Design of Lightning Risk Monitoring System Considering Surge Leakage Current in Collecting Line Surge Arresters*

XUE Fei*, SUN Wei, ZHANG Tao
(Zhangjiakou Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Zhangjiakou Hebei 075000, China)

Abstract: In order to timely control lightning strike faults of lightning arresters on power collection lines, a lightning risk monitoring system for lightning arresters on power collection lines considering surge leakage current is designed. Real-time monitoring of surge leakage current of lightning arresters and capturing key waveform parameters are realized. The remote online monitoring unit adopts random deactivation long short term memory (LSTM) network to repeatedly capture the evolution law of surge leakage current, achieve lightning risk monitoring, and convert the lightning risk monitoring results into risk levels, realizing the full process monitoring and early warning of lightning risk of lightning arresters in the collection line. The experimental results show that in different impulse waveform tests, the leakage current collector exhibits high accuracy and stability, with low error levels. At the same time, the system can achieve real-time risk tracking and warning of lightning arresters, accurately monitor the probability fluctuations of lightning strikes, and achieve graded control through warning level classification.

Key words: impact leakage current; collecting lines; lightning arrester; lightning risk monitoring
EEACC: 7220; 7310D **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.04.019

考虑冲击泄漏电流的集电线路避雷器雷击风险监测系统设计*

薛 飞*, 孙 伟, 张 涛
(国网冀北电力有限公司张家口供电公司, 河北 张家口 075000)

摘 要: 为及时管控集电线路避雷器雷击故障, 设计考虑冲击泄漏电流的集电线路避雷器雷击风险监测系统。实时监测避雷器冲击泄漏电流, 并捕获关键波形参数, 远程在线监测单元采用随机失活长短期记忆(LSTM)网络通过重复捕捉冲击泄漏电流的演变规律, 实现雷击风险监测, 并将雷击风险监测结果转换为风险等级, 实现集电线路避雷器雷击风险全流程监测预警。实验结果显示: 在不同冲击波形测试中, 泄露电流采集器均表现出高准确性和稳定性, 误差水平低, 同时系统可实现避雷器实时风险追踪和预警, 准确监测雷击风险概率波动, 并通过预警等级划分实现分级管控。

关键词: 冲击泄露电流; 集线电路; 避雷器; 雷击风险监测
中图分类号: TP23 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2026)04-0837-06

在全球能源转型背景下, 风电、光伏等新能源发电大规模接入电网, 集电线路作为连接发电单元与升压站的关键通道, 因路径长、分布广且多处于高雷暴区域, 容易遭受雷击威胁[1]。雷电是一种复杂的自然现象, 每年在全球范围内造成大量的电力事故和设备损坏, 对集电线路的安全运行构成严重威胁。集电线路避雷器作为限制雷击过电压的核心设备, 通过非线性电阻片的伏安特性将过电压箝位至安全水平, 但其长期运行易受雷击能量累积的影响, 导致保护性能退化, 直接影响其防雷效果, 容易遭受雷击风险[2-3], 为此亟需研究一种有效的集电线路避雷器雷击风险监测系统, 为电力系统的安全运行提供有力保障。

马御棠等[4]通过构建等效电路分解氧化锌避雷器的频域介电谱, 运用 Havriliak-Negami 方程提取关键特征, 并结合极限学习机构建老化评估模型, 能够精确评估集电线路避雷器各区域氧化锌阀片的老化状态, 有效实现雷击风险的监测。但是其存在频域分析对瞬态冲击特性的表征不足, Havriliak-Negami 方程主要描述介质弛豫频响特性, 难以精确

