

极端海况下海上风电场应急机制与预防策略

董文强

国家电投集团徐闻风力发电有限公司，广东 湛江 524000

DOI:10.61369/EPTSM.2025030020

摘 要： 随着海上风电场向深远海发展，其面临极端海况的风险日益增加。本文深入剖析极端海况对海上风电场的影响，包括强风、巨浪、风暴潮等引发的风机结构损伤、基础破坏、电气系统故障、海缆受损及运维困难等问题。从应急响应机制构建方面，阐述了监测预警系统的关键作用及多部门联动应急体系的组建方式；在灾害预防策略上，探讨了基于可靠性设计的风机选型、基础加固措施、电气系统防护手段、海缆保护方法及运维保障策略等。旨在为海上风电场应对极端海况提供全面、有效的应对方案，提升其安全性与可靠性。

关 键 词： 海上风电场；应急响应机制；灾害预防策略

Study on Emergency Response Mechanism and Disaster Prevention Strategy of Offshore Wind Farm under Extreme Sea Conditions

Dong Wenqiang

Xuwen Wind Power Co., LTD. State Power Investment Group, Zhanjiang, Guangdong 524000

Abstract： As offshore wind farms expand into deeper waters, the risks associated with extreme sea conditions are increasing. This paper delves into the impact of extreme sea conditions on offshore wind farms, including structural damage to turbines, foundation failure, electrical system malfunctions, cable damage, and operational challenges caused by strong winds, huge waves, and storm surges. In terms of emergency response mechanisms, it highlights the critical role of monitoring and early warning systems and the methods for establishing a multi-departmental coordinated emergency system. Regarding disaster prevention strategies, it explores reliability-based turbine selection, foundation reinforcement measures, electrical system protection techniques, cable protection methods, and operational support strategies. The aim is to provide comprehensive and effective solutions for offshore wind farms to cope with extreme sea conditions, thereby enhancing their safety and reliability.

Keywords： offshore wind farms; emergency response mechanisms; disaster prevention strategies

引言

在全球气候变化的大背景下，极端天气事件的发生频率和强度呈上升趋势，使得海上风电场面临的极端海况威胁日益严峻。因此，深入研究极端海况下海上风电场的应急响应机制与灾害预防策略，对于保障海上风电场的安全稳定运行、促进海上风电产业的可持续发展具有至关重要的现实意义。

一、极端海况对海上风电场的影响

（一）强风对风机的影响

当海上风电场遭遇强风时，风机叶片承受的气动载荷会急剧增加。超过设计风速的强风可能导致叶片产生过大的弯曲变形、疲劳损伤甚至断裂。例如，在某些强台风袭击下，部分海上风机叶片出现了严重的裂纹，甚至完全折断脱落，不仅使风机丧失发电能力，断裂的叶片还可能对周边设备和人员造成严重威胁。同

时，强风引起的强烈振动会对风机的塔筒、机舱等结构部件产生巨大的应力，长期累积可能导致塔筒倾斜、机舱连接部件松动等问题，严重影响风机的结构完整性和稳定性。

强风环境下，风机的控制系统需要快速、准确地做出响应，以调节风机的运行状态，确保其在安全范围内运行。然而，极端强风可能会超出控制系统的设计能力，导致控制信号异常、传感器故障等问题。此外，强风还可能导致电气设备的绝缘性能下降，引发短路、跳闸等故障，进一步影响风机控制系统的正常

运行。

（二）风暴潮对海上风电场的影响

风暴潮会使海平面急剧上升，对位于浅海区域的海上风电场构成严重的淹没风险。当风暴潮水位超过风机基础的设计高程时，风机的基础、塔筒底部以及海上升压站等设施将被海水淹没。海水的浸泡会腐蚀金属结构部件，损坏电气设备，导致短路、漏电等故障，使风机和升压站无法正常运行。而且，长时间的淹没还可能对基础的稳定性产生不利影响，增加基础下沉、倾斜的风险。风暴潮引起的强大水流和冲击力，可能导致海上风电场的一些设施发生移位。

