

风电场 35KV 集电线路隐患预警及故障精确定位技术探析

邹本刚

中国能源建设集团天津电力建设有限公司, 天津 300180

DOI:10.61369/WCEST.2025040016

摘 要 : 风电场 35kV 集电线路作为风电能源传输的关键环节, 其运行稳定性直接影响风电场的发电效率与安全。本文针对集电线路常见隐患类型, 系统研究了基于在线监测的隐患预警方法, 包括导线温度及弧垂监测、绝缘子泄露电流监测、避雷器状态监测等技术; 同时深入分析了行波原理、暂态特征及多源信息融合的故障精确定位技术。通过试点风电场的现场应用验证, 所提出的预警方法与定位技术可有效提升线路隐患识别率与故障定位精度, 为风电场集电线路的智能化运维提供了技术支撑。

关 键 词 : 风电场; 35kV 集电线路; 隐患预警; 故障定位; 在线监测; 行波测距

Analysis of Hidden Danger Warning and Fault Precise Positioning Technology of 35KV Collector Line in Wind Farm

Zou Bengang

China Energy Construction Group Tianjin Electric Power Construction Co., LTD., Tianjin 300180

Abstract : As a critical component in wind power transmission, the operational stability of 35kV collector lines directly impacts the generation efficiency and safety of wind farms. This study systematically investigates online monitoring-based early-warning methods for common collector line hazards, including conductor temperature and sag monitoring, insulator leakage current detection, and surge arrester condition analysis. It also provides an in-depth analysis of traveling wave principles, transient characteristics, and multi-source information fusion techniques for precise fault localization. Field validation at a pilot wind farm demonstrates that the proposed early-warning methods and fault localization technologies significantly enhance line hazard identification rates and fault detection accuracy, offering technical support for intelligent operation and maintenance of wind farm collector lines.

Keywords : wind farm; 35kV collector line; hidden danger warning; fault location; online monitoring; traveling wave ranging

引言

随着新能源产业的快速发展, 风力发电作为清洁能源的重要组成部分, 装机容量持续增长。35kV 集电线路作为风电场内部连接风电机组与升压站的核心通道, 承担着电能汇集与传输的重要功能, 其运行状态直接关系到风电场的整体效益。然而, 集电线路通常地处野外, 面临复杂的自然环境 (如强风、雷击、覆冰等) 和频繁的机械应力 (如导线振动、杆塔位移等), 易发生绝缘老化、导线损伤、设备故障等问题, 导致线路跳闸或停电事故。传统的运维模式依赖定期巡检与故障后抢修, 存在隐患发现滞后、故障定位耗时等问题, 严重影响风电场的发电效率。据统计, 风电场约 60% 的停电事故由集电线路故障引发, 其中故障定位平均耗时超过 4 小时, 造成巨大的经济损失。因此, 研发高效的隐患预警技术与精确的故障定位方法, 成为提升集电线路运维水平的关键需求。

一、风电场 35KV 集电线路常见隐患类型分析

（一）线路故障引发的隐患

线路本体故障是集电线路最常见的隐患来源，主要包括导线损伤、接头过热和线路覆冰等问题。长期受风沙侵蚀、微风振动影响，导线易出现断股、磨损等缺陷，导致载流能力下降，严重时引发断线事故，某风电场数据显示，约 30% 的线路故障源于导线机械损伤；导线接头压接不规范或氧化腐蚀，会导致接触电阻增大，运行中产生过热现象，形成热老化隐患，温度超过 80℃ 时，接头绝缘层易老化开裂，引发短路故障；在寒冷潮湿环境中，导线表面易形成覆冰，导致弧垂增大、杆塔载荷超限，可能引发断线或倒塔事故，覆冰厚度超过 10mm 时，线路安全系数显著下降^[1]。

（二）设备故障导致的隐患

集电线路配套设备的故障隐患主要集中在绝缘子、避雷器和电缆终端等部件。绝缘子长期暴露在野外，受紫外线、污秽、潮湿等影响，易出现瓷质开裂、玻璃自爆、复合绝缘子老化等问题，导致绝缘性能下降，引发闪络事故，统计表明，污秽地区绝缘子故障占比达 25% 以上；避雷器作为防雷保护装置，若长期承受过电压冲击，会导致阀片老化、密封失效，失去保护功能，使线路遭受雷击时直接跳闸；35kV 集电线路中电缆终端易因安装工艺缺陷或温度循环影响，出现绝缘击穿、局部放电等隐患，尤其在高温高湿环境中故障率显著上升。

（三）环境因素导致的隐患

风电场特殊的地理环境对集电线路形成多重威胁，强风与风沙、雷击以及生物破坏是主要的环境隐患来源。风速超过 10m/s 时，导线易发生微风振动或舞动，加速金具磨损；风沙撞击会导致绝缘子表面磨损，降低绝缘强度；山区或开阔地带的集电线路易遭雷击，直击雷或感应雷会产生过电压，导致绝缘子闪络、导线烧蚀，雷暴高发区线路雷击跳闸率可达 0.5 次/百公里。鸟类筑巢、鼠类啃咬等生物活动可能引发线路短路；树木生长靠近导线会导致放电隐患，尤其在雨季更为突出。

