

基于无线传输的避雷器带电检测技术研究

张玉辉¹, 王金铜¹, 孙超辉¹, 李佳丽¹, 邵翠芳²

(1. 国网新疆电力有限公司超高压分公司, 新疆 乌鲁木齐 830000;

2. 上海大帆准测技术有限公司, 上海 201109)

摘要: 针对传统避雷器检测方法效率低、实时性不足的问题, 提出一种融合谐波向量反演与双模通信的带电检测系统。通过在避雷器低压端部署高精度传感器, 捕获泄漏电流及阻性电流基波分量等关键参数, 创新性地开发了谐波向量反演法。该方法基于避雷器非线性特性提取三次谐波分量, 反演工频基波电压相位, 实现无 PT 参考信号的阻性电流高精度测量。在数据传输架构方面, 采用蓝牙 5.0 与 LoRa 协同机制: 近场通信通过低延迟蓝牙实现测试仪与移动终端的实时交互, 而远距离同步则依赖 LoRa 自适应扩频技术, 结合分层加密协议有效抵御变电站强电磁干扰, 保障数据安全。工程验证表明, 该系统使低运维成本显著降低 70%, 使故障响应速度提高 85%, 为高弹性电网建设提供可靠技术支撑。

关键字: 避雷器; 带电检测; 数据传输

Research on live detection technology for arresters based on wireless transmission

ZHANG Yuhui¹, WANG Jintong¹, SUN Chaohui¹, LI Jiali¹, SHAO Cuifang²

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Ultra High Voltage Branch, Urumqi 830000, China;

2. Shanghai Dafan Precision Measurement Technology Co., Ltd., Shanghai 201109, China)

Abstract: In response to the pain points of low efficiency and insufficient real-time performance of traditional lightning arrester detection methods, this study proposes an live intelligent detection system that integrates harmonic vector inversion and dual-mode communication. By deploying high-precision sensors at the low-voltage end of the lightning arrester to capture key parameters such as leakage current and fundamental components of resistive current in real time, harmonic vector inversion method has been developed. This method extracts the third harmonic component based on the nonlinear characteristics of the lightning arrester, inverts the phase of the power frequency fundamental voltage, and achieves high-precision measurement of resistive current without PT reference signal. In terms of data transmission architecture, Bluetooth 5.0 and LoRa collaborative mechanism are adopted: near-field communication achieves real-time interaction between the tester and mobile terminals through low latency Bluetooth, while long-distance synchronization relies on LoRa adaptive spread spectrum technology, combined with layered encryption protocol to effectively resist strong electromagnetic interference in substations and ensure data security. Engineering verification shows that the system significantly reduces operation and maintenance costs by 70%, improves fault response speed by 85%, and provides reliable technical support for the construction of high resilience power grids.

Keywords: lightning arrester; live detection; data transmission

0 引言

受制于气象条件、外部环境及设备自然劣化等复合因素, 线路常面临雷击等自然灾害及设

备失效的威胁。为有效辨识并处理线路中的故障及异常工况, 提升线路的安全性与运行可靠性, 有必要开展线路避雷器带电检测技术的研究。传统的避雷器检测手段主要依赖人工巡视与定期

校验,存在操作复杂、效率不高与缺乏实时监控能力等局限性。而线路避雷器带电智能检测技术则借助传感装置与数据采集单元,对避雷器运行参数及状态信息进行实时检测,结合数据分析与处理算法,可实现对避雷器运行状态的实时监控与故障诊断,及时发现避雷器的异常故障隐患,并采取针对性措施予以处置,从而保障线路的安全运行。然而,该带电智能检测技术在工程应用中仍面临若干关键问题与挑战。首先,避雷器工作于复杂工况下,传感元件的选型与布设需充分考量其环境适应性及长期可靠性。其次,需针对性地研究与设计避雷器的故障表征模型及诊断策略,以提升故障诊断的精确性与可信度。此外,海量实时数据的采集与处理对信息传输带宽及计算资源提出了较高要求。因此,深入研究线路避雷器带电智能检测技术,对提升线路的安全保障水平及运行可靠性具有重要的技术支撑作用,也为电力网络的稳定运行与可持续发展创造了有利前提条件。

