

光伏组件积尘特性对发电效率影响及智能清洁策略

韩 冠

国能孟津热电有限公司 河南 洛阳 471112

摘 要：本文聚焦光伏组件积尘特性对发电效率的影响及智能清洁策略。分析了积尘来源、成分、物理特性、化学特性与沉积规律；阐述积尘通过光学、热学、电学损失降低发电效率的机制。最后研究智能清洁策略，涵盖机械清洗方法、自动清洗系统、防尘设计及清洗周期优化。旨在为提高光伏组件发电效率、降低清洁成本提供理论依据与实践指导。

关键词：光伏组件；积尘特性；发电效率；智能清洁策略

1 光伏组件积尘特性分析

1.1 积尘来源与成分

光伏组件积尘来源广泛复杂，主要分为自然来源与人为来源。自然来源里，大气灰尘是主要构成部分。土壤颗粒经风力扬起悬浮于空中，最终沉降到光伏组件表面，其成分因地域而异。干旱少雨地区，土壤颗粒多含沙粒，以二氧化硅等矿物质为主；土壤肥沃地区则含较多有机物质和粘土矿物。春季等植物开花季节，花粉随风飘散，易附着在组件上。花粉成分主要是蛋白质、糖类有机物质，具有一定粘性，会增强积尘在组件表面的附着能力。人为来源方面，工业排放是重要因素。工厂生产时会排放大量含重金属、化学物质等有害成分的烟尘和颗粒物，如重工业工厂排放的烟尘可能含铅、汞等重金属，不仅损害光伏组件，还对环境有长期不良影响。交通运输也是积尘的人为来源之一，汽车尾气排放的颗粒物以及轮胎与地面摩擦产生的橡胶颗粒，会随空气流动沉积到组件上。建筑施工活动产生的扬尘，像水泥粉尘、砂石颗粒等，会在施工区域及其周边形成积尘源，影响附近光伏组件正常运行^[1]。积尘成分复杂多样，主要包含无机物和有机物两大类。无机物中，二氧化硅常见且硬度和稳定性高，会对组件表面造成磨损；碳酸钙、氧化铁等矿物质在潮湿环境下可能发生化学反应，腐蚀组件表面。有机物除花粉中的有机成分外，还有微生物、植物残渣等。微生物在适宜温湿度条件下会在组件表面生长繁殖，形成生物膜，进一步增加积尘附着性，加大对组件的危害。

1.2 积尘的物理特性

积尘的物理特性对光伏组件的影响主要体现在颗粒大小、形状和密度等方面。积尘颗粒的大小分布范围较广，从纳米级的微小颗粒到毫米级的大颗粒都有可能存在。细小的颗粒能够深入到光伏组件表面的微观结构

中，难以被简单的清洁方法去除，从而对组件的光学性能产生长期影响。而较大的颗粒则可能会直接遮挡部分组件表面，减少光照的接收面积。积尘颗粒的形状也各不相同，有球形、片状、针状等多种形态。不同形状的颗粒在组件表面的堆积方式和附着能力也有所差异。积尘的密度也是一个重要的物理特性。密度较大的积尘在相同体积下质量更大，对组件表面的压力也更大，可能会导致组件表面出现微小的变形或损伤。密度还会影响积尘在组件表面的堆积方式和稳定性。密度较大的积尘更容易紧密堆积，形成较厚的积尘层，进一步增加对组件的遮挡和影响。

1.3 积尘的化学特性

积尘的化学特性主要体现在其酸碱性和腐蚀性上。不同来源的积尘酸碱性差异较大，一些工业排放的积尘可能呈酸性，如含有硫酸、硝酸等酸性物质的颗粒；而一些土壤颗粒可能呈碱性，如含有碳酸钙等碱性物质的积尘。酸碱性的积尘会对光伏组件的表面材料产生化学反应，破坏其表面结构和性能。积尘中的某些成分还具有腐蚀性，如重金属离子、氯化物等。重金属离子可能会在组件表面发生氧化还原反应，产生腐蚀性物质，对组件的表面涂层和内部材料造成损害。氯化物在潮湿环境下容易形成盐酸等腐蚀性物质，对组件的金属部件和电子元件产生强烈的腐蚀作用，缩短组件的使用寿命。

1.4 积尘的沉积规律

积尘的沉积规律受到多种因素的影响，包括气象条件、地理位置和组件安装方式等。气象条件中，风速是影响积尘沉积的重要因素之一。在风速较小的情况下，空气中的灰尘颗粒更容易沉降到光伏组件表面；而在风速较大时，部分积尘可能会被吹走，但同时也会带来新的灰尘颗粒。风向也会影响积尘的沉积位置，不同风向可能会使积尘在组件的不同部位积累。地理位置对积尘

