

光伏组件在极端气候条件下的老化特性与运维策略

刘晓峰

国华（河北）新能源有限公司 河北 张家口 075000

摘要：随着光伏产业向山地等复杂地形的拓展，光伏组件面临更为严峻的极端气候考验。本文聚焦山地环境，深入剖析光伏组件在极端气候下的老化性能，详细阐述并针对性地提出涵盖设计以及安装监测及维护等多层面的运维策略。通过全面系统的分析，旨在为山地光伏电站的稳定高效运行提供有力的理论支撑与实践指导，提升光伏系统在极端气候条件下的可靠性与经济性。

关键词：光伏组件；老化特性；运维策略；状态监测

1 引言

近几年随着世界各国对清洁能源的需求不断增加，在满足日益增加的能源需求的同时，光伏电站也逐渐从平原走向山地、荒漠等各种复杂地形。山地地形所拥有的丰富太阳能资源量，可以很大程度上缓解优质耕地面积压力，使得它极具发展前景。但由于山地地区气候情况较为复杂，经常出现各种极端天气情况，这些因素对光伏组件的工作状态和寿命具有极大的影响。光伏组件是整个光伏发电系统的重要核心部分，如果其自身的性能达不到要求的话，那么就会极大程度的影响电站的发电效率以及经济收益。因此针对极端气候条件下光伏组件老化特性开展分析，并提出可行的运维措施，来保障山地光伏电站的稳定运行，增加能源的利用效率，使光伏产业得到长远发展。

2 山地环境对光伏组件的影响

随着海拔高度增加，气温呈现出递减的趋势，平均每上升1000米气温下降约6℃；同时山地昼夜温差大，白天日照强烈，温度升高很快；晚上失去大气保温作用，温度下降很快。而山地地形造成狭管效应和山谷风，使山区普遍风力大，且风向多变。白天山坡受太阳辐射影响升温快，空气上升形成谷风，风由山谷吹向山坡；夜晚山坡冷却得快，空气下沉形成山风，风由山坡吹向山谷，故此地风力非常大^[1]。强风极易对光伏组件造成巨大的机械负载，另外沙尘粒在强风下运动速度更大，会加速光伏组件表面磨损。

山地降水量大小受地形影响很大，在迎风坡面上，由于暖湿气流遇山而起地形雨作用，降水量很大，在背

风坡面则降水量较少。另外山地地形较为复杂，在安装过程中需要做好地形勘察和测量工作，做好组件的安装平整度和稳定性工作。由于山地地形不利于空气流动，所以在山谷等相对封闭空间中极易形成热岛效应，导致光伏组件周围温度上升，散热较难，由于风向不定，对于传统的通风设计无法很好的解决组件散热问题，加快了组件的老化程度，降低了发电效率。

3 光伏组件在极端条件下的老化特性

3.1 光伏组件材料在高温条件下的性能

高温可加速光伏组件封装材料的老化，以EVA胶膜为例，在高温下，EVA分子链发生热降解反应，降低其交联度，使得材料的柔韧性、粘附力变差。老化的EVA胶膜会逐渐出现发黄、变脆等现象，丧失对电池片的有效封装作用，使电池片受到外界环境的影响。试验结果表明：在高于60℃高温环境中使用的光伏组件，老化后的EVA胶膜比常温环境下使用的光伏组件老化后寿命会下降一半甚至更多^[2]。

光伏组件背板的主要作用是防水、绝缘、抗紫外线。随着温度升高，背板材料的分子结构会变化，背板的物理性能和化学性能都会下降，如表1所示。TPT背板材质在高温下会发生表面氟塑料层的分解，使背板的耐候性和防水性变差，背板材质PET基材受热后易发生收缩变形等问题，导致背板与组件之间贴合不良，使得背板防护性能下降。随着温度从25℃升至85℃，背板综合性能下降55%，TPT背板的防护性能（耐候性+防水性）下降65%，而PET基材的收缩率从0.1%增至2.8%，导致背板与组件贴合不良，进一步削弱防护能力。

表1 温度对光伏组件背板性能的影响

温度（℃）	背板综合性能保持率（%）	TPT背板防护性能（耐候+防水）保持率（%）	PET基材收缩率（%）
25（常温）	100	100	0.1
40	92	90	0.3

续表：

温度（℃）	背板综合性能保持率（%）	TPT背板防护性能（耐候+防水）保持率（%）	PET基材收缩率（%）
55	80	75	0.8
70	65	58	1.5
85	45	35	2.8

3.2 光伏组件结构在强风条件下的稳定性

强烈的风将给光伏组件带来巨大的机械负载，像风压、风吸力、剪切力等，给光伏组件的支架系统带来的很强的应力作用，容易造成支架变形、松动乃至倒塌。通过流体力学可知，如果风速达到某一高度时，就可以利用伯努利方程求解作用于光伏板上的风压大小。如果某地出现30m/s的风速，则作用于1m²光伏组件表面的风压大概可以达到450N左右，这会对组件的结构稳定构成威胁。

