

# 海上光伏电站一次设备运行稳定性影响因素及优化研究

陈坤坤

国华投资山东分公司, 山东 东营 257000

**[摘要]**海上光伏电站面临高盐雾、高湿度、强风浪等复杂海洋环境的挑战, 一次设备运行稳定性直接影响发电效益与安全寿命。与陆上光伏相比, 固定式海上光伏用桩基结构把支架和组件固定在海底上, 设备长期处在浪溅区、潮差区, 腐蚀环境更加恶劣。基于故障树模型进行故障模式分析有助于识别桩基固定式光伏的环境适应性薄弱环节。分析海洋环境因素及设备选型对稳定性的影响, 针对光伏组件衰减、箱变受潮、电缆腐蚀、保护装置误动等关键问题, 从防腐工艺、设备选型、状态监测及运维管理四维度提出优化措施。

**[关键词]**海上光伏电站; 一次设备; 运行稳定性; 状态监测

DOI: 10.64635/ja.2026.1390

中图分类号: TM615

文献标识码: A

## Research on Factors Affecting the Operational Stability of Primary Equipment in Offshore Photovoltaic Power Stations and Optimization Measures

Chen Kunkun

Guohua Investment Shandong Branch, Dongying, Shandong 257000, China

**Abstract:** Offshore photovoltaic power stations face challenges from complex marine environments, such as high salt spray, high humidity, and strong winds and waves. The operational stability of primary equipment directly affects power generation efficiency and safe service life. Compared with land-based photovoltaic power stations, fixed offshore photovoltaic systems use pile foundations to secure supports and modules to the seabed, leaving equipment exposed for long periods to splash zones and tidal range zones, where the corrosive environment is more severe. Fault mode analysis based on a fault tree model helps identify weak links in the environmental adaptability of pile-fixed photovoltaic systems. This paper analyzes the influence of marine environmental factors and equipment selection on operational stability. Focusing on key problems such as photovoltaic module degradation, moisture intrusion in box-type transformers, cable corrosion, and misoperation of protection devices, it proposes optimization measures from four dimensions: anti-corrosion technology, equipment selection, condition monitoring, and operation and maintenance management.

**Keywords:** offshore photovoltaic power station; primary equipment; operational stability; condition monitoring

### 引言

海上光伏电站属于新能源开发的主要方向, 具备光照资源充足、不占用陆地土地资源、靠近负荷中心等特点。但是海洋环境中的高盐雾、高湿度、强紫外线、风浪流耦合作用等恶劣条件, 给电站一次设备的运行可靠性带来巨大的威胁。固定式海上光伏一般用钢管桩或者预应力管桩做基础, 把光伏支架及组件抬高到海面以上, 设备安装高度要考虑到极端的高水位以及波浪爬高, 其受力特点同陆上光伏存在明显区别。一次设备指的是光伏组件、箱式变压器、电缆系统、开关设备等, 是能量传递和变换的主要载体, 稳定性直接影响到电站的发电效益。目前海上光伏电站的设计和运维经验还不成熟, 设备故障率高、运维费

用高。因此, 对一次设备运行稳定性的影响因素进行系统的研究, 并提出相应的改进措施, 对促进海上光伏产业的高质量发展有着十分重要的意义。

### 1 海上光伏电站一次设备组成及运行特点

海上光伏电站的一次设备有光伏组件、直流汇流设备、箱式变压器、升压设备、电缆系统和开关设备等。光伏组件是能量采集单元, 把太阳能转化成直流电能; 箱式变压器完成电压变换和电能汇集工作; 电缆系统完成电能的传输任务; 开关设备和保护装置保证系统的安全运行。与陆上光伏相比, 海上光伏电站运行环境有如下明显特点, 一是高盐雾环境加速金属部件电化学腐蚀, 二是高湿度和凝露造成绝缘性能降低, 三是桩基固定式结构在风浪

流作用下产生持续低频振动,导致设备连接件松动和金属疲劳,四是运维窗口期短、可达性差。

2 海上光伏电站一次设备运行稳定性影响因素分析

2.1 海洋环境因素对设备运行的影响

海洋环境因素属于影响一次设备稳定性的主要外部因素。盐雾腐蚀为主要失效机理,氯离子可以穿透设备防护层造成电化学腐蚀,使金属结构强度下降,电气连接点接触电阻增大。在浪溅区,干湿交替的循环使得盐雾浓度和腐蚀速度达到最高点,碳钢腐蚀速率可达 0.3~0.5mm/a,是不锈钢的 10 倍以上。高湿度环境下容易产生凝露,水汽在设备内凝结后会使得绝缘电阻降低,严重的还会造成短路。昼夜温差、潮汐变化造成设备表面经常出现结露现象,夜间相对湿度一般大于 90%,凝露风险比陆地大得多。根据温度、湿度、盐雾环境影响的光伏关键部件性能预测模型,可以很好地评价海洋环境对设备性能的影响趋势<sup>[1]</sup>。风浪流耦合作用给桩基、支架结构带来持续的水平和倾覆力矩,长时间的交变载荷容易引起焊缝开裂、螺栓松动。桩基冲刷属于固定式光伏所特有的问题,