沉积也有显著影响,在干旱、多风的沙漠地区,由于缺乏植被覆盖,土壤颗粒容易被风扬起,导致光伏组件积尘速度较快,积尘量较大^[2]。而在潮湿、多雨的地区,虽然空气中的灰尘颗粒相对较少,但雨水可能会将空气中的灰尘带到组件表面,并且在潮湿环境下,积尘更容易附着在组件上,难以自然清除。组件的安装方式也会影响积尘的沉积。组件之间的间距和排列方式也会影响积尘的沉积和扩散,紧密排列的组件可能会导致积尘在组件之间的缝隙中积累,增加清洁的难度。

2 光伏组件积尘对发电效率的影响机制

2.1 光学损失

积尘对光伏组件发电效率的光学损失主要体现在对光的吸收、反射和散射上。当积尘覆盖在光伏组件表面时,会阻挡部分太阳光的入射。积尘颗粒对光的吸收作用会减少到达组件内部的光能,从而降低组件的光电转换效率。不同颜色和成分的积尘对光的吸收能力不同,例如,黑色的积尘颗粒通常会吸收更多的光能,导致更多的光学损失。积尘还会增加光的反射和散射,积尘表面的粗糙不平会使入射光发生反射和散射,使原本应该进入组件内部的光能偏离原来的方向,无法被有效利用。这种反射和散射不仅会减少组件接收到的光能,还可能对周围环境造成光污染。积尘在组件表面的不均匀分布会导致光的入射角度和强度发生变化,进一步影响组件的光学性能和发电效率。

2.2 热学损失

积尘会影响光伏组件的散热性能,从而导致热学损失。积尘层会阻碍组件表面与外界空气的热交换,使组件在工作过程中产生的热量难以散发出去。随着组件温度的升高,其光电转换效率会显著下降。这是因为光伏电池的性能与温度密切相关,温度升高会导致电池内部的载流子负荷增加,开路电压降低,从而减少输出功率。积尘还可能导致组件局部过热。由于积尘在组件表面的分布不均匀,某些部位的积尘较厚,会形成局部的“热岛效应”,使这些部位的温度明显高于其他部位。局部过热不仅会进一步降低组件的发电效率,还可能对组件的寿命产生严重影响,加速组件的老化和损坏。

2.3 电学损失

积尘对光伏组件的电学损失主要体现在对组件内部电路的影响上。积尘可能会渗透到组件的密封层中,与内部的金属电极或电子元件接触,导致短路或漏电现象。短路会使组件的部分电路失去正常工作能力,减少输出功率;漏电则会增加组件的自耗电,降低发电效率。积尘中的化学物质还可能会对组件的电气连接部位

产生腐蚀作用,破坏电气连接的稳定性。例如,积尘中的酸性或碱性物质可能会腐蚀金属电极和导线,导致接触电阻增大,进一步增加电学损失。

2.4 综合影响分析

光伏组件积尘对发电效率的综合影响是光学损失、热学损失和电学损失相互作用的结果。光学损失导致组件接收到的光能减少,直接影响光电转换效率;热学损失使组件温度升高,进一步降低发电效率;电学损失则通过影响组件的电气性能,减少输出功率。这三种损失相互关联、相互影响,共同导致光伏组件发电效率的下降。在实际运行中,积尘对发电效率的影响程度会随着积尘量的增加而逐渐增大。轻微的积尘可能只会对发电效率产生较小的影响,但随着积尘的不断积累,发电效率的下降会越来越明显^[3]。

3 光伏组件智能清洁策略研究

3.1 机械清洗方法

机械清洗方法作为传统的光伏组件清洁手段,在光伏发电行业早期应用广泛,主要包括人工清洗和机械刷洗两种方式。人工清洗操作相对简便,工作人员只需携带清水和软毛刷等基础工具,即可直接对光伏组件表面进行擦拭和清洗。这种方法无需复杂的设备投入,成本较低,对于一些小型光伏电站或安装位置较为分散的组件来说,具有一定的可行性。人工清洗的效率极为低下,面对大规模的光伏阵列,需要耗费大量的人力和时间,难以满足高效清洁的需求。而且,清洁效果受人为因素影响极大,不同工作人员的操作手法、力度和细致程度各不相同,这可能导致部分区域清洁不彻底,而部分区域又可能因用力不当而受到损伤。在清洗过程中,若工作人员对清洗工具的选择不够谨慎,比如使用了过硬或粗糙的刷子,或者在擦拭时用力过猛,都极有可能对光伏组件表面造成划伤或损坏。一旦组件表面出现划痕,不仅会影响光的透过率,降低发电效率,还可能加速组件的老化,缩短其使用寿命,给光伏电站带来额外的经济损失。

3.2 自动清洗系统

自动清洗系统是近年来光伏组件清洁领域的研究热点和重要发展方向。常见的自动清洗系统有喷淋清洗系统和机器人清洗系统。喷淋清洗系统通过在光伏阵列上合理安装喷头,能够精准地将清洗液均匀地喷洒在组件表面。清洗液在组件表面形成一层水膜,利用水流的力量将积尘冲走,从而达到清洁的目的。这种系统具有清洗效率高的特点,能够在短时间内对大面积的光伏组件进行清洗,而且操作相对简单,工作人员只需设定好

