

海上风机可靠性评估

李颖峰, 田诗杰

(湘电风能有限公司 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: 依据国内外相关可靠性设计标准以及 IEC 61400 系列风力发电机组开发标准, 结合 XE-5 MW 海上风机设计开发, 建立了整套的海上风力发电机组可靠性设计评估流程, 制定了适用于海上风力发电机组工程研发的可靠性建模、可靠性分配、可靠性预计、FMECA 和 FTA 的分析方法, 并以上述可靠性设计评估流程和方法对 XE-5 MW 海上风机开展了可靠性定性和定量评估。

关键词: 海上风机; 可靠性评估; 故障模式; 定性分析; 定量分析

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2013.05.006

中图分类号: TM732; TM315 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)05-0027-05

Reliability Evaluation of Offshore Wind Turbine

LI Ying-feng, TIAN Shi-jie

(State Key Laboratory of Offshore Wind Power Generation Technology and Detection, XEMC Wind Power Company, Xiangtan 400101, China)

Abstract: According to reliability design standards and IEC61400 series design standards of wind turbines, on the basis of development of XE5-MW offshore wind turbine, a set of reliability design and review process for offshore wind turbine was developed, including the method of reliability modeling, allocation, prediction, FMECA, and FTA. With these process and methods, reliability qualitative and quantitative evaluation was carried on XE-5MW offshore wind turbine.

Key words: offshore wind turbine; reliability evaluation; failure mode; qualitative evaluation; quantitative evaluation

目前, 世界上大规模的海上风场开发方兴未艾, 海上风力发电机组在新增装机中所占比重越来越大^[1-2]。海上风机的工作环境与传统陆上风机相比更为严苛, 主要表现在: 1) 海水及盐雾腐蚀问题; 2) 风力发电机组不仅要承受风载还要承受不同程度的浪载所带来的影响; 3) 海冰冲击; 4) 在中国周边的

西北太平洋、南海一带海域及沿海地区还存在着台风等等^[3]。另外, 海上风电场施工难度大、成本高, 因难于接近而维护极为困难, 致使海上风电设备一旦发生故障将带来严重的经济损失。基于以上原因, 必须对中国海上风力发电机组急需解决的可靠性关键技术进行研究, 为我国大规模海上风电开发奠定

收稿日期: 2013-05-26

作者简介: 李颖峰(1979—), 男, 河北邯郸人, 硕士, 从事风力发电机组有关的模态分析、振动测试分析、型式测试、型式认证、可靠性分析等工作。

坚实的技术及工程基础。

1 海上风力发电机组可靠性分析方法

1.1 可靠性建模

XE-5 MW 海上风机由机械、电控和电气三大分系统构成。机械分系统是风机系统的基本组成部分,分成支撑总成、驱动链总成和叶轮总成。其主要功能是支撑驱动链和叶轮,为电控和电气分系统提供安装环境,为机组活动部件提供回转支撑,传递机械扭矩及载荷,捕获风能等。电控分系统实现机组的自动运行,主要由轮毂控制总成、机舱控制总成、

塔基控制总成、变桨总成、偏航总成以及相应的传感器组成。电气分系统,用以实现机械能-电能的转换、整机雷电保护以及照明等功能。

结合 IEC 61400-3 中载荷工况的定义^[4],XE-5 MW 海上风机主要的任务剖面有待机和发电模式。可靠性建模方法是多种多样的,有静态建模技术、动态建模技术以及仿真模型、可靠性与性能一体化模型^[5]。由于 RBD(可靠性数据块图表)方法简便直观,可以由功能逻辑框图直接转换得到,因此笔者采用 RBD 方法建模,以发电运行为例,说明系统可靠性建模情况。图 1 为系统在发电模式下的功能逻辑框图。图 2—图 5 为该模式下的系统及分系统 RBD。

