

近海大容量风力发电机组耐海盐腐蚀电气系统设计

陶志华¹ 陈峻峰²

1. 江苏苏安电力工程管理有限公司 江苏南京 211100

2. 南京艾科朗克信息科技有限公司 江苏南京 211100

摘要: 这篇文章对近海环境给电气系统带来何种影响做了深入探究。一开始,从研究背景和意义入手,讲述海盐腐蚀影响电气系统以及这种影响为何重要。然后,剖析海盐腐蚀原理,探究环境因素怎样影响电气性能,并借助典型故障实例分析,展现近海环境对电气系统安全稳定运行存在哪些潜在威胁。基于此,给出耐海盐腐蚀电气系统设计原则,像材料挑选与防护策略、结构设计优化、密封与通风设计等方面都涵盖其中。接着,细致阐述耐海盐腐蚀电气系统设计方案,发电机系统、变压器系统和控制系统等都在其中。最后,概括研究结论,给出应用建议,并探讨研究局限与未来展望。

关键词: 海盐腐蚀; 电气系统; 耐腐蚀设计; 系统设计; 故障分析

1. 研究背景

全球能源正在转型,在此背景下,近海大容量风力发电这种清洁且可再生能源获取方式日益受到关注。不过要看到,近海环境特殊,这让风力发电机组正常运行面临诸多挑战,电气系统耐海盐腐蚀问题尤其严重。

清洁能源需求持续增长,陆地风能资源开发渐趋饱和,近海风力资源丰富便成了开发新热点。近海地区风力稳定、风速较高等条件有利于大规模风力发电。近海环境湿度高、盐分高且海浪冲击频繁等情况会使电气系统极易被腐蚀损害。

以往一些近海风力发电项目因不够重视海盐腐蚀问题致使电气系统故障频发让发电企业遭受巨大经济损失。像部分机组电缆接头被腐蚀短路就得停机维修既增加维修成本又影响电力稳定供应。随着风力发电技术发展机组容量增大对电气系统可靠性与稳定性要求也更高。所以深入研究近海大容量风力发电机组耐海盐腐蚀电气系统设计有重要现实意义且十分紧迫。通过有效设计措施提升电气系统耐腐蚀性保障机组安全稳定运行对推动近海风力发电产业持续发展非常关键^[1]。

2. 研究意义

近海大容量风力发电机组在现代能源领域地位重要。研究其耐海盐腐蚀电气系统意义深远。

从能源供应方面讲,近海风力资源丰富。合理开发利用能增加能源产量以满足增长需求。从环境保护角度看传统能源生产多污染物排放破坏环境严重,近海风力发电为清洁

能源若克服海盐腐蚀实现高效稳定运行将减少传统能源依赖降低温室气体排放缓解气候变化保护生态环境。经济上频繁电气系统故障会增加维修成本缩短机组寿命降低投资回报率。

3. 近海环境对电气系统的影响

3.1 海盐腐蚀的机理分析

近海大容量风力发电机组运行时,海盐腐蚀是个严峻挑战。要设计出能抵御海盐腐蚀的电气系统,就得深入了解海盐腐蚀原理。

海盐里主要是氯化钠成分。海水溅到电气设备表面后,水分蒸发就会留下盐粒。潮湿空气中,这些盐粒容易变成电解质溶液,进而引发电化学腐蚀。这一过程中金属表面原子失电子成离子后会溶入电解质溶液中,造成金属材料损坏。

深入探究海盐腐蚀原理是设计近海大容量风力发电机组高效可靠耐海盐腐蚀电气系统之根基对保障风力发电稳定运行和减少维护成本意义重大^[2]。

3.2 环境因素对电气性能的影响

近海环境里诸多因素对电气系统性能有着明显且复杂影响。其一,近海环境湿度高是个典型特征。太多水分在电气设备表面凝结后,电气绝缘性能就会下降,短路和漏电风险随之增加。而且水分还可能渗进设备内部,腐蚀电子元件与连接线路,电气系统正常运行和稳定性都会受影响。

其二空气中海盐颗粒不可忽视。这些微小盐粒易附着在电气设备表面形成导电层,绝缘电阻降低了,放电和电弧

产生可能性就增加了。并且盐粒侵蚀会破坏设备防护涂层,让金属部件腐蚀加速,电气连接可靠性也受影响。

其三温度变化也是重要因素。近海环境昼夜与季节温差大,这会使电气设备热胀冷缩,连接松动、密封失效等问题可能就出现了。另外温度波动还影响电子元件性能参数,电气系统工作精度与稳定性面临挑战。

