

海上光伏电站全生命周期设备运维管理体系构建与实践

苏 铮

山东国华时代投资发展有限公司, 山东 东营 257000

[摘要]海上光伏电站长期处于高盐雾、强台风、潮汐冲刷、生物附着等复合恶劣环境下, 设备运维遇到腐蚀速率快、可达性差、安全风险大等问题。传统的分段式、被动式的运维方式已经不能满足大规模发展可靠性的需要。本文主要研究海上光伏电站全生命周期设备运维管理, 分析海上环境对设备运维的特殊约束条件, 提出覆盖设计制造、施工安装、运营维护、退役拆除四个阶段的全生命周期运维管理体系框架。根据 2025 年实际工程运行数据, 海上光伏年均运维成本达 0.1~0.15 元/W, 约为陆上项目的 3~5 倍, 单艘运维船年燃油费超 80 万元。本文就组织架构标准化、作业流程制度化、数字化监测平台化、绩效改进闭环化这四个主要方面来论述体系的主要构成要素。

[关键词]海上光伏; 全生命周期管理; 设备运维; 数字化监测; 智能巡检

DOI: 10.64635/ja.2026.1395

中图分类号: TM615

文献标识码: A

Construction and Practice of a Whole-Life-Cycle Equipment Operation and Maintenance Management System for Offshore Photovoltaic Power Stations

Su Zheng

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

Abstract: Offshore photovoltaic power stations are exposed for long periods to harsh compound environments characterized by high salt spray, strong typhoons, tidal scouring, and biological attachment. Equipment operation and maintenance face problems such as rapid corrosion, poor accessibility, and high safety risks. Traditional segmented and passive operation and maintenance methods can no longer meet the reliability requirements of large-scale development. This paper mainly studies whole-life-cycle equipment operation and maintenance management for offshore photovoltaic power stations, analyzes the special constraints imposed by the offshore environment on equipment operation and maintenance, and proposes a whole-life-cycle operation and maintenance management framework covering four stages: design and manufacturing, construction and installation, operation and maintenance, and decommissioning and dismantling. According to actual engineering operation data in 2025, the average annual operation and maintenance cost of offshore photovoltaic projects reaches 0.1–0.15 yuan/W, about 3–5 times that of land-based projects, while the annual fuel cost of a single operation and maintenance vessel exceeds 800,000 yuan. This paper discusses the main components of the system from four aspects: standardization of organizational structure, institutionalization of operating procedures, platform-based digital monitoring, and closed-loop performance improvement.

Keywords: offshore photovoltaic; whole-life-cycle management; equipment operation and maintenance; digital monitoring; intelligent inspection

引言

海上光伏凭借不占陆地土地、水体冷却效果好提高发电效率、靠近沿海负荷中心等优势, 已经成为可再生能源的重要增长点。到 2025 年我国海上光伏已经由示范验证阶段进入到大规模商业化阶段, 截至 2025 年我国海上光伏累计装机规模以百兆瓦至吉瓦级项目为主, 山东东营垦

利 1GW 项目建成并网成为重要里程碑, 年发电量约 17.8 亿千瓦时。与陆上光伏相比, 海上光伏设备运行环境具有很高的特殊性, 高盐雾加快了金属的腐蚀速度, 强台风和波浪冲击给组件带来了交变的疲劳荷载, 潮汐带来了干湿交替, 海洋生物附着造成组件污损。据估计, 海上光伏年均运维成本为 0.1~0.15 元/W, 比陆地项目高 3~5 倍,

有的项目后期的维护费用甚至会占到总投资的30%以上。海洋浪花飞溅区腐蚀速度可达全浸区的3~10倍,设备腐蚀速度是陆地的数倍到数10倍。传统的故障后维修模式由于响应周期长、维修窗口少等原因,很难起到预期的效果,创建起覆盖电站整个生命周期的设备运维管理体系已经成为产业迫切需要。