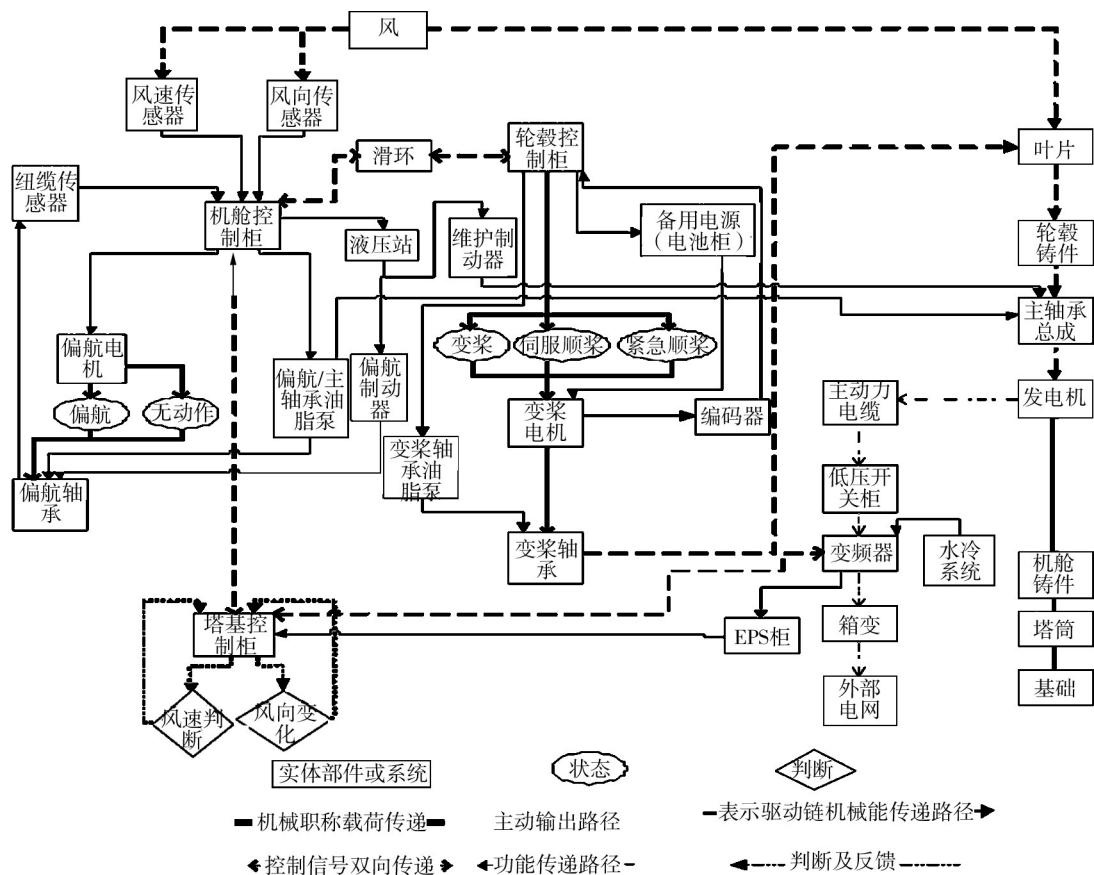


图 1 发电模式下功能逻辑框图

Fig. 1 Functional logic diagram under power output mode



图 2 XE-5 MW 海上风机任务可靠性框图

Fig. 2 Task reliability block diagram of XE-5MW offshore wind turbine

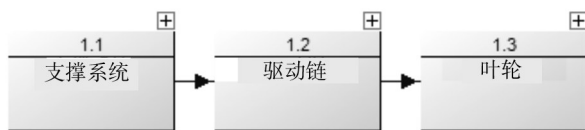


图 3 机械分系统任务可靠性框图

Fig. 3 Task reliability block diagram of mechanical subsystem

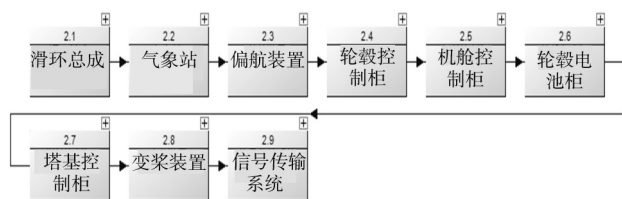


图4 电控分系统任务可靠性框图

Fig. 4 Task reliability block diagram of electronic control subsystem

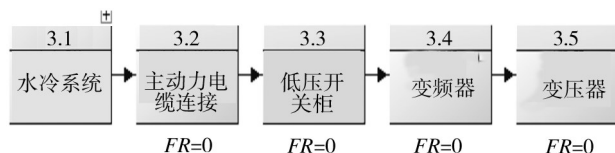


图5 电气分系统任务可靠性框图

Fig. 5 Task reliability block diagram of electrical subsystem

1.2 海上风机可靠性分配

可靠性分配方法一般包括等分配法、评分分配

法、比例组合法、考虑重要度和复杂度的分配方法、余度系统的比例组合法等^[6]。由于XE-5 MW海上风机是包含机械、电气和电控分系统的复杂系统,从经济性的角度考虑,机械分系统的可靠性要求较高,即在20 a的寿命期内不需更换,同时,在设计中也能够保证其具有很高的可靠性水平;而电气和电控分系统因受到电力电子工业水平的限制,可靠性水平相对较低。然而,工程实际中,影响XE-5 MW海上风机可利用率水平的却是电控和电气分系统。由具有丰富工程经验的专家和技术人员参与的评分分配法,能够结合电气和电控分系统的复杂程度、技术水平、工作时间、环境条件、维护水平等信息,有效地在方案论证和初步设计阶段开展可靠性分配工作。表1为XE-5 MW海上风机电气和电控分系统可靠性分配结果。

可靠性分配应反复多次进行。在方案论证和初步设计工作中,分配是粗糙的。经粗糙分配后,应与经验数据进行比较和权衡,也可和不依赖于最初分配的可靠性预计结果相比较,来确定分配的合理性,

