

我国海上风力发电设备环境条件与环境技术要求分析

许雪冬, 黄开云

(中国电器科学研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 我国海洋环境条件与欧洲海洋环境条件存在明显差异, 这对我国海上风电设备提出特殊要求。通过分析影响我国海上风电设备的环境条件, 并研究各种环境因素对设备的具体影响, 提出各关键设备需要通过的环境试验认证。最后, 针对各种环境因素影响, 提出需要采取的防护措施, 为制定针对我国海上特殊环境条件的风力发电设备环境技术标准提供依据。

关键词: 风力发电设备; 海上; 标准; 环境条件; 环境试验; 技术要求

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2013.05.008

中图分类号: TM315; X820.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)05-0036-08

Analysis of Environmental Conditions and Requirements for Offshore Wind Power Equipment in China

XU Xue-dong, HUANG Kai-yun

(China National Electric Apparatus Research Institute Co., Ltd, Guangzhou 510663, China)

Abstract: There is significant difference between marine environmental conditions of our country and Europe. Special requirements were put forward for offshore wind power equipment in China. Environmental conditions influencing offshore wind power equipment of our country were analyzed and the specific influences of various environmental factors were studied. It was put forward that key equipment need to pass environmental testing certification. Protective measures needed were put forward according to various environmental factors. The purpose was to provide reference for drafting environmental technology standard of China offshore wind power generation equipment for special environmental conditions.

Key words: wind power generation equipment; offshore; standard; environmental condition; environmental testing; technical requirement

通过国家多年的持续支持, 我国在风电科技领域取得了长足进步, 但与国际先进水平相比, 还存在较大差距。基于我国风电产业现状及国内外趋势,

我国在风电科技领域仍面临一系列挑战, 主要表现在先进风电装备自主设计和创新能力有待加强, 风电行业公共测试体系刚刚起步, 风电标准、检测和认

收稿日期: 2013-05-26

作者简介: 许雪冬(1988—), 女, 助理工程师, 主要研究方向为环境试验标准化。

通讯作者: 黄开云(1964—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为环境条件与环境试验标准化。

证体系有待进一步完善等方面。我国已参考国际惯例初步建立了风电标准、检测和认证体系,但鉴于我国特殊的环境条件与其它国家有一定差别,需根据我国国情进一步完善。

1 我国海上风电存在的主要问题

我国海岸线长,海域面积辽阔,海上风能储量约是陆上风能储量的3倍,可开发利用的风能储量约7.5亿千瓦,发展海上风电的空间巨大,但海上风电不是简单地将陆上风电搬到海上。相对陆上风电,海上风电所处的服役环境更为严酷,对海上风电设备设计制造、建设施工、运行维护等方面都提出更高要求。目前,我国海上风电各项技术均处于起步阶段,还存在诸多的技术难题,主要包括以下内容。

1) 海上风电基本上还没有形成一套独立的设计方法、标准和检测、安装、运行和维护体系,海上风电产业体系有待进一步健全。

2) 海上环境条件恶劣,海上风机对防腐蚀等要求比陆上风机更为严格,同时,运行维护成本也较高。

3) 我国海洋环境条件与欧洲海洋环境条件存在明显差异,这就对我国海上风电机组提出特殊要求。

4) 在我国的海洋区,不同区域的地质条件差异

很大,包括海上洋流、气候条件等,这样给海上风电机组基础工程设计及施工带来更大难度。

2 影响海上风电的主要环境因素

国际风电行业标准主要来自德国、丹麦和国际电工委员会,这些标准主要是以德国和丹麦的条件及经验制订的。对比分析 IEC 61400-3^[1]、德国劳氏船级社(GL)《海上风力发电机组认证规范》^[2]、中国船级社《海上风力发电机组认证规范》^[3]对海上风力发电机组环境条件的说明,可将环境条件划分为风况、海洋条件和其他环境条件。一般情况下,下列其他环境条件应考虑且需要在设计文件中说明相应的措施:1)空气温度;2)相对湿度;3)空气密度;4)水密度;5)水温度;6)水盐度;7)太阳辐射;8)降雨、冰雹、覆冰和积雪;9)化学活性物质;10)机械活性物质;11)雷击;12)地震;13)海床变化;14)冲刷;15)腐蚀;16)运输。