1 海上光伏电站设备运维特征与全生命周期管理需求

海上光伏设备运维受到环境恶劣、运维可达性差和资产长周期性这三种限制。环境上,盐雾侵蚀会使金属结构发生腐蚀变薄,在组件表面沉积上一层盐,透光率降低,存在电弧的风险。海洋大气中氯化钠含量为12.4~60mg/m³,是陆地的15~75倍,金属腐蚀速率约为内陆大气环境的4~5倍。盐分积累会使组件的衰减率提高0.05%~0.13%,使组件的使用寿命减少2~5年^[1]。台风、波浪荷载使桩基、支架、锚固系统承受交变应力,疲劳损伤速度加快。潮汐干湿交替加重了密封系统的老化。浮式光伏还要解决浮体偏移、锚链张力波动等特有的问题。渤海湾等海域年均安全作业窗口期仅约120天,海上作业受到天气、海况等严格限制,维修依靠专用船舶或者平台,500t级运维船一次往返场区耗油2t,一次燃油费1.6万元左右,年运维里程大于1万km的,燃油费用超过80万元,是陆上运维车的20倍。2024年国际油价上涨之后,部分项目的运维成本所占总投资比例已经达到了15%以上。所以海上光伏对于运维的预见性和准确性要求远远大于陆上。全生命周期角度,海上光伏的设计寿命一般在25~30年左右,水下结构要达到长期免维护的目的。设计制造、安装质量、运行监测和退役处置任何一个环节的缺失都会造成资产价值非正常折损^[2]。经过研究发现,极端的组件衰减率会造成海上浮式光伏系统的全生命周期能量产出下降20%以上。因此运维管理要往前延伸到设计制造,往后衔接到退役拆除。

2 运维管理体系构建的总体框架

2.1 体系设计原则与目标

海上光伏运维管理体系的建立要遵照五个基本原则。预防性原则就是把运维管理的重心从故障之后的修复前移到状态监测和主动维护上,提前预警消除事故隐患。贯通性原则就是打破设计、施工、运营、退役等各个阶段之间所存在的各种管理壁垒,形成一个包含设备全生命周期数据链和责任链的闭环系统。安全性原则即把作业人员安全、电网安全、海洋生态环境安全放在第一位,建立严格

的防控制度。经济性原则是指运维策略的制定要以全生命周期成本最优为方向,安全可靠和成本可控之间寻找最佳平衡。可持续性原则就是指退役阶段要统筹考虑退役设备资源化利用,减少环境负担。

该体系的主要目的可以概括为四个方面。一是降低非计划停运率,用准确的故障预知和及时的反应来最小化发电损失。二是延长关键设备的有效服役寿命,用科学的维护方法来减缓设备性能退化的速度。第三,以安全可靠为前提来达到资源配置效率最大化的目的,即在保证安全可靠的基础上,对全生命周期的运维成本进行优化。某近海大型海上光伏电站应用智慧运维平台后,综合运维成本同比下降20%,故障响应时间缩短75%。四是创建数据引领的持续改进体系,在工程实践当中持续改进运维管理水准。

2.2 全生命周期覆盖与层级结构

全生命周期运维管理体系纵向覆盖,从设备设计制造阶段开始,一直到施工安装、运营维护和退役拆除为止。四个阶段不是孤立存在的,而是依靠同一个数据平台和信息流来实现前后贯通的。前序阶段形成的设备数字档案给后序阶段的运维决策提供基础数据,后序阶段的运行数据反过来又反馈到设计和制造环节,形成管理闭环。

横向构成上分为四个管理层级。制度层来制订运维管理的组织架构、职责分工、作业规程和绩效评价标准,执行层包含日常巡检、清洁保养、状态监测、故障维修这些具体的作业行为,支撑层涉及数字化监测平台、智能巡检设备、备件储存物流之类的技术与资源支撑,改进层依靠绩效指标和数据分析结果,促使管理流程和作业手段不断改善。