项目来源: 国网冀北电力有限公司张家口供电公司项目(B30107230019)
收稿日期: 2025-04-11 **修改日期**: 2025-05-16

量化雷电冲击下避雷器非线性电阻片的瞬态热损伤累积效应。张佳琪等[5]运用小波阈值联合去噪技术有效削弱谐波与环境噪声对线路避雷器泄漏电流监测的干扰,结合多频点插值理论与谐波校正策略精确提取泄漏电流信息,并通过混合粒子群算法优化监测流程,确保集电线路避雷器雷击风险的监测。但是小波阈值去噪对非平稳雷电冲击信号适应性不足,高频噪声与泄漏电流信号在时频域存在混叠现象,易造成有效特征丢失。多频点插值与谐波校正算法在强电磁干扰场景下存在相位偏移累积误差。徐军等[6]运用核函数主成分分析技术精简数据维度,以降低计算复杂度,并结合孤立森林算法在复杂数据分布中精确捕捉异常样本,实现对集电线路避雷器雷击风险及其他异常状态的即时监测。但是该方法存在特征空间降维的不可逆损失,核函数主成分分析(Kernel Principal Component Analysis,KPCA)在压缩数据维度时,可能滤除冲击泄漏电流中表征绝缘劣化的高维非线性特征。陈玉亮等[7]借助 SES CDEGS 软件构建电磁干扰模型,针对输电线路与邻近埋地油气管道进行数值模拟,预估雷电流引发的电磁效应,并依据安全标准与研究成果,确立了包含多重风险维度的评价体系,通过评估实现集电线路避雷器的雷击风险监测。但是多重风险评价体系的权重分配依赖专家经验,难以量化动态雷击场景下的非线性风险耦合效应,且数值模拟计算耗时较长,无法支持在线实时评估。

冲击泄漏电流是避雷器在雷电冲击下产生的特殊电流,其波形参数(峰值、波前时间、能量)可直接反映避雷器在雷电冲击作用下的性能状态。通过监测冲击泄漏电流[8],可以及时发现避雷器的性能异常,为避雷器的维护和管理提供科学依据。为此本文提出了一种考虑冲击泄漏电流的集电线路避雷器雷击风险监测系统设计方案。该系统通过实时监测避雷器的冲击泄漏电流,结合雷电活动的实时监测数据,对集电线路的雷击风险进行实时评估,为电力系统的防雷工作提供科学指导。

1 集电线路避雷器雷击风险监测系统具体设计

1.1 集电线路避雷器雷击风险监测系统架构

在考虑冲击泄漏电流的集电线路避雷器雷击风险监测系统设计中,构建了由“采集-传输-处理监控”组成的三层架构体系。该体系通过前端采集获取雷电冲击下的避雷器关键数据,并依托 NB-IoT 技术实现稳定传输,最终由后端模块完成数据处理、存储及远程风险监控。集电线路避雷器雷击风险监测系统架构如图 1 所示。

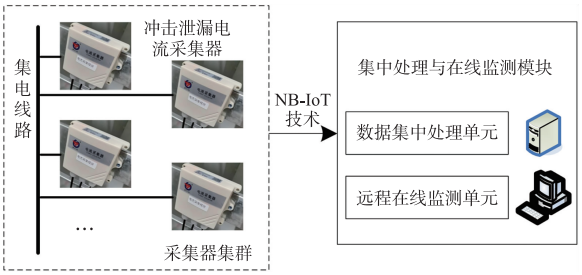


图 1 系统架构图

①冲击泄漏电流采集模块。在集电线路各避雷器上部署专用采集器,组成采集单元集群。采集器实时监测避雷器冲击泄漏电流,精准捕获峰值、波前时间等波形参数。当检测到阻性电流幅值超预设阈值时,立即打包故障数据,为风险分析提供原始信息[9]。

②NB-IoT 数据传输模块。采用 NB-IoT 技术搭建传输链路,利用其广覆盖、低功耗优势,保障采集单元与后端的数据稳定交互。采集器获取的冲击泄漏电流数据,通过 NB-IoT 网络高效传输至数据集中处理单元,突破空间限制,实现数据可靠流转。

③集中处理与在线监测模块。数据集中处理单元部署于区域电站房,负责数据接收与初步处理。接收 NB-IoT 传输的电流数据及避雷器位置编号后,同步完成故障信息存储与数据界面展示,方便现场维护人员快速定位故障避雷器。

远程在线监测单元软件部署于远端总控室,作为系统监控枢纽。实时对接数据集中处理单元,采用随机失活 LSTM 实现全域避雷器雷击风险的集中监控。支持单台避雷器实时数据、历史故障数据查询,助力总控室人员远程锁定故障位置,完成雷击风险全流程监测。

