

近海环境下海上光伏设备防腐防护及长效运行策略研究

夏宏斌

山东国华时代投资发展有限公司, 山东 东营 257000

[摘要]海上光伏属于沿海地区清洁能源开发的主要方向,但是近海环境中的高盐雾、高湿热、强紫外辐射以及干湿交替等状况,给设备带来了严重的腐蚀危害。经由长时间的海洋暴露以及多环境耦合加速试验得知,未涂层试样的海洋暴露及加速试验腐蚀速率分别为 0.28mm/a、1.1mm/a,腐蚀会导致试件疲劳极限下降 31.6%。盐雾应力对光伏组件的电性能影响很小,但是会加大电势诱导衰减效应,钠离子渗透到电池内部起协同作用。针对以上问题,对近海环境下腐蚀机理及运行特点进行分析,从材料选择、涂层体系、电气防护、监测评估等角度提出防腐关键技术,再构建起材料优化、全生命周期运维、智能预警和持续改进四个方面的长效运行保障体系,为海上光伏工程提供技术支持。

[关键词]海上光伏; 近海环境; 防腐防护; 设备运维; 长效运行

DOI: 10.64635/ja.2026.1396

中图分类号: TM615

文献标识码: A

Research on Anti-Corrosion Protection and Long-Term Operation Strategies for Offshore Photovoltaic Equipment in Nearshore Environments

Xia Hongbin

Shandong Guohua Times Investment Development Co., Ltd., Dongying, Shandong 257000, China

Abstract: Offshore photovoltaic power generation is a major direction for clean energy development in coastal areas. However, high salt spray, high humidity and heat, strong ultraviolet radiation, and alternating dry-wet conditions in nearshore environments cause serious corrosion hazards to equipment. Long-term marine exposure tests and multi-environment coupled accelerated tests show that the corrosion rates of uncoated specimens under marine exposure and accelerated testing are 0.28 mm/a and 1.1 mm/a, respectively, and corrosion can reduce the fatigue limit of specimens by 31.6%. Salt-spray stress has little effect on the electrical performance of photovoltaic modules, but it can aggravate potential-induced degradation, with sodium ions penetrating into the cells and producing a synergistic effect. In response to these problems, this paper analyzes the corrosion mechanisms and operational characteristics of offshore photovoltaic equipment in nearshore environments, proposes key anti-corrosion technologies from the perspectives of material selection, coating systems, electrical protection, and monitoring evaluation, and further constructs a long-term operation guarantee system covering material optimization, whole-life-cycle operation and maintenance, intelligent early warning, and continuous improvement. The study provides technical support for offshore photovoltaic projects.

Keywords: offshore photovoltaic; nearshore environment; anti-corrosion protection; equipment operation and maintenance; long-term operation

引言

我国河北、天津、江苏、浙江、广东等省海上光伏规划总容量超过 60GW。海上光伏迎来了前所未有的发展机遇,但是它所处的海洋环境给设备的可靠性和耐久性提出了严峻的考验。常规光伏电站故障统计结果表明,直流侧的组件、汇流箱、逆变器等地方的故障频率占到 90%以上,在海上环境里更严重。海水中的高浓度氯离子会加快金属

的电化学腐蚀速度,盐雾、潮气和紫外线三者一起加速材料的老化。海上光伏关键结构的腐蚀是海上光伏大规模发展和应用的主要障碍,光伏组件桁架、桩基材料在海洋环境中腐蚀问题更加严重。目前海上光伏防腐研究大多集中在单一材料或者涂层性能的测试上,缺少从腐蚀机理到运维保障的系统技术架构。因此,从环境作用机理入手,对防腐关键技术进行梳理,提出包含设计、施工、运维全过

程的长效运行策略。

1 近海环境下海上光伏设备腐蚀机理及运行特点

近海环境具有高盐度、高湿度、强日照、干湿交替明显等特点。海洋环境含有高盐度、高湿度、大气腐蚀、微生物腐蚀等众多因素,都会对漂浮式光伏发电系统运行及维护造成很大影响。海上光伏设备主要受到三种腐蚀形式的考验,第一种是电化学腐蚀,氯离子穿透钝化膜造成点蚀;第二种是应力腐蚀开裂,残余应力和腐蚀介质一起促使裂纹产生并扩大;第三种是生物腐蚀,海生物附着形成局部氧浓差电池加快腐蚀。

