

超高海拔发电电动机通风冷却系统的运行分析与优化设计研究

蒋富强¹, 黄 璜², 陈玉竹², 周志余², 刘健俊¹, 王 超¹

(1. 东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000; 2. 中国电建中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 430014)

摘要: 超高海拔地区环境特点会影响发电电动机通风冷却系统空气流动和热交换过程, 从而导致发电电动机冷却效果降低。为此, 首先通过数学模型分析了超高海拔环境下发电电动机通风冷却系统关键影响因素; 然后基于有限元仿真建立考虑流场、温度场及共轭传热条件的发电电动机通风冷却系统模型并进行量化设计; 最后提出超高海拔条件下发电电动机通风冷却系统的优化设计措施。研究结果为发电电动机在超高海拔环境下高效稳定运行提供理论基础, 有效推动相关产业的技术进步与发展。

关键词: 发电电动机; 超高海拔; 通风冷却; 优化设计; 有限元仿真

中图分类号: TM301.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2026)01-0242-05

Research on Operation Analysis and Optimization Design of Generator Motor Ventilation and Cooling System in Ultra-high Altitude Conditions

JIANG Fu-qiang¹, HUANG Huang², CHEN Yu-zhu², ZHOU Zhi-yu², LIU Jian-jun¹, WANG Chao¹

(1. Dongfang Electrical Machinery Company Limited, Deyang 618000, China;

2. China Power Construction Corporation Zhongnan Engineering Company Limited, Changsha 430014, China)

Abstract: The environmental characteristics of ultra-high altitude areas will affect the air flow and heat exchange process of the ventilation and cooling system of the generator motor, which will lead to the reduction of the cooling effect of the generator motor. In this paper, the key influencing factors of ventilation and cooling system of generator motor in ultra-high altitude environment are analyzed by mathematical model. Based on the finite element simulation, the ventilation and cooling system model of the generator motor is established and quantitatively designed considering the flow field, temperature field and conjugate heat transfer conditions. Finally, the optimal design measures of the ventilation and cooling system of the generator motor under the condition of ultra-high altitude are put forward. The research results provide a theoretical basis for the efficient and stable operation of generator motor in ultra-high altitude environment, which can effectively promotes the technological progress and development of the related industries.

Key words: generator motor; ultra-high altitude; ventilation cooling; optimization design; finite element simulation

1 引言

超高海拔地区(海拔超过 3 500 m)普遍具有气压低、空气密度小、氧气含量低、气温低、昼夜温差大等显著特征^[1-2], 将直接影响抽水蓄能机组所采用的全空冷发电电动机的冷却效果^[3]。在海拔 4 000 m 的运行条件下, 空气密度相对海拔 0 m 将会减少 35% 左右, 此时空气流过定子、转子等

发热体表面时带走热量的能力会降低, 削弱了发电电动机通风冷却的效果^[4]。然而, 超高海拔下的发电电动机的通风冷却系统的优化设计属行业空白。300 MW 机组通风量在大约 2 500 m 海拔已经接近在研制的 425 MW 机组水平, 350 MW 机组通风量在大约 2 000 m 海拔已经接近在研制的 425 MW 机组水平, 而 300 MW 机组在 3 500 m 海拔以上, 机组冷却所需的通风量已远超现已投运的抽蓄机组, 通风冷却设计难度较大。为此, 本

收稿日期: 2024-12-17, 修回日期: 2025-04-06, 接受日期: 2025-04-11

作者简介: 蒋富强(1979-), 男, 高级工程师, 研究方向为电机设计与研究, E-mail: 35158687@qq.com

通讯作者: 陈玉竹(1994-), 女, 博士、高级工程师, 研究方向为电力设备, E-mail: 617787199@qq.com

文首先通过建立数学模型,分析了海拔高度对发电电动机内空气流动和热交换的影响,然后采用通风网络分析、有限元仿真分析和模型试验研究等方法,对发电电动机通风冷却系统进行量化设计,最后提出超高海拔条件下发电电动机通风冷却系统的优化设计措施,以期为超高海拔环境下发电电动机高效稳定的运行提供坚实保障。

