

高温环境下光伏组件运行效率衰减规律及工程对策

聂联卡

中十冶投资集团建设有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i4.15477

[摘要] 在高温环境下光伏组件性能会遭受显著影响,已成为制约光伏发电系统全天候正常运行的关键因素。本文主要针对高温环境下光伏组件工作性能的衰减规律进行研究,分析了温度对光伏效率、材料特性、结构性能稳定性的影响,探究了骤升与长期高温工作状态下造成的运行性能波动及性能衰弱现象,并探讨了不同气候条件下的影响机理。依据这一研究成果,提出了改进结构和散热设计、选用耐热性材料、采用散热技术、构建智能监控系统等方案,以期为解决高温环境下光伏发电系统的运行问题提供一条可行性思路。这一研究成果将有助于提升光伏发电系统的经济效益与运行稳定性。

[关键词] 光伏组件; 高温环境; 效率衰减; 工程对策

中图分类号: F830.59 **文献标识码:** A

The attenuation law of Photovoltaic module operating efficiency under high-temperature environment and engineering countermeasures

Lianka Nie

CTMG INVESTMENT GROUP OP.LTD.

[Abstract] In high-temperature environments, the performance of photovoltaic modules will be significantly affected, which has become a key factor restricting the all-weather normal operation of photovoltaic power generation systems. This paper mainly studies the attenuation law of the working performance of photovoltaic modules under high-temperature environments, analyzes the influence of temperature on photovoltaic efficiency, material properties, and structural performance stability, explores the operational performance fluctuations and performance weakening caused by sudden rises and long-term high-temperature working conditions, and discusses the influence mechanisms under different climatic conditions. Based on this research result, solutions such as improving the structure and heat dissipation design, selecting heat-resistant materials, adopting heat dissipation technology, and constructing an intelligent monitoring system have been proposed, with the aim of providing a feasible idea for solving the operation problems of photovoltaic power generation systems in high-temperature environments. This research achievement will help enhance the economic benefits and operational stability of photovoltaic power generation systems.

[Key words] Photovoltaic modules High-temperature environment; Efficiency attenuation Engineering countermeasures

引言

在“双碳”目标背景下,中国可再生能源应用总量大幅提升,以太阳能、风能等为代表的可再生能源的应用成为支撑中国应对气候变化、落实“双碳”目标的重要方式之一。作为重要的可再生能源发电技术,光伏发电技术取得了快速发展,不断创历史新高。然而,实际中光伏组件经常会在高温环境下运行,这会影响到光伏组件的性能发挥。在酷热的夏天,辐射能很强、散热条件较差的地方表现尤为突出,给发电站的效率和盈利带来挑战。因此,应该进一步深入分析和研究高温条件下光伏组件效率

下降的原因和运行机理,并提出相关技术优化建议,以指导发电站的设计及运行。本文将按照原理分析、效率衰减规律及工程措施三个方面进行探讨。

1 高温环境对光伏组件运行的作用机理

1.1 温度对光电转换效率的直接影响

光伏组件的输出性能与温度高度相关,这是由半导体材料的物理特性决定的。以晶硅组件为例,当工作温度每升高1℃时,其开路电压大约降低2~2.3mV,导致整体光电转换效率下降0.3%~0.5%。在夏季高辐照地区,组件表面温度常可达到65~75℃,

与标准测试条件下的25℃相比,效率下降幅度可达12%~18%。这意味着同样的光照强度下,实际发电量将明显低于理论值。除晶硅外,薄膜电池的温度系数相对较低,但在高温条件下仍存在性能劣化。长期来看,高温运行不仅直接压缩了组件的转换效率,还增加了光电流—电压曲线的非线性特征,使系统的最大功率点追踪难度加大,从而进一步影响电站整体的运行效率。