二、基于在线监测的隐患预警方法研究

（一）导线温度及弧垂实时监测方法

导线温度与弧垂是反映线路运行状态的关键参数，其监测系统由传感单元、弧垂计算模型和预警阈值设定三部分组成^[2]。传感单元采用分布式光纤传感器或无线温度传感器，实现导线温度的实时采集，光纤传感器可沿导线全长布置，测温精度达 ±0.5℃，空间分辨率 1m；无线传感器安装于导线接头处，通过 ZigBee 协议传输数据，续航时间超过 2 年；弧垂计算模型基于导线温度、环境温度、风速等参数，采用状态方程法计算弧垂值，公式为：

$$f = \frac{l^2 \gamma}{8 \sigma_0} \sqrt{1 + \frac{2 \alpha (t - t_0) E}{\sigma_0}}$$

其中 f 为弧垂， l 为档距， γ 为导线比载， σ_0 为计算截面应力， α 为线膨胀系数， t 为实测温度， t_0 为基准温度， E 为弹性模量；预警阈值设定根据线路设计参数，设定温度预警阈值（如 70℃）和弧垂安全距离（如对地距离小于 5m），当监测值超限时触发预警，某试点风电场应用该方法后，导线过热隐患发现率提升 60%。

（二）绝缘子泄露电流在线监测方法

绝缘子泄露电流在线监测方法主要包括监测装置、特征量提取和预警模型三个方面。监测装置在绝缘子串底部安装泄露电流传感器，采用罗氏线圈或霍尔传感器采集微安级电流信号，经滤波、放大后转换为数字量，装置防护等级达 IP65，适应野外环境；特征量提取通过分析泄露电流的峰值、脉冲次数及谐波分量，评估绝缘子状态，当泄露电流峰值超过 100 μA 且脉冲次数每小时超过 20 次时，判定为污秽严重状态；预警模型结合环境湿度数据，建立泄露电流-湿度关联模型，在高湿度环境下（相对湿度 > 85%），降低预警阈值，提高预警灵敏度，该方法在某沿海风电场应用中，绝缘子闪络事故减少 45%。

（三）避雷器在线监测与故障诊断方法

避雷器在线监测与故障诊断方法以阻性电流为核心指标，其系统设计涵盖数据采集、故障诊断算法和寿命评估模型。数据采集采用穿心式电流传感器采集避雷器总泄漏电流，通过电容分压器获取电压信号，计算阻性电流分量，监测装置采样频率为 10kHz，可捕捉暂态过电压信号；故障诊断算法基于阻性电流三次谐波分量与基波分量的比值：

$$(I_{3\omega} / I_{\omega})$$

判断老化程度，当比值超过 20% 时，判定为阀片老化，同时监测避雷器表面温度，若温度异常升高（超过环境温度 10℃），则提示密封失效；寿命评估模型结合运行年限、动作次数及阻性电流变化趋势，采用 Weibull 分布模型预测避雷器剩余寿命，某风电场应用该方法后，避雷器提前更换率提升 35%，避免了 3 次大面积停电事故。

三、线路故障精确定位技术研究

（一）基于行波原理的故障测距方法

基于行波原理的故障测距方法利用故障时产生的暂态行波在线路中的传播特性实现定位，其关键技术包括基本原理、行波波头识别和改进算法。基本原理是故障点产生的行波沿导线向两端传播，到达线路两端监测装置的时间差与故障距离相关，公式为：

$$x = \frac{v(t_2 - t_1) + L}{2}$$

其中 x 为故障点距近端距离， v 为行波传播速度（约 3×10^8 m/s）， t_1 、 t_2 为两端装置检测到行波的时间， L 为线路长度；行波波头识别采用小波变换对暂态信号进行多尺度分解，提取模极大值点作为波头到达时刻，提高时间差测量精度至

$\pm 1\mu\text{s}$ ；改进算法针对分支线路，采用双端行波与单端行波结合的混合算法，通过识别行波在分支点的反射信号，消除分支对定位的影响，该方法在长距离直线线路中定位误差可控制在50m以内^[3]。

（二）基于暂态特征的故障定位新方法

基于暂态特征的故障定位新方法借助故障暂态信号包含的丰富频率分量实现定位，主要包括高频暂态能量分析、希尔伯特-黄变换（HHT）和定位模型。高频暂态能量分析是指故障发生后，线路会产生0.5-5MHz的高频暂态电流，通过安装在变电站出口的高频电流传感器采集信号，分析暂态能量在各频率分量的分布特征，判断故障方向；希尔伯特-黄变换（HHT）对暂态信号进行经验模态分解（EMD），得到本征模函数（IMF），再通过希尔伯特变换获取瞬时频率和幅值，构建故障特征向量；定位模型结合线路拓扑结构，建立暂态特征与故障距离的映射关系，采用支持向量机（SVM）算法实现定位，该方法在高阻接地故障中表现优异，定位误差小于100m，较传统方法提升50%。