（三）极端海况对电气系统的影响

1. 电气设备短路与故障

极端海况下的强风、暴雨、海水飞溅等因素，容易导致电气设备的绝缘性能下降。在一些海上风电场，曾因极端海况导致海上升压站内的开关柜、变压器等电气设备发生短路故障，造成整个风电场停电事故。

2. 电力传输中断

海缆作为海上风电场电力传输的关键通道，在极端海况下极易受到损坏。强风、巨浪可能使海缆受到过度的拉伸、弯曲和磨损，导致绝缘层破裂、导体断裂，从而引发电力传输中断。

3. 极端海况对运维的影响

极端海况下，海上风浪大、海况复杂，给运维船舶的航行和作业带来极大困难。高海况会使船舶颠簸剧烈，增加船员晕船的风险，影响船员的操作能力和工作效率。同时，强风、巨浪还可能导致船舶偏离预定航线，难以靠近风机进行维护作业。在一些恶劣海况下，运维船舶甚至无法出海，导致风电场的日常巡检、设备维修等工作无法按时进行，使故障设备得不到及时修复，进一步扩大损失。^[1]

二、海上风电场应急响应机制

（一）监测预警系统

1. 气象与海况监测设备

为了及时准确地掌握极端海况的信息，海上风电场应配备先进的气象与海况监测设备。在气象监测方面，可安装气象桅杆，上面配备风速仪、风向仪、气压计、温度计、湿度计等传感器，实时监测风电场区域的风速、风向、气压、温度、湿度等气象参数。此外，还可利用卫星遥感技术、气象雷达等获取更广泛区域的气象信息，对台风、强风暴等极端天气的路径、强度进行预测。^[2]

2. 数据传输与分析处理系统

监测设备获取的大量气象与海况数据，需要通过可靠的数据传输系统及时传输到风电场的监控中心。可采用无线通信技术，如 4G、5G 通信网络，以及卫星通信等方式，确保数据传输的稳定性和及时性。在监控中心，建立数据处理与分析系统，利用大数据分析、人工智能等技术对传输过来的数据进行实时分析处理。通过建立数学模型，对极端海况的发展趋势进行预测，提前发出预警信息，为海上风电场的应急决策提供科学依据。

3. 预警发布与响应流程

当监测分析系统预测到极端海况即将来临，且可能对海上风电场造成威胁时，应立即启动预警发布机制。预警信息应通过多种渠道及时传达给风电场的所有工作人员、相关管理部门以及周边可能受影响的单位和人员。预警信息应包括极端海况的类型、预计到达时间、强度、可能影响的范围等详细内容。

（二）应急指挥与协调机制

海上风电场的应急响应工作涉及多个部门和单位，需要建立有效的多部门联动与协调机制。风电场内部应成立由运行维护、安全管理、工程技术、物资供应等部门组成的应急救援小组，明确各小组的职责和任务，确保在应急响应过程中能够协同作战。与气象部门保持密切联系，及时获取准确的气象预报信息，为应急决策提供依据；与应急管理部门协作，争取外部救援力量和物资支持，共同应对重大突发事件。通过建立定期的沟通协调会议制度、联合演练机制等，加强各部门之间的协作配合，提高应急响应的整体效率。

在应急响应过程中，信息的及时、准确共享至关重要。建立完善的信息共享与沟通渠道，确保风电场内部各部门之间、风电场与外部相关部门之间能够实时传递信息。除了利用传统的电话、传真等通信方式外，还应充分利用现代信息技术，如建立应急管理信息平台，实现数据的实时共享和交互。通过该平台，应急指挥中心可以实时了解各应急救援小组的工作进展、现场设备设施的损坏情况、人员伤亡情况等信息；同时，各部门也能够及时获取应急指挥中心发布的指令和决策，以及外部相关部门提供的支持信息。

