

晶硅光伏电池的常见失效模式及预防对策

苏荣 廖劼 薛建锋 敖佳雨 王永洁*

通威太阳能(成都)有限公司, 中国·四川 成都 610299

摘要: 晶硅光伏电池在长时间使用中会遇到很多破坏风险, 这些风险会严重影响发电效率和使用寿命。文章全面总结了晶硅光伏电池的主要破坏原因、发生机制以及防治方法。首先清楚说明了破坏原因的基本概念及其给电站生产效益带来的坏处, 并且把常见的破坏情况分成性能下降类型和机械破坏类型两大主要类别。接着详细说明了电位诱导退化(PID)的离子移动和电压积累原理、热斑现象和蜗牛纹的产生和发展过程, 还有电池表面开裂、焊点被腐蚀、封装材料逐渐变质这些具体情况的出现原因和根本原因, 研究了材料本身的特性、生产工艺中的缺陷、外界环境的压力以及电流电压条件的综合影响。对于以上提到的问题, 文章从三个方面提出了解决办法: 在设计和制造过程中, 通过改进电池表面反光层、封装使用的胶膜材料以及组件整体结构来提高抵抗PID的能力。在电站运行维护期间, 特别重视每隔一段时间使用红外线设备检查、测量绝缘电阻并及时清理保养工作, 这样做可以有效延长电池的使用寿命。

关键词: 晶硅光伏电池; 失效模式; 预防对策; 电位诱发衰减; 可靠性

Common Failure Modes and Preventive Measures for Crystalline Silicon Photovoltaic Cells

Su Rong, Liao Jie, Xue Jianfeng, Ao Jiayu, Wang Yongjie*

Tongwei Solar (Chengdu) Co., Ltd., China Sichuan Chengdu 610299

Abstract: Crystalline silicon photovoltaic cells face numerous risks of damage during prolonged use, which can severely impact power generation efficiency and service life. This article comprehensively summarizes the primary causes, mechanisms, and mitigation strategies for these damages. It first clarifies the fundamental concepts of damage causes and their adverse effects on power plant production efficiency, categorizing common failures into two main types: performance degradation and mechanical damage. The study then elaborates on the principles of ion migration and voltage accumulation in potential-induced degradation (PID), the formation and progression of hot spots and snail trails, as well as the causes and root reasons behind surface cracking, solder corrosion, and gradual deterioration of encapsulation materials. It investigates the combined effects of material properties, production process defects, external environmental stressors, and electrical conditions. To address these issues, the article proposes three solutions: improving PID resistance through enhanced surface reflector layers, encapsulation film materials, and overall module design during manufacturing; and emphasizing periodic infrared inspections, insulation resistance measurements, and timely maintenance during power plant operation to effectively extend battery lifespan.

Keywords: Crystalline silicon photovoltaic cells; Failure modes; Preventive measures; Potential-induced degradation; Reliability

0 引言

全球能源结构正在发生快速变化, 光伏发电已经成为未来最有希望的可再生能源种类之一。晶硅光伏电池是目前市场上使用最多的类型, 其长期运行的可靠程度会直接影响到发电站每年产生的收入以及投资者收回本金和获得利润的速度。在真实的室外环境中, 光伏电池组件会受到温度反复变化、水分腐蚀、强烈阳光照射、物体压力挤压以及电流冲击等多种因素共同作用, 最终出现性能下降或者完全停止工作的现象。如果出现这样的问题, 就会造成发电量减少, 甚至可能发生火灾这种危险事件, 明显缩短

发电站能够正常使用的年限, 并且增加后期维修的成本和造成的经济损失。因此, 需要认真研究晶硅光伏电池在长期使用过程中容易出现的各种故障原因, 并且根据这些原因制定出切实可行的预防措施和提高可靠性的具体方法, 这样才能确保光伏发电系统的整个使用周期都保持平稳并且高效运转。