海流冲刷造成桩周土体流失,基础承载能力降低,进而引发支架倾斜、组件受力不均。另外,在海洋环境的昼夜温差、季节温差下,由于热胀冷缩会使密封材料老化加快,从而造成防护等级下降。紫外线辐射还会对设备外绝缘材料造成老化,使塑料件、橡胶密封件变得脆化开裂,从而降低防护等级的有效性。

2.2 设备设计选型与安装质量影响

设备自身设计选型和安装质量属于稳定性内在因素。防护等级低是失效的主要原因,部分设备外壳达不到 IP66 或者 C5 级抗盐雾的要求,盐雾渗透到腐蚀元件里面。材料选择不合理(紧固件非不锈钢、钛合金),容易造成电偶腐蚀;支架镀锌层在浪溅区容易被破坏,需要涂覆重防腐涂层,干膜厚度不小于 300μm。安装工艺缺陷同样不可忽视,电缆接头密封不好容易受潮,桩基垂直度偏差超过 1%会造成附加弯矩,支架基础精度不够会导致设备受力不均,长期造成变形或者松脱。这些问题刚开始很难被发现,随着时间的推移会变成隐患。

表 1 给出主要一次设备典型故障模式、影响因素和后果。

表 1 海上光伏电站一次设备典型故障模式及影响因素

| 设备类型  | 典型故障模式              | 主要影响因素             | 故障后果           |
|-------|---------------------|--------------------|----------------|
| 光伏组件  | 功率衰减、PID 效应、边框腐蚀开裂  | 盐雾腐蚀、紫外老化、浪溅区干湿循环  | 发电效率下降 10%~30% |
| 箱式变压器 | 绝缘受潮、绕组温升超标、散热器盐垢堵塞 | 密封失效、凝露侵入、盐雾沉积     | 设备停机、绕组烧毁      |
| 电缆系统  | 绝缘击穿、接头腐蚀、铠装层锈蚀     | 潮气侵入、敷设弯曲半径不足、紫外老化 | 电能传输中断、短路故障    |
| 开关设备  | 触头腐蚀、操作机构卡滞、二次端子氧化  | 盐雾沉积、润滑失效、凝露导致爬电   | 保护失灵、设备损毁      |
| 逆变器   | 功率器件热疲劳、控制板腐蚀       | 结温波动、盐雾侵入、散热器翅片盐堵  | 寿命缩短 30%以上     |

3 海上光伏电站一次设备运行稳定性关键问题研究

3.1 光伏组件运行可靠性问题

组件属于能量采集前端,它的可靠性会直接决定电站的发电能力。海上环境主要问题有玻璃表面盐渍沉积降低透光率,封装材料老化造成水汽入侵引发 PID 效应,边框和接线盒腐蚀造成电气连接失效。固定式组件安装高度高于平均高潮位 3~5m,台风期间浪飞沫仍然可以接触到,盐渍沉积速率比陆地高 5~8 倍。风浪造成的电池片振动引发的隐裂,桩基低频振动通过支架传到焊带和主栅连接处,造成应力集中,长时间累积造成疲劳断裂,产生热斑效应,加快功率衰减。虽然振动对年发电量影响不大,但是隐裂、热斑会大大加快组件的衰减速度。

3.2 箱式变压器及升压设备运行问题

箱变存在绝缘受潮、温升过高、分接开关故障。高湿

度下变压器油吸潮导致绝缘性能降低,绕组受潮后局部放电增加。箱变距离海面 10~15m,台风飞沫可以通过百叶窗、密封缝隙进入,昼夜温差大时内部凝露滴落在高压套管、绝缘子上。水分会使得绝缘纸的聚合度降低、抗拉强度下降,在电磁振动的作用下容易造成绝缘纸的破损脱落,堵塞油道或者引起匝间短路。散热器翅片盐垢增大热阻,实测盐垢厚度为 0.5mm 时散热效率降低约 20%,油温上升 8~12℃,油泵风扇轴承腐蚀卡滞风险增加。有载分接开关触头烧蚀造成调压失灵,箱体密封失效造成控制回路故障。

