

我国湿热沿海风电机组服役环境条件研究

陈川¹, 王俊¹, 黄海军¹, 揭敢新¹, 赵钺¹, 宋晓萍²

(1. 中国电器科学研究院有限公司 工业产品环境适应性国家重点实验室, 广州 510663;

2. 湘潭电机股份有限公司 海上风力发电技术与检测国家重点实验室, 湖南 湘潭 411102)

摘要: 目的 为我国湿热沿海风电设备的设计、制造、运行维护及标准制定提供参考依据。方法 通过对湿热沿海风电机组服役环境条件的监测, 包括风电机组运行环境温湿度数据、腐蚀数据等, 分析湿热沿海地区主要环境因素对风电机组的影响。结果 针对我国湿热沿海环境条件提出了关键设备和材料的环境技术要求及试验方法。结论 对风电机组面临的环境问题提出相应的改进措施及建议。

关键词: 风电; 湿热沿海; 环境失效; 技术要求

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.02.024

中图分类号: TJ06 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)02-0116-05

Study on Service Environmental Conditions for Wind Turbine in Hot-humid Coastal Area of China

CHEN Chuan¹, WANG Jun¹, HUANG Hai-jun¹, JIE Gan-xin¹, ZHAO Yue¹, SONG Xiao-ping²

(1. State Key Laboratory of Environmental Adaptability for Industrial Products, China National Electric Apparatus Research Institute Co., Ltd, Guangzhou, 510663 China; 2. State Key Laboratory of Offshore Wind-Power Technology and Testing, XEMC Wind power Co., Ltd, Xiangtan 411102, China)

ABSTRACT: Objective To provide reference for the design, manufacturing, operation, maintenance and standard formulation of hot-humid costal wind power equipments. **Methods** Through monitoring the service environmental conditions of the humid coastal wind turbine, including the environment temperature and humidity data and the corrosion data of the wind turbine, the impacts of the main environmental factors in hot-humid costal area of China on the wind turbine were analyzed. **Results** The environmental technical requirements and test methods were proposed for the key equipments and materials according to the environmental conditions of the hot-humid coastal area of China. **Conclusion** The improvement measures and suggestions were put forward according to the environmental problems faced by the wind turbine in hot-humid coastal area of China.

KEY WORDS: wind power; hot-humid coastal area; environmental failure; technical requirements

收稿日期: 2014-11-20; 修订日期: 2015-01-15

Received: 2014-11-20; Revised: 2015-01-15

作者简介: 陈川(1987—),男,四川富顺人,硕士,工程师,主要研究方向为产品与材料的环境适应性技术。

Biography: CHEN Chuan(1987—), Male, from Fushun, Sichuan, Engineer, Research focus: the environmental adaptability technology of products and materials.

我国湿热沿海地区拥有丰富的风能储量。例如广东省濒临南海,有长于4300 km的海岸线,亚热带季风长年不断,近海可供开发风电资源规模达1100万kW左右。同时,湿热沿海地区用电消费需求量大,有利于风电的短距离消费。我国湿热沿海地区面临着高温、高湿、盐雾、台风、雷暴等恶劣的自然环境,影响风电设备长期稳定的运行,对风电设备的设计、制造、运行维护及标准制定都提出了新的特殊要求。

笔者对某湿热沿海地区风电设备开展环境条件监测,分析环境因素对湿热沿海地区风电机组的我国湿热沿海地区拥有丰富的风能储量。鉴于此,提出了各关键设备和材料的技术要求及试验方法,以及相应的改进建议。

1 条件监测

笔者选取我国湿热沿海某风电机组,连续监测风电机组服役时机舱与塔筒内外的温度、湿度、盐雾等重要环境条件数据,以及发电机、控制系统、变流器等关键部件的局部服役温湿度数据,同时开展现场调查并及时掌握该风电机组实际服役情况。