其四强风在近海环境很常见。强风冲击和振动电气设备机械结构不说,还可能造成散热不良,设备正常温度控制受影响后电气性能也就受影响了。

其五海洋生物活动也可能影响电气系统。像有些海洋生物附着生长后可能堵塞通风口与散热通道,设备散热效果受影响后电气性能也就跟着受影响了。

近海环境中的湿度、海盐颗粒、温度变化、强风以及生物活动等因素相互作用,从多方面共同给电气系统性能带来负面影响。所以设计近海大容量风力发电机组耐海盐腐蚀电气系统时得充分考虑这些环境因素,并采取有效防护与应对措施来确保电气系统可靠运行与长期稳定。

4. 耐海盐腐蚀电气系统的设计原则

4.1 材料选择与防护策略

在近海大容量风力发电机组里,设计耐海盐腐蚀电气系统极为关键,其中材料选择与防护策略属于关键部分。

其一,选材料时得充分考量其在近海高盐环境中的耐腐蚀能力。像不锈钢材料就可选用,它耐腐蚀性和抗氧化性不错,能有效抵御海盐侵蚀。钛合金也是个好选择,强度高且在恶劣海洋环境下耐蚀性佳。还有那些带有特殊涂层(如镀镍、镀铬或者涂覆防腐漆)的金属材料也应考虑使用,这些涂层可在一定程度上阻隔海盐与金属表面直接接触以减缓腐蚀。

防护策略方面,电化学保护是常用且有效的方法。施加阴极保护电流能让金属表面处于阴极状态从而抑制腐蚀反应。另外,定期维护和更新电气系统防腐涂层不可或缺。这就包括检查涂层完整性并及时修补破损之处以保证防护持续有效。

在近海大容量风力发电机组耐海盐腐蚀电气系统设计中合理材料选择与科学防护策略相互配合确保电气系统在恶劣近海环境稳定运行延长使用寿命提升整个风力发电机组可靠性和经济性。

4.2 结构设计优化

在近海大容量风力发电机组电气系统设计里,耐海盐腐蚀很关键,而结构设计优化是其中极为重要的部分。合理结构设计既能提升电气系统耐海盐腐蚀能力,又可提高整体稳定性与可靠性。

从空间布局来讲,得充分考量电气设备在机组中的位置分布情况。把容易被腐蚀影响到的关键部件放在相对封闭且干燥之处,降低其直接暴露于海盐环境中的几率。并且要优化设备间连接方式,采用简单紧凑布线结构来减少线路暴露面积,进而削减海盐侵蚀风险^[3]。

在结构强度与稳定性方面,则要选用高强度且耐腐蚀材料。像特殊合金或者经过表面处理过的金属构件就比较合适,这样能增强结构在恶劣近海环境中的承载能力。另外,结构可拆卸性与维护便利性也不容小觑。设计部件结构时要便于拆卸和更换以便设备腐蚀或故障能及时维修更换从而减少维护成本与停机时间。

结构设计优化是综合考量过程需要把空间布局、材料选择、强度稳定性、通风散热以及维护便利性等多方面因素都考虑进去。只有精心设计并不断优化才能让近海大容量风力发电机组电气系统在海盐腐蚀这种恶劣环境下保持良好性能与可靠运行。

4.3 密封与通风设计

在近海大容量风力发电机组耐海盐腐蚀电气系统设计方面,密封与通风设计极为关键。好的密封与通风设计可保护电气系统,减轻海盐腐蚀损害并确保机组稳定运行。电气密封的部位具体见图2、3。



图2 电气系统可密封部位
(机舱与叶片连接处)



图3 电气系统可密封部位
(海上箱变处)

5. 耐海盐腐蚀电气系统的设计方案

5.1 发电机系统设计

结构设计方面得优化发电机外形和内部布局。结构设

计紧凑些就能减少暴露在外表面积从而降低腐蚀风险。对于定子和转子这些关键部件得特殊防护处理一下，可以加防护套或者防护板避免直接接触海盐环境^[4]。

合理通风系统能有效排出发电机内部热量和湿气减少海盐在内部凝结沉积。精心设计通风通道并且安装高效通风设备保证空气流通顺畅维持内部干燥环境。

另外还得考虑发电机系统和整个风力发电机组协同工作。优化控制系统让发电机跟变流器、叶片等部件高效匹配提高整个系统能量转换效率和运行稳定性。

5.2 变流器系统设计

在海上风电机组的变流器系统设计中，防止盐雾腐蚀是确保长期可靠运行的核心任务。盐雾会加速金属腐蚀、降低绝缘性能并引发短路等故障，因此需从系统架构、材料选择、密封设计、环境控制等多维度采取综合防护措施。

