

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220220

巨型水电机组励磁系统环形热管整流柜的研制与应用

童小琴¹, 张 敬²

(1. 武汉城市学院机电工程学部, 湖北 武汉 430083; 2. 中国长江电力白鹤滩水力发电厂, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 针对巨型水电机组励磁整流柜散热问题,介绍了利用环形热管散热的工作原理和自冷型环形热管整流柜的研制改进过程,分析了一体式环形热管散热器和水平对称结构的优势及其在乌东德水电站的应用。结果表明,采用完全自冷方式的环形热管励磁整流柜可在现场长期稳定运行,从设计原理上解决了灰尘、噪声、工作电源、维护等一系列问题,提高了设备的安全可靠性和自动化水平,同时降低了能耗,节能环保效益显著。

关键词: 整流柜;自冷;环形热管;节能环保

中图分类号: TV734;TK124

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)02-0218-03

1 引言

励磁系统为发电机的关键控制设备之一,起着维持发电机电压、调节电网无功、提高电力系统稳定性的作用,励磁系统的可靠性直接关系到发电机组的正常运行^[1-2]。通过励磁设备故障统计分析,发现励磁系统中整流柜发生故障的概率最高,主要是由强迫风冷散热方式所引起,只能通过加强人工维护来解决,维护不及时、不到位均将影响发电机组和电网的安全运行,因此在设计原理上就降低了设备的可靠性,给电力系统带来安全隐患。随着单机容量的增加,励磁电流增大,励磁电压升高,对冷却风量和绝缘电压的要求越来越高,强迫风冷带来的问题更显突出。国内大型机组励磁整流柜烧毁的事故时有发生,掌握大型发电机励磁系统的关键技术,研制出具备我国自主知识产权的大型发电机励磁装置,提高我国大型机组装备自动化水平,是亟待解决的重大课题之一。针对传统大型发电机励磁整流系统中强迫风冷方式带来的诸多安全隐患,本文基于本质安全的设计原则,详细介绍了自冷环形热管整流柜的研制改进过程,分析了一体式环形热管散热器和水平对称结构的优势及其在乌东德水电站的应用情况和带来的节能环保效益,为今后水电机组励

磁整流柜的升级改造提供了成熟的借鉴经验,也为电力行业实现“碳达峰、碳中和”提供了有效的解决方案。

2 环形热管散热器

热管技术利用汽液相变原理实现热量传导,为励磁整流系统中以自冷方式替代强迫风冷方式提供了可能。

传统的热管采用图1所示管形结构,使用时散热器只能水平布置,热量沿散热器轴向传递,输出功率受到柜体长度空间限制。同时工作时产生的蒸发气体与冷凝产生的液体回流方向相反,相变介质相互摩擦产生干扰影响传热效率。当蒸发气体温度过高时,冷凝液体在回流过程中会再度

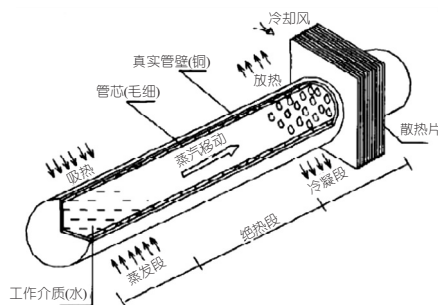


图1 管形热管散热器

Fig. 1 Tubular heat pipe radiator

收稿日期: 2022-02-09, **修回日期:** 2022-03-22

基金项目: 2022年度湖北省教育厅科学研究计划指导性项目(B2022465);武汉城市学院重点科研项目(2022CYZDKY05);国家自然科学基金项目(41476153)

作者简介: 童小琴(1984-),女,硕士、讲师、工程师,研究方向为同步发电机励磁产品的开发与应用, E-mail: 254013697@qq.com

蒸发而无法回到蒸发段,形成“干烧”,导致热管失效。

2.1 嵌入式环形热管散热器

为解决汽液混流和干烧的问题,将热管设计成环形,将环形热管嵌入到铝型材散热器的内部,制成环形热管散热器(图 2)^[3]。环形热管散热器由散热器型材、蒸发管、冷凝管及跨接管组成。蒸发管与冷凝管之间通过跨接管形成回路,然后通过抽取真空装置将管路中的空气抽出,并注入工作液。工作液便在由蒸发管、冷凝管及跨接管构成的环形回路中循环,通过蒸发冷却将热量由发热元件传递到散热器型材,进行散热。