采用硫氰酸汞分光光度法(HJ/T 27—1999^[1])对包括塔基内部、塔筒中部、机舱内部、轮毂内部、塔基外部、风电机组外部共6个部位展开了监测。各部位的氯离子质量浓度分别为0.0035, 0.0039, 0.0039, 0.0013, 0.0272, 0.1444 mg/100 cm²/d。风电机组外部的盐粒子浓度明显高于风电机组内部的盐粒子浓度。

通过A3钢现场挂片试验,表征风电机组包括塔基外部、塔基内部、塔筒中部、机舱内部、机舱外部共6个部分的腐蚀情况。机舱外、塔基外A3钢样板腐蚀严重,塔基内A3钢样板12个月后腐蚀已较严重,机舱内A3钢样板12个月后发生了严重的点蚀现象,如图1所示。分析结果表明,腐蚀产物以铁的氧化物为主。

根据ISO 9224—2012^[2]中对于大气腐蚀环境等级的划分,以A3钢腐蚀速率为依据,风电机组外部结构件所处大气环境的腐蚀等级为C5,风电机组塔基内部结构件所处大气环境的腐蚀等级为C2,塔筒中部、机舱内部腐蚀等级为C1。对机舱内的电气部件采用ECM大气腐蚀监测仪进行连续监控,试验结果表明,机舱内的大气腐蚀等级为美国ISA-S71.04—1985^[3]中的G1等级,月腐蚀厚度小于300 Å/月,环境腐蚀严酷度轻微,腐蚀对电气设备运行稳定不构成威胁。从1年期监测数据可以看出,目前该沿海风电机组机舱环境密封效果较好,腐蚀得到有效控制。

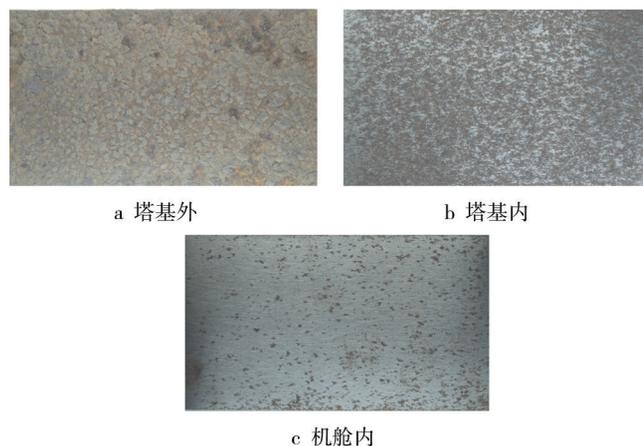


图1 风电机组不同部位的A3钢挂板12个月后照片

Fig.1 Photos of the A3 steel panel in different parts of the wind turbine after 12 months

该风电机组各个区域全年最高温度分布如图2所示。发电机定子最高温度达97℃,主轴承的最高温度达72℃。轮毂、机舱内部环境最高温度为46℃。机舱控制柜最高气温达49℃,轮毂控制柜最高气温达50℃,而塔基控制柜、变流器最高温度为40℃。

该风电机组关键区域各月的平均相对湿度变化

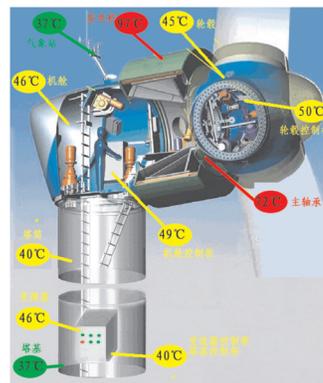


图2 沿海某风电机组各个区域最高温度分布

Fig.2 Distribution of the highest temperature in different regions of the coastal wind turbine

曲线如图3所示。塔筒中部全年湿度均较高,各月平均相对湿度在55%~75%之间,风电机组其他区域空气的相对湿度在春秋季节要略高于夏季和冬季。其中机舱内4月份平均空气相对湿度高达70%左右,3月、4月、7—10月空气平均相对湿度也均在60%以上。塔基空气相对湿度要略低于机舱内的空气相对湿度。