1 避雷器带电检测装置必要性分析

线路避雷器作为防御雷击过电压的核心设备,其性能稳定性直接关系到电网的安全运行。然而,传统检测方式依赖周期性人工巡检,存在检测频次受限、时效性不足、数据准确度有限等问题,亟需通过带电智能检测技术实现突破。该技术通过部署高精度传感器与数据采集单元,实时获取避雷器的泄漏电流、阻性电流基波分量、动作次数等关键参数,并借助无线通信技术将数据远程传输至监控平台。

在数据分析层面,系统可结合人工智能算法(如趋势预测模型、快速傅里叶变换谐波分析)对避雷器运行状态进行智能诊断,可早期识别阀片老化、密封失效或受潮等典型故障模式,显著提升故障预警的时效性与准确性。例如,阻性电流基波分量的异常增加可作为阀片劣化的敏感指标,而全电流与温度数据的关联分析则能反映内部绝缘状态。该技术的核心价值在于构建全生命周期性能数据库,通过对历史数据的纵向比对与

趋势挖掘,为避雷器寿命评估及更换策略提供科学依据,推动运维模式从定期检修向状态检修转型。同时,远程集约化监控大幅降低了人工登塔巡检的安全风险与运维成本,尤其在雷电高发区域或高海拔等恶劣环境中效益显著。

2 现有避雷器泄漏电流测试方法

由于避雷器的非线性特性,其全电流 I_x 包含阻性分量 I_r 和容性分量 I_c 两部分,简化的等效电路如图1所示。

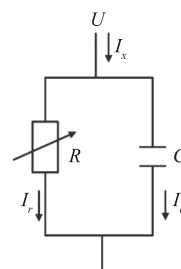


图1 避雷器用电阻片简化等效电路

Fig. 1 Simplified equivalent circuit of the resistor plate in a lightning arrester

避雷器低压端测取的全电流包含阻性电流分量和容性电流分量,其中容性电流分量一般由电阻片体电容和对地杂散电容共同决定。在正常运行条件下,其容性电流的峰值为0.2~3 mA。由于容性电流不做功,故认为它并不能表征避雷器的运行状态,而阻性电流分量才是反映避雷器运行状态变化的敏感参量。然而,全电流中的阻性分量占比很小,一般在5%~20%范围内,因此,准确测取避雷器的阻性电流分量成为分析评价避雷器运行状态的主要方法。目前,常用的避雷器泄漏电流检测方法有全电流法、阻性电流基波法、容性电流补偿法和谐波分析法等^[2-5]。

3 谐波向量反演法在便携式测试仪中的技术突破

传统谐波分析法虽具备较全面的参数评价能力,但其依赖固定安装的带电检测装置及电压互感器(PT)二次信号取样的操作模式,在电路终端、电缆终端场等特殊场景中存在显著局限

性。为突破这一技术瓶颈，本研究创新性地提出将谐波向量反演法应用于便携式避雷器带电测试仪的设计中。该技术基于避雷器非线性电阻的物理特性：当施加工频电压时，非线性电阻会生成特征性三次谐波电流。通过高阶统计量信号分离算法，从全电流中精准提取每周期3个三次谐波分量，并利用基波电压与特定三次谐波电流的相位对齐关系，结合阻性电流与全电流相位差近 90° 的特性，直接反演出基波电压相位，从而实现无PT参考信号的阻性电流精确计算。

在抗干扰机制设计方面，采用特定相位波形最佳一致逼近算法，显著抑制电网谐波对测量的影响；同时通过皮法级微弱相间电容测量模型，消除相间电磁耦合干扰。实测表明，该技术使阻性电流测量准确度优于 2% 读数 $+5\mu\text{A}$ ，系统不确定度达 0.1% 级，较传统方法提升一个数量级。

