

分布式光伏发电系统防雷工程设计及特殊场景防护

刘 彤

眉县气象局 陕西 宝鸡 722300

摘 要: 分布式光伏系统面临着直击雷和感应雷这两类雷电侵害, 加上它本身露天布设、线路走向又比较分散, 所以雷电损伤的机理显得格外复杂。对于这一系统性威胁, 我们构建了一套外部与内部协同工作的分层防护架构, 让直击雷拦截和感应过电压抑制能够有机配合起来。同时考虑到恶劣环境会让防雷装置的性能逐渐下降, 在材料和工艺层面也做了针对性的改良处理。在此基础上, 还专门针对建筑一体化、低矮架空以及分散式小型布设这几类特殊场景, 逐一识别了它们在接闪覆盖、引下连续性以及等电位联结方面存在的固有短板, 并制定了差异化的防护措施。

关键词: 分布式光伏发电系统; 雷电损伤机理; 分层防雷架构; 特殊布设场景

引言: 随着分布式光伏发电装机规模迅猛增长, 系统因露天布设、设备分散且线路繁杂, 正面临不可忽视的雷电侵害风险。直击雷与感应雷的双重作用, 使光伏组件、电气设备及控制线路的损毁问题尤为突出。与此同时, 复杂环境条件和特殊布设形式进一步加大了防雷设计难度。因此, 亟需从雷电损伤机理入手, 构建一套系统化的防雷理论框架与工程防护体系, 从而切实提升分布式光伏系统在各种工况下的运行安全性与雷电耐受能力。

1 分布式光伏发电系统防雷基础理论与体系架构

1.1 分布式光伏发电系统雷电损伤机理

雷电损伤机理, 通俗讲就是雷电能量打中光伏系统后, 各组件会发生什么样的物理损坏和电气失效。直击雷如果直接打到光伏阵列或金属支架上, 巨大的雷电流会在极短时间内产生极高的热量和强烈的电弧, 这样一来光伏面板就会碎裂, 金属构件会被熔蚀, 严重的甚至会发生结构性断裂。另外, 支架本身也是接地通路的一环, 如果泄放通道不顺畅, 高温和电动力效应还会进一步加剧机械形变。感应雷的情况则不同, 它不依赖直接接触, 而是借着雷云放电瞬间产生的剧烈磁场变化, 在长距离电缆和控制信号线上感应出幅值相当高的高压浪涌。这种浪涌一旦侵入逆变器、汇流箱或数据采集模块, 功率半导体器件很容易被击穿, 控制板卡上的精密电子元件也会遭到损坏。由于光伏组件通常是大面积露天铺设的, 电缆走线复杂且比较分散, 接缝处、接线盒以及汇流端口就成了抗干扰能力最薄弱的环节。

1.2 分布式光伏发电系统整体防雷架构设计

我们在设计整体防雷架构的时候, 出发点是把雷电

风险当作一种系统性威胁来对待, 而不是只盯着某个单一设备去做孤立加固。根据雷电侵入路径和设备安装区域的不同, 可以把防护体系划分成外部防雷和内部防雷两个层级。外部层级主要负责拦截直击雷并安全泄放雷电流, 覆盖的是光伏阵列的支撑结构、金属边框以及现场配电箱的外壳; 内部层级则着重处理电气线路和控制回路的浪涌抑制、等电位连接以及屏蔽措施, 重点保护逆变器、监控终端这类敏感设备。这两个层级不是简单地叠加在一起就行了, 而是要通过接地网络来维持工频和冲击工况下的电位平衡, 同时在汇流箱、并网柜这些交界位置设置过渡保护环节, 确保雷电流泄放的时候不会在层级交界处产生危险的电位差^[1]。从整体布局来说, 光伏阵列的防雷接地点、一次设备的浪涌保护器配置、二次控制系统的信号隔离, 还有配电线路的屏蔽接地, 所有这些都得统筹到同一个设计框架里面。这种全方位协同的方案, 可以有效避免因为某个防护缺失点而引发次生故障, 从而提升整套光伏系统的雷电耐受上限和运行可靠性。

2 分布式光伏发电系统精细化防雷工程设计

2.1 系统外部防雷工程设计

外部防雷工程设计的核心在于为分布式光伏系统建立一套能够有效拦截直击雷并将其安全泄放入地的防护通道。针对光伏组件阵列、金属支撑结构以及室外布置的配电装置, 接闪结构的布设必须综合考虑组件排布形态与场地条件, 确保接闪器能够完整覆盖所有外露区域而不留空白。引下通道的规划则要兼顾路径最短与分流均衡两项原则, 转角过多或连接不牢靠都会在雷电流泄放时诱发火花放电, 反而成为新的安全隐患。外部接地