涂层/碳钢体系在海洋环境中进行疲劳性能测试时发现,点蚀会在材料表面产生明显的应力集中区,在循环载荷的作用下,蚀坑底部的应力远远大于材料的屈服强度,从而导致产生微裂纹。相邻蚀坑之间基体材料在腐蚀和载荷的共同作用下慢慢变坏,微裂纹发展并联结成宏观疲劳裂纹。当蚀坑平均深度达 $248.5\mu\text{m}$ 和 $102.7\mu\text{m}$ 时,试件失重率分别为 42.3% 和 14.8%,疲劳强度分别下降 31.6% 和 14.8%。海上光伏按照结构形式可以分为桩基固定式和漂浮式两种^[1]。桩基固定式海上光伏支撑结构长期处在高湿度、高盐度的恶劣海洋环境中,强度和耐久性受到极大的考验,对防腐性能的要求也越来越高。漂浮式光伏会遇到系泊系统腐蚀、浮体材料老化这些特殊问题。系泊链属于海上浮式光伏系统的重要部分,它的表面粗糙度会对耐腐蚀性能产生明显的影响,减小表面粗糙度可以提高盐雾腐蚀抗力,质量损失和初始粗糙度成指数关系。海上光伏运行特点可以概括为三个高,即高故障率(直流侧故障占总故障的 90% 以上)、高维护成本(需要专用船只和窗口期作业)、高安全风险(强风浪、渔船锚害等)。与陆上光伏相比,海上设备除了要防锈外还要承受风、浪、流等多物理场的耦合作用,结构疲劳和腐蚀的耦合效应更加明显。

2 海上光伏设备腐蚀影响因素分析

2.1 盐雾环境对设备材料性能的影响

盐雾是近海环境中破坏性最强的腐蚀因子,主要成分是氯化钠,氯离子可以穿透金属表面的氧化膜造成点蚀。碳钢支架上盐雾沉积形成电解液膜,氧去极化反应加快。盐雾会对电气设备造成绝缘电阻降低、接触电阻增大。 p 型 PERC 单晶硅光伏组件在盐雾腐蚀试验中,盐雾应力对电绝缘性能和电性能影响小,但是 96 小时电势诱导衰减测试后,组件出现严重的 PID 效应,电性能大幅下降。盐雾中钠离子进入电池内部,造成盐雾应力和 PID 效应的共同作用,单一的应力不能完全反映海上应用场景的长期受

力情况,需要开发综合老化测试方法。铝合金虽然具有自钝化的能力,但是在高盐雾环境中仍然会发生点蚀。我国第一个桩基固定式海上光伏项目使用高强度铝合金支架,表面经过特殊处理来抵抗高盐雾的侵蚀,连接处用镀锌钢构件加固^[2]。腐蚀和老化效应会造成沿海光伏系统特性在长时间的运行中出现较大的漂移,需要使用腐蚀评价指标来度量参数的变化程度。

2.2 温湿度与海洋气候耦合作用分析

近海地区年平均相对湿度一般大于 80%,金属表面形成薄液膜的时间多,腐蚀电化学反应不断进行。温度升高会加快离子的扩散速度以及反应速率,一般温度每升高 10°C ,腐蚀速率就增加 1~3 倍。海洋气候的耦合作用是由于诸多因素共同起作用而产生的。紫外线照射到有机涂层上会产生光降解,使它产生微裂纹,这些微裂纹就成了腐蚀介质的通道。高湿度和盐雾一起影响时,绝缘材料吸湿后表面电阻变小,泄漏电流变大。海洋飞溅区由于干湿交替频繁、供氧充足,是腐蚀最严重的地方,必须使用更高的等级的防护措施。自然环境对海上光伏运维管理的影响主要是盐雾腐蚀、台风冲击、海生物附着三个方面,需要有针对性的制定出相应的应对措施。

3 海上光伏设备防腐防护关键技术研究

3.1 光伏支架及金属结构防腐技术

支架是海上光伏的承力结构,支架防腐直接影响系统的寿命。根据环境分区、综合防护原则,对不同海域的腐蚀机理、强度差异采取不同的防腐措施。主流技术路线有热浸镀锌(镀层厚度不小于 $85\mu\text{m}$),富锌涂料体系(环氧富锌底漆+环氧云铁中间漆+聚氨酯面漆),热喷涂金属涂层(喷锌或喷铝)。阴极保护法和涂层法相结合使用,易腐蚀部位用阴极保护,其他地方用防腐涂层全面防护。镀锌和石墨烯复合涂层技术可以在支架表面形成长效阴极保护层,防护年限超过 25 年。材料选择上 316L 不锈钢耐海水腐蚀性好但是成本高^[3]。碳钢采用热浸镀锌法处理,铝合金用阳极氧化法提高抗腐蚀性。桩基固定式海上光伏项目证明了铝合金支架在海洋环境中具有很好的长期稳定性。海上光伏系统类型有桩基固定式、漂浮式、潮间带式等,不同的结构类型所具有的腐蚀机理也不同,需要根据不同的腐蚀机理来设计相应的防护措施。

