

风电防雷系统存在的问题与解决措施分析

杨春¹ 梁鑫¹ 宁凡² 吴昊¹

1. 陕西华云防雷技术有限公司 陕西 西安 710016

2. 陕西省突发事件预警信息发布中心 陕西 西安 710014

摘要: 本文围绕风电防雷系统展开研究,结合风电防雷基础理论与相关标准,系统分析外部防雷、内部防雷及运维监测环节存在的核心问题,剖析设计、施工、运维层面的成因。针对接闪死角、SPD适配性差、运维不完善等痛点,从系统优化、施工管控、运维升级等维度提出针对性解决措施,为提升风电防雷系统防护效能、规避雷击风险、保障风电机组安全稳定运行提供理论支撑与实践参考,助力风电产业高质量发展。

关键词: 风电防雷系统; 存在问题; 解决措施

引言: 随着风电产业快速发展,风电机组多部署于高原、山地等露天复杂区域,且叶片不断加长、机组高度提升,遭受雷击的概率大幅增加。雷电灾害易造成叶片损坏、精密设备烧毁、机组停机等严重损失,制约风电项目效益发挥。当前风电防雷系统仍存在诸多防护短板,相关技术应用与运维管理有待完善。基于此,本文聚焦风电防雷系统的现存问题,探究成因并提出优化措施,对保障风电安全运行、推动产业可持续发展具有重要意义。

1 风电防雷系统相关基础理论

1.1 雷电的形成与危害特性

(1) 雷电形成机制: 对流云在大气运动过程中,内部水滴、冰晶等粒子相互碰撞摩擦,发生电荷分离与积累,正电荷聚集于云体上部,负电荷聚集于下部,形成强电场。当电场强度突破空气绝缘极限(约30kV/cm)时,会发生先导放电,随后形成主放电,释放出强大的雷电流(通常可达数十千安至数百千安)与电磁脉冲,伴随强烈的光、热效应,对高空风电设备构成直接威胁。(2) 雷电危害类型: 直击雷危害是最直接的威胁,雷电流直接击中风电机组叶片、机舱等部位,瞬间产生的高温高压会造成叶片熔化、机舱结构破损,甚至导致机组停机报废;感应雷危害更为普遍,雷电产生的强电磁感应会在机组电气线路中产生过电压,击穿变频器、控制系统等精密电气设备,引发设备故障;球形雷危害虽发生概率极低,但一旦出现,易侵入机舱内部,引发火灾、设备短路,造成不可逆的严重损失^[1]。

1.2 风电防雷系统的组成与工作原理

(1) 系统核心组成: 分为外部防雷系统与内部防雷系统两部分,二者协同工作、缺一不可。外部防雷系统主要由接闪器(如避雷针、避雷带)、引下线、接地网组

成,是拦截、疏导雷电流的核心;内部防雷系统包括屏蔽装置、浪涌保护器(SPD)、等电位连接装置,主要用于防护雷电电磁脉冲对内部设备的干扰。(2) 工作原理: 遵循“疏导为主、阻断为辅”的原则,当雷电来袭时,外部接闪器主动拦截雷电流,通过引下线将雷电流安全传导至接地网,经接地网快速泄入大地,避免雷电流在设备表面聚集;同时,内部屏蔽装置阻断雷电电磁脉冲的传播路径,浪涌保护器快速钳制线路过电压,等电位连接消除设备间的电位差,共同实现“外部疏导+内部阻断”的全流程防雷防护,保障机组安全稳定运行。

1.3 风电防雷相关技术标准与规范

(1) 国际标准: 以IEC、IEEE等国际组织制定的标准为核心,其中IEC61400系列标准明确了风电机组防雷设计、测试的具体要求,规范了接闪器布置、接地电阻限值、浪涌保护器选型等关键内容;IEEE标准则重点针对雷电电磁脉冲防护,提供了线路屏蔽、接地设计的技术指引,为国际风电防雷工程提供统一依据。(2) 国内标准: 主要依据GB、DL系列相关规范,如GB/Z25427-2010《风力发电机组雷电防护》明确了国内风电机组防雷的基本要求,DL/T620-1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》结合我国北方多雷、南方多雨潮湿的地理环境特点,细化了风电场防雷系统设计、施工与运维的具体流程和技术参数,确保防雷系统适配国内风电场实际工况。

2 风电防雷系统现存问题及成因分析

2.1 外部防雷系统存在的问题

(1) 接闪系统防护存在死角: 传统接闪器仅安装于叶尖,保护范围有限,超长叶片的叶中、叶根易形成防护盲区。叶片采用复合材料,导电性能差,雷击时电荷无法快速传导,易局部聚集产生高温高压,导致叶片爆

