

风电场集电线路故障原因分析及防范方法

卢应强

国电南京自动化股份有限公司，江苏 南京 211100

摘 要： 随着我国风电产业蓬勃发展，风电场集电线路作为电能传输的核心环节，其安全稳定运行对风电场整体效能起着决定性作用。本文通过深入剖析集电线路故障的各类原因，包括施工质量瑕疵、设备老化损耗与制造缺陷、自然环境的严峻挑战等，进而提出涵盖施工质量严控、设备精细化维护与老化管理、自然环境应对策略以及运维管理水平提升等多维度的防范方法。旨在为风电场运维管理提供全面、深入且具有实践指导意义的理论支撑。

关 键 词： 风电场；集电线路；故障原因；防范方法；施工质量

Cause Analysis and Prevention Methods for Faults in Wind Farm Collection Lines

Lu Yingqiang

Guodian Nanjing Automation Co., Ltd. Nanjing, Jiangsu 211100

Abstract： With the vigorous development of China's wind power industry, the safe and stable operation of wind farm collection lines, as the core link of power transmission, plays a decisive role in the overall efficiency of wind farms. This article deeply analyzes the various causes of faults in power collection lines, including construction quality defects, equipment aging and manufacturing defects, and severe challenges from the natural environment. It then proposes multidimensional prevention methods covering strict control of construction quality, refined maintenance and aging management of equipment, natural environment countermeasures, and improvement of operation and maintenance management level. Intended to provide comprehensive, in-depth, and practical theoretical support for wind farm operation and maintenance management.

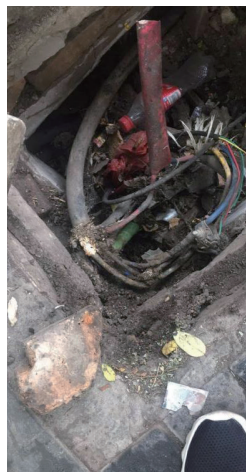
Keywords： wind farm; collection line; reason for malfunction; preventive measures; construction quality

风电场集电线路作为连接风力发电机与升压站的关键纽带，肩负着将分散的风电能源集中并输送至电网的重要使命。然而，风电场多选址于高海拔山区、旷野荒原或沿海滩涂等自然条件恶劣的区域，这使得集电线路不可避免地暴露于复杂多变的环境应力之下，极易发生故障，进而对风电场的稳定供电和高效运行构成严重威胁。深入探究集电线路故障成因并制定切实有效的防范举措，对于保障风电场运行的安全性、可靠性与经济性具有极为关键的现实意义，也是推动风电产业可持续发展的重要基础研究课题。

一、风电场集电线路故障原因分析

（一）施工质量问题

施工质量堪称集电线路稳定运行的基石，其对线路的长期可靠性影响深远。在实际工程中，导线绝缘子金具的组装若偏离设计规范，例如连接部位紧固不牢或安装角度偏差，将显著削弱导线的固定稳定性，极易在风力、振动等外力作用下引发连接金具脱落，进而导致接地故障，使线路瞬间失电并可能引发设备损坏^[1]。同时，电缆接头工艺的抉择至关重要，若采用不适宜的“热缩工艺”处理直埋电缆接头，在复杂的土壤环境与温度变化的双重影响下，热胀冷缩效应将逐渐破坏接头的绝缘完整性，致使绝缘间隙产生，防水、防潮密封性能丧失，最终引发绝缘击穿事故，严重干扰集电线路的正常输电功能，如图1所示。



> 图1：施工质量问题导致集电线路故障的现场剖析图

作者简介：卢应强（1986.01—），男，汉族，重庆铜梁人，硕士研究生，工程师，研究方向：电气设备预警诊断与智能运维关键技术的研究与应用。

（二）设备老化与制造缺陷

随着风电场运营年限的递增，集电线路设备不可避免地面临老化问题，其故障发生频率亦随之攀升。以变压器为例，长期运行过程中，本体各附件与箱体连接部位的密封脚垫在热循环、机械振动及化学腐蚀等多重因素作用下逐渐老化变质，丧失密封效能，引发渗漏油现象，不仅造成油品损耗，还可能因油位下降导致绝缘性能恶化，危及设备安全。此外，制造工艺缺陷同样不容忽视，如绕组连接环节的工艺瑕疵可能致使连接点接触电阻过大，在长期运行电流的热效应作用下，连接部位发热严重，加速绝缘老化，甚至引发绕组短路，导致变压器烧损。类似地，跌落开关、电缆头等设备在老化与制造缺陷的双重困扰下，也频繁出现绝缘击穿、烧损等故障，严重影响集电线路的供电连续性^[2]。