表1 电气和电控分系统可靠性分配

Table 1 Reliability allocation of electronic and electrical subsystem

ID	描述	可靠性分配	故障率分配	MTTF分配	数量
2	电控系统	6.065e-1	6.944e-4	1.44e+3	1
3	电气系统	6.065e-1	6.944e-4	1.44e+3	1
2.1	偏航装置	9.624e-1	5.328e-5	1.877e+4	1
2.2	气象站	8.21e-1	2.74e-4	3.65e+3	1
2.3	滑环总成	9.821e-1	2.505e-5	3.992e+4	1
2.4	轮毂电池柜	9.795e-1	2.877e-5	3.476e+4	1
2.5	轮毂控制柜	9.096e-1	1.315e-4	7.603e+3	1
2.6	机舱控制柜	9.505e-1	7.046e-5	1.419e+4	1
2.7	塔基控制柜	9.688e-1	4.404e-5	2.271e+4	1
2.8	变桨装置	9.613e-1	5.48e-5	1.825e+4	1
2.9	信号传输系统	9.91e-1	1.253e-5	7.938e+4	1
3.1	主动力电缆连接	9.939e-1	8.543e-6	1.171e+5	1
3.2	低压开关柜	9.57e-1	6.102e-5	1.639e+4	1
3.3	变频器	8.936e-1	1.562e-4	6.401e+3	1
3.4	水冷系统	7.136e-1	4.687e-4	2.134e+3	1

并根据需要重新进行分配。

1.3 海上风机可靠性预计

XE-5 MW海上风机是包含机械、电气和电控分系统的复杂系统。其涉及机械可靠性预计和电力电子器件可靠性预计。

1.3.1 机械可靠性预计

XE-5 MW研发过程严格遵循了IEC 61400-22^[7]中的型式认证要求。其整机载荷分析(整机动力学

仿真)和结构分析等设计工作严格遵循了IEC 61400-3^[4]的要求,同时其型式试验依据IEC 61400-12-1^[8]和IEC 61400-13^[9]等进行。因此,可以利用整机载荷分析和结构分析,得到精度足够的应力数据。机械部件的强度数据可由相关手册查得。结合应力-强度干涉模型和可靠度计算方法^[10-11],可以预计XE-5 MW机械分系统中部件的可靠度。机舱应力概率密度函数如图6所示,机舱可靠度为 $R=0.999\ 999\ 99$ 。