3.2 光伏组件防腐与密封防护技术

组件边框、接线盒、连接器属于腐蚀薄弱部位。边框使用阳极氧化铝合金,氧化膜厚度 $\geq 15\mu\text{m}$ 。强化玻璃镀膜采用双层镀膜技术,户外实证数据表明与单层镀膜组件

相比，第一到第五年的发电量分别提高了 0.85%、1.06%、1.1%、1.5%和 1.99%。共聚物封装胶膜将多种聚烯烃材料的优点结合起来，具有高透光率、低水汽透过率和强耐老化性能，能有效地减缓湿热环境下功率的衰减；接线盒采用电阻焊工艺保证焊接拉力强度；防水线缆通过 2PFG 2962 联合认证。密封防护要重视接线盒灌密封胶和边框密封胶的耐久性，采用耐盐雾、抗紫外线的老化硅酮密封胶，定期检查密封是否完好。海上光伏的腐蚀破坏形式有均匀腐蚀、点蚀、缝隙腐蚀和电偶腐蚀，对不同的破坏形式要采取不同的防护措施。

3.3 电气设备防潮防盐雾保护技术

逆变器、汇流箱、箱变等电气设备属于系统的重要节点。汇流箱等设备要达到 IP68 的防尘防水等级，电缆外包防水层并内填防水胶，在长时间浸泡中保持导电性能。电气设备内设有防凝露加热器，当湿度传感器检测到内部相对湿度大于 85%的时候就会自动开启，配合呼吸阀平衡内外压力差，防止凝露积聚。PCB 板涂覆三防漆（丙烯酸、聚氨酯或有机硅）厚度不小于 75 μm ，用耐盐雾不锈钢或镀金端子代替铜质连接器来减小接触电阻。电缆系统也不能忽略。海上光伏一般使用铜芯交联聚乙烯绝缘电缆，外护套选用耐环境开裂的低烟无卤阻燃聚烯烃。根据近海环

境盐雾浓度变化大，可以在电缆接头处加装可更换的干燥剂模块，6 个月检查更换一次。海缆登陆段增设混凝土包覆或者钢管防护，采用牺牲阳极阴极保护，阳极设计寿命与光伏电站全生命周期相适应。由于海洋环境会对光伏组件造成长期扰动，因此可以使用动态的知识库以及时窗来对组件的腐蚀状态进行跟踪，并且抑制由于长时间引起的扰动影响。

3.4 海上光伏设备防腐监测与状态评估技术

防腐监测是了解腐蚀状况、作出维护决策的基础。全维度数字孪生技术建立光伏面板、逆变器、海缆、升压站、海洋环境的三维模型，秒级采集电压、电流、温度、盐雾浓度等数据，数据丢失率小于 0.1%。采用机器学习的方法可以发现接线松动、组件热斑、海缆异常等可能存在的故障，用无人机、无人船和红外热像仪相结合的方式完成全面的巡视工作，单次巡视时间由原来的 8 小时缩短到现在的 1.5 小时，漏检率下降了 70%。腐蚀状态评价包含电化学试验（极化电阻，电化学阻抗谱），涂层性能评价（附着力，孔隙率），结构剩余寿命预估。定期抽检和在线监测相结合，形成完整的状态评价体系。海洋生物污损和腐蚀现象相互作用会造成材料失效，要同时考虑两者之间的交互影响。

表 1 海上光伏设备腐蚀防护等级分区与防护措施

腐蚀区域	环境特征	腐蚀速率参考(mm/a)	支架涂层体系	电气设备防护等级	监测频率
大气区	盐雾沉降，干湿交替	0.05~0.10	环氧富锌底漆+聚氨酯面漆($\geq 240\mu\text{m}$)	IP54~IP65	季度
飞溅区	干湿交替频繁，供氧充足	0.10~0.30	热浸镀锌+环氧玻璃鳞片($\geq 400\mu\text{m}$)	IP65~IP66	月度
潮差区	周期性浸泡，海生物附着	0.08~0.20	热浸镀锌+牺牲阳极阴极保护	IP68	月度
全浸区	长期浸泡，溶解氧较低	0.05~0.15	重防腐涂层+外加电流阴极保护	IP68	季度

表 1 根据海洋环境分区腐蚀特性给出各个区域的腐蚀速率参考值和相应的防护措施配置建议。飞溅区由于干湿交替频繁、供氧最充分，腐蚀速率最高，所以必须采取最严格的涂层和监测措施。长期海洋暴露试验结果表明，飞溅区未涂层试样的腐蚀速率可达 0.28mm/a，是该区域建议防护设计值的 2~3 倍，说明涂层保护的重要性非常高。