1.2 冲击泄漏电流采集器硬件设计

避雷器冲击泄漏电流采集器安装于避雷器接地端,通过高性能电流传感器获取冲击泄漏电流信号,同时采集避雷器两端电压信号[10-11]。采集器核心功能为:高速采集冲击泄漏电流瞬态信号,分析电流峰值、上升时间、能量等特征参数,当参数超过预警值时,通过 NB-IoT 通信模块将冲击事件数据(含采集器编号、冲击电流特征值)发送至区域数据集中器。避雷器冲击泄漏电流采集器结构框图见图 2。主要包含 STM32 主控芯片、冲击信号调理电路、参考电压调理电路、电源模块、高速通信模块等部件。

采集器运行时,电源模块从避雷器参考电压 PT 二次侧取电,经变压处理后为整个硬件系统提供电

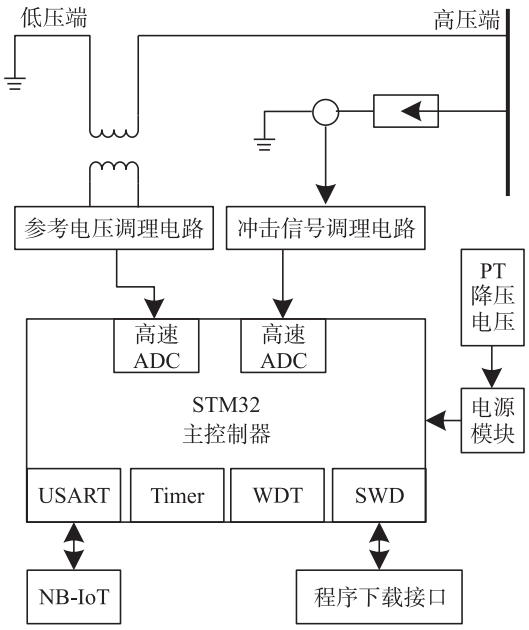


图 2　冲击泄漏电流采集器结构

能。参考电压调理电路对 PT 二次侧电压信号实施滤波、电压抬升操作,随后将信号输送至主控高速芯片 ADC 引脚 1。其中,冲击信号调理电路承担宽频带电流传感器感应的冲击泄漏电流处理任务[12],具体包括瞬态信号转换、高频信号放大、抗饱和滤波以及电压抬升,处理后的信号被传送至主控高速芯片 ADC 引脚 2。通过高速定时器同步触发两路信号的 ADC 采样,并结合信号处理电路,提取冲击泄漏电流特征参数。当参数超过预设预警值时,采集器通过 NB-IoT 数据通信模块向数据集中器发送雷电冲击数据。考虑到冲击电流的强瞬态特性,为减少电磁干扰,采集器采用电源板、检测板、主控板三部分分离设计,最终整合为 PCB 板。

1.3　数据传输模块

NB-IoT 作为窄带物联网技术,依托蜂窝数据连接,具备信号覆盖广、设备功耗低、连接容量大及成本优化等特性,可无缝部署于 GSM、UMTS 或 LTE 网络,尤其适用于低功耗、高网络连接质量要求的场景。针对集电线路避雷器雷击风险监测场景,其部署环境复杂,多处于高雷暴、地形复杂区域,传统通信方式易受环境干扰[13],而 NB-IoT 广覆盖特性,可确保在山区等信号薄弱区域稳定传输数据,为雷击风险监测提供基础通信保障。本系统选用中移物联网的 NB-IoT 无线低功耗通信模组 M5311,M5311 简化了嵌入式应用开发流程,有效缩小产品体积并降低能耗,高度适配监测系统对设备小型化、低功耗的需求。集电线路避雷器分布广,设备需长期稳定运行,低功耗设计可减少维护频次,确保在长时间无人值守场景下,仍能持续采集传输冲击泄漏电流数据,提升系统可靠性。NB-IoT 数据传输模块结构如图 3 所示。

