

高海拔低气压环境下光伏组件效率提升与阵列优化布局设计

李月珠

青海省水利水电勘测规划设计研究院有限公司 青海 西宁 810000

摘要: 高海拔地区具有丰富的太阳能资源,但低气压、强紫外线、较大昼夜温差等特殊环境因素,会对光伏组件的效率和稳定性产生显著影响。本文针对高海拔低气压环境特点,分析了该环境对光伏组件性能的影响机制,重点探讨了光伏组件效率提升技术,包括散热结构优化、抗紫外线涂层应用、低气压适应性封装设计等,并结合实际数据开展阵列优化布局设计研究,通过仿真与实验验证,提出了适用于高海拔地区的光伏组件效率提升方案与阵列布局优化策略,为高海拔地区光伏电站的建设与高效运行提供技术支持。

关键词: 高海拔;低气压;光伏组件;效率提升;阵列布局优化

引言: 高海拔地区(海拔1000m以上)大气压随高度降低,如3000m处为标准气压的70%,5000m处仅为53%。这些地区太阳辐射强,年总辐射量常超5000MJ/m²,紫外线强度高出平原20%-50%,昼夜温差大,可达20℃以上。这些特殊环境导致光伏组件效率降低8%-12%,故障率增加15%-20%。因此,研究高海拔低气压环境下光伏组件效率提升技术和阵列优化布局设计至关重要,以提高组件效率和稳定性,为光伏电站高效运行提供技术支持。

1 高海拔低气压环境对光伏组件性能的影响

1.1 低气压对散热性能的影响

光伏组件在工作过程中,约70%的太阳能会转化为热能,导致组件温度升高。在标准气压环境下,空气是组件散热的主要介质之一,通过自然对流实现热量传递。而在低气压环境下,空气密度减小,自然对流换热系数降低,组件的散热能力下降。表1为不同海拔高度下光伏组件的温度与效率变化数据(以某型多晶硅光伏组件为例,辐照度1000W/m²,环境温度25℃)。由表1可知,随着海拔升高,组件工作温度逐渐升高,效率逐渐下降。当海拔从0m升高至5000m时,组件工作温度从42℃升高至68℃,效率从15.2%降至12.1%,效率降低幅度达20.4%。

不同海拔高度下光伏组件的温度与效率变化数据表1所示

海拔高度 (m)	气压 (kPa)	组件工作温度 (℃)	组件效率 (%)	效率降低幅度 (%)
0	101.3	42	15.2	0
1000	89.8	46	14.6	3.9
2000	79.5	51	13.9	8.6
3000	70.1	57	13.1	13.8
4000	61.6	63	12.6	17.1
5000	53.4	68	12.1	20.4

1.2 强紫外线对组件材料的影响

高海拔地区紫外线辐射强烈,会加速光伏组件封装材料(如EVA胶膜、背板等)的老化。EVA胶膜长期受到强紫外线照射后,会发生黄变、交联度下降等现象,导致其透光率降低。实验数据表明,在海拔3000m处,未经过抗紫外线处理的EVA胶膜经过1年户外暴露后,透光率从初始的92%降至78%,而经过抗紫外线处理的EVA胶膜透光率仍能保持在88%以上。背板在强紫外线作用下,会出现开裂、粉化等问题,影响组件的绝缘性能和防水性能。某实验中,将普通背板与抗紫外线背板在海拔4000m处进行户外暴露试验,6个月后普通背板表面出现明显裂纹,绝缘电阻从1000MΩ降至50MΩ;而抗紫外线背板表面无明显变化,绝缘电阻仍保持在800MΩ以上^[1]。

1.3 昼夜温差对组件结构的影响

高海拔地区昼夜温差较大,光伏组件各部件(如电池片、玻璃、边框等)的热膨胀系数不同,会导致组件内部产生热应力。长期的热应力循环会使电池片出现隐裂、焊点脱落等现象,影响组件的电气性能。对海拔3500m处运行1年的光伏组件进行检测发现,约15%的组件存在电池片隐裂现象,而平原地区同型号组件的电池片隐裂率仅为3%左右。同时,部分组件的焊点出现氧化、脱落情况,导致组件的串联电阻增大,填充因子降低。

2 高海拔低气压环境下光伏组件效率提升技术

2.1 散热结构优化

针对低气压环境下组件散热能力下降的问题,可通过优化组件散热结构来提升散热性能。常见的散热结构优化方式包括增加散热鳍片、采用热管散热技术等。某研究团队对光伏组件进行散热鳍片优化设计,在组件背板安装铝制散热鳍片(鳍片高度20mm,间距10mm),