3.3 电缆系统运行风险分析

电缆主要的危险就是绝缘老化、接头腐蚀、机械损伤。绝缘层受盐雾、紫外线、温度循环三者共同影响而加快老化。电缆接头为薄弱部位,密封失效后潮气侵入导致绝缘电阻下降,进而发生击穿。敷设弯曲半径过小或者挤压造

成绝缘机械损伤,长期发展就会变成贯穿性击穿。桥架固定卡箍没有橡胶垫片时,振动会磨损外护套,破坏铠装防腐。固定式结构虽然没有动态疲劳问题,但是需要考虑进出设备区的弯曲固定和防磨措施,水下段海生物附着的影响。桩基平台电缆连接点受波浪引起的周期性弯曲影响,长时间会造成铜导体硬化、屏蔽层断丝等现象,因此需要选择具有抗弯曲疲劳性能的电

### 3.4 开关设备及保护装置稳定性问题

主要问题有断路器操作机构卡涩、灭弧能力降低、隔离开关触头腐蚀造成接触电阻增大、保护装置误动或者拒动。开关柜密封不好,盐雾造成二次端子氧化,接触电阻由原来的  $50\mu\Omega$  增大到毫欧级,造成发热、信号偏差。润滑油乳化流失造成分合闸时间超时或者拒动,灭弧室触头氧化膜增厚,开断时烧蚀加重。直流侧电弧检测误报率达到 30%~40%,由于盐雾腐蚀造成接触电阻发生变化,高频噪声和电弧频谱重合。保护定值没有考虑到台风等特殊工况造成的误动,通信链路受腐蚀影响,GOOSE 报文延时超过整定值,闭锁逻辑失效。

## 4 海上光伏电站一次设备运行稳定性优化措施

### 4.1 提升设备防腐蚀与环境适应能力

提高设备防腐蚀能力要从材料、工艺、结构三个方面着手。材料上外壳用 316L 不锈钢或者海洋级铝合金,对碳钢支架采用热镀锌加环氧富锌底漆、环氧云铁中间漆、聚氨酯面漆的复合涂层体系,总干膜厚度不小于  $300\mu\text{m}$ ,紧固件用钛合金或双相不锈钢,所有异种金属接触面均应加装绝缘垫片或涂覆导电防腐脂,不许异种金属直接接触。对于暴露在盐雾环境中的导电回路,在铜排表面可以采用镀银或者镀锡的方法进行处理,接触面涂敷导电防腐脂,切断氯离子的侵蚀途径<sup>[2]</sup>。工艺上关键的电气元件用三防漆涂覆或者灌封,三防漆厚度不小于  $50\mu\text{m}$ ,采用耐盐雾型丙烯酸或者聚氨酯材料,PCB 板及元器件引脚做整体防护,灌封胶选择导热型有机硅,兼顾防护与散热。外部防护和内部防护并重,关键区域涂覆或者灌封、密封设计、排水和凝露路径管理、所有的柜体都设有自动凝露排导槽和呼吸过滤器,过滤器用疏水型 PTFE 膜来阻挡盐雾,但是可以允许水蒸气透过。从结构上来说,改善散热风道设计,装设盐雾过滤装置,散热进风口为迷宫式结构加可更换式盐雾过滤网,过滤效率 $\geq 95\%$ ,形成冷凝水导排通道。对箱变顶部加装双层隔热顶盖,减少昼夜温差造成的凝露。防护等级提高到 IP66 及以上,保证设备在高湿重盐雾环境中正常工作。

### 4.2 优化一次设备选型与安装工艺

设备选型必须具备海洋环境适应性。光伏组件选用双玻结构或者增强型边框,双玻组件的背板为玻璃,水汽阻隔性能比有机背板好,边框用阳极氧化加封孔的方式,氧化膜厚度不小于  $15\mu\text{m}$ ,接线盒采用灌胶密封的方式,灌胶层厚度不小于 5mm,使用双组分环氧树脂。箱式变压器为全封闭结构,外壳用 316L 不锈钢,焊接后整体酸洗钝化,散热器用铜管铝翅片并涂海洋型重防腐涂料,涂料体系同支架,加装可拆卸式盐雾过滤网,网目数 $\geq 200$  目。电缆选用铠装型或者防水型结构,直埋段用钢丝铠装聚乙烯外护套海缆,桥架段用钢带铠装低烟无卤阻燃电缆,外护套材料加抗 UV 剂,接头采用预制式或者冷缩式工艺,预制式接头在工厂内完成全部制作和试验,现场只做插接,冷缩接头在相对湿度 $< 70\%$ 的环境下施工,用硅脂润滑界面。电缆接头制作应于干燥洁净的环境中进行,密封胶填充饱满并做气密性试验。桩基施工采用振动锤或液压锤沉桩,控制桩顶标高、垂直度,沉桩后及时做防腐补口,焊缝及损伤处涂刷环氧树脂修复漆。支架基础施工严格控制定位精度和垂直度,支架安装时所有的连接螺栓按规范扭矩拧紧,涂刷二硫化钼防锈油脂,紧固后立即装入防松垫片及密封帽。设备吊装、就位过程中防止磕碰损坏,安装完毕后立即恢复防护盖板。