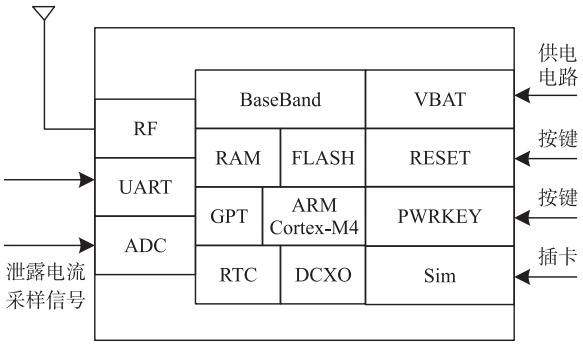


图 3　NB-IoT 数据传输模块结构图

硬件层面,M5311 集成供电、数据处理、通信等单元:VBAT 供电,RESET/PWRKEY 按键控制电源,Sim 插卡保障通信;内部 BaseBand 协同 ARM 核心处理数据,RF 单元通过天线收发信号,UART 接收雷电脉冲,ADC 采集泄漏电流,搭配指示灯等优化调试,确保强电磁干扰下仍精准采集传输数据,满足集电线路复杂工况下的监测需求。

数据传输环节,M5311 模组实现数据传输依托 LwM2M 协议,经 M5311 向 OneNET 平台发送报文。该协议匹配系统“小数据量、低功耗”需求,确保雷击后关键数据(如电流峰值)及时上传。数据进入平台后,支持存储与服务器调用[14],为雷击风险评估提供实时数据,助力运维人员快速掌握避雷器状态,提升监测时效性与决策精准性。

1.4　避雷器雷击风险监测

长短期记忆网络(Long-Short Term Memory,LSTM)作为循环神经网络(RNN)的改进模型,擅长处理时间序列数据,与集电线路避雷器冲击泄漏电流的时序特性高度契合。在雷击风险监测场景中,冲击泄漏电流的峰值、波前时间等参数随时间动态变化,构成典型时间序列。LSTM 通过门控结构可以有效克服 RNN 短期记忆局限,既能留存长期历史电流数据中的关键特征,又可过滤无关信息。同时 LSTM 可捕捉不同时段冲击泄漏电流的演变规律,为雷击风险预测提供时序维度的深度特征提取。集电线路避雷器雷击风险监测过程中,遗忘门 f_t 可以筛选出长期历史数据中对雷击风险监测有价值的信息,过滤无关干扰。其输入为前一时刻隐含层输出 h_{t-1} 与当前时刻输入 X_t,前者由历史冲击泄漏电流特征参数时序数据组建,后者为实时采集的避雷器冲击泄漏电流特征参数,f_t 的表达式为:

$$f_t=\sigma(W_f\cdot[h_{t-1},X_t]+b_f) \tag{1}$$

输入门 i_t 将实时采集的避雷器冲击泄漏电流特征参数融入细胞状态，为后续风险评估提供最新数据支撑。控制当前输入 X_t 对细胞状态的更新，具体表达式为：

$$i_t=\sigma(W_i\cdot[h_{t-1},X_t]+b_i) \tag{2}$$

输出门 O_t 通过 h_{t-1} 和 X_t 确定最终输出值 h_t，即雷击风险评估结果：

$$O_t=\sigma(W_o\cdot[h_{t-1},X_t]+b_o) \tag{3}$$

细胞状态更新可以结合历史以及实时冲击电流特征参数，实现集电线路避雷器雷击风险的动态监测，表达式为：

$$\tilde{C}_t=\tanh(W_c\cdot[h_{t-1},X_t]+b_c) \tag{4}$$

$$C_t=i_t\cdot\tilde{C}_t+f_t\cdot C_{t-1} \tag{5}$$

$$h_t=O_t\cdot\tanh(C_t) \tag{6}$$

式中：b_f、b_i、b_o、b_c 均表示偏置系数；σ 表示 Sigmoid 激活函数，用于引入非线性特征，使模型更精准地拟合冲击泄漏电流时序数据与雷击风险的复杂关联；W_f、W_i、W_o、W_c 均表示权重矩阵，用于学习冲击泄漏电流与雷击风险之间的映射关系。

