

多布水电站高海拔灯泡贯流水轮发电机设计概述

施明星 鄢帮国

(东方电气东方电机有限公司,四川 德阳 618000)

摘要:介绍了多布水电站高海拔灯泡贯流水轮发电机的电磁设计和主要结构设计特点。针对电站高海拔情况,通过电磁优化设计、定子防晕与绝缘海拔修正、转子磁极优化设计和通风冷却系统选择合适的轴流风机,解决了在高海拔地区水轮发电机易起晕、放电和散热困难等难题。

关键词:高海拔;灯泡贯流水轮发电机;电磁;结构;防晕;绝缘;通风系统;轴流风机

Abstract: The characteristics of electromagnetic design and main structure design for high - altitude bulb tubular - turbine generator of DuoBu hydropower station are introduced. Aiming at the station in high altitude area , the difficult problems , that is , the corona is easily produced and it has difficulty with discharge and heat dissipation , are solved through the electromagnetic optimization design , the corona proof and insulation altitude correction of stator , the pole optimization design of rotor , and selecting appropriate axial fan for ventilation system.

Key words: high altitude; bulb tubular - turbine generator; electromagnetic; structure; corona proof; insulation; ventilation system; axial fan

中图分类号: TM312 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2017)06 - 0058 - 03

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.06.013

表1 发电机基本参数

名称	参数
型号	SFWG30 - 48/5800
额定容量/MVA	32.61
额定电压/kV	10.5
额定电流/A	1 793
额定转速/(r · min ⁻¹)	125
飞逸转速/(r · min ⁻¹)	380
功率因数	0.92(滞后)
相数	3

0 引言

多布水电站是位于西藏自治区林芝县境内,安装了4台单机容量为30 MW的灯泡式贯流机组,额定水头16.7 m,多年来平均发电量为505.6 GWh。多布水轮发电机安装高程为海拔3 041 m,是东方电气东方电机有限公司设计制造的首台安装在高程超过3 000 m高海拔地区的大型灯泡贯流式水轮发电机。高海拔环境条件的特点是空气稀薄、含氧量低、气压低、气温低,对水轮发电机会产生起晕电压降低、空气绝缘耐压降低、散热困难、温升增加等影响。因此,按照常规机组进行发电机设计,已不能满足特殊地理环境下的运行要求。

1 发电机基本参数

发电机基本参数如表1所示。

2 电磁设计概述

电磁方案设计是水轮发电机设计的首要环节,

决定着发电机总体尺寸控制、结构布置和性能参数,面临的综合问题特别多。尤其对于灯泡贯流式水轮发电机来说,由于极数多、转速低,受到影响流道及水力性能的灯泡体直径限制,发电机转子直径要小于常规发电机,难以像常规立式发电机那样可以通过增大定子直径来满足通风冷却和结构布置的要求。多布水轮发电机灯泡比为1.299,定子机座外径仅为6 300 mm。为了使定子机座具有足够刚强度和通风间隙,定子铁心外径取值5 800 mm,定子铁心长度取值1 600 mm,而铁心长度与极距的比值高达4.61;同时,多布电站海拔高、气压低、空气密

表2 环境条件参数与电机散热系数对照表

	海拔高度 /m	年平均气压 /kPa	空气密度 /(kg·m ⁻³)	空气体积比热 /(kJ·m ⁻³ ·k ⁻¹)	电机表面相对 散热系数
常规发电机	≤1000	≥90.0	≥1.148	1.12	1
多布发电机	3041	70.1	0.848	0.784	0.824

度下降、空气比热容也降低,电机表面散热系数较常规机组下降了17.6%,见表2。在此情况下进行电磁设计,与常规灯泡贯流水轮发电机相比难度更大,需要特别考虑发电机的散热问题。

由于该电站海拔高,同等空气流量换热能力下降,为保证发电机的损耗能及时散发出去,不至积聚发热,电磁方案从降低损耗和提高散热能力方面进行如下优化设计:

- 1) 降低定子电密,降低定子热负荷;
- 2) 定子线棒规格采用多股薄而窄的股线,减小股线涡流损耗;
- 3) 增大定子槽深宽比,有利于定子线棒的散热;
- 4) 定子上、下棒线采用不同截面设计,以更加有效地利用槽深;
- 5) 在保证定子有效铁心高度的基础上,增加通风沟数量,从而增大定子散热面积;
- 6) 磁极冲片材料采用薄钢板,降低磁极表面损耗。