裂损坏。(2)引下线存在安全隐患:引下线长期暴露户外,连接部位易受自然环境侵蚀而腐蚀、老化、断裂;部分引下线通流能力不足,传导雷电流时易产生高温电弧,损坏机组结构,影响雷电流顺畅传导。(3)接地系统不达标:受山区岩石多、土壤电阻率高的地质条件影响,接地体布局不合理,导致接地电阻过高,雷电流无法快速泄入大地,易引发地电位反击,损坏机组电气设备。

2.2 内部防雷系统存在的问题

(1)浪涌保护器(SPD)适配性差:部分风电场SPD选型缺乏针对性,未结合设备耐受电压、雷电活动强度合理选型,动作阈值与设备需求不匹配,易出现误动作导致设备断电,或失效无法抑制过电压,无法发挥防护作用。同时,SPD安装位置不合理,与被保护设备距离过远,防护效果大打折扣。(2)屏蔽与等电位连接不完善:电缆敷设未采用屏蔽电缆,或屏蔽层接地不牢固、接地电阻过大,雷电产生的电磁脉冲易通过电缆侵入控制系统。设备间等电位连接不规范,未形成完整的等电位网络,雷击时设备间存在电位差,易引发设备绝缘击穿、短路故障^[2]。(3)精密设备防护不足:机舱内变频器、PLC控制器等精密电子设备结构精密、抗电磁干扰能力弱,未针对性加装防护装置,易受雷电感应产生的电磁脉冲影响,出现信号紊乱、设备失灵,甚至烧毁等问题,影响机组正常运行。

2.3 防雷系统运维与监测存在的问题

(1)运维体系不完善:多数风电场未建立系统的防雷运维制度,缺乏定期巡检、维护计划,对SPD、引下线、接地体等关键部件的老化、损坏情况无法及时发现,导致防雷系统防护效能逐步下降,增加雷击风险。(2)监测预警能力不足:多数风电场未部署完善的实时雷电预警与定位系统,无法实时监测雷电活动轨迹、强度,难以提前预判雷击风险,无法联动风机采取主动避雷措施,只能被动承受雷击损失。(3)运维人员专业素养不足:运维人员缺乏风电防雷专业知识与实操技能,对防雷系统工作原理、隐患排查方法掌握不熟练,无法精准识别系统隐患,也难以规范开展维护、检修工作,影响运维质量。

2.4 现存问题的核心成因

(1)设计层面:防雷系统设计缺乏针对性,未充分结合风电场地理环境、雷电活动规律,也未考虑新型风机的结构特点,设计方案过于笼统,科学性不足,导致系统先天存在防护缺陷。(2)施工层面:施工过程中工艺不规范,接地体敷设、引下线连接、SPD安装等关键环节操作不标准,存在连接不牢固、敷设深度不足等质量隐患,直接影响防雷系统的整体防护效果。(3)运维层

面:相关单位对防雷系统运维重视程度不够,缺乏完善的运维管理制度与智能监测手段,运维资金、人员投入不足,导致系统后期维护不到位,隐患长期积累,防护效能持续下降。

3 风电防雷系统问题的解决措施

3.1 外部防雷系统优化措施

(1)完善接闪系统设计:针对传统接闪系统防护死角问题,采用多点接闪模式,在叶片叶尖、叶中关键部位分别安装专用接闪器,扩大保护范围,实现全叶片无死角防护。同时,在叶片表面均匀涂抹高导电、耐老化的专用导电涂层,提升复合材料叶片的导电性能,使雷击时电荷能够快速传导,避免局部电荷聚集产生高温高压,有效防止叶片爆裂、分层等损坏现象,保障叶片安全。(2)优化引下线配置:选用铜质或镀锡铜等高导电、耐腐蚀的专用引下线,适配雷电流流通需求,避免因通流能力不足产生高温电弧。规范引下线连接部位的处理工艺,采用防腐密封材料对连接点进行包裹,防止风雨侵蚀导致的腐蚀、老化与断裂;同时增加引下线跨接点数量,降低接触电阻,确保雷电流能够顺畅、快速传导至接地网,减少传导过程中的能量损耗与安全隐患^[3]。(3)改进接地系统:结合风电场土壤电阻率实际情况,优化接地体布局,采用水平接地极与垂直接地极组合敷设的方式,扩大接地网覆盖范围,提升接地效能。选用长效降阻防腐材料,对grounding体进行防腐处理,延长使用寿命,同时有效降低接地电阻,确保接地电阻控制在规范限值内,使雷电流能够快速、安全泄入大地,避免地电位反击现象发生。