1 晶硅光伏电池常见失效模式概述

1.1 失效模式的定义与影响

晶硅光伏电池出现失效情况, 就是指在生产、运输、安装或者使用很长时间以后, 因为材料、工艺、外界环境

或者电流电压这些原因的作用,导致电池组件输出电力的多少、电流电压的大小以及整体结构的坚固程度发生变化,并且这种变化是不正常的、超出预期的^[1]。一旦发生了这样的失效情况,就会造成电池组件的发电能力下降,同时也会影响到整个光伏电站系统的发电效率和年发电总量。从经济效益的角度来看,失效会导致电池组件的性能不断恶化,使用年限缩短,需要投入更多的资金来维修和更换设备,运维成本也会大幅增加,从而严重影响到项目的最终回报率。如果一开始就出现了特别严重的失效情况,甚至还会带来安全隐患,比如由于局部温度过高而引发火灾的风险。

1.2 主要失效模式分类

根据失效的具体表现方式和引起的原因,晶硅光伏电池常见的失效类型可以分为两种主要类型,一种是性能下降类型的失效,另一种是机械损伤类型的失效。性能下降类型的失效主要表现为组件发电效率和输出能力的不断降低,这种问题的核心原因通常是材料内部电化学性质发生了变化,或者电气连接出现了不正常的情况,整个过程显得非常隐秘。一些典型的例子包括电位诱发衰减(PID),这种衰减是因为电压波动造成的;封装材料的老化问题,比如乙烯醋酸乙烯酯共聚物因为长时间使用而颜色变黄、表面出现裂缝,或者背板因为温度变化而变得脆弱易碎;还有焊带和栅线在使用中被腐蚀,导致电路连接的电阻变大,影响整体性能。机械损伤类型的失效则是指组件的结构发生了物理上的破坏,这种情况通常是因为受到外来的撞击或者内部积累的压力导致。常见的机械损伤类型有电池片内部出现裂缝,比如沿着主栅线分布的细长裂纹或者覆盖大面积的网状裂纹;边框和背板因为承受压力而发生破裂,或者因为某个地方被挡住阳光照射而产生局部阴影,进而引发高温聚集,造成不必要的热斑现象,同时还会出现一种特殊的纹路效果,叫作“蜗牛纹”。这两种类型的失效经常互相影响,共同限制着光伏组件的使用寿命和运行稳定性。

2 主要失效模式的具体表现与成因

2.1 电位诱发衰减(PID)的机理与影响因素

电位诱发衰减主要表现为组件功率的异常大幅衰退,其核心机理在于高压电场作用下,电池组件内部发生有害的离子迁移和电荷极化现象^[2]。当组件负偏压过高时,封装材料中的钠离子会向电池表面迁移并聚集,破坏减反膜的钝化效果,同时导致电池内部载流子复合加剧,电池片自身产生极化,最终表现为开路电压、填充因子及输出功

率显著下降。这个过程受到环境湿度、温度以及组件对地电压等多种电气条件的影响,同时也与封装胶膜材料性能、玻璃表面状况以及电池减反膜质量密切相关。

2.2 热斑效应与蜗牛纹的产生与扩散

热斑现象起源于组件内部某个位置的电池片因为出现裂缝、制造过程中存在瑕疵或者受到外界遮挡而变成了一个额外的负载,这样就造成这个区域承受了反向电压并且温度不断升高。局部区域的过热损坏了电池片本身,并且有可能破坏掉整个组件的封装材料以及背板部分。蜗牛纹表现出来的样子就是组件表面分布着一些看起来像蜗牛爬行留下的黑色线条,这种图案的形成原因非常复杂,涉及到多个方面的因素互相影响。电池内部的裂缝成为了应力集中的地方,封装材料中添加的一些化学成分,在遇到水分、氧气和阳光热量的作用之后会发生化学变化,生成银或者其他物质沿着这些细微裂缝慢慢渗透出来,最终形成了肉眼可见的花纹图案,这个整个形成的过程跟封装材料的配方设计以及外界环境产生的压力有着非常密切的关系。