2 超高海拔环境下发电电动机通风冷却系统运行分析

2.1 发电电动机通风冷却系统

发电电动机通风冷却系统通过空气流动带走热量,防止过热。典型发电电动机通风结构见图 1,转子旋转所产生驱动力作用下,冷却空气流经上、下风道及定、转子风道。其中定、转子为通风系统主要风道,其过流面积直接影响风量大小。

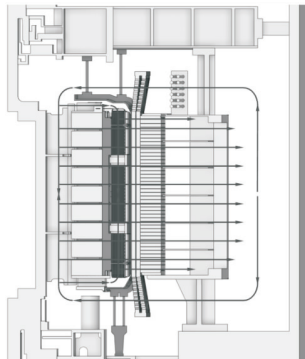


图 1 典型发电电动机通风结构

Fig. 1 Typical ventilation structure of generator motor

2.2 超高海拔对发电电动机通风冷却系统影响

超高海拔地区对发电电动机通风冷却系统的影响主要在温度和空气密度两个方面。海拔高度、气压与温度见表 1。以 4 000 m 海拔地区为例,空气气压减小约 40%,气温降低约 26 K。海拔高度每升高 1 000 m,空气密度减小约 10%,相对海拔 0 m 的基准环境,4 000 m 以上的超高海拔地区,空气密度降低约 35%,同时,与空气密度呈正比变化的体积比热容相应减小。

表 1 不同海拔高度下气压与温度

Tab. 1 Air pressure and temperature at different altitudes

海拔 度/m	大气压 /Pa	温度 /℃	海拔 度/m	大气压 /Pa	温度 /℃
0	101 325	15.0	3 000	70 086	-4.5
1 000	89 858	8.5	4 000	61 621	-11.0
2 000	79 472	2.0	5 000	55 324	-17.5

2.2.1 超高海拔对发电电动机风量的影响

发电电动机转子可视作离心风扇,定子及冷却器为外部风阻。由理论分析可知,风扇产生的

压头与克服固定阻力消耗的压头均与密度呈正比,二者随着气体密度降低同比降低,因此风量不受密度影响。即对一台结构确定的电机而言,气体密度不影响电机的总风量及风量分配。发电电动机需求风量可由下式进行预估^[6]:

$$Q_0 = \frac{1}{C_v \Delta t} \sum P_i \quad (1)$$

式中, Q_0 为需求风量, m^3/s ; $\sum P_i$ 为通风冷却系统带走的损耗, kW ; C_v 为空气的定压热容量, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$; Δt 为空气温升, K 。

假定通风系统带走的损耗及空气温升保持不变,若要保证与电机相同的温升水平,则不同海拔高度下需求风量变化见图 2。由图 2 可知,海拔的升高导致需求风量增加,当电机运行到 4 000 m 超高海拔地区时,则理论需求风量将增加到 0 m 基准海拔时的 1.6 倍。

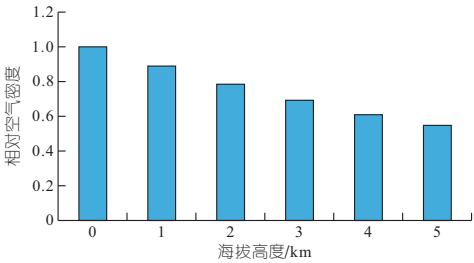


图 2 空气密度随海拔变化图

Fig. 2 The theoretical demand air volume varies with altitude

2.2.2 超高海拔对发电电动机内热交换的影响

空气直接冷却结构的表面温升根据对流公式确定。空气间接冷却热量主要通过热传导从高温结构传递给低温结构,再通过直接冷却表面被空气带走。经过理论分析和试验统计,工程上给出对流散热系数随海拔高度变化关系符合如下公式:

$$\alpha = Ch^m \quad (2)$$

式中, α 为对流换热系数; C 为与 0 海拔相关系数; h 为海拔高度; m 为经验系数,取值一般在 0.78~0.82 之间。

式(2)中系数 C 则与散热表面的几何结构及气流速度相关^[6],空气热力性质发生变化时,电机主要散热表面的对流散热系数 α 会随之改变,热传导等效热阻 R 则不受影响。

