机容量16万千瓦的水轮发电机组,其发电机组在高海拔地区单机容量居世界第一,年发电量可达6亿kW·h。

2 发电机主要参数

主要参数见表1。

表1 发电机主要参数表

1	结构形式	立轴半伞式	14	相数	3
2	额定容量	47.06 MVA	15	定子接法	Y
3	额定功率	40 MW	16	定子铁芯内径	6 190 mm
4	额定电压	10.5 kV	17	定子铁芯长	1 180 mm
5	额定电流	2 587.6 A	18	气隙	19 mm
6	额定频率	50 Hz	19	纵轴同步电抗	0.969
7	额定功率因数	0.85(滞后)	20	纵轴瞬变电抗	0.27
8	额定转速	187.5 rpm	21	纵轴超瞬变电抗	0.202
9	飞逸转速	348 rpm	22	横轴同步电抗	0.597
10	转动惯量	4 200 t·m ²	23	短路比	1.16
11	推力负荷	470 t	24	旋转方向	俯视顺时针
12	机座号	6 800	25	冷却方式	密闭自循环空气冷却
13	绝缘等级	F级	26	励磁方式	静止可控硅励磁

3 发电机结构及设计要点

本发电机为立轴半伞式结构,设有两个导轴承。上导轴承在上机架中心体内;下导轴承与推力轴承合用一个油槽,布置在下机架的推力油槽

内。发电机采用密闭自循环双路进风的固定引风板端部回风通风结构,主要由定子、转子、上机架、下机架及推力轴承、油水管路、辅助接线、灭火管路、制动器管路、空气冷却器装置等组成。发电机结构见图1。

收稿日期:2015-09-23

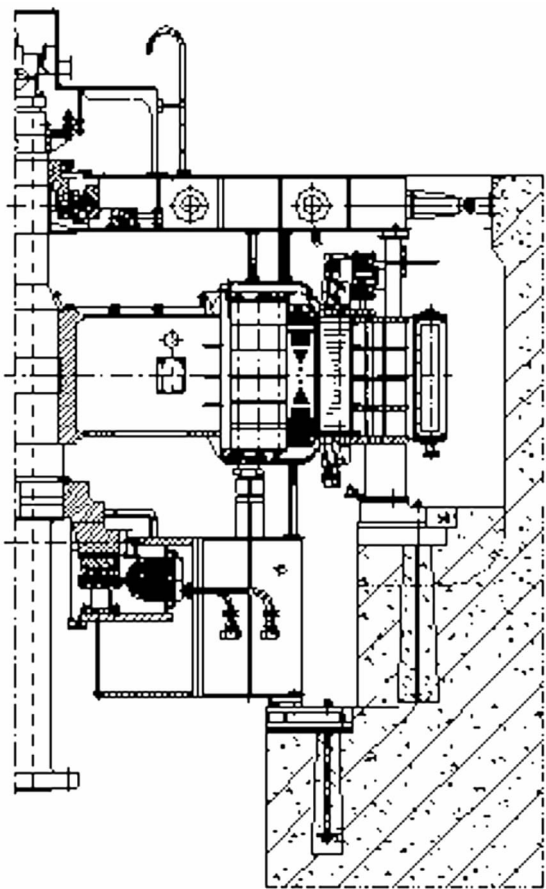


图 1

该电站海拔高度达 4 023 m, 高海拔地区单机容量居世界第一, 发电机的设计存在结构型式、材料选取、通风冷却方式、绝缘电气性能等一系列难题。作为东风电机公司上台阶的项目, 在整个设计过程中, 设计人员学习借鉴了国内外先进技术, 结合公司实际工艺水平, 在保证机组性能的前提下, 开发运用了大量先进技术, 使得该机组具有结构合理、性能优越、经济效益高等特点。目前, 旁多电站 4 台机组均已成功投运, 运行状况良好, 机组振动、噪音、温升等各项性能指标均显著优于国家标准及协议要求。事实充分说明该电站发电机所采用的一系列新技术是成功的, 并极具向后续电站推广使用的价值。现将发电机各部套结构及设计过程中所开发应用的新技术介绍于后。