2.3 电池隐裂、焊带腐蚀及封装老化的原因

电池内部裂缝通常因为制造以及装配环节受到强烈冲击而产生,比如焊接操作不够规范、层压压力分布不均、搬运过程中出现剧烈震动或者安装位置存在倾斜等问题^[3]。焊带被腐蚀的情况常常出现在高温潮湿环境下,水蒸气从封装边缘渗透进去以后碰到残留的助焊剂,两者一起发生化学反应造成破坏,结果就是连接线路的电阻变得更大,电力转化效率明显降低。封装材料慢慢变老的过程主要包括乙烯醋酸乙烯酯胶膜颜色变暗以及背板表面开裂这些情况,根本原因来自阳光长时间照射、温度持续升高还有空气湿度增加这些不利条件,各种因素会让材料内部发生光氧化反应和水解反应,最终导致光线透过能力减弱并且粘合牢固度变差。

3 针对各类失效的预防与改善对策

3.1 抗PID设计与材料工艺优化做法

对于PID效应的防范,重点放在电池结构和组件封装的初期改进上。在电池方面,可以通过提升电池片氮化硅减反膜的密实度来阻止钠离子进入硅片内部扩散。在组件方面,关键是挑选具有高体积电阻率和强钠离子阻隔性能的封装胶膜,比如抗PID类型的EVA胶膜或者聚烯烃这类封装材料,来切断电流泄漏的路径。通过改善组件结构的设计方案,比如在层压件背面安装耐腐蚀性更强的背板,或者在电池串和边框之间设置带有负偏压的辅助装置来进行电力平衡调整,都能明显减少PID现象发生的可能性。

3.2 生产工艺与安装过程的控制措施

生产过程需要严格控制焊接温度和压力大小,防止温度太高或者压力太大造成电池片出现早期裂缝或者接触不良的情况。采用电致发光或者光致发光这些在线检测仪器,对每一枚电池片进行裂缝检查工作,把存在缺陷的电池片全部挑出来并丢弃掉^[4]。安装的时候要按照标准步骤操作,确保组件在搬运和摆放的时候受到均匀的力作用,绝对不能随便踩踏或者用蛮力扭曲变形。合理规划安装支架支撑点的具体位置布局,选用符合国家标准要求的紧固工具,尽量避免在组件表面形成局部应力过大的区域,从而有效降低因安装操作而造成的机械破坏风险。

3.3 电站运维管理与定期检测的保障

高效的运维管理成为防止故障扩大的关键因素。必须设立一套标准化的红外热成像检测制度,迅速识别并且定位那些温度异常的组件。还需要开展常规的组件绝缘电阻测试,仔细观察和察觉PID现象出现的初期信号。另外还要制定一套合理的清洁方案,尽量避免灰尘和鸟粪长时间堆积造成遮挡,引发局部过热问题。如果遇到一些轻微的问题,比如有少量的蜗牛纹或者潜在的PID效应,可以持续跟踪这些情况,并且做好详细的数据记录和分析工作。但如果遇到严重影响到设备安全和发电效率的重大故障,比如大面积的热斑或者明显的机械损伤,就必须马上采取措施,把有问题的部件隔离开或者直接更换下来,防止故障变得更加严重,造成更大的损失。

4 提升光伏电池可靠性的综合措施

4.1 从制造到应用的全链条质量控制

为了保证晶硅光伏电池能够使用很长时间,必须把原材料采购、电池生产、组件加工、系统安装以及后期维护这些环节全部结合起来,组成一个完整而且统一的质量管理整体框架,这一点特别重要^[5]。整个框架首先要从最开始的原材料挑选和标准设定这两方面下手,一定要把硅料和各种辅助材料选得非常仔细,把标准定得足够严格,这样就能从一开始就尽量减少出现故障的可能性。到了电池生产和组件制作这两个步骤,除了要按照平常的标准流程来做事以外,还要特别关注镀膜过程、焊接质量、层压工艺这些关键步骤的实时监控和数据记录工作,引入一些自动化的设备和智能检测工具,能够快速发现并把那些隐藏着裂痕或者焊接不牢的不合格产品挑出来,不让它们继续往后送。到了系统安装和电站建造这两个步骤,需要根据施工现场的具体气候条件和地理环境来做详细的分析和判断,然后制定出统一的操作规则和接线标准,同时还要安