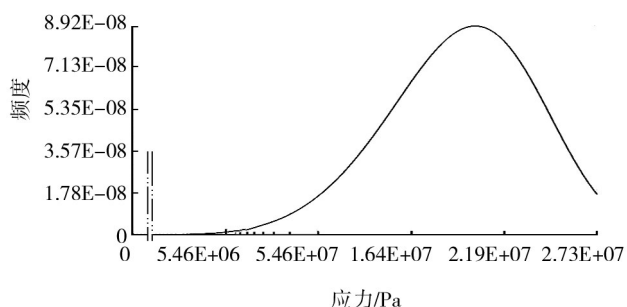


图6 机舱应力概率密度函数

Fig. 6 Stress probability density function of nacelle

1.3.2 电力电子器件可靠性预计

XE-5 MW 使用的元器件均符合工业标准并进行筛选,依据 GJB/Z 299C—2006^[12]进行预计。元器件质量等级依据元器件的选用、采购、批检验控制和 FRACAS 系统运行情况来确定。机组工作在风力资源较丰富的风场中,其环境温度在 $-30\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,环境类别为 GF-地面固定。经过分析,预计塔基控制柜的平均故障前时间 t_{MTTF} 为 31 399.4 h,其中塔基给机舱供电的空气开关对该系统的故障影响最大,

其贡献率为 31.95%。

1.4 海上风机故障模式影响及危害性分析 (FMECA)

目前 FMECA 的执行标准有多种^[13],结合 XE-5 MW 特点,参考 GJB 1391^[14]的通用要求,决定采用风险优先数法(Risk Priority Number, RPN)以及危害度矩阵法 2 中分析方法。RPN 将机组各故障模式的发生频度、严重度和检测度等级相乘,将得到的数值从大至小依次排列,通过制定的临界值,确定 XE-5 MW 各故障模式建立拯救措施的范围及优先顺序。通过危害度矩阵的方法,分析 XE-5 MW 是否存在不可接受的故障。将故障概率等级划分为 5 个等级,以 10 d 之内为 1 个等级,每增加 1 个量级为 1 个等级;将严酷度类别划分为 4 个等级,以造成 1000 元损失为 1 个等级,每增加 1 个量级为 1 个等级;将故障概率等级划分为 5 个等级,以危害度 $<1\times 10^{-6}$ 为 1 个等级,每增加 1 个量级为 1 个等级,最终制定了以下 XE-5 MW 风力发电机组 FMECA 表单,见表 2。

表2 FMECA 表格

Table 2 FMECA table

失效模式				失效机理			失效影响			现行设计				实施措施及后果				
编 码	产 品 名 称	功 能 要 求	任 务 阶 段	ID	失 效 模 式	失 效 机 理	失 效 来 源	局 部 影 响	高 层 影 响	最 终 影 响	严 重 度 S	控 制 预 防	频 度 检 测 O	检 测 度 D	R 建 议 措 施	实 施 措 施	S O D	RPN
				-0														结果

通过分析,得到 XE-5 MW 的危害性矩阵、I 和 II 类故障模式清单以及可靠性产品清单,确定了 XE-5 MW 海上风机可靠性关键产品的故障模式没有落在危害性矩阵的阴影区域。根据 I、II 类故障模式清单的分析结果,以故障模式危害度 6 为临界值对机组组成产品的危害度进行比较后,给出系统可靠性关键产品清单,见表 3。

1.5 海上风机故障树分析(FTA)

XE-5 MW 的变桨总成非常重要,它是保障机组正常运行以及安全的关键总成。因此分析中,将顶事件设定为变桨总成能够正常变桨和紧急变桨。参考 GJB/Z 768A^[15]的通用要求,结合 XE-5 MW 特点,开展故障树分析。

