

高湿高盐环境下光伏设备可靠性研究

刘海洋

山东国华时代投资发展有限公司, 山东 东营 257000

[摘要]高湿高盐环境给光伏设备的长期可靠运行造成严重威胁。文章对环境特征及其影响机制进行了分析,研究了湿热老化和盐雾腐蚀这两种主要的失效机理,综述了加速老化试验设计、盐雾与湿气耦合试验、性能在线表征和寿命预测等可靠性试验方法。就失效机理和试验方法而言,从材料选择和表面保护、封装结构改进、电气系统抗腐蚀设计、运维和状态评价四个方面给出了可靠性改善的途径,给沿海和海上光伏电站的设计选型和运维管理给予技术上的参照。

[关键词]光伏设备;高湿高盐环境;盐雾腐蚀;湿热老化;可靠性试验

DOI: 10.64635/ja.2026.1393

中图分类号: TM615

文献标识码: A

Research on the Reliability of Photovoltaic Equipment in High-Humidity and High-Salinity Environments

Liu Haiyang

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

Abstract: High-humidity and high-salinity environments pose serious threats to the long-term reliable operation of photovoltaic equipment. This paper analyzes environmental characteristics and their influence mechanisms, studies two major failure mechanisms, namely damp-heat aging and salt-spray corrosion, and reviews reliability testing methods such as accelerated aging test design, coupled salt-spray and humidity testing, online performance characterization, and life prediction. Based on failure mechanisms and testing methods, reliability improvement paths are proposed from four aspects: material selection and surface protection, improvement of encapsulation structures, corrosion-resistant design of electrical systems, and operation, maintenance, and condition assessment. The study provides technical reference for the design selection, operation, and maintenance management of coastal and offshore photovoltaic power stations.

Keywords: photovoltaic equipment; high-humidity and high-salinity environment; salt-spray corrosion; damp-heat aging; reliability testing

引言

伴随着我国沿海以及海上光伏装机容量的迅速增长,高湿高盐环境给光伏设备可靠性造成的限制也越来越明显。传统的内陆光伏失效规律和防护经验不能直接转移过来,设备在盐雾、高湿、温变等多应力耦合作用下出现加速老化和腐蚀,严重地影响着电站的经济性和安全性。现有的标准测试方法以单因素加速为主,和真实的服役环境相差很大,并且新型高效电池在该场景下长期退化的行为没有得到系统的探究。

1 高湿高盐环境特征及其对光伏设备的影响

高湿高盐环境主要发生在沿海地区、海上光伏电站和岛屿等地。我国近海光伏装机潜力超过 100GW,但是该类区域的腐蚀性是由高浓度氯离子、持续高湿度和盐雾沉

降共同造成的。海洋环境湿度常年大于 70%,盐雾中氯化钠附着后形成电解质溶液,对金属部件产生电化学腐蚀,钠离子、氯离子容易在玻璃表面形成导电通道,降低抗 PID 性能^[1]。光伏设备的各个子系统都会受到影响。铝合金边框在盐雾侵蚀作用下会出现阳极氧化层破损现象,从而导致基体出现腐蚀。接线盒、连接器为薄弱环节,密封失效后会使得水汽、盐雾进入。退役组件拆解可知,沿海环境下的电缆铜导体氧化之后接触电阻急剧上升,成了热斑的引发点。高湿和高盐存在很强的耦合效应。湿气是盐离子的迁移介质,盐离子是绝缘电阻降低、电化学腐蚀加快的催化剂。经过研究得知,海上光伏组件表面的盐沉积会使退化速度增加 0.05%~0.13%,寿命减少 2~5 年。

2 光伏设备失效模式与机理分析

2.1 湿热老化机理

湿热老化属于高湿高盐环境里光伏组件性能衰退的主要原因。高温高湿时,水汽透过封装材料渗入到组件内,造成物理化学反应,使电气性能不断恶化。封装胶膜水解为主要途径。EVA 胶膜在高温高湿环境下容易水解,产生乙酸等酸性物质腐蚀电池片的栅线和焊带,造成串联电阻增大、填充因子下降。新南威尔士大学的研究表明,用激光辅助烧结结点的 TOPCon 组件在湿热环境下存在开路电压降低驱动的新衰减途径,不同于以前关注的串联电阻增加机制。更复杂的失效就是钠离子迁移破坏。硅异质结组件湿热试验显示,玻璃中浸出的钠离子在湿气的作用下迁移到电池上,破坏了钝化层,功率损失达到 57.6%。用低钠玻璃或者玻璃-玻璃封装,在 2000 小时湿热老化后功率损失可以控制在 3% 以下。