尽管 LSTM 在时序数据处理中优势显著，但其应用于集电线路避雷器雷击风险监测时，因网络隐含层较深，仍存在训练耗时与过拟合问题[15]。为此，引入随机失活技术优化模型。在 LSTM 网络输入阶段，以前一时刻隐含层输出 h_{t-1} 为对象，按概率 p 随机归零部分神经元输出及权重，降低节点间依赖，实现网络正则化，形成“弱神经网络”训练模式。训练过程中，无随机失活的网络可表示为：

$$\begin{cases}z_i^{(l+1)}=w_i^{(l+1)}h^l+b_i^{(l+1)}\\h_i^{(l+1)}=f(z_i^{(l+1)})\end{cases} \tag{7}$$

式中：h^l、$z_i^{(l+1)}$ 分别表示隐含层神经元前一时刻输出、下一时间输入。w、b 分别为神经元权值和偏置。

引入随机失活后，借助伯努利函数 Bernoulli(p) 生成概率向量 $r_i^{(l)}$，对神经元输出 $h^{(l)}$ 进行加权：

$$\begin{cases}\tilde{h}^{(l)}=r^{(l)}h^{(l)}\\z_i^{(l+1)}=w_i^{(l+1)}\tilde{h}^{(l)}+b_i^{(l+1)}\\h_i^{(l+1)}=f(z_i^{(l+1)})\end{cases} \tag{8}$$

式中：$\tilde{h}^{(l)}$ 为概率失活后的神经元输出。

通过该机制，模型过拟合与梯度消失问题得到有效抑制，对集电线路避雷器雷击风险的预测精度显著提升，确保监测系统在复杂时序数据场景下稳定运行。

将随机失活 LSTM 监测到的集电线路避雷器雷击风险监测结果 Q，转换成表 1 所示的风险等级，为运维人员提供决策依据。

表 1 风险对应等级

风险监测结果	预警等级
Q>80%	Ⅰ(红色)
50<Q≤80%	Ⅱ(橙色)
20<Q≤50%	Ⅲ(绿色)
0<Q≤20%	Ⅳ(蓝色)

2 性能测试与分析

选取位于某地区的大型风电场作为实验场地，该风电场所处位置属于典型的高雷暴区域，为集电线路避雷器雷击风险监测系统的测试提供了理想的自然环境。风电场内的集电线路采用 YJV22-10-3×240 型号的电缆，共有 6 条集电线路，将各个风力发电机组产生的电能汇集输送至升压站。集电线路的总长度约为 58 km，分布范围广，且部分线路穿越山区、森林等复杂地形。为免受雷击损坏，在集电线路各个关键节点上共安装了 60 台氧化锌避雷器，其详细参数见表 2。在每台避雷器接地端部署冲击泄露电流采集器，实现全覆盖冲击泄露电流数据采集，采集器的连接实物如图 4 所示。

表 2 避雷器详细参数

参数	数值
避雷器型号	YH10WZ-108/281
额定电压	17 kV(rms)
标称放电电流	10 kA(8 μs/20 μs)
安装位置	风机出口、电缆分支箱、升压站入口
冲击电流注入参数	峰值 5 kA~50 kA，波前时间 1 μs~10 μs
环境温度	−25 ℃~+45 ℃(模拟高寒与高温环境)
雷暴活动数据	年均雷暴日数 45 天，平均雷电流幅值 28 kA