（三）应急救援资源储备与调配

1. 应急救援设备与物资储备

海上风电场应根据可能面临的极端海况风险，储备充足的应急救援设备与物资。在应急救援设备方面，应配备专业的海上救援船舶，船上配备先进的导航设备、通信设备、救生设备以及必要的维修工具和设备。同时，储备一定数量的直升机，用于在紧急情况下快速运送救援人员和物资，以及进行人员搜救。^[3]

在物资储备方面，应储备足够的救生衣、救生圈、灭火器、消防水带、应急照明设备、备用电源、电缆抢修材料、风机零部件等物资。此外，还应储备一定数量的食品、饮用水、药品等生活物资，以满足应急救援人员和受困人员的基本生活需求。应急救援设备与物资应定期进行检查、维护和更新，确保其处于良好的可用状态。^[4]

2. 应急救援人员培训与组织

应急救援人员应包括运行维护人员、安全管理人员、专业技术人员以及经过专业培训的海上救援人员等。对应急救援人员应定期进行培训，如海上救生、消防灭火、设备抢修、伤员急救等；同时，还应加强应急救援人员的安全意识教育和心理素质训练，提高其在紧急情况下的应对能力。^[5]

3. 资源调配机制与流程

制定科学合理的应急救援资源调配机制与流程，确保在极端海况发生时，应急救援资源能够得到及时、有效的调配。应急指

挥中心应根据现场的实际情况和救援需求，统一调配应急救援设备、物资和人员。在资源调配过程中，应遵循“先急后缓、保障重点”的原则，优先满足对保障人员生命安全和恢复风电场关键设备运行最为紧迫的需求。

建立资源调配的信息化管理系统，实时掌握应急救援资源的储备情况、使用情况和调配状态。通过该系统，应急指挥中心可以快速查询和调度所需的资源，提高资源调配的效率和准确性。同时，加强对资源调配过程的监督和管理，确保资源调配的公正、合理，避免资源浪费和滥用。

（四）应急预案制定与演练

定期组织应急演练是检验和提高海上风电场应急响应能力的重要手段。应急演练应模拟各种可能发生的极端海况场景，如台风、巨浪、风暴潮等，对应急预案的各个环节进行全面检验。在演练前，应制定详细的演练方案，明确演练目的、内容、流程、参与人员以及演练的组织与保障措施等。演练过程中，应注重实战性和真实性，尽可能模拟实际应急救援中的各种困难和挑战，如恶劣的海况、通信中断、设备故障等，锻炼应急救援人员的应对能力和团队协作能力。演练结束后，应及时对演练效果进行评估和总结，分析演练过程中存在的问题和不足之处，提出改进措施和建议，对应急预案和应急响应机制进行完善。通过不断地组织应急演练，提高海上风电场全体人员的应急意识和应急技能，确保在极端海况发生时能够迅速、有效地开展应急救援工作。^[6]

三、海上风电场灾害预防策略

（一）基于可靠性设计的风机选型与布局

合理的风机布局不仅能够提高风电场的发电效率，还能增强其应对极端海况的能力。在进行风机布局设计时，需要综合考虑风资源分布、海流情况、海底地形以及极端海况的影响。利用计算流体力学（CFD）等技术，模拟不同风机布局方案在不同风向、风速条件下的尾流效应，优化风机间距与排列方式。对于易受强风、巨浪冲击的区域，可适当增大风机间距，减少相邻风机在极端海况下的相互干扰与碰撞风险。同时，依据海流流向调整风机布局，降低海流对风机基础的冲刷作用，提高基础稳定性。^[7]

（二）风机基础加固与防护

针对不同的地质条件和极端海况特点，对风机基础结构进行优化设计。对于单桩基础，可通过增大桩径、增加桩长或采用变

截面设计，提高基础的抗倾覆和抗水平位移能力。在桩周土体易受冲刷的区域，可设置防冲刷裙板或抛石防护，减少海浪、海流对基础周围土体的侵蚀。对于重力式基础，优化基础的形状和尺寸，增加基础的重量和稳定性，同时在基础表面设置防滑、防腐蚀涂层，延长基础的使用寿命。