3.1 定子设计

定子主要由机座、定子铁芯、定子绕组、铜环引线及端箍等组成。

定子机座由优质钢板焊接而成, 主要作用是固定铁芯。为保证机座刚度强度, 设计时, 通过结

构设计及有限元计算结合进行的设计模式, 定量计算机座三相短路时的受力, 找出机座受力的弱点(如起吊点、鸽尾筋, 空冷器口处机座壁)加以补强。在满足机座强度的同时最大程度地节约了材料, (图 2)。

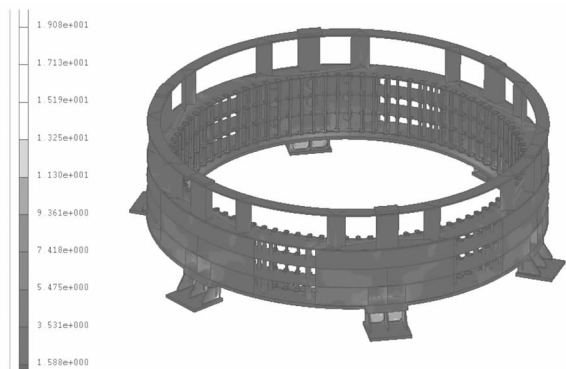


图 2

定子铁芯由导磁性能好, 损耗较小的硅钢片交错叠制而成, 为了减小涡流损耗, 在扇形片的两面涂以绝缘漆(F 级)。在轴向方向把铁芯分成多段, 段间用通风槽板隔开以形成通风沟。定子铁芯采用穿心式螺杆 + 碟形弹簧的压紧方式, 该结构不仅能有效防止铁芯松动, 始终给予定子铁芯恒定、足够的压力, 而且还能降低压指、压板材料用量及性能要求(图 3)。

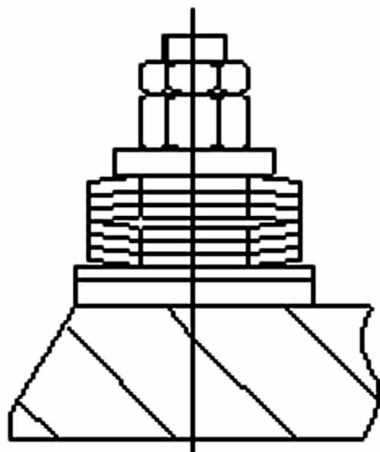


图 3

4 000 m 以上高海拔水轮发电机定子线棒 VPI 工艺的开发。目前, 我国中小型机组以多胶模压为主, 大型机组虽采用 VPI 制作, 但均应用于低海拔地区, 在此之前, 东风电机公司在水轮发电机上没有 VPI 技术储备。研究表明, 4 100 m 海拔高度下, 定子线棒绝缘、防晕能力较低海拔下降超

过30%，若仍采用传统的多胶模压工艺，定子线棒的绝缘、防晕等多项电气参数不能满足机组安全运行的要求。针对上述情况，设计人员通过多个电磁方案比较、计算，并结合分厂各阶段试验数据，开发出了针对4 000 m以上高海拔定子线棒的专用少胶VPI工艺，攻克了高海拔条件下线棒绝缘、防晕能力不足的技术难题。见图4。



图4

3.2 转子设计

转子主要由磁极、磁轭、转子支架、主轴等组成。

磁极主要由磁极铁芯、磁极线圈及阻尼绕组组成。磁极铁芯由优质钢板冲制的冲片叠压而成。叠压后，两端用磁极压板通过拉紧螺杆将铁芯固定成一体。磁极线圈由异形铜排绕成，每匝匝间垫耐高温环氧玻璃布作为匝间绝缘。阻尼绕组由阻尼条与阻尼环组成。磁轭由优质钢板冲制的冲片叠压而成。磁轭全长分为多段，中间有多条环形通风道，用拉紧螺杆把紧成整体，然后用磁轭斜键通过热打将磁轭紧固在转子支架上。