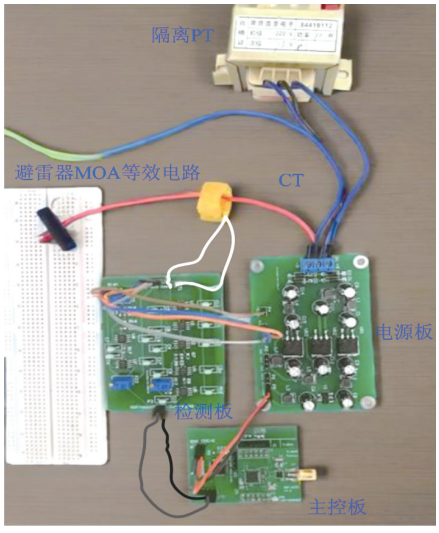


图 4 采集器的连接实物图

为验证本文系统应用冲击泄露电流采集器的采集效果,采用标准冲击电流发生器,以人为方式注入 8 μs/20 μs、10 μs/350 μs 双指数波形,统计采集器进行冲击泄露电流的测量效果,并选取峰值误差、波前时间误差、能量积分误差为测试指标,实验结果见表 3。分析表 3 数据可知,避雷器的冲击泄露电流采集器在 8 μs/20 μs 和 10 μs/350 μs 双指数波形的测试中均表现出色,峰值误差、波前时间误差以及能量积分误差均保持在较低水平,冲击信号下的最大误差≤2.5%。这表明采集器具有较高的测量准确性和稳定性,能够准确捕捉到雷击事件中的关键参数,满足集电线路避雷器雷击风险监测对数据准确性的需求,验证了采集器在实际应用中的可靠性与有效性。

表 3　冲击泄露电流采集器采集效果

测试波形	参数	标准值	采集器测量值
8 μs/20 μs	峰值/kA	10	9.86
	波前时间/μs	8	7.92
	能量/(kJ/Ω)	2.5	2.47
10 μs/350 μs	峰值/kA	20	19.74
	波前时间/μs	10	9.85
	能量/(kJ/Ω)	35	34.2

为验证本文系统的数据传输性能,在研究场景中分别选择信号强度稳定在-110 dBm 的山区集电线路区域、信号强度稳定在 -85 dBm 的平原集电线路区域,固定数据样本:随机生成包含 100 组冲击电流峰值、数据量大小为 10 kB 的冲击泄漏电流数据文件,通过上位机向采集器下达数据传输指令,要求设备以每分钟 1 次的频率,持续向 OneNET 平台发送固定数据文件,测量 60 min 内的数据传输速率,结果见图 5。从图 5 可知,在平原(信号强度 -85 dBm)场景下,数据传输速率整体维持在较高水平(约 30 kbit/s ~ 40 kbit/s),波动幅度小,体现了 NB-IoT 在优质信号环境下的数据传输高效性;在山区(信号强度-110 dBm)场景中,尽管信号强度弱,传输速率仍稳定在 20 kbit/s 左右,无明显速率中断或大幅衰减。这一结果验证了本文系统的 NB-IoT 凭借其强覆盖特性,即使在山区这类信号薄弱区域(-110 dBm),仍能保障稳定的数据传输速率,满足集电线路避雷器监测数据的实时上传需求,突破传统通信技术在复杂地形的应用限制。

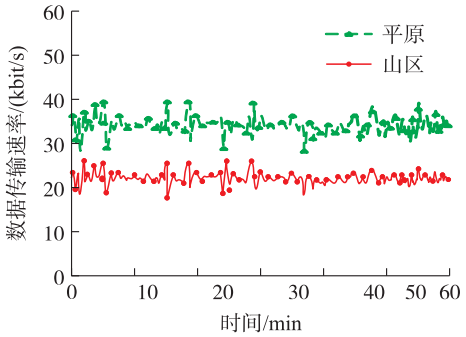


图 5　不同区域的数据通信效果

以某条集电线路上的一避雷器为监测对象,应用本文方法对其进行雷击风险监测,通过图 6 展示一天内的风险监测预警结果。分析图 6 数据发现。本文系统具备实时风险追踪能力,系统能够监测到避雷器雷击风险概率的时段性波动,如 06:00—12:00、18:00—24:00 期间,风险概率随潜在雷暴活动变化而起伏,直观反映避雷器实时风险状态,体现对雷击风险的动态监测效能。同时通过通过Ⅰ-Ⅳ级预警分级,将风险概率转化为明确的预警等级。当风险概率触及对应等级的阈值时,系统能够及时触发对应等级的预警,帮助运维人员快速定位风险时段,实现从低风险到高风险的全流程分级管控,有效证明了系统在雷击风险预警中的精准性与实践指导价值。