（三）自然环境因素

风电场独特的自然环境为集电线路的稳定运行带来诸多挑战。在寒冷地区，冰雪覆盖是常见现象，绝缘子串表面的冰层积累将显著改变其绝缘性能，当电场强度超过冰层耐受极限时，极易引发闪络事故，导致线路跳闸。同时，导线覆冰过载会使线路机械负荷急剧增大，严重时可能引发断线倒塔事故。而脱冰跳跃现象则可能导致导线间或导线与杆塔部件间的空气间隙瞬间减小，引发放电故障。风害也是不容忽视的因素，强风作用下导线剧烈摇摆，一方面会使导线与杆塔、导线与导线之间的空气间隙频繁变化，增加放电风险。另一方面，长期的风振疲劳还可能导致导线、金具等部件的机械损伤，降低线路强度。此外，雷电过电压对集电线路的威胁尤为严重，雷电绕击可直接作用于导线，引发线路跳闸^[3]。反击则是雷电击中杆塔或避雷线后，雷电流通过杆塔接地电阻泄放时产生的高电位反击至导线，同样导致线路绝缘击穿，影响风电场电能输出的稳定性。

二、风电场集电线路故障防范方法

（一）加强施工质量控制

在风电场集电线路建设中，施工质量控制至关重要。电缆铺设路径规划时，运用地理信息系统（GIS）分析周边地形、交通与规划信息，借助卫星影像与地形数据，避开重型车辆通行区与规划道路，降低外力破坏风险^[4]。

电缆沟开挖依据地质勘探报告确定深度与坡度，防止沟壁坍塌或深度不足影响电缆铺设。回填时严格按土壤压实度标准分层夯实，为电缆提供稳定支撑。放线采用张力放线设备精准控制电缆张力，避免拉伸或松弛受损。电缆头制作由专业资质人员依电气连接工艺规范操作，确保导体连接紧密、绝缘包扎严密，防止局部放电或绝缘击穿。

对于上下坡电缆的S型摆放与固定桩加装，依据坡度、电缆重量等参数进行力学计算，确定固定桩材质、直径、入土深度与S型弯曲半径，建立力学模型模拟受力优化方案，保障电缆结构完整。

电缆预留长度结合当地气候电缆热胀冷缩特性与线路维护改造需求，运用热膨胀系数公式精确计算。中间接头采用专用保护

盒并填充高性能绝缘防水密封胶，防止水分、灰尘侵蚀，维持良好绝缘性能^[5]。

施工完成后的交接试验，绝缘电阻测试用高精度测试仪依不同电压等级电缆绝缘电阻标准严格检测。耐压试验按电气设备试验标准逐步升电压至规定值并持续观察，验证线路施工质量符合设计，为集电线路运行奠定基础。

（二）强化设备维护与老化管理

集电线路设备可靠运行需完善巡检维护机制与科学老化管理策略。巡检周期综合设备类型、运行环境与历史故障数据，用可靠性分析方法确定。如高温、高湿、高盐雾环境设备缩短巡检周期、增加频次^[6]。

巡检借助高清红外热像仪捕捉设备表面温度分布，发现连接不良或局部放电发热点。超声波局部放电检测仪定位内部局部放电位置与强度，评估绝缘劣化程度。油色谱分析技术检测变压器油溶解气体成分与含量，依特征气体分析法判断内部故障隐患。

发现渗漏油、连接松动、绝缘老化等问题，立即启动隐患跟踪处理流程。建立隐患台账记录相关信息，安排专业维修团队限时处理，维修后复查评估确保隐患消除。

设备老化监测除常规手段，引入物联网（IoT）设备状态监测系统。在关键部位安装传感器采集振动、温度、压力等参数，经大数据分析平台实时分析与趋势预测。如建立变压器老化预测模型，依油温、绕组温度、油中微水含量等多参数变化预估剩余寿命，为设备维护更换决策提供精准依据^[7]。

老化严重且维修成本高、可靠性低的设备更新换代，遵循技术先进、可靠与经济统一原则。调研市场设备性能、质量与价格，参考同行经验，选择适合本风电场工况的新型设备。安装调试按制造商技术规范与手册操作，邀请厂家技术人员现场指导，确保设备安装精度与调试参数达标，提升集电线路设备健康水平与运行可靠性。

（三）应对自然环境挑战

冰雪覆盖威胁集电线路时，加热融冰技术依导线材质、规格、长度与环境温度等参数精确计算加热电流与电压，建立热传导数学模型模拟冰层融化过程优化方案，高效融冰且避免导线过热损伤。机械除冰研发智能除冰机器人，利用视觉识别系统与路径规划算法在复杂线路环境自主导航，精准识别冰层厚度与位置，使用旋转切割刀、振动破冰锤等高效除冰，提升除冰效率与安全性^[8]。

风害防范的线路设计优化，运用计算流体力学（CFD）软件模拟不同杆塔结构、导线间距与排列方式下风流场，获取风荷载分布情况，据此设计抗风性能最佳的杆塔结构与导线布局，如采用猫头型杆塔并增加横担长度与强度，增大导线间距并水平排列，降低风振影响。同时，建立基于地理信息系统（GIS）的线路走廊管理平台，精准定位与管理周边树木、建筑物、广告牌等障碍物并定期清理，保障线路周围环境安全。