喷淋的时间和强度等参数即可。不过,喷淋清洗系统也存在一些不足之处。它需要消耗一定量的水资源,在水资源匮乏的地区,这可能会增加运营成本。在清洗过程中,清洗液与积尘混合后会产生污水,如果处理不当,可能会对周边环境造成污染。机器人清洗系统则更加智能化和自动化。机器人配备了先进的传感器和导航系统,可以在光伏组件表面自主移动,利用刷子、刮板等工具对组件进行细致的清洗。它能够根据组件表面的积尘情况自动调整清洗力度和方式,确保清洁效果的同时,避免对组件造成损伤。机器人清洗系统还支持远程监控和操作,工作人员可以在控制中心实时了解机器人的工作状态和清洁进度,减少人工干预,降低人力成本。但机器人清洗系统的成本较高,技术复杂度也较大,需要解决机器人的导航、定位、越障等技术问题,以确保其能够在复杂的光伏阵列环境中稳定运行。

3.3 防尘设计

防尘设计是从源头上减少光伏组件积尘的有效策略,对于提高光伏组件的发电效率和延长其使用寿命具有重要意义。一种常见的防尘设计是在光伏组件表面涂覆防尘涂层。这种防尘涂层具有独特的疏水、疏油等特性,能够在组件表面形成一层保护膜。当灰尘落在涂有防尘涂层的组件表面时,由于涂层的特殊性质,灰尘与组件表面的附着力大大降低,容易在风力或雨水的作用下自然滑落,从而减少积尘的积累。防尘涂层不仅可以有效防止灰尘的附着,还能在一定程度上抵抗紫外线、酸雨等环境因素的侵蚀,保护组件表面不受损害。另一种防尘设计是优化光伏组件的结构,还可以在组件表面设置微小的凸起或纹理,这些凸起或纹理能够改变灰尘在组件表面的附着方式,降低积尘的稳定性。当有风吹过时,灰尘更容易从这些凸起或纹理上脱落,从而保持组件表面的清洁。通过这些防尘设计,可以在一定程度上减少人工清洁的频率,降低清洁成本,提高光伏电站的运行效率。

3.4 清洗周期优化

清洗周期的优化对于提高光伏组件的发电效率和降低清洁成本具有至关重要的作用。如果清洗周期过长,光伏组件表面的积尘会不断积累,形成厚厚的灰尘层。这层灰尘会严重遮挡阳光,减少组件接收到的光照强度,从而大大降低发电效率。据研究表明,当积尘达到

一定程度时,光伏组件的发电效率可能会下降20%甚至更多。而且,长期积尘还可能导致组件表面温度升高,加速组件的老化和损坏,进一步增加运营成本^[4]。相反,如果清洗周期过短,虽然可以保持组件表面的清洁,但会增加清洁成本,造成资源的浪费。因为每次清洗都需要投入人力、物力和时间,频繁的清洗会提高运营成本,降低光伏电站的经济效益。因此确定合理的清洗周期需要综合考虑多种因素。首先要考虑当地的积尘情况,不同地区的气候、环境等因素会导致积尘的速度和程度不同。其次,气象条件也是重要的考虑因素,如降雨量、风速等。降雨可以自然清洗组件表面的积尘,在降雨较多的地区,清洗周期可以适当延长。另外,还要考虑组件的性能特点,不同类型、不同质量的光伏组件对积尘的敏感程度不同,需要根据实际情况进行调整。可以通过建立数学模型来优化清洗周期。例如,根据历史气象数据和组件发电效率的监测数据,分析积尘量与发电效率之间的关系,确定发电效率下降到一定程度时对应的积尘量,进而确定最佳的清洗周期,还可以利用传感器技术实时监测组件表面的积尘情况,根据积尘量的变化自动调整清洗周期,实现智能化的清洗管理,提高光伏电站的运行效率和经济效益。

结束语

光伏组件积尘对发电效率影响显著,其特性复杂多样,涉及来源、成分、物理与化学特性及沉积规律等方面。积尘通过多种损失机制降低发电效率,严重制约光伏发电系统性能。为此,本文提出的机械清洗、自动清洗系统、防尘设计及清洗周期优化等智能清洁策略,能有效应对积尘问题。未来,还需进一步优化清洁技术,降低成本,提升光伏发电的经济性与可靠性。

参考文献

- [1]潘大飞.光伏组件表面污染对发电效率影响及其清洁策略探讨[J].张江科技评论,2024,(04):123-125.
- [2]张天红,卢强,李升.光伏组件积尘状态的检测技术综述[J].太阳能,2024,(01):63-69.
- [3]张佳平.光伏系统发电效率的影响因素[J].上海节能,2022,(01):56-61.
- [4]袁高亮.新能源发电技术在火力发电厂中的应用[J].光源与照明,2021(3):116-117.