根据以上国内外海上风电机组标准对环境条件的要求,并参考国内外环境条件标准(主要是 GB/T 4796, GB/T 4797, GB/T 4798 和 IEC 60721 系列标准)对各种环境参数组的分等分级的方法,可将我国风电机组的海上特殊环境条件按表1分为六类,具体环境因素内容见表1。

对我国四大海域展开气候数据的分析和统计,

表1 影响海上风电的环境因素

Table 1 Environment factors influencing offshore wind power generation equipment

环境条件类型	环境因素
气候条件	空气温度(年最低/最高)、湿度、空气压力(最高/最低)、太阳辐照强度、降水强度、喷水、海浪、风速、凝露、冰雹、结冰、结霜、雷暴
生物条件	微生物(霉菌、真菌等)、动物(鼠类、蚁类、鸟类等)、海洋生物(大型海洋生物、海藻、贻贝、藤壶、牡蛎、苔藓虫)
化学活性物质条件	盐雾
机械活性物质条件	砂、尘(漂浮、沉积)
水文条件	海水表层温度(最低/最高)、海水表层最大盐度、最大潮差、波浪(最大波高/周期)、流水速率、海水表层速度、海冰厚度
机械条件	振动、冲击、摇摆、倾斜

并参考 GB/T 14092.4—2009^[4]对各种环境参数分级的方法,得出风力发电设备的气候环境参数及其等级(见表2)。设计方在选择设计值时,应考虑诸多气

候条件同时出现的可能性。1年重现期或更短时间正常范围内的气候变化,应不影响海上风力发电机组的正常运行。

表2 气候条件等级及环境参数
Table 2 Climatic conditions level and environmental parameters

环境参数		K1	K2	K3	K4
		渤海	黄海	东海	南海
空气温度/℃	年最低	-20	-20	-10	5
	年最高	35	35	35	40
相对湿度≥95%时的最高温度/℃		25	25	28	28
空气压力/ kPa	最低	100	100	99	99
	最高	103	103	102	102
太阳辐照强度/(W·m ⁻²)		1000		1200	
除雨以外 其他	喷水			3	
水源/(m·s ⁻¹)	海浪			10	
最大风速/(m·s ⁻¹)				30,50	
凝露				有	
结冰和结霜		有	有	有	—
雷暴		有	有	有	频繁

3 环境因素对风力发电设备的影响

风力发电设备在我国海上特殊环境条件下运行

时,容易发生部件故障停机、控制失灵、短路等问题,影响整个风力发电设备的正常稳定运行。通过收集资料并结合环境适应性的研究经验,得出各种环境因素对海上风力发电设备的主要影响分析(见表3)。

表3 环境条件对风电发电设备的主要影响
Table 3 Major effect of environmental conditions on wind power generation equipment

环境条件类型	环境因素	对风力发电设备的影响
气候条件	温度	低温会引起零件、材料发生龟裂、脆化、可动部卡死、特性改变 高温会引起零件、材料发生软化、效能降低、特性改变、潜在破坏、氧化
	湿度	湿度的作用下,可能会对构件造成腐蚀,影响结构性能 湿度导致电气部件的绝缘材料电阻和热性能降低
	空气压力	低气压引起电器部件外绝缘强度降低、发生电弧或电晕放电造成设备失灵或工作不稳定
	太阳辐射	加速设备的老化
	风速	风速过大时风电设备不能正常运行,大风导致风电机组倒塌事件
	结冰和结霜	叶片结冰会导致风电设备无法正常运行
	雷暴	雷暴会造成叶片或机身损坏、发电机绝缘击穿、控制元器件烧毁
生物条件	鼠类	鼠类咬坏电线/电缆,引起停电、短路或通讯故障等问题
化学活性物质条件	盐雾	盐雾导致风电机组发生腐蚀,严重时会导致电气设备等毁坏
机械活性物质条件	砂、尘	砂砾会导致叶片、轴承、齿轮等机械部件的加速磨损
机械条件	振动、冲击	振动会导致叶片断裂、发电机和齿轮箱发生故障等问题