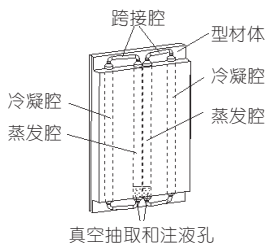


图 2 环形热管散热器

Fig. 2 Loop heat pipe radiator

环形热管的蒸发腔与冷凝腔分离,实现汽、液分流,管内二相介质流动方向一致,加快了热量传递速度,并保证了冷凝液能顺利回流蒸发段,彻底解决了“干烧”问题。同时热管与散热片之间形成面接触,增大热管与散热器的接触面积,降低了热管与散热器的接触热阻。热管的环形结构还改变了热量的传导方向,使散热器的功率不再受柜体长度空间限制,使散热器的结构更灵活,柜内布局更合理。

2.2 一体式环形热管散热器

第一代嵌入式环形热管散热器中的热管与散热器各自独立,热管嵌入在散热器型材中。热管的工作液在由蒸发管、冷凝管及跨接管构成的环形回路中循环。蒸发管、冷凝管及跨接管均为铜管,散热器为铝型材,散热器铝型材与铜管之间存在接触热阻和机械应力,影响了传热效率,且加工工艺复杂,材料成本也较高。

经过优化设计,新研制出了将热管与散热器型材融合的一体式环形热管散热器(图 3)。一体式环形热管散热器取消了构成热管环形回路的铜管,直接在型材内成型蒸发腔、冷凝腔和跨接管。在型材体上设有密封式真空抽取和注液孔,抽取型材内部腔体中的空气并向腔体内注入工作液,蒸发腔与冷凝腔之间通过跨接管连通形成环形回路,热管的工作液在散热器型材内腔中循环。一体式环形热管散热器只需一种型材,消除了散热

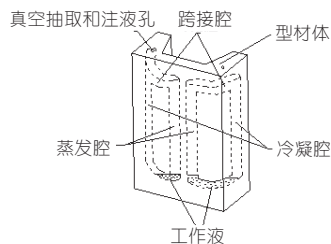


图 3 一体式环形热管散热器

Fig. 3 Integrated loop heat pipe radiator

器铝型材与铜管之间的接触热阻,解决了散热器型材与铜管之间的机械应力问题,提高了散热效率,优化了工艺,减轻了自重,并大幅降低了成本^[4]。

3 环形热管整流柜的结构设计

受柜体空间限制,自冷条件下整流柜内部器件存在相互热干扰,影响整流柜的输出能力。为达到最佳冷却效果,保证每个可控硅具有相同的散热条件,对自冷型整流柜的各种结构布置进行了详细的热仿真研究。

3.1 上下结构环形热管整流柜

励磁整流柜的可控硅整流元件布置为上、下两组,当上、下两组散热器结构对称时,下层可控硅组件会加热空气,使上层可控硅组件的进风温度提高,影响上层可控硅组件的冷却效果,导致上层可控硅温度大大高于下层可控硅温度,限制了整流柜的输出能力。

如图 4 所示,如果采用上下非对称结构,上层可控硅组件的进风温度依然受到下层可控硅组件

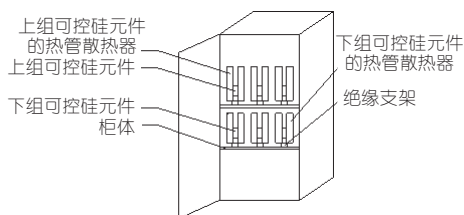


图 4 上下非对称结构热管整流柜

Fig. 4 Heat pipe rectifier cabinet of up-down asymmetric structure

的影响,但通过增大上层散热器的面积可加强上层可控硅组件的冷却效果。假设上层可控硅元件带的热管散热器表面积为 S_2 ,下层可控硅元件带的热管散热器表面积为 S_1 ,则二者满足下列关系:

$$S_2 \geq S_1(T_{A_1} - T_1)/(T_{A_1} - T_1 - km) \quad (1)$$

式中, T_{A_1} 为下层可控硅元件温度; T_1 为柜体内的冷却空气温度; k 为冷却空气质量系数; m 为冷却空气质量。

3.2 水平对称结构环形热管整流柜

励磁整流柜的热管散热器通过加大上层可控硅的散热器,降低了上层可控硅元件的温度。但

此方法带来的问题是上、下两组热管散热器无法互换,通用性差。

将环形热管励磁整流柜的散热器设计成水平对称结构(图 5(a)),该结构的特征为励磁整流柜的可控硅整流组件分为前、后两组布置,在经过可控硅整流元件或热管散热器的竖直截面(图 5(b))时,前、后两组可控硅整流组件镜面对称布置,竖直截面与柜体的侧壁垂直,使所布置的表面积完全相同的热管散热器具备互换性。通过将自冷型整流柜的可控硅整流组件采用前后镜面对称结构,更好地解决自冷型整流柜上组可控硅元件温度高于下组可控硅元件温度的问题,提高了整流柜的额定输出能力和经济性,且操作方便。