并在海拔3000m处进行实验测试。结果表明，与无散热鳍片的组件相比，安装散热鳍片后组件工作温度降低了12℃，效率提升了2.3%（从13.1%升至15.4%）。热管散热技术具有高效的传热性能，将热管嵌入光伏组件背板，可快速将电池片产生的热量传递至外界。在海拔4000m的实验中，采用热管散热的光伏组件工作温度较普通组件降低了18℃，效率提升了3.5%。

2.2 抗紫外线涂层应用

在光伏组件玻璃表面涂覆抗紫外线涂层，可有效减少紫外线对封装材料的损伤。抗紫外线涂层通常由纳米二氧化钛、氧化锌等材料组成，具有良好的紫外线吸收和反射性能。对涂覆抗紫外线涂层的光伏组件进行测试，在海拔3000m处户外运行1年后，组件EVA胶膜透光率仍保持在90%以上，而未涂覆涂层的组件EVA胶膜透光率仅为78%。同时，涂覆涂层的组件效率下降幅度为2.1%，远低于未涂覆涂层组件的5.3%。

2.3 低气压适应性封装设计

优化光伏组件的封装工艺，提高组件在低气压环境下的密封性和稳定性。采用低气压适应性封装设计，如增加封装胶层厚度、采用新型密封材料等，可减少空气泄漏和水汽侵入。某企业开发的低气压适应性光伏组件，将封装胶层厚度从0.5mm增加至0.8mm，并采用硅橡胶密封材料。在海拔5000m的低气压环境下进行可靠性测试，经过1000小时的高低温循环和湿度冷冻试验后，组件的绝缘性能和电气性能均无明显变化，而普通组件在相同条件下出现了封装层开裂、绝缘电阻下降等问题^[2]。

2.4 高效电池技术应用

采用高效电池技术是提升光伏组件效率的根本途径。PERC（Passivated Emitter and Rear Cell）电池、HJT（Heterojunction Technology）电池等高效电池具有更高的转换效率和更好的温度系数。PERC电池的转换效率较传统多晶硅电池高2%-3%，且温度系数更低（-0.34%/℃左右，传统多晶硅电池约为-0.42%/℃）。在海拔3000m处，PERC组件效率为16.5%，较传统多晶硅组件（13.1%）提升了3.4%。HJT电池转换效率更高（可达24%以上），温度系数更低（-0.26%/℃左右），在高海拔地区具有更大的应用潜力。

3 高海拔低气压环境下光伏阵列优化布局设计

3.1 阵列间距优化

在高海拔地区，太阳辐射强烈，但同时大气透明度较高，太阳光线较为直射，这使得前后排组件间的阴影遮挡问题尤为突出。合理的阵列间距可以有效避免后排组件被前排遮挡，确保每块组件都能接收到尽可能多

的直射阳光。间距优化的关键在于平衡日照时间与组件间的阴影遮挡，考虑到高海拔地区的太阳高度角较大，计算阵列间距时应采用更严格的数学模型，如考虑太阳赤纬角、时角及当地地理纬度等因素的综合影响。通过仿真软件模拟不同间距下的日照情况，结合当地的实际日照数据和组件高度，确定最优间距。一般来说，相较于平原地区，高海拔地区的阵列间距需要适当增大。例如，在海拔3000m、纬度30°的典型高海拔地区，通过模拟分析发现，将阵列间距从传统的2.8m增加至3.2m，可以显著减少冬季和早晚时段的阴影遮挡，从而提高整个阵列的日照时长和发电效率。

3.2 阵列倾角优化

阵列倾角直接影响到组件接收到的太阳辐射量，在高海拔地区，由于大气稀薄，散射辐射较少，直射辐射占比更高，因此合理调整阵列倾角对提升发电效率至关重要；倾角优化需综合考虑当地的地理纬度、季节变化、太阳高度角以及组件的最佳发电角度等因素。通常，在高海拔地区，夏季太阳高度角较大，冬季则较小，因此理想的倾角应是一个在全年内能够平衡各季节发电量的折中值；利用气象数据和光伏发电模拟软件，对不同倾角下的年总辐射接收量进行模拟计算，并结合组件的发电效率曲线，可以确定最佳倾角^[1]。在海拔3000m、纬度35°的地区，研究发现，将阵列倾角从常见的28°调整至32°，可以在全年范围内最大化辐射接收量，特别是在冬季，倾角增加能有效提升日照时长和辐射强度。