4 风力发电设备环境试验与技术要求

向国内几十家风电企业发送调查问卷,就风力发电设备在我国海上服役时各部件应通过的环境试

验进行调研。通过对调研反馈表进行分析,各关键部件应通过的环境试验见表4。

在沿海和海上区域服役的风力发电机组的服役环境与其他地区相比具有其特殊性。其中很重要的一点是在沿海和海上区域空气不仅湿度大,还

表4 各部件应通过的环境试验

Table 4 Components should pass environment tests

序号	部件	环境试验
1	主控制系统	温度变化试验、湿热试验、盐雾试验、霉菌试验、雷击试验、振动试验
2	发电机	温度变化试验、湿热试验、盐雾试验、雷击试验、振动试验
3	变流器	温度变化试验、湿热试验、盐雾试验、霉菌试验、雷击试验、振动试验
4	变桨控制系统	温度变化试验、湿热试验、盐雾试验、霉菌试验、雷击试验
5	偏航系统	湿热试验、凝露试验、盐雾试验、霉菌试验、振动试验
6	齿轮箱	湿热试验、凝露试验、盐雾试验、霉菌试验、振动试验
7	测风系统	湿热试验、水试验、盐雾试验、霉菌试验、振动试验、雷击试验
8	叶片	温度变化试验、湿热试验、模拟太阳辐射试验、盐雾试验、雷击试验
9	塔架	低温试验、模拟太阳辐射试验、盐雾试验、振动试验

含有大量海水蒸发产生的盐分,形成了浓度很高的盐雾。在湿润的空气中,盐雾电离出大量氯离子,氯离子穿透金属表面的防护膜与内部金属发生化学反应,另外氯离子具有一定的水合能,容易吸附在设备表面的孔隙和缝隙,导致金属材料的零部件腐蚀。电气设备内部的线圈和触头腐蚀后,导致电接触不良,使电气设备发生短路或绝缘性能下降,给整个风电机组的安全运行带来不利影响。下面用盐雾试验的选择作为例子来说明各环境试验的选择方法。

GB/T 2423 系列标准是为产品规范制定者或产品试验者提供一系列统一和可再现的环境(主要是气候和机械强度)试验方法。电气、机电、电子设备和装置,及其组件、分组件、元件都适用于本系列标准。在对海上风电机组的耐环境影响进行评估时,可参照本系列标准选取相应的试验方法,并对试验中或试验后的试验样品性能进行评价。

GB/T 2423.18—2012^[5]适用于在预定耐受含盐大气的元件或设备,试验时依据其耐受程度选用相应的严酷等级。其中严酷等级(1)和(2)适用于试验在海洋环境或在近海地区使用的产品。严酷等级(1)适用于试验在大部分使用寿命期间暴露于这种环境的产品。严酷等级(2)适用于试验可能经常暴露于海洋环境、但通常会受封闭物保护的产品。它们通常在元件质量保证程序中用作普通腐蚀试验。风力发电机组的各设备依据其暴露场所,可分为有气候防护场所和无气候防护场所。有气候防护场所的设备(包含变流器、主控制系统、发电机、变桨电机、偏航电机等)宜采用严酷等级(2)。试验前,按规定测

量试样的绝缘电阻和进行功能试验。试样按使用状态放入盐雾箱内,在15~35℃温度条件下连续喷雾2h;喷雾过程结束后,将受试设备按使用状态放入温度为 (40 ± 2) ℃,相对湿度为90%~95%的湿热箱内,历时20~22h。试验期间设备不运行。试验结束后,将受试设备置于正常大气条件下恢复1~2h,紧接着进行绝缘电阻测量和性能试验。

变流器的绝缘电阻应满足表5的要求,介电性能应满足在正常试验大气条件下,变流器各回路能承受波形1.2/50 μs的脉冲电压,不得出现击穿、闪络、打火花现象,或变流器各回路经工频耐压试验后无击穿闪络及元件损坏现象。