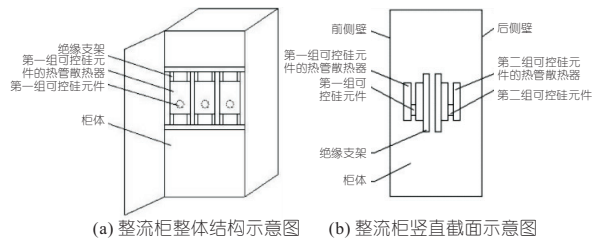


图 5 水平对称结构热管功率柜

Fig. 5 Heat pipe rectifier cabinet of horizontal symmetric structure

4 工程应用及节能环保效益

4.1 工程应用

2004 年 3 月,首套环形热管整流柜在葛洲坝电厂 19F 机组投入运行^[5]。葛洲坝电厂 19F 单机容量 125 MW,额定励磁电压 430 V,额定励磁电流 1 553 A,采用 3 台热管整流柜并联。整流柜采用嵌入式环形热管散热器、上下非对称结构,单柜自冷输出能力 1 600 A。投运后整流柜一直安全稳定运行。其后葛洲坝 3F、14F 及三峡电源电站等机组陆续采用了同类型的环形热管整流柜^[6]。

为提高环形热管整流柜的自冷输出能力,重新设计了柜体结构。散热器仍采用嵌入式环形热管散热器,但将上下非对称结构调整为水平对称结构。2007 年 4 月、2011 年 4 月,水平对称结构的环形热管整流柜先后通过了中国水力发电工程学会电力系统自动化专委会和瑞士 ABB 公司的测试,单柜自冷输出能力 2 500 A。2012 年,水平对称结构的环形热管整流柜在三峡地下电站 27F、29F 机组上投入运行。三峡地下电站 27F、29F 单机容量 700 MW,最大励磁电压 506 V,最大励磁电流 3 960 A,强励电流 7 920 A,采用 4 台热管整流柜并联。投运至今,整流柜一直安全稳

定运行^[7]。

为进一步提高热管散热器的可靠性和维护的方便性,在三峡地下电站热管整流柜的基础上,对环形热管散热器进行了优化,将嵌入式环形热管散热器改进为一体式环形热管散热器,提高了散热器效率,自冷输出能力不变,却减少了单体散热器重量和体积。

2021 年 6 月,中国第 4、世界第 7 大水电站乌东德水电站全面投产发电,包括 12 台单机容量 850 MW 机组,最大励磁电压 541 V,最大励磁电流 4 111.8 A,强励电流 8 223.6 A,励磁整流柜全部采用 4 台一体式环形热管散热器的环形热管整流柜并联。现场运行结果显示,在机组额定负荷下,可控硅最高温度不超过 63 °C,温升不超过 40 °C,符合标准要求^[8]。

4.2 节能环保效益

热管自冷散热励磁整流柜不仅能解决强迫风冷散热方式带来的灰尘大、绝缘降低、维护量大等问题,还可减少冷却风机运行的电能消耗,具有节能环保效益。以 1 套 700 MW 机组励磁整流系统为例,若采用强迫风冷方式,共需 5 台 500 W 的大功率风机,每年耗电量约 $1.98 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$;若采用热管自冷方式,无需风机,每年节省的用电量相应节约了 $0.79 \times 10^4 \text{ kg}$ 标准煤的同时减少了碳粉尘排放量 $0.54 \times 10^4 \text{ kg}$ 、二氧化碳排放量 $1.97 \times 10^4 \text{ kg}$ 、二氧化硫排放量 $0.06 \times 10^4 \text{ kg}$ 、氮氧化物排放量 $0.03 \times 10^4 \text{ kg}$ 。

全国筹建、在建、已建成的 600 MW 容量及以上巨型水电机组约 180 台,若全部采用环形热管自冷散热励磁整流系统,每年可节约 $142.2 \times 10^4 \text{ kg}$ 标准煤,减少碳粉尘排放量 $97.2 \times 10^4 \text{ kg}$ 、二氧化碳排放量 $354.6 \times 10^4 \text{ kg}$ 、二氧化硫排放量 $10.8 \times 10^4 \text{ kg}$ 、氮氧化物排放量 $5.4 \times 10^4 \text{ kg}$ 。该结果还可推广到 600 MW 以上的火电机组,也可作为煤矿、冶金等行业大功率电源,环保效益显著。

5 结论

a. 环形热管技术的引入改变了传统的散热方式,摆脱了对风机的依赖,在提高设备可靠性的同时降低了能耗,践行了绿色低碳发展的理念。

b. 随着我国“碳达峰、碳中和”政策的推行,社会经济发展面临新的能源与环保需求,环形热管技术为电力行业实现“碳达峰、碳中和”提供了有效的解决方案,可为我国“双碳”目标顺利落地做出贡献。

(下转第 206 页)

[2] 方旭,冯晓波. 基于 Copula 函数的边坡可靠度高效分析方法[J]. 中国农村水利水电, 2021(4): 201-206, 211.