网络的构建也绝非简单埋设几根接地极就能了事,必须依据土壤电阻率分布与设备空间布局,将各金属支架底座、设备外壳通过接地干线互联成一个低阻抗的泄放网络。以某项目新材料 750kWp 分布式光伏项目为例,该项目在 2025 年并网运行时采用了屋面避雷带与原有厂区防雷网可靠连接的一体化防雷系统,支架系统还特别设计了导流槽结构,关键电气连接部位均采用不锈钢紧固件以防腐蚀导致的接触不良。外露金属构件之间的电气连通性同样至关重要,各段支架搭接处、边框与支撑柱的连接点但凡存在间断或接触不良,都要进行可靠的跨接处理^[2]。只有逐一排查并强化这些节点的连接质量,才能最大限度消除接闪盲区与防护死角,使整个外部防护体系在遭受直击雷时能够迅速将雷电流导入大地,不至于在某个局部形成过高的电位抬升而对设备造成反击损伤。

2.2 系统内部防雷工程设计

内部防雷工程设计的关注重点,在于雷电电磁效应经由线路耦合进入电气与控制系统后所引发的过电压侵害。对于汇流箱、逆变器以及监控终端这类核心设备,浪涌防护器件的选型必须区别对待,直流侧与交流侧的电压等级和波形特征存在本质差异,各自的泄放能力与响应速度要求也大相径庭。安装位置同样讲究策略,防护器件越靠近被保护设备的入口,其抑制效果就越有保障,同时各级防护之间还需考虑能量配合问题,避免前级尚未动作而后级已经承受过大冲击。2025 年发布的 QX/T781-2025 标准专门针对光伏系统中电涌保护器(以下简称 SPD)的选择与使用原则作出了详细规定,涵盖交流侧与直流侧 SPD 的选型及等电位连接要求。交直流配电线路的屏蔽与布线走向直接影响感应过电压的耦合程度,将动力电缆与控制信号线分开敷设并保持足够间距,能够有效削弱电磁干扰的耦合路径。等电位联结方面,设备金属壳体、电缆屏蔽层以及金属管线必须统一接入接地系统,确保雷电流侵入时各导电部分之间的电位差被控制在安全限值以内。已有研究表明,雷击距光伏侧最近的杆塔时,光伏侧的雷击跳闸率会从 27.52 次每百公里年上升至 29.63 次每百公里年,风险等级较高。因此,室内外线路穿越不同防雷区域交界处的屏蔽层接地处理也需细致完成,只有层层设防,内部设备才不会在雷电来临时因为某个细微的接地遗漏而遭受不可逆的电气损伤。

3 复杂工况场景分布式光伏发电系统防雷防护

3.1 恶劣环境下光伏系统防雷性能衰减特性

复杂环境对光伏防雷装置的影响绝非简单的表层腐

蚀或物理磨损,而是从材料微观结构到电气导通性能的多维度渐进式劣化。高腐蚀性气氛会持续侵蚀接闪装置表面的金属镀层,使其截流能力逐年下降,同时接地体在电化学反应下产生锈蚀产物,导致其与土壤的接触电阻显著攀升。高湿度环境则加速绝缘支撑部件的表面爬电过程,降低整个防雷回路的冲击耐受水平。多风沙条件下,高速沙粒的冲蚀作用会使金属构件的有效截面积不断缩减,连接部位的接触压力也逐渐松弛,这些变化累积到一定程度便会诱发局部放电或接触不良。强电磁辐射环境对浪涌防护器件的性能影响尤为突出,反复的瞬态冲击会逐步劣化压敏电阻的伏安特性曲线,降低其动作阈值与泄放效率。接地电阻的异常波动往往是上述多种因素耦合作用的结果,有时呈现季节性大幅变化,有时则表现为持续单向漂移。明确这些衰减特征和失效模式的演变规律,后续在不同场景下进行有针对性的防护优化才能找准发力点,避免盲目加固造成的资源浪费。

3.2 恶劣环境适配性防雷优化防护方案

针对复杂环境所暴露出的防雷性能缺陷,适配性优化方案需要从材料选型、结构改进和工艺升级三个方向同步推进。金属防雷构件的防腐处理不能局限于表面涂覆,而应根据环境侵蚀等级选用耐候性更优的不锈钢或镀层工艺,同时在接点处增加密封衬垫以阻断湿气侵入路径。接地系统的改良则要从结构形式和敷设方式两方面入手,在高电阻率区域可采用深井接地或换土工艺来降低接地电阻的稳态值,并增设接地监测装置实时追踪电阻变化趋势,以便及时察觉异常并进行补强^[3]。在电磁干扰较为突出的区域,线路防雷屏蔽措施需要进一步升级,包括采用双层屏蔽电缆、增加屏蔽层接地密度以及在电缆进出设备处设置信号类浪涌保护器。防腐与密封处理虽然增加了初期施工难度,但对于延长防雷系统在恶劣工况下的有效服役周期具有显著价值。经过这些综合改良措施,防雷系统的整体抗退化能力将得到实质性增强,其在寿命周期内的防护效能曲线也更加平缓,不至于在运行中后期出现防护性能急剧下滑的局面。