3 全生命周期各阶段运维管理重点

3.1 设计制造阶段的可靠性运维设计

设计阶段把运维前置思维嵌入其中,可以降低全生命周期成本。设备选型要适应海洋环境,双面双玻组件抗盐雾渗透性好、衰减率低,比常规组件更适合海上使用。天合光能2025年发布的抗盐雾方案,在70天的交变盐雾S8试验中可以使得功率衰减小于0.5%。支架、桩基要兼顾力学性能和防腐耐久性,中科院海洋所研究团队认为锌铝镁镀层的耐蚀性是纯锌镀层的15倍以上,在海上光伏支架上具有良好的耐蚀性。工程实践证明,创建C5等级全链防护体系可以大大减少运维防腐的成本。还要事先安排好智能巡检航路、维修通道和备件更换区。设备技术档案属于形成起来的运维管理基础数据源。

3.2 施工安装阶段的质量控制与数据采集

施工安装质量决定设备初始健康状况,也是全生命周

期数据链的起始点。桩基沉桩精度、支架拼装质量、电气设备密封防水性能都会对之后的故障率产生影响。应建立严格的施工过程质量控制体系，以某招远海上光伏项目为例，对胎架进行优化设计，防腐工艺进行改进，螺栓球加工精度提高，使支架组拼一次验收合格率达到 88.9%，返修率降低超过 40%。施工阶段所采集的数据要录入到数字化档案中，既可作为验收的依据，也可成为运营阶段趋势分析的基础。中交三航局在海上光伏施工中创建电子沙盘，对重要工序实施全过程动态模拟，达成施工方案可视化交底 150 多次，保证 12 个关键节点精确掌控，创造出单日完成 9 个平台安装的纪录，工效提高 20%。施工期同步接入数字孪生监管平台在多个项目上已经得到了验证，很好地解决了数据孤岛的问题^[3]。该近海大型海上光伏电站利用 2800 张无人机影像搭建起 AI 视觉检测系统，得到的缺失组件召回率为 96.15%，F1-score 为 98.04%，单张图像的平均处理时间为 1.12 秒。

3.3 运营维护阶段的智能巡检与预防性维修

运营维护属于体系的核心执行部分，要由全面的人工巡检转变为空地协同、智能为主、人工为辅的模式。智能巡检上无人机装有红外热像仪和可见光相机，按照事先设定好的航线自动飞行采集组件表面的温度和外观，利用 AI 识别出热斑、隐裂、玻璃碎裂以及盐层沉积。无人船和水下机器人对水下桩基、海缆和锚固系统进行检测。根据行业数据可知，智能巡检可以把漏检率降低 70%以上，单次巡检时间从原来的 8 个小时缩短到现在的 1.5 个小时。巡检覆盖效率提升 80%。数字孪生平台以 1:1 的方式还原电站的三维模型，数字世界与物理世界映射误差率低于 2%。将物联网传感器的电流、电压、温度、辐照度、海洋气象数据全部整合到一起，实现秒级监测并可视化，

数据丢失率小于 0.1%。使用 AI 算法得到的故障预警准确率达到了 92%，成功预警了由于盐雾造成的接线故障。热斑效应造成的发电效率损失降低了 15%。预防性维修根据设备健康状况评价来采取不同的措施，状态良好的设备按期保养，发现异常的设备制定相应的处理方案并确定作业时间，性能严重退化、经济性差的设备提前安排更换。应该建立气象和海洋水文联动机制来动态产生安全运维窗口，降低恶劣天气作业风险 30%，提高计划的执行率。

