

高海拔地区风电场集电线路防雷措施改进

郭祥宇

华电新能源集团股份有限公司湖南分公司 湖南 长沙 410000

【摘要】：高海拔地区具有气压低、空气密度小、紫外线强等特殊气候与地理条件，导致风电场集电线路防雷工作面临诸多挑战。本文结合高海拔地区的环境特性，分析了当前风电场集电线路防雷系统存在的问题，从线路绝缘强化、防雷装置优化、接地系统改进及运维管理完善等方面，提出针对性的防雷措施改进方案。通过实例验证，改进后的防雷措施可显著提升集电线路的耐雷水平，降低雷击故障发生率，为高海拔地区风电场的安全稳定运行提供技术支撑。

【关键词】：高海拔；风电场；集电线路；防雷措施；改进

DOI:10.12417/2705-0998.25.24.019

1 引言

随着新能源产业的快速发展，风电场建设逐渐向高海拔地区延伸。高海拔地区拥有丰富的风能资源，但特殊的自然环境给风电场集电线路的安全运行带来严峻考验。当前，高海拔地区风电场集电线路多沿用平原地区的防雷设计标准与措施，未充分考虑高海拔环境的特殊性，导致防雷效果不佳。因此，深入研究高海拔地区风电场集电线路的防雷问题，优化改进防雷措施，具有重要的现实意义与工程价值。本文基于高海拔地区的环境特点，结合实际工程经验，对集电线路防雷措施的改进进行详细探讨。

2 高海拔地区环境特性及对集电线路防雷的影响

2.1 高海拔地区环境特性

高海拔地区通常指海拔高度超过 1000 米的区域，该区域的环境特性主要体现在四个方面。一是气压与空气密度低，随着海拔升高，气压逐渐降低，空气密度随之减小，海拔每升高 1000 米，空气密度约下降 10%~15%。二是空气湿度低，高海拔地区气候干燥，相对湿度普遍低于平原地区，尤其在冬季，湿度更低。三是紫外线辐射强，海拔升高后，大气层对紫外线的阻挡作用减弱，强紫外线会加速线路绝缘材料的老化。四是雷电活动频繁，高海拔地区地形复杂，多山地、峡谷，容易形成局部强对流天气，雷电日数明显多于平原地区，且雷电流幅值更大、陡度更高。

2.2 对集电线路防雷的影响

高海拔环境特性对集电线路防雷产生多方面不利影响。首先，空气绝缘强度下降，导致线路的电晕起始电压降低，绝缘子串的闪络电压大幅下降，即使是较小的雷过电压，也可能引发绝缘子闪络，造成线路跳闸。其次，强紫外线辐射加速绝缘子、避雷器等防雷设备绝缘材料的老化，降低设备的绝缘性能与使用寿命，增加防雷系统故障风险。再次，雷电流幅值大、陡度高，会使线路感应过电压升高，更容易突破线路的防雷保护防线，同时对防雷装置的通流能力与耐受能力提出更高要求。最后，干燥的环境会降低土壤的导电性能，导致接地装置

的接地电阻难以降低，雷击时接地电位升高，加剧线路设备的损坏。

3 高海拔地区风电场集电线路防雷现状及存在问题

3.1 防雷现状

目前，高海拔地区风电场集电线路的防雷措施主要参考平原地区的设计规范，核心措施包括安装避雷器、架设架空地线、优化绝缘子选型及设置接地装置等。在避雷器选型方面，多采用金属氧化物避雷器，其具有响应速度快、通流能力强等优点；架空地线主要采用镀锌钢绞线，用于屏蔽导线，拦截雷电直击；绝缘子多选用钢化玻璃绝缘子或复合绝缘子；接地装置则根据土壤条件，采用水平敷设与垂直接地相结合的方式。然而，由于未充分考虑高海拔环境的特殊性，这些防雷措施在实际应用中难以达到理想效果。部分高海拔风电场集电线路的雷击跳闸率高达 3~5 次/百公里·年，远高于平原地区风电场的 1~2 次/百公里·年，严重影响风电场的正常运行。