表5 变流器绝缘电阻

Table 5 Insulation resistance of current transformer

$(U_i/\sqrt{2})/V$	试验后最低绝缘电阻值/MΩ
≤60	1
>60	10

主控制系统绝缘电阻应满足在系统中带电回路之间及带电回路与地之间,用绝缘测量仪器进行绝缘电阻测量,测得的绝缘电阻符合表6的要求。介电强度满足冲击耐受电压符合GB/T 3797—2005^[6]第4.8.2条规定的要求,工频电压满足GB/T 3797—2005第4.8.3条规定的要求。

发电机、变桨电机、偏航电机的绝缘电阻应符合GB/T 7060—2008^[7]中5.7.1的要求。

GB/T 2423.17—2008^[8]适用于评定保护性涂层的质量以及均匀性。风力发电机组机舱内外的外

表6 主控制系统绝缘电阻
Table 6 Insulation resistance of main control system

设备	额定工作电压 U_n/V	最低绝缘电阻值/ $M\Omega$
用于控制、保护、安全和内部通信的所有设备、计算机和其他电子设备	≤ 60	10
	> 60	100
其他电气设备	≤ 250	100
	(250, 1000]	100
	(1000, 1500]	100

露于空气中的金属电镀件和化学处理件应按该标准进行试验。各种零件可依据表7进行试验并进行合格评判。

5 环境影响的防护措施

通过与国内主要知名风电行业企业开展交流活动,并向国内几十家风电企业发送调查问卷,就风力发电设备在我国海上特殊环境条件下的防护措施展开调研。汇总分析对各种环境因素的主要防护措施见表8。

表7 盐雾试验
Table 7 Salt fog test

底金属材料	零件类别	镀层类别	合格要求	试验时间/h
碳钢	一般结构零件			
	紧固零件	锌	未出现白色或灰黑色、棕色腐蚀产物	48
	弹性零件			
合金钢	紧固零件	锌铬涂层	未出现白色或灰黑色、棕色腐蚀产物	720
	一般结构零件	镍、铬	未出现灰白色或绿色腐蚀产物	96
铜和铜合金	一般结构零件			
	紧固零件	镍	未出现灰白色或绿色腐蚀产物	48
	弹性零件			
		镍	未出现灰白色或绿色腐蚀产物	48
	电联零件	锡	未出现灰黑色或绿色腐蚀产物	48
铝和铝合金		银	未出现灰白色或绿色腐蚀产物	24
	一般结构零件	阳极氧化	未出现灰白色产物	48

表8 风力发电设备在我国海上特殊环境下服役的防护措施
Table 8 Protective measures of offshore wind power equipment in China

环境因素	防护措施
低温	自动投切的加热装置和使用低温材料等
高温	采用强制散热、安装空冷和水冷装置、局部地方采用隔热材料等
湿热	采用防潮、采用适当的加热去湿措施等
太阳辐射	采用耐紫外线老化的材料、外壳采用适当涂层等
结冰和结霜	设置自动投切的加热装置等
盐雾	采取涂料保护或热喷涂金属保护、增加腐蚀裕量、阴极保护等
振动	采用特殊的减振设计、对设备进行绑扎紧固、设备采用弹簧或橡胶等较好的隔震防振措施
雷电	等电位连接和屏蔽,协调配合的SPD防护等
台风	考虑台风和特殊的阵风、极端风向变化和湍流等,从设计的角度解决台风环境下的安全问题

6 结语

针对风力发电设备在我国海上服役时环境条件的特殊性,提出了适合我国海上风力发电设备的环境条件参数组及等级;分析这些环境条件对设备造成的具体影响,提出了各部件应通过的环境试验;并针对各种环境因素的影响,分析了需要采取的防护措施。为制定针对我国海上特殊环境条件的风力发电设备环境技术标准提供依据。该标准的制定能规范和提升我国风力发电设备在海上恶劣环境地区的环境适应性能,促进风力发电设备在海上恶劣环境下长期、稳定运行。