3.4 退役拆除阶段的设备评估与资源化

退役拆除阶段属于全生命周期管理的收尾部分，包含设备剩余寿命评定、安全拆解以及组件资源化利用等内容。伴随着海上光伏装机容量的迅速增长，大规模退役会在未来的十年里集中发生。运营期要创建设备性能退化数据库，包含组件衰减率追踪，支架腐蚀程度评判，电气设备绝缘老化趋向等内容，给退役时点的科学决定赋予支撑。对剩余发电性能还可以的设备进行评估，看是否可以将其梯次利用到低要求的场景中；对已经超过了经济服役期的设备则应该规范拆解，回收其组件。光伏组件中含玻璃、铝、硅、银等高值材料，用物理法或者化学法回收可以大大减少光伏产业的碳足迹，实现资源闭环。2025 年中国循环经济协会专门召开退役风光设备循环利用发展研讨会，国家能源局已经将老旧风电站升级改造、风电机组退役回收和再利用列为 2025 年能源行业标准计划立项重点方向^[4]。运维管理体系的设计要前瞻性地把退役管理的要求融入到运营阶段的设备资产登记和状态评价工作当中，防止退役阶段缺少有效的决策依据而仓促处置。为了便于直观地呈现全生命周期各个阶段的运维管理重点以及实践要点，对表 1 进行整理归纳。

表 1 海上光伏电站全生命周期各阶段运维管理要点

阶段	核心管理目标	关键管理活动	数据产出	跨阶段衔接要点
设计制造	嵌入可运维性、奠定可靠性基础	环境适应性选型、防腐体系设计、智能巡检预留、技术档案编制	设备技术参数、防腐体系配置、设计寿命指标	档案移交至施工安装阶段
施工安装	确保安装质量、采集初始健康数据	桩基精度控制、支架拼装验收、密封防水测试、初始数据采集	沉桩监测数据、安装精度记录、电气性能基线	初始状态数据纳入运维档案
运营维护	降低非计划停运、延长设备寿命	智能巡检、状态监测、预防性维修、作业窗口管理	运行参数序列、健康评价报告、维修作业记录	退化数据反馈至设计与更换决策
退役拆除	安全处置与资源化回收	剩余寿命评估、设备拆解、组件回收、场地修复	退役评估报告、回收物品质检数据	退役经验反馈至新一代电站设计

4 运维管理体系的核心构成要素

4.1 组织架构与职责分工

高效的运维管理组织结构要达成战略管理、区域协调

和现场执行这三个方面的功能融合。战略管理层由公司总部或者资产管理部门来执行，负责制订运维管理制度标准、统筹年度运维预算、组织重大故障的事故调查以及开

展全生命周期的资产绩效评价。区域协调层对接管辖范围内的各个海上场站,对资源调配、备件区域仓储管理、跨场站技术经验共享等进行管理。现场执行层由场站组成运维团队,设置监测值班组对数字化平台进行实时监控和预警处理,设置巡检作业组对无人智能装备进行调度并做数据复核分析,设置维修作业组对故障位置进行定位后做专项维修工作^[5]。各个层次之间职责边界要明确划分清楚,防止出现职责交叉造成管理效率降低的情况。运维团队还要有海洋工程、电气自动化、材料腐蚀等各方面的技术人员,以满足海上运维作业多专业交叉的特点。

4.2 标准化作业流程与制度规范

标准化作业流程是保证运维质量一致性和作业安全的主要方式。海上光伏运维所涉及的作业活动有日常巡检标准化、状态监测和数据记录、清洁维护作业、故障排查流程、维修作业实施方案、应急事件处置预案、备品备件出入库管理等,每一个都必须编写出对应的标准化作业指导书。作业指导书要规定作业前风险辨识和安全审批的要求,作业过程中关键控制点和检测的要求,作业完成后质量验收的标准及记录归档的要求。安全管理上应该建立出海作业审批制度、海上作业安全操作规程、紧急撤离和医疗救援预案、极端天气条件下应急响应方案。另外还要根据不同的设备、不同级别来制定标准的故障编码和维修策略库,以减小故障处置时决策的延迟。