2.2 盐雾腐蚀机理

盐雾腐蚀对光伏设备的影响主要是金属部件的电化学腐蚀以及电气绝缘性能的下降这两个方面。盐雾中含有的活性氯离子可以穿透金属表面的保护性氧化层,和金属基体进行电化学反应,生成可溶性金属氯化物,使金属材料不断受到侵蚀。

对于 p 型 PERC 单晶硅光伏组件的研究表明,盐雾应力本身对组件的电气绝缘性能影响很小,但是盐雾腐蚀之后进行的 PID 测试发现组件存在严重的电势诱导衰减效应,电性能受到很大的影响。由此可知,盐雾应力会加重 p 型 PERC 单晶硅光伏组件的 PID 效应,其本质就是盐雾中钠离子渗透到光伏组件内部太阳能电池里,造成盐雾应力 and PID 效应共同影响。因此,对长期在海上工作的部件来说,单个应力不能完全体现其所处的长期应力环境,需要采用综合老化试验来更接近地模拟现场情况。

盐雾会改变光伏组件的光学性能。光伏组件表面的盐雾沉积会使得光伏组件表面透光率降低,进而导致光伏组件光电转换效率降低。长期处于高盐雾环境的光伏系统中,连接器以及支架连接件会因为腐蚀、氧化而出现电气连接性能降低的现象。电化学诊断技术的发展给盐雾腐蚀的早期检测赋予了新的手段,动电位极化、电化学阻抗谱等方法可以定量测定腐蚀动力学,在可见损伤出现之前就预估到失效。

3 高湿高盐环境下光伏设备可靠性试验方法

3.1 加速老化试验设计

光伏设备的可靠性评价依靠加速老化试验,主要原理

就是把高于实际服役条件的应力水平施加到设备上,从而激发失效模式,推算出产品在正常使用条件下寿命。目前国际通行的标准主要包括 IEC 61215 系列、IEC 61701 盐雾腐蚀测试以及 IEC 63126 高温测试等。ASTM E1171 给出了三种环境试验程序,热循环程序、湿度-冷冻循环程序、延长持续时间湿热程序,用电偏置模拟现场部署模块的应力。

但是 IEC 标准中单项环境试验元素单一,不能真实地反映户外实际运行环境中各种应力协同作用的复杂情况。综合序列加速老化测试方法的提出,就是为了解决上述问题而提出的。研究表明,综合序列加速老化测试方法并不是把单一环境因素的可靠性测试任意组合起来,而应该根据实际的气候数据进行比较,再确定不同的老化测试条件;序列中各个环境因素的先后顺序也会对测试结果产生很大影响。

湿热老化试验中 IEC 61215 标准规定的湿热试验条件是 85℃、85% 相对湿度,时间是 1000 小时。但是实际研究发现,大部分组件可以经过 1000 小时的湿热试验,真正的耐久性判定需要测试时间达到 3000 小时以上。对高湿高盐环境有特殊要求的盐雾腐蚀测试标准 IEC 61701 规定,用 5% 浓度的氯化钠溶液,pH 值在 6.5~7.2 之间,暴露时间为防腐等级分为 6 小时、24 小时、96 小时等不同的周期,组件以带电状态在盐雾腔内暴露,模拟实际运行环境的电气负载和腐蚀双重作用。

3.2 盐雾与湿气耦合试验

单个盐雾试验或者湿热试验不能完全体现出高湿高盐环境的腐蚀情况。盐雾和湿气之间存在着明显的耦合作用,盐离子在湿气的作用下加快了迁移的速度,湿气给电化学腐蚀提供了电解液的环境。所以盐雾和湿气耦合试验对准确评价光伏设备在高湿高盐环境下可靠性来说十分重要。

耦合试验可以采用先湿热后盐雾、先盐雾后湿热或者循环交替等不同的序列方式。湿热预处理会使封装材料吸湿软化,减小它对盐离子入侵的阻隔作用,从而增大后面盐雾腐蚀的影响。研究结果表明,盐雾腐蚀之后再 PID 测试会造成严重的 PID 效应,这是由于湿热环境下钠离子迁移的缘故。所以合理的耦合试验序列要根据实际的气候特点来设计。