4 海上光伏设备长效运行保障策略

4.1 防腐材料与设备选型优化策略

选择时应该以全生命周期成本而不是初始投资来决定。关键选型原则支架选用耐蚀材料或者重防腐涂层体系，组件选用双层镀膜玻璃和共挤 POE 胶膜封装，逆变器和汇流箱防护等级不小于 IP65，关键部位 IP68。电气连接件采用镀金或者耐盐雾不锈钢材料。建立设备分级管

理体系，对关键设备（组件、逆变器、海缆等）采用高可靠性的产品，一般设备既考虑性能又考虑成本。实行供应商防腐能力认证制度，规定供应商必须要有海洋环境的应用业绩以及第三方检测报告。海上光伏腐蚀防护系统性解决方案要从涂层体系设计、阴极保护配置、监测系统集成这三个方面进行考虑。

4.2 全生命周期运维管理体系建设

全生命周期管理包含设计、施工、运维和退役等各个阶段。设计阶段做腐蚀环境评价及防护方案规划，施工阶段操控涂层施工品质，防止产生针孔，漏涂等状况，运维阶段创建标准化巡检制度。运维管理体系应该包含日常巡检（每月一次外观检查，每季度一次红外热成像）、定期检测（每年一次绝缘电阻测试、涂层厚度检测）、专项检测（极端天气后全面检查）。该平台已经在近海大型海上

光伏电站中应用,在运维成本降低 20%,故障预测准确率提高到 92%的情况下,成功避免了由于渔船锚撞造成的 200 万元的潜在损失,巡检覆盖率提高了 80%。根据海上光伏的环境特点,要创建起盐雾腐蚀监测预警体系、台风应急响应体系以及海生物定时清除制度。

4.3 智能监测与故障预警机制应用

智能化就是海上光伏运维的发展趋势。采用 BIM 和 GIS 技术相结合的方式对海洋水文气象、船舶通航、人员定位、视频监控、设备运行监测等各方面数据进行整合,从而实现监测、评估、诊断、预测、告警的功能。融合 AIS 船舶自动识别、虚拟电子围栏、雷达监测技术创建起三重防护体系,准确发出渔船锚害等危险的预警信号。预警机制要设多条标准线。黄色预警指标异常要关注,橙色预警要安排巡检,红色预警立即停机检查。智能诊断要不断改进机器学习模型,把历史故障案例加入到训练集中,从而提升准确率。利用深度神经网络最大功率点跟踪方法,加入腐蚀评价指标,在复杂的海洋环境里可以得到高效的鲁棒控制性能。

4.4 设备防腐性能持续提升措施

持续改进是适应海洋环境的不确定性,提高系统的可靠性。创建腐蚀数据平台,搜集各个项目的腐蚀速率,涂层寿命,故障模式等数据,指导后续的设计改进。对新型防腐材料及应用技术进行研究,即石墨烯复合涂层、智能自修复涂层等。新型超浸润海洋防护涂层从表面润湿性设计入手,给长效防腐开辟了新的技术途径。同时推进标准

体系的建立。目前海上光伏防腐标准还不完善,需要尽快制定出《海上光伏钢结构防腐技术规范》、《海上光伏设备盐雾试验方法》等标准。定期对运维人员进行技术培训,提高运维人员技术水平,建立防腐案例库、经验交流制度,推进防腐技术知识的积累和传承。

5 结语

近海环境下的海上光伏设备防腐防护,是保证海上光伏设备安全、经济、长久运行的关键问题。盐雾、温湿度、紫外辐射等多因素耦合作用加快了腐蚀的速度,涂层破坏之后基体金属的点蚀和疲劳载荷共同作用,使结构寿命大大降低。从材料体系、涂层防护、电气密封、智能监测四个方面系统地建立防腐技术体系,形成以材料优化、全生命周期运维、智能预警、持续改进为内容的长效运行保障机制。伴随着新材料、智能传感、数字孪生技术的发展,海上光伏防腐会向主动化、精准化、智能化方向发展。

[参考文献]

- [1]孙慧丽.漂浮式光伏发电系统在海洋环境中的腐蚀效应[J].全面腐蚀控制,2023,37(12):113-115+122.
 - [2]张鑫红.自然环境对海上光伏运维管理的影响以及应对措施[J].现代商贸工业,2024,45(2):260-262.
 - [3]陈晓华,满成,甄永泰,等.海上光伏关键结构的腐蚀与防护综述[J].中国腐蚀与防护学报,2026,46(2):315-326.
- 作者简介:夏宏斌(1999.04—),毕业院校:山东科技大学,所学专业:机械,当前就职单位:山东国华时代投资发展有限公司,职务:值班员,职称级别:助理工程师。