4 特殊布设形式分布式光伏发电系统防雷防护

4.1 特殊布设光伏系统防雷短板分析

建筑一体化布设将光伏组件嵌入屋面或幕墙,其防雷设计高度依赖建筑物原有防雷体系。根据现行技术规范,此类系统可利用光伏组件金属边框作为接闪器,利用建筑物柱内钢筋或钢构架作为自然引下线,并利用基础内钢筋作为自然接地体。然而,实际工程中既有建筑的防雷系统并非为光伏系统量身定制,二者衔接处常常存在电气连接不可靠的问题,组件边框与建筑结构之间

的等电位联结若不到位,雷电流泄放时便会在连接点产生过高电位差。光伏系统安装后,建筑物遭受雷击的事故率较传统建筑有所上升。低矮架空布设适用于农村光伏、农光互补等场景,支架高度通常不超过3米,其防直击雷措施主要依靠支架兼作接闪器。但支架材质若为普通镀层钢材而非热镀锌钢材,或厚度不足,长期暴露于户外后腐蚀导致的导电性能下降不容忽视。支架之间的连接如果仅靠压块而非可靠焊接或螺栓连接,接触电阻难以控制在规范要求的范围内,接闪的电气连续性便无法保证^[4]。分散式小型布设涉及多个独立安装单元,每个单元规模小且彼此间距不等,各单元往往各自为政地进行接地施工,缺乏统一的联合接地网络规划,等电位联结的完整性也难以保障。

4.2 特殊布设场景专项防雷防护设计

针对建筑一体化布设的空间约束,防雷设计应充分利用建筑物原有的防雷设施作为基础骨架。某市民文化中心光伏发电系统便是一个典型案例,该项目总装机容量275kW,屋面防雷系统整合了镀锌钢筋网格与浪涌保护器,支架接地系统与建筑防雷体系连接形成复合防护。组件铝边框与支架之间应通过专用接地线建立直接等电位连接,支架阵列间的连接则应采用焊接工艺确保持久的电气贯通。对于低矮架空布设,支架兼作接闪器的前提是材质必须采用热镀锌钢材且厚度不小于2毫米,支架间的连接应采用可靠焊接或螺栓连接并将接触电阻控制在较低水平。在阵列边缘和转角部位若存在保护范围不足的情况,可增设辅助接闪措施予以弥补。分散式小型布设的接地条件受限问题,可通过各单元就近接入原有接地系统,并采用铜排或扁钢将所有单元的接地网互联成闭合网络来解决。各单元的设备端应配置适配的

浪涌保护器,确保过电压防护在每一处接入点均得到落实^[5]。某厂区光伏项目在安全设计中采用了一体化防雷系统,屋面避雷带与原有厂区防雷网实现可靠连接,关键电气连接部位采用不锈钢紧固件以防腐蚀导致的接触不良。通过上述差异化设计,各类特殊布设场景的防雷防护短板能够逐一补齐,从而实现全系统无盲区的防雷覆盖。

结束语:综上所述,分布式光伏发电系统的防雷防护需从雷电损伤机理出发,构建外部与内部协同的分层防护架构。在此基础上,针对恶劣环境导致的防雷性能衰减采取适配性材料与工艺改良,同时充分考虑建筑一体化、低矮架空及分散式小型布设等特殊场景的固有短板,制定差异化专项防护方案。通过系统化的理论支撑与精细化的工程设计,形成覆盖各类工况的全场景防雷技术体系,能够有效提升分布式光伏系统在复杂条件下的运行安全性与雷电耐受能力,为光伏发电的规模化发展提供可靠的防雷安全保障。

参考文献

- [1] 陈刚,黄冠军.分布式光伏发电系统防雷工程设计及特殊场景防护[J].现代建筑电气,2025,16(9):11-16.
- [2] 柴辰,蔡超,何一川,等.考虑分布式光伏和配电系统相互影响的雷击风险评估[J].科学技术与工程,2025,25(17):7219-7225.
- [3] 杨浩,刘可欣,夏航,等.分布式光伏发电系统防雷技术体系[J].光源与照明,2026,(1):196-198.
- [4] 刘凯.分布式光伏发电项目安全监测与预警系统设计与应用[J].流体测量与控制,2026,7(3):96-99+106.
- [5] 张聚伟.光伏建筑一体化系统的电气设计与安全防护技术[J].科学技术创新,2026,(3):189-192.