排专人负责现场检查,确保工人干活的时候不会因为操作不当而造成机械上的损坏或者电气方面的安全隐患。

4.2 环境适应性设计与系统集成优化

太阳能电池板的实际可靠程度完全依靠跟周围环境的匹配程度。一定要彻底抛弃那种只有统一规则的设计方式,而是要根据每个具体使用场景来制定专门能够应对各种困难条件的具体设计方案,并且还要把整个系统做得更加完善。刚开始规划的时候,一定要仔细研究这个电站会遇到哪些天气状况,比如特别热又潮湿、阳光强烈又刺眼、风吹得很大或者下雪很多等等,然后按照这些实际情况来挑选那些能够承受同样恶劣天气的封装材料、密封胶以及背板。如果担心因为太热而导致电池板性能下降,就需要挑选专门防止这种问题出现的电池板和胶膜产品,同时还要在整套系统的电气部分里面改进接地方法,把负极跟地面连接的位置安排得更加合适一些。如果担心风吹得特别厉害或者积起来大量雪花造成破坏,就要先用计算机模拟出最坏情况下的应力分布情况,然后再做物理实验验证,这样就能让整个组件框架和支撑脚变得更加结实耐用。

5 结语

晶硅光伏电池想要长期稳定工作,就必须保证光伏电站能够获得很好的经济收益和可靠的安全保护。研究过程中,全面总结了PID衰减、热斑效应、蜗牛纹、隐裂还有材料老化这些常见故障的具体原因和发生条件,详细说明了各种因素相互作用下造成的损坏过程。依靠对故障的深入分析,制定了从设计、制造、生产到安装、调试再到后期维护的每一个环节都能用到的预防措施和减少损失的方法,希望能够形成一个从产品开始到结束都围绕可靠性展开的完整管理流程。不过,在实际使用中会遇到很多复杂的天气变化和降低成本、增加发电量的压力,所以接下来的研究和实际操作还需要特别关注那些隐藏很深的故障物理原理,同时还要开发出更加精确的预测使用寿命的计算方法。必须建立起一套从原材料采购、电池制作、组件装配到最后整个系统的质量检查控制体系,根据不同地区的气候特点和具体的安装环境来做出专门的设计和改进行方案,让更多人得到更好的经济收益,从而推动整个光伏行业走上平稳且能长久发展的道路。

参考文献:

- [1] 陈敬欣,丁阳,张翼飞等.基于柔性晶体硅电池的光伏瓦研究[J].太阳能学报,2022,43(08):104-107.
- [2] 杨晶媛,黄洁.云南硅光伏产业发展及对策研究[J].中国科技产业,2022(06):65-67.

[3] 张力夫, 朱光辉, 陈侃. 光伏电站晶硅组件常见问题分析及优化管理建议[J]. 有色冶金节能, 2021, 37(02): 51-54.

[4] 李旭东, 刘丁璞, 焦福强等. 晶硅光伏组件回收技术现状研究及展望[J]. 再生资源与循环经济, 2023, 16(06): 40-43.

[5] 胡瑞义, 章小庆. 太阳能光伏晶硅铸造与组件制

造工艺——评《硅太阳能电池光伏材料》[J]. 铸造, 2021, 70(09): 1139.

基金项目: 四川省区域创新合作项目“基于 Poly finger 背面钝化接触的 TOPCon 电池关键技术研究及示范应用”(基金编号: 2026YFHZ0155)。

* 通讯作者: 王永洁。