（三）基于多源信息融合的故障定位方法

基于多源信息融合的故障定位方法通过整合多维度数据提高定位可靠性，主要由信息源构成、融合算法和智能化修正组成^[4]。信息源构成包括行波监测数据、故障录波器数据、SCADA系统运行参数（电压、电流、功率）、气象数据及无人机巡检图像等；融合算法采用贝叶斯网络构建多源信息融合模型，将各信息源的定位结果作为证据，通过概率更新得到最终定位结果，例如，行波定位结果与暂态特征定位结果的置信度分别为0.8和0.7时，融合后置信度可达0.92；智能化修正引入机器学习算法，通过历史故障数据训练定位模型，自动修正不同工况下的定位偏差，在某复杂地形风电场应用中，该方法将平均定位误差从200m降至80m，故障查找时间缩短60%。

四、现场应用效果及可靠性验证

（一）试点风电场选取及监测方案设计

试点风电场选取及监测方案设计是验证技术有效性的重要环节，选取了三个不同地理环境的风电场作为试点，A风电场位于平原地区，装机容量150MW，35kV集电线路总长85km，以架空线路为主，存在覆冰与鸟害隐患；B风电场位于沿海地区，装机容量200MW，线路总长110km，含30km电缆线路，面临高湿度与盐雾腐蚀问题；C风电场位于山区，装机容量120MW，线路总长75km，地形复杂，雷击与树木障碍隐患突出。监测方案设计中，

在线监测系统每10km线路布置1套导线温度/弧垂监测装置，每基杆塔安装1套绝缘子泄露电流监测装置，每个避雷器组配置1套状态监测装置；故障定位系统在变电站出口及线路分支点安装行波监测装置，采样频率2MHz，配置3套暂态特征分析装置，覆盖全场线路；数据传输采用光纤专网与4G无线通信结合的方式，实现监测数据实时上传至运维中心，数据传输时延小于5s^[5]。

（二）隐患预警方法的实际应用效果评估

通过1年的运行监测，对三个风电场的隐患预警效果从预警准确率、隐患处理时效和经济效益三个方面进行评估，结果显示共发出预警信号237次，现场核查确认198次为真实隐患，准确率83.5%，其中导线过热预警准确率89%，绝缘子污秽预警准确率78%，避雷器老化预警准确率85%；隐患处理时效方面，平均处理时间从传统巡检模式的48小时缩短至12小时，重大隐患（如导线断股、避雷器失效）处理及时率达100%；经济效益上，通过提前处理隐患，减少线路跳闸18次，避免发电量损失约25.2万kWh，折合经济收益15.1万元。

（三）故障定位方法的可靠性验证

在试点期间，通过人为设置20次模拟故障（包括短路、接地、断线等类型），并记录实际故障的定位结果，对故障定位方法的可靠性从定位精度、响应速度和环境适应性进行验证，定位精度方面，行波定位平均误差95m，暂态特征定位平均误差130m，多源融合定位平均误差70m，其中，多源融合方法在高阻接地故障中表现最佳，误差小于50m；响应速度上，故障发生后，行波定位系统平均响应时间0.5s，暂态特征分析系统响应时间3s，融合定位结果输出时间5s；环境适应性方面，在大风、雷雨等恶劣天气下，多源融合方法定位准确率仍保持在90%以上，而行波定位受噪声影响准确率降至75%。

五、结束语

风电场35kV集电线路的隐患预警与故障定位是保障风电场安全高效运行的关键技术。本文通过分析线路常见隐患类型，研究了基于在线监测的预警方法，包括导线状态监测、绝缘子与避雷器状态评估等；同时探讨了行波原理、暂态特征及多源融合的故障定位技术。现场应用表明，所提出的技术方案可有效提升隐患识别率与故障定位精度，显著降低运维成本。未来研究可进一步优化监测设备的续航能力与抗干扰性能，结合人工智能算法实现隐患的智能预测与故障的自主诊断，推动风电场集电线路运维向全自动化、智能化方向发展。

参考文献

- [1] 李俊男. 风电场集电线路隐患放电识别特性研究 [J]. 电气技术与经济, 2025, (08): 293-296.
- [2] 李俊男. 风电场集电线路隐患放电识别特性研究 [J]. 自动化应用, 2025, 66(09): 134-137.
- [3] 徐彭涛. 风电场35KV集电线路隐患预警及故障精确定位技术探析 [J]. 电力设备管理, 2025, (04): 123-125.
- [4] 马永亮. 风电场集电线路火灾成因及消防防护策略研究 [J]. 消防界(电子版), 2024, 10(24): 10-12.
- [5] 张剑锋. 大型风电场集电线路隐患预警与故障定位技术应用分析 [J]. 电气技术与经济, 2024, (11): 147-150.