2 环境因素对风电机组影响

研究表明,湿热沿海风电机组接近50%的风电机

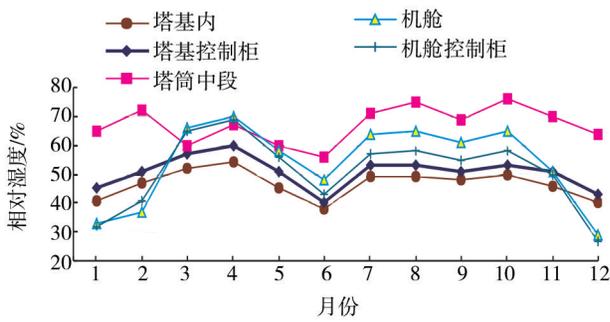


图3 某沿海电机组各主要部分月平均相对湿度变化曲线
Fig.3 Monthly average relative humidity curve in the main parts of the coastal wind turbine

组故障停机均与环境因素有着直接或间接的关系。与环境相关的故障中,冷却系统的故障与维护、发电机温度过高、材料损坏这三类引起的故障维护及停机几率较大。其中6—9月份的与环境相关问题引起的故障维护及停机约占全年故障维护及停机总数的50%。

我国湿热沿海地区夏季气温长期在30℃以上,散热条件差,常见故障及停机多与散热不良有着直接或间接的关系。风电机组在夏季潮湿条件下,非常容易在部件表面形成凝露,结合物体表面的尘埃,形成导电通路,破坏电气绝缘。湿热沿海地区,空气中含有大量随海水蒸发的盐分,所面临的腐蚀环境条件更加恶劣,容易导致电气设备内部的线圈和触头发生腐蚀,风电机组传动系统、电气控制系统故障率大大增加等问题。同时高盐雾浓度下金属的腐蚀速率非常高,对风电机组钢结构、螺栓等紧固连接件及其他部件的腐蚀也应更加严重。

湿热地区台风雷暴频发,对风电机组的影响巨大,风电机组在断电状态下,偏航失效,风机无法调整对风。台风出现各个方向的大风作用产生的弯扭组合力矩超过叶片及变桨执行机构承载极限,导致叶片断裂,变桨系统受损。台风方向的不断变化,使得台风事假在机组上的静力效应和动力效应共同作用下不断施加疲劳载荷,严重时会导致塔筒倾覆。例如在2013年9月的“天兔”超强台风中,广东红海湾风电场共25台风机受损,甲冬风电场共29台风机受损,石碑山风电场共40台风机受到不同程度损坏。以红海湾风电场为例,共8台风机发生倒塔,8台风机叶片、机舱、轮毂损坏,2台风机机舱着火^[4]。

3 环境问题改进建议

由于环境因素对风电机组的影响,需针对不同环

境条件提出风电机组材料选择和产品环境由于环境因素对风电机组的影响。对于高温环境,可以增加安装空冷或水冷装置,适当地对某些关键部件选取采用耐高温材料、隔热材料及润滑油等。对于高湿可采取适当的加热除湿装置,并在关键电器部件上涂覆防潮涂料等。

我国湿热沿海夏季高温也可以采用更加高效的冷却方式、增加散热面积、优化气流分布、将冷却器安装到机舱外部等,以提高整个风电机组的通风散热水平,尤其需注意密封系统及部件的散热问题。防潮可以通过加热来实现,但由于电气运行温度有限,在我国湿热沿海地区,大多数情况下不能通过无限制提高温度来除湿,以风电发电机组中最容易出现问题的变流器防高温防湿方案的选择为例。目前风力发电机组越来越向大功率发展,尤其是沿海风电机组。由于大功率变流器散热量大和体积限制,只能选择散热效率较高的冷却方式——水冷+水套冷。对于此种方式,除湿的最佳方案是降低柜内绝对湿度,可以使用转轮除湿机。对于密闭的机舱,则可以将整个机舱作为一个除湿防潮空间,按照空间体积进行除湿量计算,选择大功率除湿机,对机舱内所有部件进行防潮。如果机舱采用自然通风散热方式,则需对关键部件进行局部除湿。高温对液压油的影响,可以采取的措施有:一是对液压油冷却,防止环境温度过高使液压系统效率变差,二是通过降低风电机组的输出功率防止因主要部件高温而停机^[5]。