转子支架采用圆盘式组焊结构。支架在工地热套在主轴上，它是支撑磁极、磁轭重量，传递力矩的主要部件。

3.3 上机架设计

上机架为辐射型组焊结构。在电站现场将上机架中心体与各支臂焊为一体。支臂底板处设有垫板，在现场调整好上机架高程、水平后将垫板焊在机座顶环上。上导轴承位于上机架中心体内，上导轴承瓦为花瓣刚性支承结构，共8块导瓦，上导轴承瓦座背面垫有绝缘板，以防止轴电流产生

从而烧坏轴瓦。上导瓦油膜间隙均可通过调整支柱螺钉与导轴瓦之间的垫片获得。

3.4 下机架设计(含推力轴承)

该电站发电机为立轴半伞式结构，推力轴承位于转子下方，与下导轴承合用一个油槽。下机架为承重机架，主要承受水轮机的水推力、机组转动部分的重量及机架自重。根据旁多电站业主要求，该电站推力轴承的支撑结构应具有弹性并能平衡瓦间不对称负荷。弹簧束支撑结构的特点是一种多支点支撑，各支点刚度适中，高度相等。支撑弹簧束除承受推力负荷外，还具有均衡各块瓦间的负荷和吸收振动的作用。弹簧束支撑结构具有较大的承载能力，较低的轴瓦温度和运行稳定等优点。该结构不仅性能可靠，而且成本适中。目前，弹簧束支撑结构已在后续多个项目上得到推广使用。见图5。



图5

3.5 发电机风路设计

研究证明，海拔高度的上升将导致冷却空气密度下降，具体如下：

发电机冷却空气密度下降，若机内空气流量保持不变，则发电机的通风损耗比例会相应下降，意味着发电机总发热量的减少和需求风量的降低。

冷却空气密度下降后，气(换热空气)∶固(铁芯、线圈)两相间的对流换热强度随之减弱，表面散热系数降低，气∶固两相间温差上升；同时，发电机冷却空气密度下降会降低其体积比热，若保持冷却空气的流量不变，则冷却空气的温升

相应增加,故发电机冷却空气密度下降后,发电机内主要发热部件温升相应提高。

发电机海拔高度增加后,其主要发热部件的温升均会提高。在发电机内各部位散热面积和热负荷保持不变的情况下,其通风系统的设计必须考虑适当增加机内空气流量,通过适当增加空气流量来降低冷却空气的温升从而弱化高海拔对发电机内各部件温度的提升作用。

综上所述得出,随着海拔高度增加,发电机主要发热部件的温升均会提高。在发电机内各部位散热面积和热负荷保持不变的情况下,其通风系统的设计必须考虑适当增加机内空气流量,通过相应增加空气流量来降低冷却空气的温升从而弱化高海拔对发电机内各部件温度的提升作用。

该电站海拔高度为4 000多m,空气稀薄(表2)(设计进水温度:28℃)

表2 空气参数表

海拔高度 /m	空气密度 /kg·m ⁻³	空气体积 比热 /kJ·m ⁻³ ·k	空冷系统 带走总损耗 /kW	需求风量 /m ³ ·s ⁻¹
0	1.225	1.1	720	23.3
4 023	0.79	~0.70	~725	37.0

由表2可知:旁多电站机组所在地的空气密度较正常值下降了35%;空气体积比热仅为正常值的64%;机组额定运行时,所需风量增加了近60%。基于以上情况,为了提高通风冷却效果,发电机风路采用双路径向无风扇端部回风结构。该结构的优点是:缩短了风路,冷却空气直接进入定子绕组的上、下端部,先冷却线棒端部,避免了由于风路死区而引起的端部温升过高的情况;然后再进入转子,利用转子支架和转子磁轭的风扇作用,将冷却空气打入发电机极间和气隙,最后进入定子铁芯通风沟进行冷却,见图6。此通风系统为了加强风扇效应,尽量减小入口损失,将转子支架设计成弧形进风口,并通过增加转子径向通风沟及磁轭通风隙的数量来增加电机的风量,有效弥补了高海拔条件下空气稀薄导致换热风量不足的情况。