[3] 杨超,黄达,张永兴,等. 基于 Copula 理论的岩体抗剪强度参数估值[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12): 2463-2470.

[4] ZHOU X, ZHANG G, HU S, et al. Copula-based approach coupling information diffusion distribution for slope reliability analysis[J]. Bulletin of engineering geology and the environment, 2020, 79(4): 1-16.

[5] TANG X, LI D, ZHOU C, et al. Copula-based ap-

proaches for evaluating slope reliability under incomplete probability information [J]. Structural safety, 2015, 52: 90-99.

[6] 邢婕,唐小松,李典庆,等. 水利水电工程岩基抗剪强度参数二维分布模型构造的 Copula 方法[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 783-792.

[7] 张蕾,李典庆,唐小松,等. 基于贝叶斯理论的抗剪强度参数最优 Copula 函数识别[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 578-588.

[8] 孔宪京,宋来福,徐斌,等. 基于 Copula 函数的堆石料非线性强度参数相关性及其分布模型研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(5): 797-807.

Study on Soil Parameters Distribution Model of Yangtze River Embankment Shoreline Based on Copula Function

YIN Yong-xin^{1a}, YANG Wen-dong^{1b}, ZHOU Xin-long², HU Shao-hua^{1a}

(1a. School of Safety Science and Emergency Management; 1b. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: Aiming at the problem that the reliability calculation results of embankment slope stability are not accurate due to the fact that the correlation between variables cannot be considered in two-dimensional independent distribution, based on 171 sets of test data of the shear strength of the Yangtze River embankment shoreline soil, Copula function was used to study the correlation between the shear strength parameters of the Yangtze River embankment shoreline soil. The AIC and BIC criteria were used to identify the optimal edge distribution and Copula function, and a two-dimensional joint distribution model was constructed. The influence of data volume on the identification of correlation structure between parameters was analyzed. The results show that the two-dimensional joint distribution model based on Copula function can accurately characterize the correlation between soil parameters of the Yangtze River embankment shoreline; When the data volume is more than 24 groups, AIC and BIC criteria can accurately identify the optimal Copula function, which provides a reference for the reliability calculation of embankment slope and the construction of Copula function model.

Key words: Copula function; embankment; shear strength parameters; marginal distribution; joint probability distribution model



(上接第 220 页)

参考文献:

[1] 陆继明,毛承雄,范澍,等. 同步发电机微机励磁控制[M]. 北京:中国电力出版社,2006.

[2] 毛承雄,吴建东,娄慧波,等. 基于电流源型变换器的大型同步发电机励磁[J]. 水电能源科学, 2008, 26(3): 172-175.

[3] 童小琴,张敬,刘德红. 热管自冷型整流柜风道设计分析[J]. 低温与超导, 2021, 49(9): 38-41, 60.

[4] 周宇,张敬,田会莉,等. 一种隐式环路环形热管散

热器;中国,201120433196.5[P]. 2012-07-11.

[5] 胡国,李朝晖,杨兴斌,等. 葛洲坝电厂 19F 机组励磁系统状态监测与诊断[J]. 水电自动化与大坝监测, 2005, 29(2): 23-27, 41.

[6] 马龙,周伍,曾广栋,等. 葛洲坝电站 3 号机组增容改造稳定性分析[J]. 大电机技术, 2012(6): 44-47, 54.

[7] 王波,张敬,胡先洪,等. 三峡地下电站国产化励磁系统[J]. 大电机技术, 2011(6): 63-66.

[8] 中国国家标准化管理委员会. 同步电机励磁系统大、中型同步发电机励磁系统技术要求: GB/T 7409.3-2007[S]. 北京:中国标准出版社,2007.

Development and Application of Loop Heat Pipe Rectifier Cabinet for Excitation System of Giant Hydropower Units

TONG Xiao-qin¹, ZHANG Jing²

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan City College, Wuhan 430083, China; 2. Baihetan Hydropower Plant, China Yangtze Power Co., Ltd, Yichang 443002, China)

Abstract: In order to solve the heat dissipation problem of heat pipe rectifier cabinet for excitation system of giant hydropower station, the working principle of loop heat pipe and the processes of development and improvement of loop heat pipe rectifier cabinet were introduced. The advantages of integrated loop heat pipe and horizontal symmetry structure, as well as its application in Wudongde Hydropower Station were analyzed. The practice shows the loop heat pipe rectifier cabinet adopting completely self-cooling heat dissipation mode is in a thermal stable state after long-term operation in the field, and a series of problems, such as dust, noise, power supply, maintenance, can be solved from the design principle. Meanwhile, it can improve the safety, reliability and automation level of the equipment and reduce the energy consumption, the benefits of energy-saving and environmental protection are obvious.

Key words: rectifier cabinet; self-cooling; loop heat pipe; energy conservation and environmental protection