3.2 存在的主要问题

3.2.1 线路绝缘水平不足

高海拔地区空气绝缘强度下降，而集电线路选用的绝缘子仍按照平原地区标准选型，其额定爬电比距无法满足高海拔环境的绝缘要求。同时，强紫外线辐射加速绝缘子表面老化、龟裂，导致绝缘子绝缘性能下降，容易发生沿面闪络。此外，线路导线的电晕损耗增加，也会间接降低线路的绝缘水平。

3.2.2 防雷装置保护效果不佳

一是架空地线的屏蔽效果有限，高海拔地区风电场集电线路多沿山地敷设，线路起伏大、转角多，架空地线难以实现对导线的全范围屏蔽，存在雷电绕击的风险。二是避雷器选型不合理，部分风电场选用的避雷器额定电压、通流能力未考虑高海拔地区雷电流幅值大的特点，雷击时容易发生避雷器爆炸、损坏，无法有效限制雷过电压。三是避雷器安装位置不科学，仅在线路终端、转角塔等关键节点安装，未实现全线路的均衡保护。

3.2.3 接地系统性能差

高海拔地区土壤干燥、电阻率高，部分区域土壤电阻率甚至超过 $1000 \Omega \cdot m$ ，常规接地装置的接地电阻难以降至设计标准（通常要求接地电阻 $\leq 10 \Omega$ ）。接地电阻过大，雷击时会产生较高的接地电位升，导致线路绝缘子串闪络、设备损坏。此外，高海拔地区温差大、冻融循环频繁，会破坏接地装置的连接部位，加剧接地电阻的升高。

3.2.4 运维管理不到位

高海拔地区地形复杂、交通不便，给集电线路防雷设备的运维工作带来诸多困难。部分风电场存在防雷设备巡检不及时、维护不到位的问题，如绝缘子表面积污未及时清理、避雷器漏电流未定期检测、接地装置腐蚀未及时处理等，导致防雷系统的性能逐渐下降，无法有效应对雷击风险。

4 高海拔地区风电场集电线路防雷措施改进方案

4.1 强化线路绝缘水平

4.1.1 优化绝缘子选型

根据高海拔地区的绝缘需求，选用具有高爬电比距的绝缘子。对于海拔 1000~3000 米的区域，绝缘子爬电比距应不小于 $25mm/kV$ ；海拔 3000~5000 米的区域，爬电比距应不小于 $31mm/kV$ 。优先选用耐紫外线、抗老化性能强的复合绝缘子，其表面采用硅橡胶材料，具有良好的憎水性与耐候性，可有效抵御强紫外线辐射与积污闪络风险。同时，在绝缘子两端加装均压环，改善绝缘子串的电压分布，避免局部电场强度高导致绝缘击穿。

4.1.2 提升导线绝缘防护

对集电线路导线采用绝缘包覆处理，选用耐候性强的绝缘材料包裹导线，减少电晕损耗，提升导线的绝缘水平。此外，合理增大导线间距，避免雷击时导线之间发生闪络。对于线路中的跳线、接头等薄弱部位，加装绝缘护套，强化局部绝缘防护。

4.2 优化防雷装置配置

4.2.1 改进架空地线设置

采用双架空地线设计，提升对导线的屏蔽效果，降低雷电绕击率。架空地线选用高强度铝合金绞线，其具有重量轻、强度高、耐腐蚀等优点，适合高海拔地区复杂地形的敷设。对于线路转角、爬坡等关键区段，适当降低架空地线的悬挂高度，缩小架空地线与导线之间的距离，进一步提升屏蔽效果。同时，在架空地线两端加装接地装置，确保雷击时雷电流能够快速导入大地。