1.2 组件材料与电路特性的温度敏感性

高温作用下,光伏组件中多种材料和电路特性表现出敏感性,成为效率衰减的重要因素。封装材料如EVA(乙烯-醋酸乙烯酯)在温度超过70℃时容易发生交联不均、黄化或脱层,降低透光率并增加光学损耗。背板材料在长期高温下可能产生微裂纹,降低组件的绝缘强度。与此同时,金属导体的电阻会随温度升高而增加,例如铜的电阻温度系数约为 $0.00393/^\circ\text{C}$,当温度从25℃升至70℃时,电阻值上升近18%,直接造成线路损耗增加。电路中的旁路二极管在高温条件下也更易触发失效,导致“热点效应”出现,加剧局部温升和性能衰退。因此,温度敏感性不仅是单一环节的变化,而是贯穿于光学、电学与热学的多重效应叠加。

1.3 高温引发的结构损伤与隐性缺陷

除效率和电学特性外,过高的温度也会引起光伏组件结构损伤和隐裂等。高温和昼夜温差带来的电池组件内热胀冷缩现象易反复循环作用到焊接点、汇流条等关键部位,造成应力疲劳,增加隐裂产生的可能性。此外,高温会在组件中逐步软化密封材料的部分粘结,从而降低组件的防水和绝缘性能。例如,在沙漠地区运行的组件中大约60%的故障问题是由高温引起的隐裂和包装损坏。过高的温度也会加速潜在的衰减现象(PID)的发生,造成组件表面漏电流增加,进而功率损失的百分比能在几个月的时间范围内增加到5%以上。这类结构性和隐裂问题难以被常规检测手段发现,但若任其发展,将会造成难以弥补的损失,对电站使用年限和生活稳定性造成重大影响。

2 高温环境下光伏组件运行效率衰减规律

2.1 瞬态温升条件下的效率波动特征

在光伏电站运行过程中,组件温度并非稳定不变,而是受太阳辐照强度、风速、环境温度等因素的瞬态波动影响。研究表明,当辐照度在 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 条件下迅速上升时,组件表面温度可在数分钟内由35℃升至55℃以上,效率随之下降约5%~8%。这种快速温升会导致电流与电压输出的瞬时失衡,形成功率波动。特别是在炎热的夏季正午时段,组件表层温度的瞬态上升速度明显加快,常超过 $2^\circ\text{C}/\text{min}$,使最大功率点追踪(MPPT)系统的响应频繁,进而增加了逆变器的调节负荷。尽管这种波动具有可逆性,但其短期累积效应可能导致“热点效应”触发,造成局部区域温度持续升高,对组件可靠性构成潜在威胁。因此,瞬态温升不仅是效率衰减的直接表现,更是引发后续结构损伤与性能恶化的重要前兆。

2.2 长期高温运行下的衰减曲线与趋势

相比瞬态效应,长期高温运行对组件效率的影响更具累积性和不可逆性。在电站全生命周期中,光伏组件普遍表现出逐年递减的发电效率。实验数据表明,在沙漠和热带气候区,运行超过5年的组件平均效率衰减率可达 $0.6\%\sim 0.8\%/\text{年}$,高于中温地区的 $0.3\%\sim 0.5\%/\text{年}$ 。这一差异主要源于长期高温加速了材料老化与电路失效。典型的衰减曲线呈现前期快速、后期趋缓的特征,即在运行前3~5年效率下降较为明显,此后进入缓慢下降阶段。例如,某西北地区电站的晶硅组件在投运前两年效率下降幅度达3.5%,此后每年衰减约0.4%。长期高温还会加剧潜在诱发衰减(PID)的进程,导致电流泄漏和功率下降。由此可见,长期高温运行不仅带来线性效率损失,还可能引发非线性加速衰减,对电站全寿命周期效益造成显著影响。