经过分析,XE-5 MW 变桨总成中没有一阶最小割集,共有 121 个二阶最小割集。通过对二阶最小割集的分析,可以找到出现次数较多的元器件,它们对故障树顶事件发生的影响概率最大,通过提高这些元器件的可靠性水平可以有效控制顶事件的发生(见表 4)。

2 海上风机可靠性评估

2.1 可靠性定性分析

海上风机可靠性和维修性设计与分析均是以“故障”、“缺陷”、“错误”为中心开展工作,将“故障”作为海上风机设计的固有质量特性,从不同角度和不同层面进行分析并解决问题。文中以“故障”为核

表3 XE-5 MW可靠性关键产品清单

Table 3 Key product of reliability of XE-5 MW

编号	系统名称	故障模式	严酷度类别	危害度
1	风力发电机	无法紧急收桨	II	12
2	电控系统	变桨驱动故障或要求紧急变桨	II	12
3	变桨伺服驱动器	过流	II	9
4	变桨装置	变桨驱动失电	II	6
5	变桨电机	无法正常工作	II	6
6	变桨伺服驱动器	无信号输入	II	6
7	速度编码器	信号异常	II	6

表4 底事件定性分析重要度

Table 4 Importance degree of bottom event qualitative analysis

编号	底事件名称	总次数	二阶	三阶	四阶	五阶
1	DC/DC斩波	1005	0	6	837	162
2	串流电阻52R1.1-支路3	380	2	270	108	0
3	变桨驱动控制逻辑模块(DC/DC)-支路3	380	0	2	324	54
4	电池组-支路3	380	2	270	108	0
5	开关58K4-支路3	380	2	270	108	0
6	SBP-支路3	380	0	2	270	108
7	受监测电池组-支路3	380	0	2	270	108

心问题,以海上风机整机为研究对象,应用系统工程和并行工程思维,将可靠性和维修性分析技术有机地结合到一起。

海上风机可靠性定性分析技术研究方案如图7所示,主要解决途径包括:

1) 分析建立海上风机功能需求和任务想定模型,包括功能系统/任务系统对应的信息、信息流图,建立功能系统/任务系统与信息层次图,逐层分析通用与专用信息与功能系统/任务系统关系模型,为可靠性后续分析奠定基础;

2) 结合故障机理分析,从海上风机整机出发,建立功能层次图,并划分关键性功能和关键系统;

3) 应用FMEA技术,参考GJB 1391^[14]的通用要求,结合海上风机工程实际,分析并建立完整的海上风机所有约定层次产品间的故障传播关系;

4) 按照GJB 768A^[15]的通用规则,开展故障树分析图形化建模技术研究,利用Isograph可靠性分析工具,通过树形结构表达海上风机整机可靠性模型的可视化研究结果。

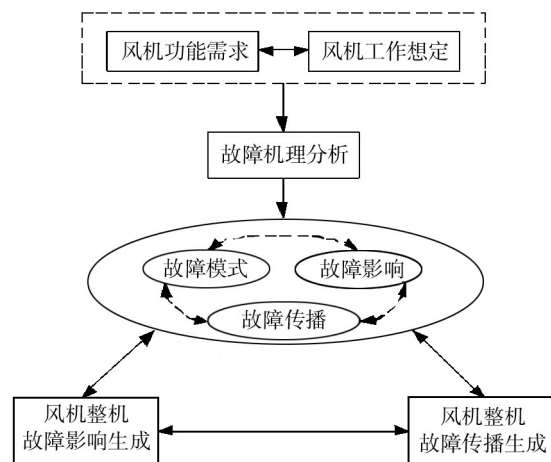


图7 海上风机可靠性定性分析技术途径

Fig. 7 Qualitative reliability analysis approach for offshore wind turbines

2.2 可靠性定量分析

海上风机可靠性定量设计和分析是以概率和数
(下转第41页)

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].