4.2.2 科学选型与布置避雷器

根据高海拔地区雷电流幅值大、陡度高的特点，选用额定电压更高、通流能力更强的金属氧化物避雷器。对于海拔超过

2000 米的区域，避雷器的额定电压应在平原地区标准基础上提高 10%~20%。扩大避雷器的安装范围，除线路终端、转角塔外，在直线塔上每隔 2~3 基塔安装一组避雷器，实现全线路的均衡保护。此外，选用带脱离器的避雷器，当避雷器发生故障时，脱离器可自动将其与线路断开，避免影响线路正常运行。

4.3 改进接地系统设计

4.3.1 优化接地装置结构

针对高海拔地区土壤电阻率高的特点，采用复合型接地装置。水平敷设部分选用镀锌扁钢，垂直接地极采用铜包钢接地极，同时在接地体周围敷设降阻剂。降阻剂选用长效、稳定的无机降阻剂，可有效降低土壤电阻率，提升接地装置的导电性能。对于土壤极度干燥的区域，采用深井接地方式，将垂直接地极深入地下水水位以下，确保接地装置的稳定性能。

4.3.2 加强接地装置的防腐与稳定

高海拔地区温差大、冻融循环频繁，对接地装置的防腐性能提出更高要求。接地体采用热镀锌处理，连接部位采用焊接方式，并对焊接处进行防腐处理。在接地装置周围铺设碎石垫层，减少冻融循环对接地体的破坏。定期对 grounding 装置的接地电阻进行检测，当接地电阻超过设计标准时，及时采取增补接地极、更换降阻剂等措施。

4.4 完善运维管理体系

4.4.1 建立常态化巡检机制

结合高海拔地区的地形与气候特点，制定科学的巡检计划。采用无人机巡检与人工巡检相结合的方式，提高巡检效率与覆盖面。重点巡检绝缘子表面积污、老化情况，避雷器的外观、漏电流情况，以及接地装置的腐蚀、连接情况。对于巡检中发现的问题，建立台账，及时整改。

4.4.2 加强防雷设备检测与维护

定期对避雷器进行预防性试验，检测其漏电流、直流参考电压等参数，确保避雷器性能完好。定期清理绝缘子表面的积污，对于严重老化、龟裂的绝缘子及时更换。定期检测接地装置的接地电阻，每年至少检测 2 次，在雷雨季节前重点检测。

4.4.3 建立雷击故障应急机制

制定雷击故障应急预案，明确应急处置流程与责任分工。配备必要的应急抢修设备与物资，如避雷器、绝缘子、接地材料等。雷击故障发生后，快速组织抢修，缩短故障停电时间。同时，对雷击故障原因进行深入分析，总结经验教训，持续优化防雷措施。

4.5 改进方案的技术要点总结

为清晰呈现改进方案的核心技术要点，便于工程应用与推广，现将各环节的关键技术参数与要求汇总如下表所示。

表1 各环节的关键技术参数与要求

改进环节	核心技术要点	高海拔适配要求
线路绝缘强化	选用高爬电比距绝缘子、加装均压环、导线绝缘包覆	海拔 1000-3000m 爬电比距 $\geq 25\text{mm/kV}$; 3000-5000m $\geq 31\text{mm/kV}$, 优先选复合绝缘子
防雷装置优化	双架空地线、高强度材质、避雷器选型与加密布置	避雷器额定电压提高 10%-20%, 直线塔每 2-3 基装 1 组, 带脱离器
接地系统改进	复合型接地装置、敷设降阻剂、深井接地	接地电阻 $\leq 10\Omega$, 采用热镀锌接地体, 做好防腐与抗冻融处理
运维管理完善	无人机+人工巡检、定期检测、应急机制	每年至少 2 次接地电阻检测, 雷雨前重点巡检, 配足应急物资

5 实例验证

5.1 工程概况

选取某位于海拔 2800 米的风电场作为试验对象, 该风电场总装机容量为 50MW, 集电线路采用 10kV 电缆与架空线路混合敷设方式, 架空线路总长度为 32 公里。该风电场投运初期, 采用常规防雷措施, 2020-2021 年期间, 集电线路雷击跳闸率为 4.2 次/百公里·年, 严重影响风电场的正常运行。2022 年, 对该风电场集电线路实施本文提出的防雷措施改进方案。