3.3 阵列排布方式优化

高海拔地区地形多样，需根据具体地形选择适配的排布方式，避免因地形限制导致发电量损失。对于平坦地形，可采用“行列式+错位排布”相结合的方式，在传统行列式基础上，将相邻两行组件沿东西方向错位0.5倍组件宽度，减少行间遮挡的同时，利用空气流动增强组件散热。某海拔3500m的平坦场地实验显示，该排布方式较传统行列式发电量提升2.1%，组件平均温度降低2.3℃。对于山地地形，阶梯式排布是主流选择，但需精准控制阶梯高度与宽度。以坡度25°的山地为例，每级阶梯高度差应不小于3m，宽度不小于组件长度的1.5倍（以1.6m长组件为例，宽度需≥2.4m），同时在阶梯边缘设置挡墙，防止水土流失导致组件基础变形。某山地光伏电站采用该设计后，阵列全年遮挡率控制在1.5%以内，较未优化的阶梯排布发电量提升4.2%。另外，对于高海拔多风地区，可采用“疏密结合”的排布方式，在风速较高的区域（年均风速≥6m/s）增大阵列间距至常规值的1.2倍，减少风荷载对支架的冲击，同时避免组件因强风振

动导致的隐裂。某海拔4500m风区电站的测试表明,该方式可使组件故障率从8.7%降至3.2%,年发电量稳定提升1.3%。

4 实验验证与结果分析

4.1 光伏组件效率提升技术验证

为验证所采用的光伏组件效率提升技术的有效性,精心挑选了两组光伏组件开展对比实验。实验组选取了经过散热结构优化、抗紫外线涂层应用以及低气压适应性封装设计的光伏组件,对照组则采用普通光伏组件。实验地点选在海拔3000m处,进行为期1年的户外实验。在实验期间,安排专人定时记录组件的工作温度、效率以及发电量等关键参数,确保数据的准确性和完整性。实验结果清晰地展示在表2中。从工作温度来看,实验组组件平均工作温度为52℃,而对照组达到57℃,实验组较对照组降低5℃,这表明散热结构优化有效降低组件的工作温度,减少了因高温导致的效率损耗。在效率方面,实验组组件平均效率为15.3%,对照组仅为13.1%,实验组提升2.2%,说明抗紫外线涂层和低气压适应性封装设计显著提高了组件的发电效率。从年发电量数据上,实验组组件年发电量为1320kWh,对照组为1180kWh,实验组提升11.9%。综合各项数据,可以明确得出结论,所采用的光伏组件效率提升技术具有良好的效果,能够有效提高组件在高原环境下的性能和发电能力^[4]。

海拔3000m光伏组件实验组与对照组数据对比表

组件类型	平均工作温度(℃)	平均效率(%)	年发电量(kWh)	发电量提升幅度(%)
对照组	57	13.1	1180	0
实验组	52	15.3	1320	11.9

4.2 光伏阵列优化布局验证

在海拔3000m、北纬35°的特定地区,我们开展了光

伏阵列优化布局的验证实验。按照优化后的方案,建设了阵列间距为3.2m、倾角为32°的光伏阵列实验区,同时设置采用传统布局(间距2.8m,倾角28°)的阵列作为对比。经过6个月的运行监测,我们收集到了两组阵列的详细发电数据。结果显示,优化后阵列的月均发电量为108kWh,而传统布局阵列的月均发电量为102kWh,优化后阵列发电量提升了5.9%,这充分验证了阵列优化布局设计的有效性。

结束语

综上所述,高海拔低气压环境下光伏组件的效率提升与阵列优化布局设计至关重要。本文深入剖析了该环境对组件性能的诸多不利影响,针对性地提出了散热结构优化、抗紫外线涂层应用等一系列组件效率提升技术,以及阵列间距、倾角和排布方式的优化策略。通过实验验证,所提出的技术和策略有效提升了组件效率与阵列发电量,显著改善了高海拔地区光伏系统的性能。未来,随着技术的不断进步,还需持续探索更高效、更可靠的方法,以推动高海拔地区光伏产业的蓬勃发展。

参考文献

- [1]李明,张伟,王磊.光伏组件选型及光伏阵列配置优化研究[J].太阳能学报,2022,43(10):3456-3462.
- [2]王涛,林培杰,周海芳,等.采用ELM和优化电压传感器布局的光伏阵列故障检测与区域定位[J].福州大学学报(自然科学版),2022,50(04):475-482.
- [3]魏晨晨,王超,李想,等.光伏组件发电效率影响因素分析[J].建设科技,2023(1):79-81.
- [4]王辉,冯征,王思镇,魏广雨,景妍,孙阳.光伏组件不同布置倾角对发电量影响的研究[J].能源与节能,2022(11):7-12.