3.2 内部防雷系统优化措施

(1)规范SPD选型与安装:结合机舱内各类设备的耐受电压、工作参数及风电场雷电活动强度,科学选型适配的浪涌保护器(SPD),确保SPD动作阈值与设备需求精准匹配,避免出现误动作或失效问题。在电源进线端、信号接口、控制回路等关键节点合理安装SPD,缩短SPD与被保护设备的距离,提升防护效果;建立SPD定期检测制度,定期检测其动作性能与完好状态,及时更换失效部件,保障SPD持续发挥防护作用。(2)完善屏蔽与等电位连接:电缆敷设全部采用屏蔽电缆,并穿金属管进行保护,减少电磁脉冲的侵入;确保屏蔽层两端可靠接地,接地电阻控制在规定范围内,形成完整的屏蔽防护体系,阻断雷电电磁脉冲的传导路径。规范机舱内、塔架内各类设备的等电位连接,将所有电气设备、金属构件连接至同一等电位网络,消除雷击时设备间的电位差,有效防止设备绝缘击穿、短路等故障。(3)强化精密设备防护:

针对机舱内变频器、PLC控制器等精密电子设备抗电磁干扰能力弱的问题,为其加装专用电磁屏蔽罩,阻隔雷电电磁脉冲的干扰;同时采用滤波、隔离等技术,优化设备电路设计,提升设备自身的抗电磁干扰能力,避免因雷电感应导致的信号紊乱、设备失灵、烧毁等问题,保障精密设备稳定运行^[4]。

3.3 运维与监测体系完善措施

(1) 建立健全运维管理制度:制定完善的防雷系统定期巡检、维护计划,明确巡检周期、运维流程与岗位职责,将运维工作落到实处。加强对SPD、引下线、接地体、接闪器等关键部件的检查,重点排查老化、腐蚀、损坏、松动等隐患,及时进行维修或更换,确保防雷系统始终处于良好运行状态,持续发挥防护效能。(2) 构建智能监测预警系统:在风电场全域部署大气电场仪、雷电定位设备,实时监测雷电活动的轨迹、强度与发展趋势,结合AI算法对雷电风险进行精准预判,提前发出预警信号。联动风机控制系统,在雷电来临前调整风机运行状态,将叶片调整至顺桨位置,采取主动避雷措施,最大限度降低雷击损失^[5]。(3) 提升运维人员专业素养:定期组织运维人员开展风电防雷专业培训,内容涵盖防雷系统工作原理、部件结构、隐患排查方法、维护操作规范及应急处置流程等,普及风电防雷专业知识与实操技能。通过理论考核与实操演练相结合的方式,提升运维人员的专业能力,确保其能够精准识别系统隐患、规范开展维护检修工作,保障运维质量。

3.4 施工质量管控措施

(1) 规范施工流程:施工前组织技术交底,确保施工人员全面掌握设计方案与技术标准,严格按照规范要求开展施工。加强对接地体敷设深度、引下线连接工艺、SPD

安装位置等关键环节的质量管控,杜绝偷工减料、操作不规范等行为,及时整改施工过程中发现的隐患,确保施工质量符合标准。(2) 加强施工验收:建立完善的施工验收机制,制定详细的验收标准与流程,施工完成后,对防雷系统各部件、各环节进行全面检测,重点检测接地电阻、引下线通流能力、SPD性能、屏蔽层接地情况等关键指标。邀请专业检测机构参与验收,确保验收结果客观公正,只有验收合格的防雷系统,方可投入使用,从源头杜绝施工质量隐患。

结束语

风电防雷系统的稳定运行是风电项目安全高效运转的重要保障,其防护效能直接关系到设备寿命与运营效益。本文全面梳理了风电防雷系统在外部防护、内部防护及运维监测等方面的问题,结合成因提出了针对性优化方案,形成“问题-成因-措施”的完整分析体系。后续需结合风电技术发展,持续优化防雷设计与运维模式,强化技术创新与质量管控,不断提升防雷系统适配性与可靠性,为风电产业安全发展筑牢防雷屏障。

参考文献

- [1]王克,汪天呈,甘瑜前.风电机组过电压保护与防雷接地保护设计研究[J].机电信息,2020,11(26):128-129.
- [2]王皓,胡军.论风电场雷电防护措施研究[J].科技创新导报,2021,16(20):109-110.
- [3]赵江.风电机的直接雷击及其防护[J].科技资讯,2022,17(19):43-44.
- [4]梅迪斯.风力发电机组的综合防雷技术措施研究[J].科技风,2021,24(18):180-184.
- [5]姚林玲,崔婷茹,杨瑜.风力发电机组的防雷设计方法分析[J].科技创新导报,2023,13(33):51-53.