湿热沿海风电机组钢结构面临的腐蚀环境条件恶劣,长期处于高温、高湿、盐雾等更为严酷腐蚀环境,表面腐蚀防护的寿命要求是至少15年以上(ISO 12944-1^[6]),其目标是达到与风力发电机组相同的20年寿命。大气区钢结构涂层保护应具有良好的耐候性。推荐涂层体系配套方案为环氧富锌底漆80 μm+环氧云铁中间漆200 μm+面漆80 μm。

湿热沿海地区风电机组叶片长期暴露于盐雾、强紫外线、高温高湿、强降雨等恶劣环境下,尤其是叶片在运转时,雨水会对叶片产生强烈的冲刷和侵蚀。玻璃纤维增强聚酯树脂和环氧树脂是目前制造风力发电机叶片的主要材料,同时采用涂层进行保护,防止材料老化、磨损,延长叶片的使用寿命。涂层应具有良好的附着力、耐磨、抗冲击、耐盐雾、耐湿热和耐候性。叶片在运行过程中常见的问题包括:涂层表面失光、产生毛面、裂缝、涂层剥落或磨损、砂眼等,所以为了维持风电场正常运转,需要定期对风机叶片进行检修、清洗、维护、修补等工作^[7]。

对于海盐粒子对风电机组内部电气元件的侵蚀,主要应考虑提高机舱及塔筒的密封性。加强风电机组塔基和机舱的密封,且密封部位注意定期检查其可靠性。也可以考虑在机舱增加空气净化装置,可以有效去除机舱中的海盐离子、酸性物质,并且降低机舱中空气的湿度,有效解决由空气污染引起的电机、精密部件及电子系统等的微观不可逆损坏,并解决密封后的系统散热问题。

湿热沿海属于雷电、台风等自然灾害频发区,应主要从设计的角度解决台风环境下的安全问题,加强风电场建设的微观选址、机组选型、备用电源系统的优化、安全链控制的设计、叶片等机组关键部件运行的监测及塔筒的优化设计等工作,确保风电机组的安全运行。我国湿热沿海雷暴频发,从而风电设备应具备较好防雷性能,一般来说应按 IEC 61400—24:2010 中 LPL I^[8]考虑,否则需要进行雷电防护水平的风险评估。

4 湿热沿海风电机组环境试验及技术要求

由此可见,应加强对风电机组的环境质量控制,建立风电机组材料、零部件及系统、整机的三级环境质量控制体系,以确保风电机组在不同环境下的长期稳定运行。在风电机组的研发制造阶段需对新机型进行材料的环境认证与检测、零部件或子系统的环境检测、在安装验收阶段进行整机的环境检测与评估,在运行阶段进行定期的维护,以确保风电机组在不同环境下的长期稳定运行。

例如,我国湿热沿海环境条件具有特殊性,风电机组各设备根据其应用场所,可分为有气候防护场所和无气候防护场所。不同的严酷等级,可根据湿热沿海地区高温、高湿、高盐雾的特点对相关试验参数进行设定。试验期间设备不运行,试验后将设备于正常大气下静置 1~2 h 后进行绝缘电阻、介电强度、性能测试等^[9]。根据环境条件监测结果选择试验温度,例如监测发现机舱控制柜环境温度可达 49.1 °C,对应测风塔环境温度为 36.1 °C。对控制系统进行高温环境测试,按 GB/T 2423.2—2008^[10]中规定试验 Bd 进行,试样为实际工况中的整机,不包装。将试样放入温度为室温的试验箱中,然后将温度调节到(55 ± 2) °C。试样在此条件下达到温度稳定后,通电以实际工况运行验证其高温下启机能力,当试样温度达到稳定,在该条件下持续暴露 16 h。试验后,恢复 2 h 绝缘电阻、介电

