

高海拔风力发电机组防雷技术研究

黄晓春 胡志宝

中广核（政和）风力发电有限公司 福建 福州 350000

摘要：高海拔地区雷电活动强度大、频次高，特殊低压地形环境使风机雷击风险远高于平原地区，易出现叶片损毁、电气设备击穿、系统误动作等故障。本文剖析高海拔雷电环境特征、风机雷击风险与损伤机理，从接闪防护、雷电流泄放、接地系统、电磁屏蔽四方面优化防雷关键技术。通过联合仿真与工程实体验证，优化方案可大幅提升防雷效率，显著降低机组雷击故障率，为高海拔风电机组安全稳定运行提供可靠技术支持。

关键词：高海拔；风力发电机组；防雷技术

引言：随着我国高海拔风电开发规模持续扩大，特殊高寒、低压、强雷电环境对机组防雷系统提出严苛要求。传统平原防雷技术无法适配高海拔雷击强度高、引雷范围大、放电剧烈的特性，导致风机雷击故障频发，制约风电项目安全运维与经济效益。为解决该行业痛点，本文针对性分析高海拔风机雷击故障机理，优化全套防雷技术体系，结合仿真与工程应用验证防护效果，为高海拔风电防雷技术升级提供参考。

1 高海拔地区风机雷击环境与故障机理分析

1.1 高海拔区域雷电环境特征

（1）高海拔区域雷电活动呈现频次高、强度大的特征，尤其午后至傍晚时段为雷暴高发期，雷电流幅值可达200kA以上，且正极性闪击占比显著高于平原地区。

（2）低气压环境下空气密度降低，电子平均自由程增大，雷电先导起始电压阈值下降约15%~25%，先导传播速度减缓，使得先导通道更易向地面高耸物体发展。

（3）高海拔雷暴云底高度较低，云地间电场强度增强，且地形抬升效应导致局地对流旺盛，雷暴单体尺度小但放电更为剧烈，与平原地区的层状云雷暴在放电特征和移动路径上存在显著差异。

1.2 高海拔风机结构与雷击风险特性

（1）大型风机叶片尖部及后缘区域曲率半径小、电场集中效应显著，是最主要的雷击接闪部位；机舱顶部风速仪、航空灯等突出物以及塔筒法兰连接处均为防雷薄弱环节。（2）高海拔风机作为局部区域内的最高耸结构，其高度可达150m以上，在雷云电场下尖端电晕放电强烈，上行先导起始时间提前，引雷半径较平原增大20%~40%。（3）叶片旋转工况下，动态接闪过程中叶尖线速度可达100m/s以上，旋转效应使得雷击附着点呈现非对称分布特征，迎风面叶尖区域雷击概率约为背风面的2~3倍^[1]。

1.3 高海拔风机典型雷击故障类型

（1）直击雷巨大能量（单次雷击转移电荷量可达数百库仑）直接作用于叶片接闪器周边区域，造成复合材料烧蚀、炸裂乃至叶片断裂；塔筒遭受直击雷时，雷电流沿筒壁传导可引发局部熔穿和结构变形。（2）感应雷通过电源线、信号线等电缆回路耦合过电压，幅值可达数倍额定电压，导致变频器IGBT模块、控制电源板等敏感电子器件击穿烧毁。（3）雷电电磁脉冲空间辐射强度高可达数kV/m，通过空间耦合进入控制系统，引起PLC误动作、编码器信号跳变、通信中断等，导致风机紧急停机、扭矩突变等运行故障。

1.4 高海拔风机雷击损伤机理

（1）雷电流欧姆热效应使叶片复合材料表面温度急剧升至3000℃以上，基体树脂热解气化、纤维氧化烧蚀，形成凹坑状损伤区，严重时贯穿蒙皮导致结构强度丧失。（2）雷电流瞬间加热产生的冲击波压力峰值可达数兆帕，在复合材料层间产生拉伸和剪切应力波，引发分层、基体开裂和纤维断裂，裂纹沿界面扩展后导致叶片整体承载能力显著下降。（3）雷击浪涌过电压沿电缆传导至电气设备时，在绝缘薄弱处形成局部放电，高温电弧使绝缘材料炭化、性能劣化，最终发展为绝缘贯穿性击穿，造成设备永久性损坏。

2 高海拔风力发电机组防雷关键技术优化

2.1 风机接闪防护系统优化设计

（1）适配高海拔环境的叶片接闪器选型与布局优化。高海拔强雷暴地区雷电流幅值大、陡度高，接闪器选用钨铜合金或钨铜复合材料以提升耐腐蚀性能。叶片尖部设置主接闪器，距叶尖5m、10m处增设辅助接闪器分散雷电流密度。通过电场仿真确定各接闪器最佳安装角度，确保叶片在各俯仰角下均能有效接闪。接闪器底座增设热缓冲层，降低雷电流注入瞬间对叶片层压结构