(上接第31页)

理统计理论为基础,结合海上风机功能需求和工作想定,将海上风机重大的可靠性事故后果作为分析对象,开展优化分析。文中以海上风机定性分析故障结果为输入,利用产品累积发生概率数据基础,定量求解海上风机可靠性顶层设计参数结果。

在海上风机定性研究结果的基础上,结合Isograph可靠性分析工具,开展了基于概率的海上风机故障数据求解和分析技术研究。主要研究包括:

1) 以海上风机定性分析研究结果为输入,开展故障树最小割集的可靠性参数定量计算方法研究。

2) 在最小割集定量分析结果的基础上,进行海上风机整机可靠性定量分析技术研究。

3) 开展共因故障技术研究,以解决在整机级故障树中,因产品特性、环境诱发、载荷变化、人为差错等外因或内因产生的共因故障对海上风机安全性和可靠性累积发生概率的影响。

3 结语

在借鉴其它行业可靠性设计分析工作的基础上,阐述了适用于我国海上风力发电机组的可靠性分析评估方法,并在XE-5 MW海上风机上应用真实数据进行验证。验证结果表明,各个可靠性分析方法与真实情况贴近。可应用文中分析结果,进一步形成结合海上风机型号特点的可靠性工作程序、方法、途径,以及相应的工作指南。

参考文献:

- [1] IEC 61400-3—2009, Wind Turbines—Part 3: Design Requirements for Offshore Wind Turbines[S].
- [2] Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines[K]. Germany: Germanischer Lloyd, 2005.
- [3] 海上风力发电机组认证规范[K]. 中国:中国船级社, 2012.
- [4] GB/T 14092. 4—2009, 机械产品环境条件 海洋[S].
- [5] GB/T 2423. 18—2012, 环境试验 第2部分:试验方法 试验Kb:盐雾, 交变(氯化钠溶液)[S].
- [6] GB/T 3797—2005, 电气控制设备[S].
- [7] GB/T 7060—2008, 船用旋转电机基本技术要求[S].
- [8] GB/T 2423. 17—2008, 电工电子产品环境试验 第2部分:试验方法 试验Ka:盐雾[S].

参考文献:

- [1] 秦海岩, 庄岳兴, 高辉, 等. 中国海上风电和大型风电基础发展战略研究[R]. 北京:中国可再生能源规模化发展项目办公室, 2009.
- [2] 李晓燕, 余志. 海上风力发电进展[J]. 太阳能学报, 2004, 25(1), 78—83.
- [3] 江建军. 浅析海上风电场运维安全管理特殊性[J]. 风能产业, 2006(6): 16—19.
- [4] IEC 61400-3—2006, Design Requirements of Offshore Wind Turbines[S].
- [5] 俞敏雯, 曾辉, 刘正高. 系统可靠性评估技术发展综述[J]. 质量与可靠性, 2005(2): 32—35.
- [6] 张安. 地铁车辆的可靠性分配和可靠性预计[J]. 质量与可靠性, 2006(7): 13—17.
- [7] IEC 61400-22—2010, Conformity Testing and Certification [S].
- [8] IEC 61400-12-1—2005, Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines[S].
- [9] IEC 61400-13, Wind Turbine Generator Systems—measurement of Mechanical Loads[S].
- [10] 李瑞莹, 康锐, 党伟. 机械产品可靠性预计方法的比较与选择[J]. 工程机械, 2009(5): 53—57.
- [11] 刘惟信. 机械可靠性设计[M]. 北京:清华大学出版社, 1996.
- [12] GJB/Z 299C—2006, 电子设备可靠性预计手册[S].
- [13] 张大钢, 刘雁潮, 韩静. 故障模式影响及危害性分析(FMECA)技术标准发展和应用研究[J]. 质量与可靠性, 2013(3): 48—51.
- [14] GJB/Z 1391—2006. 故障模式、影响及危害性分析指南[S].
- [15] GJB/Z 768A—1998. 故障树分析指南[S].