4.3 数字化监测与故障诊断平台

数字化监测平台就是全生命周期运维管理技术的大脑。该平台要将数据采集和监控系统、环境监测系统、智能巡检系统、设备资产管理系统等进行整合,创建起统一的数据底座和信息视图^[6]。数据采集层设置在现场的各种传感器要能持续采集电压、电流、温度、辐照度、桩基倾斜、锚链张力等多方面数据,并且要和气象、海洋水文数据一起接入。数据分析层依靠机器学习算法来建立设备健康评价模型、故障预测模型,对异常数据进行智能诊断分析,并且可以自动发出预警信息。从可视化呈现上来说,用数字孪生技术创建出海上电站三维实景模型之后,就可以对设备的运行状态以及异常点位展开动态展示,并且支持运维人员实施远程感知和辅助决策。海上光伏智慧运维一体化平台已应用于海上光伏项目的实际操作中,构建起“感知-分析-决策-执行”全流程智能运维新范式,将海洋水文气象、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融合,形成监测、评价、诊断、预测、告警的能力,解决了传统电站管理中数据分散的问

题^[7]。平台还要创建起设备全生命周期的电子档案,把每台设备从出厂、安装、历次维修到退役的所有过程数据全部保存下来,变成可以追踪的数字资产。

4.4 绩效指标与持续改进机制

绩效评价是运维管理持续改进的抓手。应创建包含运维效率、设备可靠度、经济效益和安全状况等各方面内容的指标体系。运维效率上可以设置故障平均修复时间、计划维修完成率、预防性维修占比和巡检覆盖率等指标。设备可靠性的指标有设备可用率、非计划停运次数、组件年衰减率、关键设备故障间隔期等。经济效益上可以设置度电运维成本、发电量损失率和备件库存周转率等指标^[8]。从安全管理角度出发,可以设置可记录的事故率、作业窗口利用率、安全培训覆盖率等指标。绩效数据要定时搜集并加以剖析,找出运维管理上的短板之处,进而对管理策略和作业手段做出调整。持续改进机制还要有定期的管理评审、同行对标分析和新技术应用试点推广等制度安排。

5 结束语

海上光伏电站的设备运维管理,实际上就是对海洋极端环境的一种应对方式。文章从海上光伏的环境特点出发,分析了全生命周期各个阶段的运维管理需求,建立了一个包含设计制造、施工安装、运营维护和退役拆除四个阶段的运维管理体系框架,从组织架构、作业流程、数字化平台和绩效改进四个方面论述了体系的主要组成要素。根据实际情况工程应用数据可知,采用智能巡检、预防性维修相结合的方式可以明显减少因突然出现的故障而造成的停机时间,数字孪生平台驱动状态监测可提高故障的预警及时性,标准化作业保证了运维质量的一致性。未来要重点推进人工智能算法在复杂海洋环境下的诊断精度提高、深远海无人化运维装备的研发应用、基于全生命周期成本模型的运维策略动态优化等方向的工作,不断推进海上光伏运维管理体系的更新换代。

[参考文献]

- [1]韩春阳.光伏电站工程中水上光伏高强预应力管桩沉桩精度控制研究[J].电力设备管理,2026,(6):220-222.
- [2]程佳才,刘双志,张玲.智能无人机红外巡检技术在光伏电站故障诊断中的应用[J].光源与照明,2025,(6):165-167.
- [3]张岩峰,崔振磊,惠星,等.桩基固定式海上光伏支撑结构防腐蚀设计研究[J].西北水电,2025,(4):36-41.
- [4]官明开,林旻,冯和静,等.海上光伏桩基质量关键控制点分析[J].工程质量,2025,43(S1):217-220.
- [5]王玉新.智慧数字技术在海上光伏电站运维管理中的应

用[J].集成电路应用,2023,40(9):296-297.

[6]袁博,李招招,宋璇,等.海上光伏电站智慧运维一体化平台研究及应用[J].西北水电,2025,(4):123-129.

[7]靳迪,经秋霞,郝润朴,等.环境友好型清洗剂在海上漂浮式光伏清洁运维中的应用[J].清洗世界,2025,41(3):113-115+120.

[8]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:苏铮(2000.04—),毕业院校:华北电力大学(保定),所学专业:机械工程,当前就职单位:山东国华时代投资发展有限公司,职务:运检员,职称级别:助理工程师。