导管架基础则可通过加强导管架的支撑结构，提高其在极端海况下的承载能力。采用有限元分析方法，对基础结构在不同荷载工况下的应力、应变分布进行计算，找出结构的薄弱环节，进行针对性的加强设计。此外，还可考虑采用新型基础结构形式，如浮式基础与固定式基础相结合的混合基础，提高风机在极端海况下的适应性和稳定性。

（三）电气系统防护与冗余设计

海上风电场的电气设备长期处于潮湿、盐雾、强风等恶劣环境中，极易受到损坏。因此，对电气设备应采取严格的防护措施。选用具有高防护等级（如 IP67 及以上）的电气设备，确保设备在潮湿、盐雾环境下仍能正常运行。对电气设备的外壳进行密封处理，防止海水、潮气侵入设备内部；在设备内部安装除湿装置，保持设备内部干燥。

为提高电气系统在极端海况下的可靠性，采用冗余设计理念。在关键电气设备和系统中设置备用设备或备用线路，当主设备或主线路出现故障时，备用设备或线路能够自动切换投入运行，保障风电场的正常供电。^[8]

（四）海缆保护与监测

建立完善的海缆监测系统，实时监测海缆的运行状态。采用分布式光纤传感技术，监测海缆的温度、应变等参数，及时发现海缆的异常情况，如局部过热、机械损伤等。通过海缆在线监测系统，将监测数据传输到监控中心，利用数据分析软件对数据进行处理和分析，预测海缆的故障风险。在海缆保护方面，在海缆路由上方设置明显的标识，如浮标、警示桩等，提醒过往船舶注意避让，防止船舶抛锚、拖网等行为对海缆造成损坏。在海缆易受外力破坏的区域，如靠近港口、航道的区域，可设置海缆保护区，限制船舶的航行和作业活动。^[9]

（五）运维保障策略

制定科学合理的运维计划，定期对风机、电气设备、海缆等设施进行巡检和维护。采用先进的检测技术，建立设备维护档案，记录设备的运行状态、维护情况、故障处理等信息，通过对这些数据的分析，掌握设备的性能变化规律，预测设备的使用寿命，提前制定设备更换和维修计划。^[10]

参考文献

- [1] 舒萍. 丹麦拟建设世界最大海上风电场 [J]. 科技创新与品牌, 2011, (03): 86.
- [2] 毕亚雄, 沙先华, 秦海岩, 等. 海上风电场的“心脏”: 海上升压站 [J]. 科学世界, 2017, (12): 46.
- [3] 王伟伟. 海上风电建设施工基地规划及物料管理研究 [J]. 中国战略新兴产业, 2022, (21): 172-175.
- [4] 黄文庆, 马海栋. 我国海上风电场救助现状和展望 [J]. 航海, 2024, (04): 48-52.
- [5] 全球最大漂浮式海上风电场将投运 [J]. 风能, 2019, (11): 10.
- [6] 英国海上风电项目可实现“负补贴”运行 [J]. 中外能源, 2020, 25(12): 91-92.
- [7] 杜杰, 刘碧燕. 海上风电场智慧调度平台开发及应用 [J]. 风能, 2020, (10): 52-55.
- [8] 吉其荣, 陶阔, 张智杨. 海上风电场风机安装风险辨识及对策 [J]. 珠江水运, 2024, (21): 16-18. DOI: 10.14125/j.cnki.zjsy.2024.21.025.
- [9] 宝新能源强势进军海上风电 [J]. 电气制造, 2010, (05): 75.
- [10] 唐广银, 李红涛, 徐辉, 等. 海上风电场项目应建立全生命周期技术标准 [J]. 中国船检, 2016, (12): 95-97+118.