### 4.3 构建设备状态监测与故障预警体系

状态监测体系是预防性维护的技术基础。设备运行状态全面感知是海上光伏运维的基础,传统的手工巡检已经不能满足了,应该转变为依靠实时状态感知和数据分析的预防性维护<sup>[3]</sup>。在关键设备上安装在线监测装置,光伏组件安装 IV 曲线扫描和热成像监测,每串组串单独设置一个智能汇流箱,内部装有电压、电流、绝缘电阻检测模块,采样周期不小于五分钟一次,变压器上安装有油温、油位、微水及局部放电监测装置,局部放电检测采用超高频法,灵敏度不大于 5pC,增加铁芯接地电流检测和振动频谱分析,电缆系统使用分布式光纤测温及振动监测,沿电缆路径敷设感温光纤,空间分辨率为 1m,温度精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ,利用布里渊散射技术对应变进行监测,定位误差 $\leq 2\text{m}$ 。将监测数据汇总到一个平台之上,用大数据分析创建起设备健康状况评价模型,模型接受盐雾浓度、温湿度、振动幅值、电气参数等作为输入,并且输出健康指数,指数低于 70 分就会发出预警并给出故障原因和检修建议,从而达成故障的提前预警。

#### 4.4 完善设备运维管理与检修机制

运维管理机制要符合海上作业的特点。建立分级运维策略,日常巡检使用远程监测平台,每天自动产生状态报告,异常点用手机 APP 推送给运维人员,每月安排一次全面登岛检查,重点对浪溅区涂层破损、螺栓松动、密封胶条老化等进行检查,紧急抢修有应急预案,预案中明确了不同季节、不同潮位下最短可达路径和备件调运方案。分区隔离设计可以减小单点故障的影响,把光伏阵列分成若干个独立的发电单元,每个单元配备独立的汇流、升压设备,当某一个单元出现故障的时候,不会影响到其它单元的正常运转,保证故障定位和修复的可行性,在方案设计阶段就要考虑可维护性和运维可达性。检修上制定以设备状态评价为基础的不同种类检修计划,状态评价为良好的设备按周期延长到 1.5 倍的标准周期检修,注意状态按标准周期,异常状态缩短到 0.5 倍周期并优先安排,防止出现过度检修或者检修不到位的情况。建立备品备件管理体系,关键设备备件在岸基仓库储备,运维人员要参加有关海洋电气设备的专项培训,培训内容为盐雾腐蚀机理、密封检查方法、带电清洗技术、海上安全救生等,每年复训不少于 40 学时。建立全生命周期设备档案,对设备从安装到退役的全过程进行记录,出厂试验报告、安装记录、巡检记录、故障处理记录、维修更换记录等形成数字化档案库,给以后的项目提供经验反馈。

#### 5 结语

海上光伏电站一次设备运行稳定程度,是影响海上光

伏电站规模化发展的主要因素。系统分析了海洋环境因素和设备自身特性对稳定性的影响机理,找到了光伏组件衰减、箱变受潮、电缆腐蚀、保护装置误动等主要问题,从防腐蚀能力的提高、设备选型的优化、状态监测体系的建立、运维机制的完善四个方面给出了相应的解决办法。固定式海上光伏的结构形式同陆上类似,但是浪溅区腐蚀、桩基振动、盐雾凝露等海洋特有的因素使它的设备故障模式以及防护需求大相径庭。海上光伏正在由示范走向规模化应用,运维成了产业发展的关键瓶颈,依靠实时状态感知和数据分析开展预防性维护,可以达成运维决策的改善以及主动干预。随着材料技术、智能传感和数据分析技术的发展,海上光伏电站一次设备的运行可靠性会越来越高,给海上新能源规模化开发提供强有力的支撑。

#### 【参考文献】

- [1]刘博,李刚,刘诚,等.考虑环境影响的漂浮式光伏关键部件性能预测研究[J].环境技术,2024,42(11):134-141.
- [2]刘观晨.桩基固定式海上光伏项目的设计与施工策略[J].科技资讯,2024,22(10):85-87.
- [3]刘骁,贾志军.海上光伏的腐蚀破坏与防护措施[J].环境技术,2024,42(3):38-41.

作者简介:陈坤坤,(1998.03—),毕业院校:湖北理工学院,所学专业:电气工程及其自动化,当前就职单位:国华投资山东分公司,职务:副主运检员,职称级别:初级。