发电电动机定子传热示意图见图 3(a),图 3(a)中 P_{Cu} 为定子线圈损耗, P_{Fe} 为定子铁心损耗, R_{Cu} 为定子线圈热阻, R_{CF} 为线圈与铁心间热阻, R_{Fe} 为定子铁心热阻。定子线圈损耗热一部分传到定子铁心,再与铁心损耗一起与冷却空气进行热交换;另一部分直接传递到冷却空气。定子线圈的温升包含冷却空气温升、气—固两相表面温升和绝缘温降组成。其中,绝缘温降为线圈

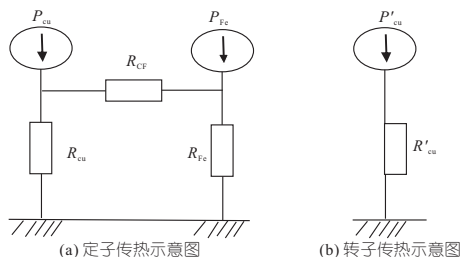


图 3 定子和转子传热示意图

Fig. 3 Heat transfer diagram of stator and rotor

到铁心间传热所致,为传导方式,仅与绝缘物性及厚度有关,与空气无关,因而不受海拔高度变化的影响。空气温升与表面温升均与空气物性有关,受海拔高度变化的影响。

发电电动机转子线圈传热示意图见图 3(b),图 3(b)中 P'_{cu} 为转子线圈损耗, R'_{cu} 为转子线圈热阻。转子线圈直接与冷却空气进行热交换,转子线圈直接与空气进行热交换,其温升为线圈表面温升与空气温升之和,为空气对流传热,受空气物性变化的影响^[6]。

某发电电动机不同海拔地区运行时定、转子线圈温升变化趋势见图 4。由图 4 可知,海拔升高,电机温升增大,若在 4 000 m 超高海拔地区,定子线圈温升增加约 20%,转子线圈温升增加超 40%。

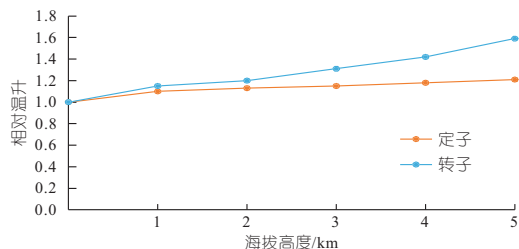


图 4 定、转子温升随海拔变化曲线

Fig. 4 Curves of temperature rise of stator and rotor with altitude

3 超高海拔发电电动机通风冷却系统模型建立

3.1 超高海拔全空冷发电电动机通风冷却系统设计难点分析

超高海拔通风冷却系统的设计目标是保证温度负荷绝缘等级要求。《旋转电机定额和性能》(GB/T 755-2019)^[7] 规定了平原地区和 40 °C 环境温度条件下定子绕组和铁心的温升。对密闭自循环的电机来说,冷却器出风温度即为环境温度。对非基准条件的温升限值,需环境温度和温升值之和满足绝缘等级的要求。《发电电动机基本技术条件》(GB/T 20834-2014)^[8] 规定了绕组、

定子铁心等部件的温升,并给出非基准运行条件和定额时温升限制的修正。同样该标准也是以环境温度和温升值的和为最终限值,即以温度为限制而非以温升^[8]。因此,超高海拔全空冷发电电动机通风冷却系统设计主要解决以下几方面的难题:①选择合适的通风结构;②如何提高电机总风量满足冷却需求;③如何控制电机定转子线圈等主要发热部件的温升及温度分布的均匀性;④需要基于高海拔空气密度和电机通风量进行空水冷却器散热性能校核设计;⑤如何对通风冷却系统性能进行准确的评估。