5.2 改进措施实施

根据该风电场的实际情况, 实施的改进措施如下: 一是将原有钢化玻璃绝缘子更换为爬电比距 31mm/kV 的复合绝缘子, 并在绝缘子两端加装均压环; 二是将单架空地线改为双架空地线, 选用高强度铝合金绞线; 三是优化避雷器配置, 选用额定电压 12kV 的金属氧化物避雷器, 在直线塔上每隔 2 基塔安装一组, 共计新增避雷器 42 组; 四是对原有接地装置进行改造, 敷设降阻剂, 增设铜包钢垂直接地极, 对部分区域采用深井接

参考文献:

- [1] 周秀, 逯梓来, 白金, 等. 35kV 风电场架空集电线路不同防雷方式等同性研究[J]. 高压电器, 2025, 61(11): 212-220.
- [2] 吕泽卿. 关于提高集电线路避雷器试验效率的研究[J/OL]. 电瓷避雷器, 1-7[2025-12-30].
- [3] 石利国. 集电线路防雷接地技术在风电场施工中的应用[J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(09): 159-162.
- [4] 胡春林. 考虑不同雷击位置和防雷措施的风电场雷电暂态特性及防护研究[J]. 电气技术与经济, 2025, (09): 55-63.
- [5] 李向鑫, 于辉耀, 李顺元, 等. 智能自动化控制下的风电场集电线路防雷保护方案[J]. 自动化博览, 2025, 42(09): 90-93.

地; 五是建立无人机巡检与人工巡检相结合的机制, 每季度对防雷设备进行一次全面检测。

5.3 改进效果分析

改进措施实施后, 对该风电场集电线路 2022-2023 年的运行数据进行统计分析。结果显示, 2022-2023 年期间, 集电线路雷击跳闸率降至 0.8 次/百公里·年, 相较于改进前下降了 80.9%。避雷器、绝缘子等防雷设备的故障发生率也显著降低, 2023 年全年未发生因防雷设备故障导致的线路跳闸。接地电阻检测数据显示, 改造后的接地装置接地电阻均稳定在 8Ω 以下, 满足设计要求。同时, 风电场的发电效率得到明显提升, 2023 年发电量较 2021 年增加了 5.2%, 减少了因雷击故障造成的经济损失。实例验证表明, 本文提出的高海拔地区风电场集电线路防雷措施改进方案具有良好的实用性与有效性。

6 结论与展望

6.1 结论

高海拔地区特殊的环境特性导致风电场集电线路防雷工作面临诸多挑战, 现有防雷措施存在绝缘水平不足、防雷装置保护效果不佳、接地系统性能差及运维管理不到位等问题。针对这些问题, 本文提出的强化线路绝缘水平、优化防雷装置配置、改进接地系统设计及完善运维管理体系的改进方案, 可有效提升集电线路的耐雷水平。通过选取海拔 2800 米的风电场进行实例验证, 改进后的集电线路雷击跳闸率下降 80.9%, 接地电阻稳定在设计标准以内, 防雷效果显著。该改进方案充分考虑了高海拔地区的环境特殊性, 技术可行、经济合理, 可为高海拔地区风电场集电线路的防雷设计与改造提供参考。

6.2 展望

随着风电场建设向更高海拔地区延伸, 集电线路防雷面临的挑战将更加严峻。后续可进一步研发适配超高海拔地区的专用防雷设备, 提升设备的耐候性与绝缘性能; 结合大数据、物联网技术, 构建智能化防雷监测系统, 实现对集电线路雷击风险的实时监测与预警; 深入研究高海拔地区雷电活动的规律, 为防雷措施的优化提供更精准的理论支撑。通过持续的技术创新与研究, 不断提升高海拔地区风电场集电线路的防雷水平, 推动新能源产业的健康发展。