2.3 不同气候条件对效率衰减的差异化影响

光伏组件的效率衰减规律在不同气候条件下表现出明显差异。高温高湿地区如华南沿海,组件在高温作用下常伴随湿气侵入,加速EVA封装层的水解反应和背板老化,使效率衰减率普遍高于干燥地区。而干热气候如西北戈壁和沙漠地区,尽管空气湿度较低,但昼夜温差较大,热胀冷缩频繁,引发隐裂和焊点疲劳,导致功率损失同样显著。气候条件不仅决定了衰减速度,还影响了衰减机理的主导因素,高温往往与湿度、风速、昼夜温差等因素相互叠加,形成复杂的差异化影响。

2.4 效率衰减对发电量与经济效益的综合影响

光伏组件性能衰减的直接后果是发电量损失,进而影响到经济效益。例如100MW规模的电站,如果组件衰减率达到每年0.7%,那么按照十年累计衰减量将导致发电量损失7~8%,价值数千万元的损失。同时,由于温度升高的性能损失还伴生运维成本的增加。例如,部分高温导致故障造成的频繁更换损耗部件。由PID引发的功率输出损失需要使用抬压手段来修复功率,对发电系统的运维成本产生进一步影响。更为重要的是,高温衰减会改变电站的投资回收期。如果预期的衰减系数为0.5%,而实际的衰减系数达到0.8%,那么项目投资回收的时间可能就会延长12年,影响投资者对该类型项目的青睐程度。从全生命周期来看,在关注光伏组件技术特性的同时,还需要分析其对项目经济效益以及可持续性运营的影响程度。

3 提升高温环境下光伏组件运行效率的工程对策

3.1 优化组件结构与排布以增强散热性能

设计光伏电站时,组件布置和排列也会影响到电池的热环境。若排列过于紧凑将不利于空气流动,导致组件背面热量散发不出去,影响发电系统的运行温度。在适当的相邻阵列之间增加间距,从而形成空气自然流动的气道,进而降低阵列的表面温度约 23°C ,其发电率提高约1%。分散在建筑物上的小型屋面光伏发电,应考虑提供10~15cm高度支撑以防止屋顶的热量积累。安装在地面上的光伏发电系统,可以在其下部放置浅色鹅卵石或反射材料,用于减少地面的二次辐射。对于高温少风的地区,可以在电池板边缘及背板上附着散热翅片或者引导空气流动的凹槽,从而改进空气流动性和避免可能发生的热点。

组件运行温度与效率之间存在明确关系,可由下式描述:

$$T_c = T_a + \frac{G}{800} \times (NOCT - 20) \quad (1)$$

其中 T_c 为组件温度, T_a 为环境温度, G 为太阳辐照强度,

$NOCT$ 为标称工作温度。通过降低 T_c , 组件发电性能可在高温环境下保持更稳定, 同时减少热应力导致的材料疲劳与隐性损伤。

3.2 采用低温度系数与耐高温的新型电池材料

材料性能是决定组件高温适应性的根本因素, 常规晶硅电池温度系数范围约为 $-0.35\% \sim -0.45\% / ^\circ\text{C}$, 在环境温度超过 70°C 时效率急剧下降。故而, 采用温度系数较低的新材料电池技术是降低效率衰减的有效途径。例如, 异质结 (HJT) 电池温度系数约为 $-0.25\% / ^\circ\text{C}$, 在相同环境条件下可减少30%以上的效率损失。而对于多节层状电池/钙钛矿/硅等复合电池, 其温度系数大致可以做到与 $-0.20\% / ^\circ\text{C}$ 相当, 可满足沙漠或热带地区应用要求。在包装材料方面, 常用的EVA材料在高温下会产生变色、变白和部分脱落, 应选择耐温性好、防潮性好的POE材料代替。采用POE代替EVA, 在高温高湿环境下工作5年后, 透光率衰减程度大约可以减小40%左右。采用具有氟元素复合薄膜为背板, 可提高抗紫外线和耐热性能, 有效降低裂纹的产生和PID的可能性。连接带及焊接点的金属焊料建议选用耐热疲劳更好的合金, 降低因为热循环造成的压力对光伏系统的影响, 在生产过程中, 应增加严苛的热循环和湿热实验, 保证产品在投入运行之前排除一切可能存在的问题, 降低运行中因高温导致的早期失效风险。