性能、工频电压等满足要求。监测变流器环境温度最高达 40.2 °C,对应测风塔环境温度为 36.1 °C,则按 GB/T 2423.2—2008 中规定试验 Bd 进行试验时,试验温度调节在(45 ± 2) °C。

对于塔架、叶片涂料,应对试验前后干膜厚度、附着力、光泽色差等性能进行测试,要求附着力在拉力值 ≥ 5 MPa 之前,应没有出现底漆和底材失去附着力的情况。相关试验可参照海上平台及相关结构的涂料防护体系评价方案 ISO 20340—2009^[11]进行测试。根据我国湿热沿海地区环境条件,可对其进行修改,将其中 24 h 低温试验改为盐雾试验,紫外照射+冷凝水与盐雾试验共 168 h 为 1 周期,可选择试验周期为 10, 15, 20, 25 个周期。试验后按 GB/T 1766—2008^[12]的要求对人工模拟试验后的样品进行起泡、锈蚀、开裂、剥离、失光、变色等方面老化程度评级,并参考 ISO 4624—2002^[13]进行涂层拉开附着力测试。在拉力值 ≥ 5 MPa 之前,应没有出现底漆和底材失去附着力的情况。用适当方法除掉漆膜之后,测量腐蚀蔓延值 $M = (C - W) / 2$,其中, C 是腐蚀宽度的平均值, W 是线的初始宽度。要求循环试验后对于 2 mm 划痕涂的涂层体系 $M < 3$ 。

5 结论

研究表明,风电机组在我国湿热沿海特殊环境条件下运行时,由于高温、高湿、盐雾等环境因素影响,容易发生部件故障停机、控制失灵、短路、结构损坏等问题。需要分析风力发电设备在我国特殊环境下的服役环境条件数据及其对风电机组的影响,针对不同问题,从风机设计到风机生产上采取解决措施,以应对不同环境条件带来的危害。提出并确定相应的环境试验方法及技术要求,建立适用于我国特殊环境条件的风力发电设备环境技术标准体系,以确保在我国特殊环境下风电机组能够长期稳定运行。

参考文献:

- [1] HJ/T 27:1999, 固定污染源排气中氯化氢的测定 硫氰酸汞分光光度法[S].
HJ/T 27:1999, Stationary Source Emission—Determination of Hydrogen Chloride—Mercuric Thiocyanate Spectrophotometric Method[S].
- [2] ISA S71.04:1985, Environmental Conditions for Process Measurement and Control Systems: Airborne Contaminants[S].
- [3] ISO 9224—2012, Corrosion of metals and alloys—Corrosivity of atmospheres—Guiding values for the corrosivity categories