的热冲击损伤^[2]。(2)机舱、塔筒外置接闪防护装置升级改造方案。机舱顶部加装梳状接闪阵列覆盖风速仪、风向标等传感器区域,保护角控制在30°以内。塔筒法兰连接处增设环形接闪带,防止雷电流在法兰缝隙处产生火花放电。塔筒中部每间隔20m安装金属均压环,削弱高海拔强雷暴下塔筒侧面的绕击概率。(3)多接闪点协同防护的雷电覆盖范围优化计算。基于先导发展物理模型建立多接闪器三维电场叠加分布矩阵,计算不同雷云极性和风轮方位角下的整体接闪效率。采用遗传算法寻优确定各接闪器相对位置及曲率半径的协同匹配关系,使各部位接闪覆盖率不低于95%,雷击定位集中度提高约30%。

2.2 雷电流泄放通道优化技术

(1)高海拔低温环境下导流导体材料选型优化。低温环境优选镀锡铜编织带与铝镁合金复合导体组合方案,兼顾导电率与低温抗拉强度。导体外层增加耐低温硅橡胶绝缘护套防止冰雪附着。连接端子镀银处理,接触电阻稳定控制在50μΩ以下。(2)叶片-轮毂-机舱-塔筒一体化泄放通道搭建。叶片内部敷设铜质导流缆,经轮毂滑环过渡至机舱碳刷机构,再经由机舱底座铜排引至塔筒内壁泄流扁钢,形成网格状泄放骨架。各连接节点采用液压压接加螺栓锁固双重保障,通道直流电阻不大于30mΩ。通道走向避开变桨电机、偏航齿轮箱等敏感部件。(3)泄放通道过渡电阻控制与密封防护技术。可拆卸连接点涂覆导电润滑脂并用热缩管密封,定期检测过渡电阻,偏差不超过±10%。穿墙及法兰贯穿处采用铜质密封套管加O型圈结构,兼顾导电连通与气密防水。轮毂内旋转段导流缆设置冗余双路并联,保障单路失效时泄放通道持续可靠^[3]。

2.3 高海拔风机接地系统改良技术

(1)高海拔冻土、砂石地质接地电阻偏高问题整改。冻土和砂石地质电阻率高达1000~3000Ω·m,采用深井爆破加压力灌注降阻剂工法穿透冻土层,垂直接地极延伸至30~50m。基础周边开挖环形沟槽置换低电阻率回填料,使接地电阻从30Ω以上降至4Ω以下。(2)复合型接地网结构与降阻优化方案。构建环形水平接地带、深井垂直接地极与外延辐射状接地线三位一体的复合接地网。水平接地带采用120mm²铜绞线双环敷设,埋深不低于2.5m。外延辐射线沿四个方向伸出40m连接深井接地极,实现立体散流,工频接地电阻稳定控制在3Ω以内。(3)接地系统防腐、防冻长效防护技术措施。接地体选用铜层厚度≥0.8mm的铜包钢复合材料,焊点涂覆防腐漆。冻土区域接地极埋置于冻土层以下,并填充掺

盐细砂降低冰点至-15℃以下。每两年复测接地电阻并开挖检查,确保全寿命周期性能可靠。

2.4 雷电感应与电磁脉冲防护技术

(1)风机电气系统浪涌保护器(SPD)适配选型。电源线路第一级选用I类冲击电流SPD($I_{imp} \geq 25kA$),安装于机舱主配电柜入口;第二级选用II类SPD($I_n \geq 20kA$)分布于塔筒底部及变频器前端。信号线路选用响应时间≤1ns的高频SPD,匹配现场总线接口特性。(2)机舱、控制柜电磁屏蔽结构优化设计。机舱罩壳内表面粘贴0.5mm厚铜箔形成法拉第笼结构,接缝焊锡密封。控制柜采用双层钢板夹屏蔽网结构,柜门加装导电密封条,闭合接触电阻小于10mΩ。进出电缆孔加装屏蔽过线器实现360°环接。(3)二次回路防雷接地与等电位联结技术。机舱和塔底设置截面≥100mm²的等电位接地母排,将所有信号地、保护地、屏蔽地汇接后经单独引下线接至主接地网。二次信号电缆采用总屏蔽加分屏蔽结构,两端接地消除环流干扰。各子系统通过等电位连接均衡电压,确保雷击时设备间电位差控制在200V以内。

3 高海拔风力发电机组防雷系统仿真验证与工程应用分析

3.1 仿真模型搭建与参数设置

(1)基于电磁仿真软件的风机整体模型构建。采用CDEGS与COMSOL Multiphysics联合仿真平台,建立包含叶片、机舱、塔筒及接地系统的全尺寸三维模型。叶片按复合材料分层建模并赋予各向异性介电参数,塔筒简化为锥形金属壳体,接地网按实际拓扑精确建模。叶片尖端和接闪器周边区域网格加密至5mm,其余部位渐变划分。(2)高海拔雷电环境参数与边界条件设定。雷电流波形采用10/350μs和8/20μs两种标准波形,幅值分别设为200kA和100kA。空气域相对介电常数按海拔3000m气压修正,击穿场强阈值取 $2.5 \times 10^5 V/m$ 。雷云采用等效电荷模型施加于风机上方,边界设为散射边界条件^[4]。(3)仿真评价指标与试验验证标准确定。接闪效率以接闪器捕获次数与总雷击次数之比表征,覆盖范围以有效接闪区域体积量化。泄放性能以节点暂态电位升和泄流密度衡量,电磁抑制效果以设备端残余过电压评价。结果参照IEC62305、GB/T33629及GB/T35073标准判定。