3 发电机结构设计概述

3.1 总体结构

多布水轮发电机整体结构为水平灯泡贯流式结构,主要由定子、转子、组合轴承、通风系统、灯泡头、锥体、支撑及其他辅助部件组成。轴系采用双支点双悬臂结构,发电机与水轮机共用一根轴;正、反推力轴承位于转子下游侧,径向轴承设置在转子与正向推力轴承之间,推力轴承与径向轴承共用一个油槽;通风系统采用了外加轴流风机的径、轴向混合式强迫通风方式。

3.2 定子结构设计特点

3.2.1 定子机座

定子机座采用钢板焊接的轴向V型筋结构,由于运输条件限制分为两瓣,在工地安装间内组圆。

3.2.2 定子铁心

定子铁心采用薄的优质低损耗硅钢片叠压而成。定子铁心和定子机座采用浮动双鸽尾筋进行固

定连接,来适应定子的热膨胀。定子铁心采用绝缘穿心螺杆并在穿心螺杆的上游侧增设蝶形弹簧的方式进行压紧,保证铁心长期压紧而不松动。

3.2.3 定子绕组

定子绕组采用1支路星形波绕组的结构。定子线棒为单匝杆式,为了减小股线环流,采用小于360°的不完全换位方式^[1]。其基本原理是:利用槽部各股线的磁不平衡感生电势去补偿股线回路中端部磁场的作用。根据定子线棒的内部结构,分析计算端部磁场引起的各股线的感生电势和环流,计算线棒的环流损耗系数,求得最佳换位角度。如图1所示,经分析计算,得到小于360°换位时定子线棒平均环流系数曲线。因此,多布水轮发电机线棒采用了330°的换位角度,大大降低了因股线环流引起的损耗发热。

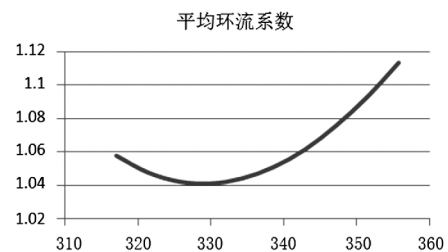


图1 定子线棒平均环流系数曲线

3.2.4 定子防晕和绝缘修正

对于在高海拔地区运行的水轮发电机组,定子线棒与定子绕组的防电晕和绝缘性能至关重要,要求也更高。根据GB/T 7894-2009《水轮发电机基本技术条件》的规定,当海拔高度超过1000m时,起晕电压的试验值应按JB/T 8439-2008《使用于高海拔地区的高压交流电机防电晕技术要求》进行修正。根据GB 311.1-2012《绝缘配合 第一部分:定义、原则和规则》要求,当设备安装在海拔高度高于1000m时,要对设备外绝缘的耐压值进行修正。

定子线棒和绕组的起晕电压值海拔修正系数按照式1)进行计算:

$$K_q = (1 - kH_s) / (1 - kH_A) \quad (1)$$

式中: K_q 为线圈的起晕电压修正系数, kV ; k 为起晕电压随海拔升高的递减率,取为 0.1 km^{-1} ; H_s 为试

验地点的海拔 $k\text{m}$; H_A 为安装地点的海拔 $k\text{m}$ 。

定子绝缘的工频交流耐电压值海拔修正系数按照式(2)进行计算:

$$K_a = e^{q\left(\frac{H-1000}{8150}\right)} \quad (2)$$

式中: K_a 为海拔修正系数; H 为设备安装地点的海拔高度, m ; q 为指数(对于空气间隙的短时工频耐电压, 取 $q=1$ [21])。

试验地点的海拔高度约为 500 m , 多布电站海拔高度为 $3\ 100\text{ m}$ 。根据式(1)与式(2)计算可以得到, 定子线棒和绕组的起晕电压试验值的修正系数为 1.377 , 定子绝缘的工频交流耐电压修正系数为 1.294 。多布发电机定子的防晕和绝缘等级根据海拔修正系数进行相应设计修正, 定子线棒采用了绝缘性能更稳定、更可靠的少胶 VPI 工艺。厂内试验时, 定子线棒起晕电压及绝缘耐电压值均按修正后的试验电压值进行试验并合格, 保证了发电机定子在高海拔地区的可靠运行。