3.2 超高海拔发电电动机通风冷却系统模型建立

电机内部空气流场的基本控制方程主要为质量守恒方程和动量守恒方程。变分原理和剖分插值相结合来求解数理方程的数值计算方法是有限元定、转子三维温度场计算的基本原理。流场和温度场耦合计算,还需考虑能量守恒方程。

根据电机周期性,计算模型取一个磁极区域进行搭建,其中包含定、转子部分主要发热部件、结构部件及空气流域。图 5 为计算模型及网格划分。计算时,转子侧空气域按电机转速给定。冷风温度设置为 40 °C。空气物性按实际海拔高度对应值给定,空气比热设置为 0.749 kJ/(m³ · K)。电机电磁损耗分项加载在绕组、铁芯、极靴表面等发热部件上,铜损考虑温度变化引起的损耗变化。

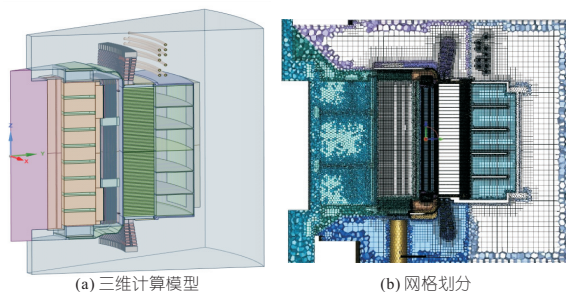


图 5 三维计算模型及网格划分

Fig. 5 Three-dimensional computational model

流场和温度场的耦合计算结果见图 6,包括各位置的流动方向、速度和温度。冷却空气在转子驱动下,流动顺畅,各部位风速分布合理,定子风沟风速分布均匀,能够为电机冷却提供有利条件。温度场计算结果表明,该电机在 3 500 m 超高海拔条件下运行时,定、转子温升均满足考核需求。

4 超高海拔环境对发电电动机通风冷却系统优化设计结果

超高海拔空冷发电电动机通风冷却系统设计

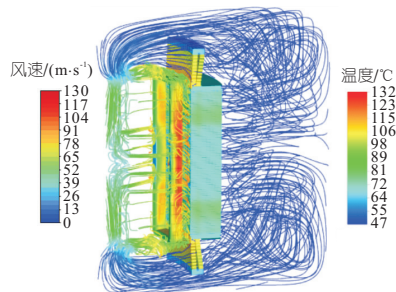


图 6 共轭传热计算结果示意

Fig. 6 Fluid-solid coupling calculation results sketch

须采取相应措施增加换热能力,降低电机结构件温升,以保证发电机的安全运行。

(1)增加冷却风量。对密闭自循环通风方式的电机,增加定、转子风道等瓶颈位置过风面积、优化通风结构减小风阻等可有效增加冷却风量。另外,磁轭两端设计风扇,增加转子旁路风道也是提高风量的手段。而对于受到结构尺寸限制,风道过风面积无法增加的电机,可采用外加风机等方式。图 7 为定子风沟高度、转子风沟高度、转子磁轭风扇高度对总风量的影响。由图 7 可知,不同的调节手段对增加冷却风量的效果有所不同,在进行结构优化时可根据设计需求选择适当的调节方式。

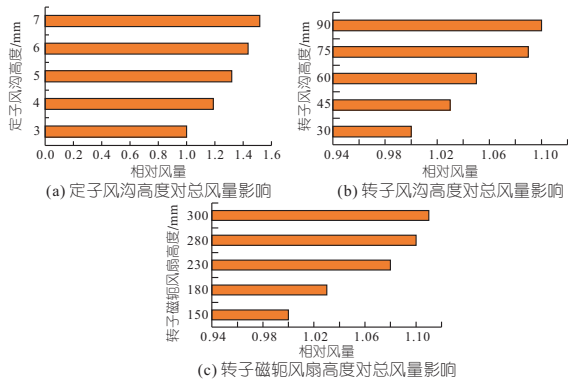


图 7 定子风沟高度、转子风沟高度及转子磁轭风扇高度对总风量影响

Fig. 7 Influence of stator duct height, rotor duct height and rotor yoke fan height on total air volume