- [S].
- [4] 吴远伟. 台风对沿海风电机组的危害及对策[C]// 风电场防台风及运检研讨会. 广州, 2014.
WU Yuan-wei. Hazards and Countermeasures of the Coastal Wind Turbine from The Typhoon[C]// Symposium about Prevention and Running Inspection of the Typhoon. Guangzhou, 2014.
- [5] 董红云, 颜志伟, 王立鹏, 等. 风力发电机组防潮防凝露技术研究及应用[J]. 南京工程学院学报, 2012(3): 49-52.
DONG Hong-yun, YAN Zhi-wei, WANG Li-peng, et al. Study and Application on humidity Prevention and Dewing Prevention in Wind Turbine[J]. Journal of Nanjing Institute of Technology, 2012(3): 49-52.
- [6] ISO 12944-1: 1998, Paints and Varnishes-Corrosion Protection of Steel Structures by Protective Paint Systems[S].
- [7] 杨春燕, 瞿欢, 熊杰, 等. 风电叶片保护涂层的现状及应用[J]. 中国新技术新产品, 2011(17): 159.
YANG Chun-yan, QU Huan, XIONG Jie, et al. Present Situation and Application of Coating Protection of Wind Power Blades[J]. China New Technologies and Products, 2011(17): 159.
- [8] IEC 61400-24: 2010, Wind Turbines-Part 24: Lightning Protection[S].
- [9] GB/T 2423.2: 2008, 电工电子产品环境试验 第2部分: 试验方法 试验B: 高温[S].
GB/T 2423.2: 2008, Environmental Testing for Electric and Electronic Products-Part 2: Test B: High Temperature[S].
- [10] 许雪冬, 黄开云. 我国海上风力发电设备环境条件与技术要求分析[J]. 环境装备工程, 2013, 10(5): 42-47.
XU Xue-dong, HUANG Kai-yun. Analysis of Environmental Conditions and Requirements for Offshore Wind Power Equipment in China[J]. Equipment environmental engineering, 2013, 10(5): 42-47.
- [11] ISO 20340: 2009, Paints and Varnishes-Performance Requirements for Protective Paint Systems for Offshore and Related Structures[S].
- [12] GB/T 1766: 2008, 色漆和清漆 涂层老化的评级方法[S].
GB/T 1766: 2008, Paints and Varnishes-Rating Schemes of Degradation of Coats[S].
- [13] ISO 4624: 2002, Paints and Varnishes-Pull-off Test for Adhesion[S].

(上接第 115 页)

- sion Technology Applications in The Marine Platform Anticorrosion[J]. Chemical Engineer, 2013(2): 53-55.
- [11] 张海军, 胡卫东, 刘宝安, 等. 达克罗涂层防腐技术及应用[J]. 电镀与精饰, 2013, 35(7): 28-32.
ZHANG Hai-jun, HU Wei-dong, LIU Bao-an, et al. Dacroment Anti-corrosion Technology and Its Application[J]. Plating and Finishing, 2013, 35(7): 28-32.
- [12] 王俊芳, 杨晓然. 军用防腐涂料涂装的发展探讨[J]. 装备环境工程, 2005, 2(6): 51-53.
WANG Jun-fang, YANG Xiao-ran. Discussion on the Development of Military Corrosion Protective Coating Technology[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(6): 51-53.
- [13] 夏兰廷, 韦华. 海洋腐蚀环境下钢铁有机防护涂层的设计原则[J]. 太原重型机械学院学报, 2004, 25(2): 32-36.
XIA Lan-ting, WEI Hua. Design Principle of Organic Coatings for Steel & Iron Materials Exposed to Seawater Corrosion Environment[J]. Journal of Taiyuan Heavy Machinery Institute, 2004, 25(2): 32-36.
- [14] 汪国平. 船舶涂料与涂装技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998.
WANG Guo-ping. Marine Coatings and Coating Technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1998.
- [15] 桂泰江. 国外氟涂料的进展[J]. 现代涂料与涂装, 2006(9): 31-32.
GUI Tai-jiang. Progress in Fluoro Contained Coatings Abroad [J]. Modern Paint & Finishing, 2006(9): 31-32.
- [16] 张瑞珠, 卢伟, 严大考, 等. 水轮机叶片表面聚氨酯弹性涂层的抗磨蚀性分析[J]. 表面技术, 2014, 43(1): 11-15.
ZHANG Rui-zhu, LU Wei, YAN Da-kao, et al. Abrasion Resistance Analysis of Spray Polyurethane Elastic Coating on Turbine Blades[J]. Surface Technology, 2014, 43(1): 11-15.
- [17] 杨忠敏. 聚氨酯涂料及其应用前景[J]. 涂装与电镀, 2011(6): 14-17.
YANG Zhong-min. Polyurethane Coatings and Application Prospect[J]. Painting & Electroplating, 2011(6): 14-17.
- [18] 文邦伟. 日本重防蚀涂装工艺概况[J]. 表面技术, 2005, 34(4): 15-17.
WEN Bang-wei. Survey of Heavy Anticorrosive Painting Process in Japan[J]. Surface Technology, 2005, 34(4): 15-17.