雷电防护的避雷器选型与安装依线路所在地区雷电活动强度与线路绝缘水平确定。通过雷电定位系统获当地雷电活动数据，用电磁暂态分析软件算不同型号避雷器泄流能力与残压水平，选

择适配产品。绝缘子选用维护除关注耐雷水平，还考虑自清洁性能与抗污闪能力。采用复合绝缘子并涂覆憎水性涂料，定期用无人机搭载高清摄像头巡检清理积污，确保绝缘性能良好。

建立气象预警机制，与当地气象部门构建深度数据共享与信息交互平台。借助气象部门专业监测网络与数值天气预报模型获取精确气象信息，使用大数据分析技术挖掘分析，建立气象灾害预警模型，提前数小时甚至数天预测恶劣天气发生概率、强度与影响范围，以便及时调整集电线路运行方式，如降电压、转负荷等，提前安排运维人员特巡与应急准备，最大程度降低自然环境不利影响^[9]。

（四）提高运维管理水平

提升运维人员专业素养与技能水平是系统工程。专业培训课程涵盖电力系统理论、高电压技术、电力电子技术、自动控制原理等多学科知识，并结合实际运行案例讲解。如分析典型故障案例，从现象、原因、排查方法到处理措施，让运维人员掌握故障诊断处理思路与技巧。技术交流研讨会邀请行业专家学者、设备制造商代表与其他风电场优秀运维人员参与，共探运维新技术、新方法、新经验，拓宽视野思路。现场实操演练在模拟故障场景下让运维人员亲身体验排查处理过程，提高实际操作与应急反应能力^[10]。

运维管理制度与流程遵循国际标准与行业规范，如 ISO 9001 质量管理体系、ISO 14001 环境管理体系及电力行业运维管理标准。明确日常巡检、设备维护、故障处理到应急响应各环节工作标准、责任主体、流程与记录要求。如制定巡检作业指导书规定

路线、内容、方法、记录格式与异常报告流程。建立故障处理应急预案明确应急响应级别、处理流程、人员调配与资源保障等，保障运维工作规范化、标准化与高效化^[11]。

现代信息技术手段在运维管理应用中，集电线路远程监控系统采用先进传感器、通信与数据处理技术。选高精度、高可靠性电压互感器、电流互感器、温度传感器、湿度传感器等采集运行参数与设备状态信息，经 5G 通信网络或光纤通信网络传至监控中心数据服务器。大数据分析平台用数据挖掘、机器学习与人工智能技术深度分析海量监测数据。如用聚类分析算法分类故障数据建立故障特征库。用神经网络算法预测设备运行状态，提前发现潜在故障隐患，为运维管理提供智能化决策支持。

三、结论

风电场集电线路故障是制约风电场稳定运行的关键瓶颈。本文通过对故障原因的全面深入剖析，从施工质量、设备状况、自然环境以及运维管理等多个维度揭示了故障发生的内在机理，并针对性地提出了一系列切实可行的防范方法。加强施工质量控制可从源头上减少线路缺陷。强化设备维护与老化管理能够有效延长设备使用寿命并提升运行可靠性。随着风电技术的持续创新发展以及运维管理理念与手段的不断优化升级，风电场集电线路的安全稳定运行将得到更为有力的保障，从而推动我国风电产业向着更加高效、可靠、可持续的方向迈进。

参考文献

[1] 李飞. 某风电场 35kV 集电线路跳闸分析及防范措施 [J]. 电工技术, 2023, (24): 14-17.

[2] 马铁, 王英, 丁树峰, 等. 一种基于行波的风电场集电线路单相接地故障测距方法 [J]. 水电与新能源, 2023, 37(11): 9-12.

[3] 任慧琴. 风电场集电线路单相接地故障定位方法研究 [J]. 模具制造, 2023, 23(09): 244-246.

[4] 李启永, 商东明, 张圣涛, 等. 基于行波原理的 35kV 风电场集电线路故障在线监测 [J]. 电气技术与经济, 2023, (06): 300-302+306.

[5] 张世雄. 某风电场 35kV 风机集电线路塔上塔电缆多次击穿原因分析 [J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(05): 330-331.

[6] 喻银, 杨理斌, 曾祥君, 等. 风电场集电线路单相接地故障柔性电压消弧与动态保护新原理 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(05): 1789-1802.

[7] 党向东. 风电场集电线路故障原因分析及预控措施 [J]. 电工技术, 2023, (04): 30-32.

[8] 秦卫民. 某大型风电场 35kV 集电线路接地故障保护拒动原因分析及处理 [J]. 自动化应用, 2023, 64(03): 56-57+61.

[9] 王晓东, 王永浩, 刘颖明, 等. 海上风电场集电多分支线路故障区段定位方法 [J]. 太阳能学报, 2023, 44(01): 163-170.

[10] 李占龙. 风电场 35kV 集电线路零序电流保护拒动分析 [J]. 电力安全技术, 2022, 24(08): 29-32.

[11] 吴宗晃, 潘岩. 风电场地埋电缆集电线路故障原因分析及防范措施 [J]. 福建水力发电, 2021, (02): 65-67.