(2)提高电机自身的散热能力。提高发热部件自身的散热能力,能够用较小的冷却风量,带走较大的发热量,从而有效的控制温升。绝缘温降是定子温升的组成部分,采用高导热绝缘材料可降低绝缘温降,从而降低线圈温升。另外定子的多槽、深槽、增加风沟数量—减小风沟高度等结构能够增加定子的散热能力。内冷高效散热结构可为转子提高很好的散热能力。图 8 为转子散热结构示意图。通过仿真获取内通风的作用,转子线圈冷却风量分配及散热量分布见图 9。由图 9 可看出,转子内冷孔用较小的风量能够带走较多的

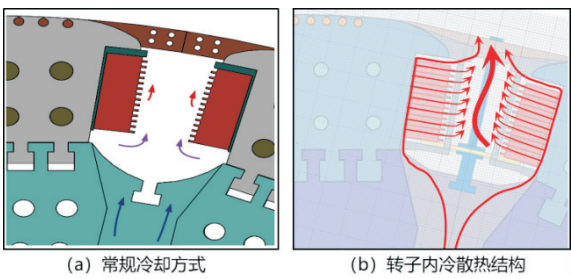


图 8 转子散热结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of heat dissipation structure of rotor

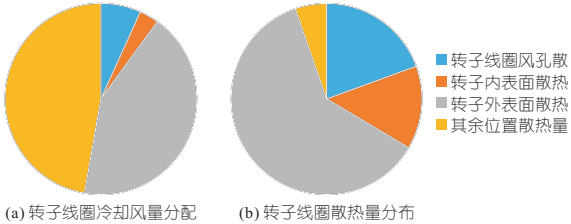


图 9 转子线圈冷却风量分配及散热量分布

Fig. 9 Rotor coil cooling air volume distribution and heat dissipation distribution map

热量,相比外表面散热能力明显提高。

(3)提高空气利用率。改变气体流动的方式,使有限的空间和风量能得到更好的利用,也是一种超高海拔发电电动机通风冷却系统的优化设计方案。通过在定子端部线圈附近增加挡风板引导更多气流吹拂线圈端部,提高发热体附近的速度,是一种降低定子线圈温度的有效措施。端部线圈增加调节挡风板前后的风速分布见图 10。由图 10 可看出,发电机端部加挡风板后,上下端部附近的风速均有一定程度的提高,从而达到降低端部线圈温度的目的。

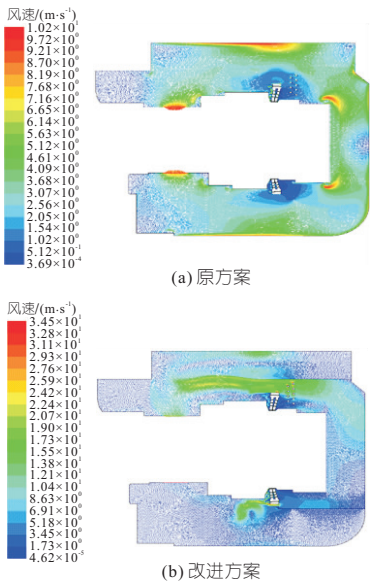


图 10 端部线圈增加调节挡风板前后的风速分布

Fig. 10 The flow velocity distribution map before and after the end coil is added to the windshield is adjusted

(4)提升空冷器性能。当电机风量减小后,空

侧散热系数明显下降,冷却器换热性能变差,为保证合适的冷风温度,需采取如下措施增强空冷器性能:①加大空气侧散热面积,如增加冷却管数量、改变散热翅型式等;②使用高导热材料,减小空气与水间的温差;③优化空气流道,一方面增强湍流,另一方面避免气流短路或涡流。

(5)考虑环境温度的补偿。在超高海拔高度下,环境温度降低比较明显,如在 4 000 m 海拔时,环境温度较 0 m 海拔时降低 26 K,理论上通风冷却系统冷风温度会相应降低,电机发热部件温度随之下降。因此,在超高海拔发电电动机设计时,可根据实际情况考虑环境温度的补偿。绝缘寿命主要取决于其温度而非温升,而海拔高度对绝缘耐热性并无影响,当电机所在地冷却水的温度较低时,可通过降低冷却器出风温度、提高电机温升的方式,在保证各部件温度符合绝缘热分级要求的前提下,为电机通风系统提供更多的设计空间。