新型加速老化方法也不断出现。新南威尔士大学的研究团队提出了一种基于硝酸盐诱导、pH 值可控污染的电池级加速老化方法,在弱酸性硝酸盐环境下对前表面金属

化稳定性进行评价,可以更真实的模拟 EVA 封装组件内部的化学环境,有预测价值。该方法给电池级快速评价和组件级长期老化行为之间提供了一条有效的通道。

3.3 性能衰减在线表征

性能衰减表征属于可靠性试验的重要部分,目的在于建立试验应力和性能退化的定量联系。电学性能测试是表征的主要方法,一般有最大功率、开路电压、短路电流、填充因子、串联电阻等参数的前后对比。湿热老化后填充因子的下降是反映接触电阻增大、钝化层退化的综合效果的最灵敏的电性能变化指标。

光学表征也不能忽略。电致发光(EL)和光致发光(PL)成像可以直观地显示电池内部的缺陷分布,即裂纹、PID 暗区、腐蚀斑点等^[2]。非破坏性表征法可以在试验的各个时间点上重复使用,从而跟踪退化的过程。新南威尔士大学的 TOPCon 电池研究显示,Zn(NO₃)₂ 处理之后电池退化趋势同组件级湿热试验存在较好的一致性,主要表现在填充因子下降,EL 和 PL 图像分别从不同的角度表现出接触腐蚀以及钝化损失的微观机理。

电化学诊断技术近些年来得到越来越多的关注。动电位极化、循环伏安法、电化学阻抗谱等方法可以测定腐蚀动力学,检测界面的退化,在可见损伤出现之前就预测失效。这些技术把传统的盐雾箱试验同电化学、纳米尺度表征结合起来,给剖析光伏电池里的腐蚀现象赋予了特别的分析架构。

3.4 可靠性统计与寿命预测

可靠性试验的主要目的就是建立量化的预测模型,也就是用加速老化试验的数据来推算光伏设备在实际服役条件下寿命的预测模型。加速因子是连接加速试验和现场服役的纽带,它的大小由试验应力和现场应力的差别以及退化过程的活化能来决定。常用寿命预测模型有阿伦尼乌斯模型、逆幂律模型等。

高湿高盐环境下多应力耦合条件下寿命预测就变得比较复杂。盐雾浓度、湿度、温度三种应力同时作用于光伏设备,并且各个应力之间存在相互影响,简单的线性叠加模型不能很好地描述实际的退化行为。因此要根据多因素加速寿命试验数据建立多应力寿命预测模型,其中含有交互项。

综合序列测试结果和户外运行结果的统一检验是寿命预估可靠的先决条件。因为综合序列测试包含了很多环境因素以及它们之间的相互影响,所以它的预测结果要比单独进行的测试要更加接近实际情况。但是综合序列测试时间长、成本高,怎样在保证预测精度的同时改进测试方案,依然是目前的研究重点。

4 光伏设备可靠性提升策略

4.1 材料选型与表面防护技术

材料选型是提高光伏设备耐腐蚀性的主要方法。耐盐雾腐蚀的海光专用镀膜玻璃是用致密的 SiO₂ 底层和高透减反表层的双层结构组成的,底层可以有效地阻挡水汽和氯离子的渗透,表层具有自清洁和 94% 以上的超高透光率^[3]。边框材料上,传统的铝合金边框已经不能适应高腐蚀环境的要求了,用 AA15 级抗腐蚀铝合金边框或者玻璃纤维增强聚氨酯复合材料边框来取代,再配合双层镀膜玻璃形成一道防护屏障。就封装材料而言,传统的 EVA 胶膜在高湿、高盐的环境下容易发生水解,从而影响到它的使用。光转胶膜和丁基胶密封技术相结合,配合丁基胶封边封孔工艺,可以大大提高组件的阻水性能。隆基海芯胶膜采用双 EPE 结构,从根本上消除漏电问题,阻止 EVA 水解释放醋酸腐蚀电池。