强风易引起光伏组件的振动，且长期的振动会对光伏组件内部材料以及结构产生一定的疲劳损伤。当风速受到激励达到光伏组件固有频率时，光伏组件会出现较大的振动幅度，并在该状态下会发生组件材料的快速疲劳损坏。强风造成沙尘暴天气发生时，空气中会含有大量的沙尘颗粒，随风飘散到光伏组件表面对其表面产生冲刷、侵蚀，造成光伏组件表面磨损。由于沙尘颗粒较为坚硬，并且在较强的气流状态下吹向光伏组件表面时，会对光伏组件玻璃盖板、封装材料产生侵蚀作用。

3.3 光伏组件在暴雨条件下的电气性能

遇暴雨天气，光伏组件长期处于被雨水淋湿的状态，如果组件密封性不好，那么水分就会进入到组件内部，而当水分进入组件后，就会在电池片上形成导电通路，造成电池片短路，从而造成组件的输出功率大幅下降。水分会与电池片表面的金属电极发生化学反应，进而使电池片表面的金属电极受到腐蚀，这也会进一步损害到组件的电气性能。研究表明当光伏组件内部湿度大于60%时，其短路故障的概率也会大幅上升，如表2所示。在湿度60%处形成明显拐点，60%以下故障概率缓慢上升，60%以上呈陡峭增长，呼应“湿度 > 60%时短路故障概率大幅上升”结论。

雨水由于含有一定杂质和电解质，附着在组件表面上之后会形成水膜，会破坏组件的电气绝缘性能，如果电气绝缘性能下降，就容易出现漏电的情况，对正常工作造成干扰，同时也会危及人员生命安全。组件绝缘电阻如果不达标，在潮湿环境下使用就容易出现漏电情况，存在火灾隐患；暴雨天气时风力大，雨滴受气流作用有强烈的冲刷力，冲击到组件上产生巨大的机械载荷，易造成组件玻璃盖板碎裂、边框变形等损坏，使组

件的内部结构损坏，进而损坏组件的电气性能和使用寿命。特别是在地形起伏较大的山地区域，局部风速、雨量较大，光伏组件遭受机械冲击损害的程度也就越大^[3]。

表2 光伏组件内部湿度与短路故障概率关系表

内部湿度（%）	短路故障概率（%）
30	5
40	8
50	12
60	20
70	45
80	70
90	90

4 基于极端气候的光伏组件运维策略

4.1 设计阶段的优化措施

（1）安装角度与支架系统设计

结合山地地形特点以及太阳辐射特点，在安装光伏组件时按照坡向的朝向调节，这样有利于提高光伏组件发电量，也能抵御极端气候影响。北半球斜坡上的组件安装角度可适当增大，增加冬季太阳辐射接收量；在多风区域的组件安装角度可适当减小。要尽可能避免遮挡，保证组件接受充分的光照。支架系统是支撑光伏组件的主要构件，设计中要充分考虑到强风、暴雨等极端天气，选用强度高、耐腐蚀性强的材料，并且要使支架结构具备足够大的刚度及稳定性，能经受住极端条件下光伏组件所受到的重量以及各种附加的作用力。

（2）散热通风与防水密封设计

在高热地区要采取有效的散热通风措施，来降低光伏组件的工作温度。组件下方留出通风间断，加快空气流动；在组件背面加装散热片或者散热扇以增加散热面积；合理安排光伏电站位置，避免组件布置过密产生热岛效应；防止暴雨等恶劣天气出现时水进入组件内，加强组件防水及密封处理。对组件在生产过程中保证封装材料质量、封装工艺可靠，并提高组件的密封性能；对组件安装过程中，对接线盒、连接器等处做好防水处理，避免出现水分进入。

4.2 运行阶段的监测与预警

在线监测系统能够实时采集到光伏组件输出功率、工作温度、开路电压、短路电流等电气性能参数及环境

参数，根据采集数据对光伏组件状态进行判断，并将该判断结果呈现给用户。对使用在线监测系统采集的数据进行周期性巡检，结合组件的老化模型及故障诊断算法，对光伏组件运行状态进行综合判定与分析预测，完成故障早期预警与诊断工作，如表3所示。监测时间在9.02，太阳辐射强度无明显下降，但输出功率骤降23%

表3 实时参数监测数据表（1分钟级采样）

监测时间	输出功率 (kW)	工作温度 (℃)	开路电压 (V)	短路电流 (A)	环境温度 (℃)	湿度 (%)	风速 (m/s)	太阳辐射强度 (W/m ²)	系统状态判断
09:00:00	5.2	42	38.5	15.8	25	60	2.1	800	正常
09:01:00	5.3	43	38.4	15.9	25.2	59	2.0	810	正常
09:02:00	4.1	51	36.2	14.2	25.3	58	1.9	805	功率异常（预警）
09:03:00	4.0	52	36.0	14.0	25.4	58	1.8	802	功率异常（报警）