(6)优化计算方法。对于高海拔地区的发电电动机,温升的准确计算主要依赖于对空气密度、比热等物性参数变化的精确模拟,这就需要对计算方法进行优化,充分考虑空气物性变化、电机损耗及温升之间的关联关系,提高通风冷却计算精度。首先仿真过程中,建立空气热物性与运行海拔高度变量关联式,实现空气物性随海拔高度和电机内部不同位置的变化;其次利用软件功能实现定转子铜耗随温度和位置的变化,达到损耗高精度动态加载。

5 结论

a. 高海拔对发电电动机通风冷却系统的影响主要包括空气流动、发电电动机风量及内热交换三个方面。在 4 000 m 超高海拔地区,转子线圈温升增加超 40%,定子线圈温升增加约 20%。

b. 超高海拔空冷发电电动机通风冷却系统设计主要措施包括增加冷却风量、提高空气利用率、提高电机自身的散热能力、提升空冷器性能、考虑环境温度的补偿及优化计算方法。

参考文献:

[1] 马哲,廖祥波,高峻泽,等. 高海拔地区抽水蓄能电站吸出高度计算公式的修正方法[J]. 水电能源科学, 2024, 42(11): 176-180. (MA Z, LIAO X B, GAO J Z, et al. A modified method for calculating suction height of pumped storage power station in high altitude area[J]. Water resources and power,

2024, 42(11): 176-180. (in Chinese))

- [2] 李静,王振红,吴启凡. 同冷区和纵缝对高海拔区西藏某重力坝混凝土温度应力的影响[J]. 水电能源科学, 2022, 40(4): 91-94. (LI J, WANG Z H, WU Q F. Impact of synchronous cooling zones and longitudinal joint on temperature stress of concrete gravity dam in Tibet high altitude regions[J]. Water resources and power, 2022, 40(4): 91-94. (in Chinese))
- [3] 李亚鹏,田正宏,孙啸,等. 高海拔寒冷地区混凝土筑坝层面结合特性试验分析[J]. 水电能源科学, 2022, 40(4): 99-103. (LI Y P, TIAN Z H, SUN X, et al. Experimental analysis of layer bonding characteristics of concrete dam in high altitude cold area[J]. Water resources and power, 2022, 40(4): 99-103. (in Chinese))
- [4] 张艳玲,童富果,刘刚. 基于水气两相流的海拔高程对某电站溢洪道泄洪雾化的影响分析[J]. 水电能源科学, 2024, 42(1): 120-124. (ZHANG Y L, TONG F G, LIU G. Analysis of influence of altitude on a hydropower station spillway flood discharge atomization based on water air two-phase flow[J]. Water resources and power, 2024, 42(1): 120-124. (in Chinese))
- [5] LIU W M, WANG S M, LI W L, et al. Numerical calculation of fluid heat transfer in rotor of large air-cooled generator based on global ventilation network model[C]//2023 26th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 05-08 November 2023, Zhuhai, China. 2023: 4590-4595.
- [6] LI W L, GUAN C W, CHEN Y H. Influence of rotation on rotor fluid and temperature distribution in a large air-cooled hydrogenerator [J]. IEEE transactions on energy conversion, 2013, 28(1): 117-124.
- [7] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 旋转电机定额和性能: GB/T 755-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019. (State Administration of Market Supervision and Administration, Notional Standardization Management Committee. Rotating electrical machines-rating and performance: GB/T 755-2019[S]. Beijing: China Standard Press, 2019. (in Chinese))
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 发电电动机基本技术条件: GB/T 20834-2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015. (General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Notional Standardization Management Committee of the People's Republic of China. Fundamental technical specifications for generator-motor: GB/T 20834-2014[S]. Beijing: China Standard Press, 2015. (in Chinese))