3.3 转子结构设计特点

转子支架为后倾斜支臂圆盘式结构, 由中心体轮毂、斜支臂和磁轭圈焊接组成。磁轭分 6 段, 由优质厚钢板焊接而成。转子支架的筋板斜向设置, 起后倾风扇作用, 通风效率高, 有利于径向风路通风。转子支架中心体通过联轴螺栓与水轮机主轴法兰把合在一起, 并通过销套传递扭矩。转子支架上游侧设有可拆的多块制动环。磁极装配主要包括磁极铁心和磁极线圈和阻尼绕组等, 磁极装配采用螺栓把合的方式固定在转子支架上。

针对多布水轮发电机在高海拔地区运行, 其转子磁极通风散热的要求更高, 磁极线圈与磁极铁心之间更易出现放电现象的问题, 多布水轮发电机转子磁极优化设计如下:

- 1) 磁极铁心采用厚薄钢板冲片叠压而成, 降低磁极表面损耗;
- 2) 磁极线圈由带散热翅的异形铜排扁绕而成, 散热效果更好;
- 3) 通过增大磁极托板厚度等措施, 增大磁极线圈到磁极铁心的爬电距离;
- 4) 对磁极线圈试验耐压值按海拔修正系数 1.294 进行修正。

3.4 通风冷却系统

多布发电机采用密闭强迫自循环混合式通风系统, 如图 2 所示。在定子上游侧设有 6 个空气冷却器, 并相应配有 6 个高原轴流风机, 一部分冷风经轴流风机加压后进入转子支架, 并与转子支架旋转压头串联, 使冷风通过磁轭和磁极后进入气隙, 再经过定子通风沟后由铁心背部流出到达空气冷却器入口; 另一部分冷风由转子支架下游侧进入, 轴向流经定子全长后, 到达空气冷却器入口; 两部分热空气汇合进入冷却器, 经冷却后进入轴流风机, 形成完整的循环风路。

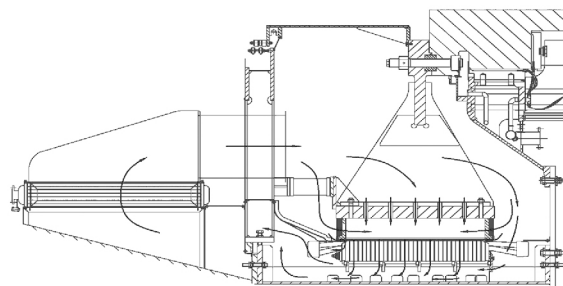


图 2 发电机通风系统

海拔高度上升, 意味着大气压力和大气温度的降低, 两者对空气密度的影响作用相反。由于多布发电机采用密闭循环通风系统, 因此大气温度降低对空气密度增加效应可以忽略, 只考虑大气压力降低对冷却空气密度的减小效应。空气密度降低, 空气体积比热随密度降低而减小, 发电机的需求风量会增加。以海平面高度为基准, 对多布水轮发电机在其所在高度运行时的需求风量进行分析, 见表 3。

表 3 发电机需求风量分析

海拔高度 /m	空气密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	空气体积比热 /($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{k}^{-1}$)	空冷系统带走总损耗 /kW	需求风量 /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
0	1.225	1.12	555.34	24.8
3 041	0.848	0.784	555.34	35.4

根据表 3, 发电机需要由冷却系统带走的损耗为 555.34 kW 。结合以往同类产品分析、计算和试验研究成果, 要满足冷却需要, 发电机在海拔 $3\ 041\text{ m}$ 地区运行所需要的空气流量为 $35.4\text{ m}^3/\text{s}$, 所需风量增加了近 43% 。因此, 解决高海拔因素对通风冷却系统带来的影响, 选择合适的风机至关重要。

将发电机的通风系统等效成图 3 所示的计算网络, 利用网络法 [3] 进行电机风阻特性求解, 可求出发电机内各部位的风速、风量、风压等参数。在此基

(下转第 81 页)

网技术 2012, 36(7): 195-201.

- [9] Smith J C, Milligan M R, Deneo E A, et al. Utility Wind Integration and Operating Impact State of the Art [J]. IEEE Trans. on Power Systems 2007, 22(3): 900-908.
- [10] Sulla F, Svensson J, Samuelsson O. Symmetrical and Un-symmetrical Short-circuit Current of Squirrel-cage and Doubly-fed Induction Generators [J]. Electric Power Systems Research 2011, 81(8): 1610-1618.
- [11] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9.
- [12] 朱永强, 张旭. 风电场电气系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 124-126.