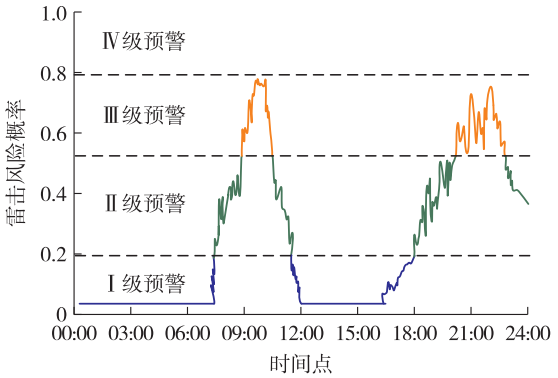


图 6　集电线路避雷器风险监测结果

3　结束语

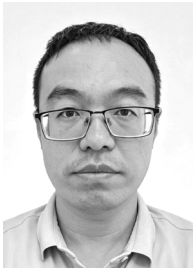
本文设计了一种考虑冲击泄漏电流的集电线路避雷器雷击风险监测系统,并在一高雷暴区域的大型风电场验证系统采集、传输以及风险监测性能。实验结果表明该系统具备高精度数据采集、稳定数据传输和实时风险预警能力,为风电场的运维管理提供了有力支持,展现了在复杂地形和高雷暴区域的应用潜力。

参考文献:

[1]　王林. 高速铁路接触网与架空输电线路防雷规范差异对比分析[J]. 铁道标准设计,2022,66(5):159-164,182.

[2]　鲁海亮,王会武,李志忠,等. 站用 10 kV 系统中性点

接地方式对避雷器地电位升安全限值的影响[J]. 高电压技术,2024,50(4):1499-1507.
[3] 王陆璐,左中秋,吴成成,等. 避雷器泄漏电流测量原理分析及内置式监测装置研制[J]. 高压电器,2024,60(8):174-182.
[4] 马御棠,束洪春,钱国超,等. 基于频域介电谱曲线分解的氧化锌避雷器老化状态评估[J]. 电工技术学报,2024,39(3):901-913.
[5] 张佳琪. 考虑谐波影响的线路型避雷器泄漏电流在线监测方法研究[J]. 高压电器,2023,59(11):129-134,144.
[6] 徐军,齐蓬勃,李凡,等. 一种基于 KPCA-IF 的配电网保护系统异常状况监测模型[J]. 电力科学与技术学报,2024,39(3):31-37.
[7] 陈玉亮,吴广春,李德明,等. 雷击高压输电线路对临近埋地油气管道电磁干扰的案例分析[J]. 腐蚀与防护,2023,44(11):93-100.
[8] 蔡力,田汭鑫,魏俊涛,等. 连续冲击电流脉冲下避雷器阀片电气性能研究[J]. 电工技术学报,2023,38(S1):168-176.
[9] 陈洁,赵丹丹,张宗扬,等. 不同冲击电流波下金属氧化物避雷器仿真模型适用性研究[J]. 高压电器,2025,61(1):197-203.
[10] 周利军,魏仁伟,刘聪,等. 多重雷击下氧化锌避雷器的冲击老化特性[J]. 高电压技术,2022,48(9):3507-3516.
[11] 秦锋,陈伟,王旭桐,等. 强电磁脉冲下金属氧化物避雷器瞬态响应特性[J]. 高电压技术,2022,48(8):3326-3333.
[12] 冯瑞发,蔡汉生,廖民传,等. 基于改进跳闸率计算方法的输电线路雷击风险评估及防雷配置研究[J]. 电瓷避雷器,2022(1):75-81.
[13] 陈雷,吴浩,李栋,等. 基于集成学习的 HVDC 输电线路雷击故障识别方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2022,34(5):102-110.
[14] 桂重,韩永霞,刘刚. 计及多脉冲回击电流及电晕电流效应的输电线路耦合雷电过电压特性[J]. 南方电网技术,2023,17(12):145-151.
[15] 李炼炼,谷山强,孟刚,等. 雷击故障下的分布式故障监测装置定位精度测试方法[J]. 高电压技术,2024,50(9):4110-4119.



薛 飞(1990—),男,汉族,河北省张家口市康保县人,工程硕士,研究方向:输配电及用电工程,xfyonk@aliyun.com。