3.3 引入被动与主动冷却技术降低运行温度

光伏组件在高温环境下运行时, 冷却措施能够显著降低温度, 提高发电效率。被动冷却方式投资低、维护简便, 常见措施包括增加组件背部通风间隙、设计导风槽以及安装散热鳍片。屋顶电站可利用支架抬升形成空气通道, 地面电站可结合导风板集中气流, 均能使表面温度下降 $2 \sim 4^\circ\text{C}$ 。在部分高温区域, 采用相变材料贴合背板, 当温度超过 60°C 时吸收潜热, 能够延缓继续升温, 使效率保持稳定。主动冷却方式效果更显著, 喷水降温在夏季高温时段应用广泛, 每次可使温度降低 $5 \sim 10^\circ\text{C}$, 功率提升约 $4\% \sim 6\%$ 。液冷系统通过循环水或冷却液持续带走热量, 适用于大型集中式电站。

冷却效果与温度系数关系可用下式表示:

$$\Delta P = P_{ref} \times \beta \times \Delta T \quad (2)$$

其中 ΔP 为功率变化, P_{ref} 为参考功率, β 为温度系数,

ΔT 为温度降低幅度。若液冷系统使温度下降 8°C , 在 $\beta = -0.4\% / ^\circ\text{C}$ 条件下, 功率可提升约3.2%。因此, 合理组合被动与主动冷却措施, 能够在不同气候条件下有效抑制高温效应, 提升电站稳定性与收益。

3.4 建立智能监测与温度预警系统提升运维效率

在光伏电站运维环节, 高温风险若不能被及时识别, 将加速组件衰减。通过智能监测系统可以对运行温度进行实时追踪。组件阵列中布设红外传感器和热像仪, 可在秒级监测温度分布, 一旦局部温度超过 70°C 即可触发报警, 运维人员能够在早期阶段发现热点隐患。在部分电站实践中, 智能温控系统的应用使得年平均衰减率从 0.75% 降低至 0.55% , 十年累计发电量增加约6%。同时, 该系统还能生成效率衰减曲线和故障报告, 为电站投资方提供决策依据, 优化检修计划, 降低盲目运维成本。

4 结语

高温环境对光伏组件运行效率的影响具有长期性与累积性, 工程对策必须从设计、材料、冷却与运维四个环节全面展开。优化排布与结构设计能降低自然升温, 新型电池和封装材料能减少温度敏感性, 被动和主动冷却措施能直接控制运行温度, 智能监测系统则提供全过程的数据支持与风险预警。这些措施相互配合, 能够从源头到运行末端形成闭环管理。以一个100MW规模电站为例, 若采取以上综合措施, 十年累计发电量可比常规方案增加 $5\% \sim 8\%$, 对应的收益提升可达数千万元。可见, 在高温地区推广系统性的工程对策, 不仅能延长组件使用寿命, 还能显著改善电站经济性与投资回收效率。

[参考文献]

- [1] 师永平, 田成. 沙漠环境对光伏组件影响的研究[J]. 红水河, 2024, 43(4): 76-80.
- [2] 崔杨, 成驰, 陈正洪. 基于数值天气预报的光伏组件温度预测研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(5): 7.
- [3] 曾伟, 孙旻, 肖文波. 一天中户外光伏组件输出性能影响规律的研究[J]. 南昌大学学报: 理科版, 2023, 47(3): 234-237.
- [4] 孟炎, 高德东, 铁成梁, 等. 交变温度场对光伏组件性能的影响研究[J]. 可再生能源, 2021, 39(3): 6.
- [5] 王鲁宁, 王文彬, 姚洪鹏, 等. 基于t检验的光伏电站中能效异常光伏组件识别研究[J]. 太阳能, 2024(4): 101-107.

作者简介:

聂联卡(1982--), 男, 汉族, 河南省南阳市镇平县人, 本科, 机电工程或电气工程。