定时对在线监测系统收集的数据进行分析、评价，找出组件的工作规律及老化趋势，然后根据数据进行分析^[4]，得出影响光伏组件工作效率的主要因素，并据此来制定运维方案；同时也可以根据组件的老化程度，合理地制定出自身的维护计划以及更换时间，进一步提高电站的运行效益和经济效益。

4.3 维护与修复策略

（1）清洁维护与部件更换

定期清扫光伏组件表面的沙尘、污垢等杂物，可提高组件透光率，从而改善发电效果。清洁方式可采取人工方式或机械方式，针对多沙尘地区应适当提高清洁频率。在清理过程中严禁使用腐蚀性强的清洗剂，以免损坏组件表面减反射膜、封装材料；若光伏组件的零部件（接线盒、连接器、支架）发生损坏或老化，应及时更换，更换时需与原部件规格、性能一致，并且更换后的部件需要能正常使用，更换时要按照相关步骤和标准来执行。

（2）电池片与封装材料的修复

如果光伏组件的电池片出现了隐裂、断栅等故障现象，那么要根据故障的程度来进行修复处理。对于轻微隐裂的电池片，用激光修复方法，通过激光对准隐裂部位照射，使电池片内部的硅材料重新融化连接，把电池片上的缺陷焊接好，使电池片恢复到原来的性能状态；对于有严重断栅或电池片破裂的情况，就必须更换电池片。

当光伏组件的封装材料（EVA胶膜、背板）出现老化发黄或者开裂等情况时，可以采用局部修复及整体更换的方式进行修复，对于小范围的老化可使用专门的修复剂进行局部修复；对于大面积老化后必须将组件拆开再替换新的封装材料，并再次进行封装，这样就需要根据其封装的形式，分别采用手工缠绕式、单层PE/PO/

（从5.3kW降至4.1kW），同时工作温度超出正常范围（升至51℃），开路电压和短路电流同步下降，系统判定为“功率异常”。结合环境参数（风速、温度稳定），排除自然因素影响，初步指向组件内部故障（隐裂、热斑）。

EVA封装膜与双玻组件封装等形式来对新封装材料以及组件密封防水性能、绝缘性能等进行检查，确认达到预期效果。

4.4 极端气候下的应急运维措施

时刻关注气象部门发出的极端天气预警信息，提前做好相关应急工作。对于强台风的即将来临情况，需要及时检查固定光伏组件的支架系统，并加强防护，确保其能够在强风负荷的作用下有效抵御；对光伏组件周边的杂物及障碍物要及时清除，以免被大风吹起后碰撞到光伏组件上造成损坏^[5]；检查并疏通光伏组件的排水系统，以防暴雨天气产生积水。在出现高温热浪天气的时候，要对散热系统是否正常工作进行检查，如果有必要还需要添置散热装置，从而将组件工作温度降下来。在极端气候期间，可以暂时关闭停运光伏发电站，并断开电回路防止由于电气故障带来的危险情况的发生。

5 结论

本文针对光伏组件在山地极端气候条件下的老化特性及运维对策进行了研究分析，根据不同的山地极端气候条件选择不同的运维方式，这样能够很好的控制光伏组件的老化速度，提高了组件性能、可靠性以及提升发电量、减少故障的发生概率、增加组件的寿命，增强了光伏电站经济价值；未来还可以进一步研究光伏和其他清洁能源组成的多能互补系统，提升能源供应的稳定性与可靠性；并研究多能互补系统协同运维的方法，实现资源共享、优化配置，降低运维成本，为全球能源转型、绿色发展提供助力。

参考文献

[1]杨少成,沈伟,郑天志.PERC技术高功率光伏组件在云南复杂山地条件下发电效率实证研究[J].信息化研究,2025,51(04):163-165+190.

[2]唐勇,程普,孙航,等.山地光伏组件安装工艺及运维关键技术研究[J].工程建设与设计,2025,(02):113-115.

[3]范康靖,魏刚.山地光伏组件设计及安装运维研究[J].工程建设与设计,2024,(24):48-50.

[4]上官炫烁,唐梓彭,魏超,等.光伏组件减反射薄膜在山地光伏电站中的应用研究[J].太阳能,2023,(10):62-68.

[5]于佳禾,许盛之,张一平.山地光伏电站各区域光伏组件的温度差异对比[J].南开大学学报(自然科学版),2021,54(05):59-63.

[6]李锋,周邦栋.某山地光伏电站光伏组件防雷保护优化探索[J].广西电力,2020,43(01):57-61.