5.2.1 变流器外壳与密封设计

IP 防护等级：外壳需达到 IP65/IP66 以上，确保完全防尘和高压水柱冲洗能力，防止盐雾渗透。

材料选择：外壳材质采用 316L 不锈钢或玻璃纤维增强复合材料（GFRP），兼具耐腐蚀性与轻量化。

密封件：使用氟橡胶（FKM）或硅橡胶密封条，接口处填充聚硫密封胶，确保动态接缝（如门盖）的长期气密性。

5.2.2 结构设计：

倾斜顶盖：防止积水滞留，减少盐分沉积。

无缝隙设计：避免螺栓直接外露，采用嵌入式安装结构。

5.2.3 散热系统防护

闭式冷却循环：采用液冷散热（如乙二醇 - 水溶液）或空气 - 空气热交换器，避免外部含盐空气直接接触发热元件。

5.2.4 防盐雾涂层：

散热片表面喷涂环氧 - 锌基防腐涂层或陶瓷涂层，提升耐蚀性。

风扇叶片采用聚醚醚酮（PEEK）等耐盐雾复合材料。

冗余设计：配置双风扇或备用散热通道，防止盐雾堵塞导致过热。

5.2.5 内部环境控制

正压设计：向变流器柜内通入过滤后的干燥空气（或氮气），维持内部气压略高于外部，阻止盐雾侵入。

湿度控制：内置加热器和湿度传感器，当湿度 > 60%

时自动启动除湿。使用分子筛干燥剂吸收潮气。

盐雾过滤：进风口安装多层滤网（如 HEPA 滤芯 + 活性炭），定期更换。

5.2.6 关键部件防腐蚀设计

功率模块防护：IGBT/Diodes 封装采用陶瓷基板和金锡焊料，避免铜铝直接暴露。

电路板喷涂三防漆（聚氨酯或丙烯酸树脂），覆盖焊点和走线^[5]。

连接器与电缆：选用镀金或镀镍端子，配合 IP68 级密封插头（如 HARTING Han® 系列）。

电缆外皮采用交联聚乙烯（XLPE）或氟塑料（FEP），抗盐雾老化。

6. 结论与展望

深入探究近海大容量风力发电机组耐海盐腐蚀电气系统后，有如下重要结论。

其一，近海环境里海盐腐蚀给电气系统带来巨大挑战。分析海盐腐蚀机理后，明确化学作用与物理侵蚀过程，这为后续设计奠定关键理论根基。

就设计原则而言，材料选取与防护策略确定极为关键。挑选抗腐蚀性能佳的材料，并配合有效的防护涂层与处理手段，可大幅增强电气系统耐盐蚀能力。优化结构设计能减少腐蚀介质聚积与侵蚀，合理规划密封与通风设计可有效管控湿度与盐分侵入，保障电气系统稳定运行。

具体到设计方案上，发电机系统设计充分考量抗腐蚀需求，运用特殊绝缘材料与防护结构，确保发电效率与稳定性。变流器系统设计着重电路优化与元件防护，有效削减故障风险。控制系统设计达成对整个电气系统精准监控与调控，及时察觉并处理潜在腐蚀问题^[6]。

总体而言，本研究成功打造一套近海大容量风力发电机组耐海盐腐蚀电气系统。精心设计并优化各环节后，极大提高电气系统于恶劣近海环境中的可靠性与耐久性。不过也得看到研究存在局限之处，像实际运行中长期监测数据不够多，一些极端环境条件模拟与应对举措还有待进一步完善。未来研究可聚焦更先进材料研发与应用，并结合智能化监测与维护技术进一步提升电气系统性能与可靠性，为近海风力发电产业持续发展给予更有力支撑。

参考文献：

[1] GB/T 31817-2015《风力发电机组防护涂装技术规范》

[2] NB/T 31006-2011《海上风力发电机组防腐规范》

[3] 张伟, 王海涛《近海风电塔筒防腐涂层体系设计与性能研究》期刊《腐蚀科学与防护技术》2022

[4] 李静, 陈明等《海上风机基础钢结构阴极保护优化设计》期刊《中国腐蚀与防护学报》2021

[5] 刘洋, 赵志强《碳纤维复合材料叶片抗盐雾腐蚀表

面处理技术》期刊《玻璃钢 / 复合材料》2020

[6] 周涛, 杨帆《近海风电设备腐蚀监测与预警系统开发》期刊《仪器仪表学报》2023

作者简介: 陶志华; 女; 汉; 1976 年 11 月; 江苏南京; 本科; 高级工程师; 电力工程建设