- [13] 张保会. 分散式能源发电接入电力系统科学技术问题的研究 [J]. 电力自动化设备, 2007, 27(12): 1-4.

作者简介:

王彦国(1983), 硕士、工程师, 主要研究方向为电力系统中 110 kV 及以下继电保护、新能源发电保护控制;

余群兵(1979), 硕士、工程师, 主要研究方向为电力系统中 110 kV 及以下继电保护;

徐光福(1982), 硕士、工程师, 主要研究方向为电力系统中 110 kV 及以下继电保护、分布式发电保护控制。

(收稿日期: 2017-07-06)

(上接第 60 页)

基础上, 以满足需求风量并留合适的裕度为目标进行风机选型, 最终得到风机的工作点及电机的总风量为 $39.9 \text{ m}^3/\text{s}$, 保证了通风系统能为发电机各发热部件的冷却提供足够的风量, 解决了高海拔条件下空气稀薄对于发电机通风系统的影响。

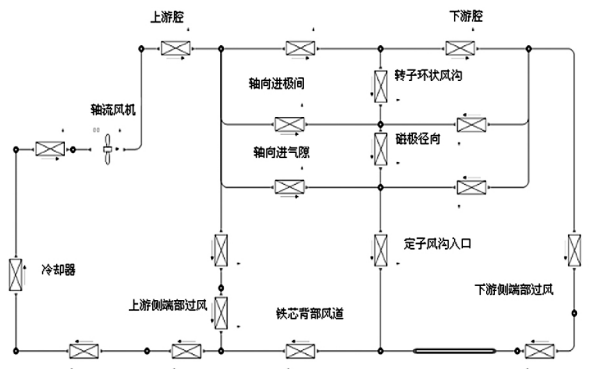


图3 发电机通风系统等效计算网络

另外, 多布发电机的冷却系统采用一次水循环方式, 即经空气冷却器热交换后的热水直接排进河道, 河水通过水泵加压后注入冷却器构成水冷却循环系统。高海拔地区一般河水温度相对较低, 多布水轮发电机冷却系统采用一次水循环方式, 冷却效果更好。

4 结 语

多布高海拔灯泡贯流水轮发电机已于 2016 年 1 月 17 日全部成功投产发电, 各项指标及参数均满足国家标准与合同要求。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了一系列的课题^[4]。通过电磁优化设计、定子防晕和绝缘海拔修正、转子磁极优化设

计和通风冷却系统选择合适风机, 解决了在高海拔地区水轮发电机易起晕、放电和散热困难等难题。发电机投运后各部件温升或温度, 见表 4。

表 4 发电机投运后各部件温升或温度
(额定功率: 30 MW)

	定子绕组 /K	正推力瓦 /($^{\circ}\text{C}$)	反推力瓦 /($^{\circ}\text{C}$)	径向轴承瓦 /($^{\circ}\text{C}$)
平均值	46	42	27	39
合同要求值	≤ 78	≤ 70	≤ 70	≤ 70

西藏多布 30 MW 灯泡贯流水轮发电机是东方电气东方电机有限公司自主设计制造的、目前高海拔地区已经运行的单机容量最大的灯泡贯流式水轮发电机。它的成功投运, 标志东方电气东方电机有限公司已经掌握了高海拔地区大型灯泡贯流水轮发电机的设计要点与难点, 为今后高海拔灯泡贯流水轮发电机的设计、研发奠定了重要基础。

参考文献

- [1] 陈锡芳. 水轮发电机结构运行监测与维修 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [2] 刘雁, 胡波, 梁智明, 等. 海拔高度对发电机定子线圈常规绝缘性能的影响 [J]. 东方电气评论, 2016, 30(4): 55-61.
- [3] 廖毅刚. 大型灯泡贯流式水轮发电机通风系统研究 [J]. 东方电气评论, 2003, 17(1): 42-46.
- [4] 付佩贤, 张翀, 祁腊梅. 高海拔、大、中容量水轮发电机的开发设计 [J]. 四川水力发电, 2015, 34(5): 148-151.

作者简介:

施明星(1986), 工学硕士、工程师, 从事水轮发电机设计工作;

鄢帮国(1983), 工学学士、高级工程师, 从事水轮发电机设计工作。

(收稿日期: 2017-09-15)