发电机定子机座壁上圆周均布了8套单个容量为110 kW的空气冷却器,用于冷却从机组内部出来的热空气。

3.6 防油雾措施

该电站为中、低转速机组,通常情况下,机组

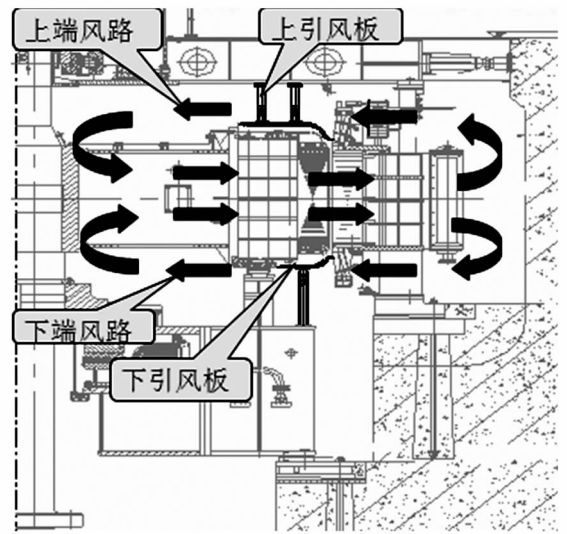


图6

运行时的油槽内外压差不大,不会出现油雾外溢的问题。但考虑到旁多电站站址海拔高度达4 023 m,环境空气密度仅为正常值的65%,若不采取恰当措施,机组运行时,油槽内所产生的油雾将致使槽内压力显著大于槽外压力的情况,从而引发油雾外溢的事故。为此,设计过程中,技术人员针对性地采用了如下措施防止油雾外溢:①对油槽内所有部件,包括油冷却器、挡油板、导油板的位置进行合理的布置,使油流顺畅,同时减小撞击和搅动,从而减少油雾的产生;②采用接触式密封盖,防止由于接触不实导致油雾外溢;③采用吸、排油雾装置,将产生的过量油雾排出,避免油、气混合影响轴承润滑及冷却;④每个轴承设置了两台液压空气滤清器,有效平衡了油槽内、外压差。从旁多电站发电机实际运行情况看,以上针对高海拔地区的防油雾措施是成功的。

3.7 材料选取及使用

旁多电站地处4 023 m的高海拔、高寒地区,温度多变,极端气温低至-29.3℃。在此恶劣环境下,材料的选取不仅仅要计算机组运行时的最大受力,还需考虑极端低温环境下,材料的酥脆性、低温脆断等因素。通过分析论证、计算,最终机组主要受力部件的材质均采用了Q345E,使机组在极寒环境下具有足够抗冲击功能。

4 社会效益及经济效益

目前,世界各地河流梯级开发已趋于枯竭,行
(下转第161页)

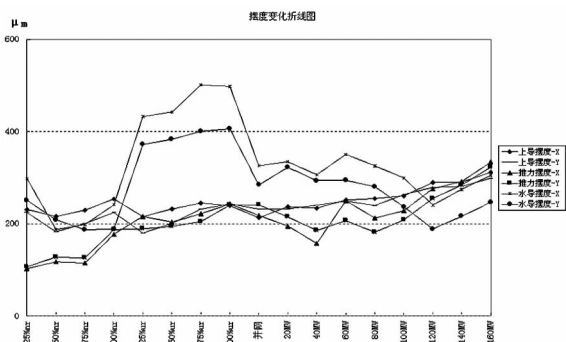


图 7 机组稳定性试验各部位摆度趋势

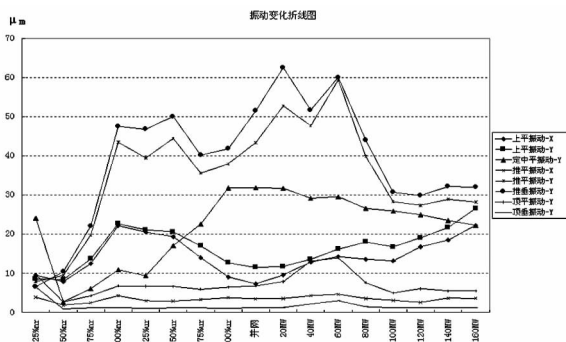


图 8 机组稳定性试验各部位振动趋势

对出现类似状况机组提供一定的借鉴经验。

(1)对于定子与底环偏心问题,理应在安装过程中应予以充分保证,但对运行多年机组,机组的销钉定位精度变差,更有甚者销钉定位失效,给机组运行带来很大安全隐患,故而机组扩修过程中,应校核其同心度。