4.2 封装结构优化设计

封装结构的优化设计是达到全方位防护的目的。对于高湿高盐环境,组件要形成多层密封。丁基胶封边封孔技术可以阻止水汽从组件边缘渗透进去。高密封接线盒在接线盒上实现了 IP68 级的防水防尘性能,在长时间浸泡的情况下也可以保证内部电路绝对干燥。玻璃-玻璃封装结构在阻水性上比其它封装结构要好得多。研究表明,在 2000 小时湿热老化之后,用玻璃-玻璃封装配置的组件功率损失比传统的背板封装结构小得多。主要是由于双层玻璃结构从根本上消除了背板吸湿、透湿的通道,配合边缘密封胶的改进,形成了几乎完美的水汽屏障。

4.3 电气系统抗腐蚀设计

电气系统抗腐蚀设计在高湿高盐环境里更为重要。接线盒、连接器属于电流输出的重要节点,密封性、防腐性的好坏直接关系到整个组件的可靠性。高密封接线盒用宽温域、高化学稳定性的材料制成,内部密封结构经过改进,防腐能力大大提高。电缆、连接器的选型也不能小视^[4]。光伏专用电缆应采用交联聚烯烃等耐候性材料,满足 H1Z2Z2-K 或者 PV1-F 标准,具有良好的抗紫外线、抗臭氧和抗温湿循环的特性。电缆连接器的压接质量影响系统的可靠性。不专业的压接或者使用不匹配的工具都会造成内部线芯损伤或者接触面积不够,给长期运行埋下隐患。

4.4 运维与状态评估方法

即使使用最优的设计,也需要科学的运维管理。在线监测和定期评估相结合是目前的主要方法。沿海滩涂光伏

电站的实践表明，在智能化运维体系中发电设备的故障率可以小于 0.5%，故障诊断准确率大于 98%。巡检时主要对边框腐蚀、接线盒密封、电缆接头温度、盐沉积等进行检查。红外热像仪可以发现连接器的异常温升。定期清洗

玻璃表面的盐沉积物可以提高透光率，降低渗透风险。运维系统要创建腐蚀等级档案，动态调节清洗次数。为了更好的把握失效模式和提升策略之间的联系，将表 1 的内容进行汇总。

表 1 高湿高盐环境下光伏组件主要失效模式及可靠性提高措施汇总

失效模式	主导机理	加速试验方法	提升策略
PID效应加剧	盐雾Na ⁺ 渗透	盐雾试验后接PID测试	选用低钠玻璃、绝缘边框
EVA水解/腐蚀	乙酸释放、金属腐蚀	湿热老化（≥1500h）	更换POE/EPE胶膜、丁基胶封边
金属边框腐蚀	Cl ⁻ 电化学腐蚀	盐雾箱暴露试验	阳极氧化AA15级、GRPU复合材料边框
接线盒/电缆失效	湿气侵入、密封失效	盐雾+湿热耦合试验	高密封IP68设计、耐候电缆
玻璃表面透光衰减	盐沉积、水渍形成	盐雾暴露+清洁周期评估	双层镀膜玻璃、自清洁涂层
层压件分层	水汽侵入、界面失效	PID-d分层测试	阻水胶膜、边缘增强封装

5 结束语

高湿高盐环境对光伏设备的可靠性造成了很大的威胁。文章从环境特征出发，对湿热老化和盐雾腐蚀的机理进行了研究，对加速老化试验、耦合试验、在线表征及寿命预测等技术进行了综述，并从材料、结构、电气、运维四个方面提出了提高措施。目前还存在一些问题，现有的加速试验以单因素或者简单的序列为主，不能真实地模拟出多应力协同的情况，电池、组件、系统多层级失效机理之间的联系还不清楚，新型高效电池技术在长期高湿高盐环境下退化的数据也不够。随着海上光伏、近海渔光互补等场景的不断扩大，材料创新、测试标准化、智能运维三者之间的协同发展将会使光伏产业由原来的“量”扩张变为现在的“质”提升。

【参考文献】

[1]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.

[2]张文博,王明宇,尚志生.“盐光互补”光伏支架接地系统防腐设计与分析[J].光源与照明,2024(4):104-106.

[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设计研究[J].西北水电,2025(4):36-41.

[4]谈诚,许一川,任剑锋,等.沿海环境中光伏钢结构支架的常用防腐蚀技术[J].腐蚀与防护,2023,44(7):81-85.

作者简介：刘海洋（1997.07—），毕业院校：内蒙古工业大学，所学专业：机械工程，当前就单位：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。