3.2 防雷系统防护效果仿真分析

(1)优化前后接闪效率与雷电覆盖范围对比分析。优化前叶片接闪率约72%,漏击集中于叶背中段和机舱尾部。多接闪器协同方案使整体接闪率提升至94%以上,覆盖范围向下扩展约25%,叶片尖部和机舱顶部保护裕度分

别提高40%和35%，接闪盲区基本消除。（2）雷电流泄放速率与接地电位分布仿真结果。200kA雷电流注入时，优化后泄放通道峰值电流集中于导流缆路径，塔筒壁面分流比由65%降至12%以下。接地网最大暂态电位升为28.7kV，边缘降至3.2kV以下，接触电压和跨步电压均满足安全限值。（3）雷电电磁脉冲抑制效果仿真验证。未屏蔽时机舱内场强达8.6kV/m，控制柜感应电压超3kV。加装铜箔屏蔽层后场强降至0.6kV/m以下，柜内感应电压降至280V，SPD动作后残压控制在1.5kV以内，保护效果满足标准要求。

3.3 工程应用实例与效果监测

（1）高海拔风电场防雷改造工程实施方案。选取四川某海拔3200m风电场15台2.5MW机组实施系统性改造，包括叶片辅助接闪器加装、塔筒均压环安装、泄放通道重建及复合接地网降阻工程，单台工期约7天，2025年6月完工。（2）改造后机组雷击故障数据统计与对比分析。改造前同期雷击故障停机23次（叶片损伤8次、电气故障12次、其他3次），改造后仅4次轻微信号干扰且自动复位，叶片及主设备零损伤，故障率下降82.6%。（3）复杂工况下防雷系统运行稳定性监测结果。满发、偏航、变桨等工况下泄放通道接触电阻月均波动 $\pm 5\%$ 以内。雷暴过境时接地网暂态电位升实测24.3kV，与仿真误差 $< 15\%$ 。低温覆冰条件下系统无功能性降级，运行稳定可靠。

3.4 现存问题与技术改进展望

（1）当前高海拔风机防雷技术应用局限性分析。对超200kA极端雷击防护裕度不足，接闪器多次烧蚀累积效应缺乏量化评估手段。高海拔复杂地形施工受限，降阻效果较平原差20%~30%。旋转滑环、碳刷动接触可靠性仍是长期隐患，仿真模型对先导随机性表征能力有限。

（2）极端高海拔环境防雷技术优化改进方向。开发海拔4000m以上专用接闪器材料（如铂铱合金镀层）和自融冰

型接地电极。研究多脉冲连续雷击耐受能力提升技术，探索石墨烯复合涂层在叶片防雷与防冰一体化中的应用。发展基于雷电实时监测的主动接闪策略，雷暴来临前自动顺桨停机并预置最优接闪姿态^[5]。（3）智能化、一体化风电防雷技术发展趋势。融合雷电气象预警、雷击定位与故障诊断的智能防雷管理系统是主流方向。光纤布拉格光栅传感技术可实现泄放通道接触电阻、温升和应变的多参量实时预警。未来趋向接闪、泄放与结构承力一体化设计，采用碳纤维导电复合材料替代传统接闪器，结合数字孪生技术赋能全生命周期管理，推动防雷从被动保护向主动智能防护跨越。

结束语

本文完成高海拔风机雷击环境、故障机理的系统性分析，优化形成一体化防雷防护技术体系，经仿真与工程实践证实，该技术可有效消除防雷盲区、抑制雷电电磁干扰，大幅降低机组雷击故障率。同时梳理了当前极端雷击防护、复杂地形施工等现存技术短板，展望了新型防雷材料、智能主动防护与数字孪生一体化的发展方向，可为后续高海拔风电防雷技术迭代与工程应用提供理论与实践依据。

参考文献

- [1]杨怀宇,刘正书,吴文龙.超高海拔环境风力机叶片防雷设计仿真研究[J].装备环境工程,2025,22(08):137-147.
- [2]赵泽阳,刘亚坤.高海拔山地风电场风机群雷电保护特性与防护优化[J].电工技术学报,2024,39(11):3467-3474.
- [3]王超,李刚.高海拔风力发电机组接地系统降阻与防雷改造技术[J].电力系统保护与控制,2023,51(15):190-196.
- [4]黄怡璿,樊亚东,王红斌.高海拔地区雷暴活动特征与风机防雷参数修正研究[J].高电压技术,2022,48(09):3289-3297.
- [5]陈宇轩.高海拔风电机组机舱与电气系统感应雷防护技术研究[J].可再生能源,2025,33(04):512-517.