(2)对于定转子等大直径圆形空间物体圆度检测与控制,是机组运行质量及安全运行的重要

(上接第 151 页)

业内产能过剩,竞争异常激烈,利润空间很小,仅一些存在着很大开发难度的流域还有待开发,如青藏高原等高海拔地区。由于高海拔地区气候条件相当恶劣,昼夜温差大、气温低、空气稀薄,从而对发电机组的结构型式、材料选取、通风冷却方式、绝缘电气性能等提出一系列新的课题。作为高海拔地区单机容量世界第一的已运行机组,西藏旁多电站发电机组的成功投运,标志着我公司完全掌握了高海拔地区发电机组设计、制造中的技术难点,为今后承接类似机组提供了大量的技术及经验储备,提升了公司市场竞争力。

截至 2011 年 11 月底,藏中电网装机容量仅 87.3 万 kW,电力供需矛盾严重。而旁多电站装

指标;对于定转子空气间隙值分析,不能仅仅局限与空气间隙偏差在合格范围内,应综合分析定子、转子磁极的空间圆度和垂直度,使其各部分空间圆度均合格范围内,从而保证空气间隙动态均匀。

(3)对于无下导轴承的半伞式机组,如转子稍有不平衡力,推力瓦摆度就显示较大,且在各规程并未对推力摆度允许值作相关要求,故而在机组调整中心,应力图将中心偏差控制在最小范围内,同时在运行过程中,应整体找一次重量不平衡,尽量减少转子自身的机械不平衡现象。

(4)在实际处理过程中,发电机机组部分摆度在空载后略有下降,是因为轴向水推力增加、推力轴承摩擦力加大,转子不容易偏离中心所致,同时负荷增加,有功、无功电流增加,磁场强度亦增大,使转子的径向不平衡力相对减小,使转子偏离中心也愈加困难。

参考文献:

- [1] 王海. 水轮发电机组状态检修技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [2] 蔡燕生、李东、燕飞. 龚嘴水电站水轮发电机组振动分析及探究[J],水力发电,2014,40(12)63-67.
- [3] 何睿. 铜街子电站 11F 机组振动处理[J],四川水力发电,1999,18(4)23-27.
- [4] GB/T8564—2003 水轮发电机组安装技术规范[S].
- [5] DL/T507-2002 水轮发电机组启动试验规程[S].

作者简介:

方仲超(1985-),男,陕西榆林人,西北农林科技大学热能与动力工程本科毕业,助理工程师,现于宝珠寺电厂从事电力设备检修及项目管理工作。

(责任编辑:卓政昌)

机容量达 16 万 kW,年平均发电量约 5.99 亿 kW·h。电站成功并网运行后,大大缓减了西藏中部地区电力不足的情况。

作为央企,DEC 很好地将“中央关心西藏,全国支援西藏”落到了实处,为边疆地区社会稳定、经济发展乃至国家的长治久安作出了巨大的贡献。

作者简介:

付佩贤(1984-),男,汉族,云南昭通人,毕业于重庆大学电机专业,工程师,现为东方电气集团东风电机有限公司技术部设计员;

张 翀(1974-),男,汉族,湖南新邵人。毕业于重庆大学电机专业,高级工程师,现为东方电气集团东风电机有限公司电机设计室主任;

祁腊梅(1985-),女,汉族,内蒙古赤峰人。毕业于哈尔滨理工大学电机专业,工程师,现为东方电气集团东风电机有限公司电机设计员。

(责任编辑:卓政昌)