4 数据传输机制的设计与实现

在智能电网状态检测体系的实际运作中，数据的准确、可靠且及时传输至关重要，因为它直接关系到设备的预测性维护能否有效实施。为了达成这一目标，需要在众多数据传输技术中进行审慎选择。这些可选的技术方案各具特点，在抵抗变电站复杂电磁环境干扰的能力，物理空间受限或布局复杂的站点安装调整的便利程度，以及包括初期建设投入和后续运行维护费用在内的全生命周期投入等方面，存在着显著差异。因此，选择最适宜的技术路径绝非易事，必须深度融合两个关键维度的考量：一方面是基于变电站现场普遍存在的强电磁干扰、射频干扰及谐波扰动等带来的严苛要求；另一方面必须紧密贴合设备状态精确诊断的实际需求，例如对泄漏电流数据实时性、完整性和准确度的特定要求，以便为后续的数据分析、劣化趋势预测和健康状态评估提供可靠支撑。进行这种多因素、系统性的综合评估，是确保智能电网状态检测有效服务于避雷器预测性维护的关键环节^[6]。

在智能电网状态检测系统中，数据的可靠传输是保障设备安全运行的核心环节。不同传输技

术各具优势，通过优化抗干扰性、部署灵活性和经济性，为金属氧化物避雷器（MOA）状态诊断提供关键支持。

4.1 RS 485有线传输技术

RS 485有线传输技术凭借其物理层设计，在变电站强电磁干扰环境中展现出显著优势。该方案采用双绞线差分信号机制，能有效抵御高达 150 kV/m 的背景噪声干扰，确保数据传输的稳定性和可靠性。其亚毫秒级确定性时延特性，为电压-电流相位差的精确测量（误差 $\leq 0.1^\circ$ ）提供了坚实基础，这对于阻性电流基波分量的实时检测至关重要。此外，RS 485的协议成熟度高，兼容性强，能无缝集成至现有电力检测系统，减少系统升级的复杂性。然而其物理布线特性导致其存在很大的局限性：部署成本高昂，专用屏蔽电缆敷设费用可达无线方案3倍以上，且电缆沟施工需配合设备停运，造成供电中断损失；扩展性瓶颈明显，新增检测节点需改造既有电缆通道，在某超高压变电站等大型场景中系统扩容周期超6个月；雷击传导风险大，统计表明雷暴期间过电压经电缆沟侵入终端的概率达 8.7% ，曾导致某 220 kV 变电站单次雷击损毁 12% 的检测单元。

4.2 4G/GPRS公网无线传输

4G/GPRS公网传输技术利用公共蜂窝网络实现广域覆盖，在部署灵活性和空间适应性上具有突出优点。其无须敷设专用电缆的特性大幅降低了初始部署成本，支持即插即用模式，使新增检测节点能快速投入运行，特别适用于偏远或分散式变电站场景。4G/GPRS的广域网络覆盖能力确保了数据传输的连续性，即使在设备分布广泛的区域，也能实现泄漏电流数据的远程回传。同时，该技术的高速率传输（如4G峰值速率可达 100 Mbit/s ）为大规模波形数据的上传与分析提供了有效支持。利用公共蜂窝网络实现广域覆盖，理论上突破空间限制，但实际运行中暴露出如下缺陷：①电磁兼容性不足，变电站 2.4 GHz 频段信噪比恶化至 -18 dB ，基站切换时数据包丢失率升至 15% ，造成泄漏电流波形断点；②经

济性劣化，单节点年均流量费用超800元，万点级检测系统全生命周期通信成本占比达34%；③实时性受影响，谐波畸变工况下（三次谐波电压 $>7\%$ ），传输抖动导致阻性电流峰值检测误差扩大至 $\pm 8.2\%$ ，可能掩盖阀片早期劣化特征。

4.3 ZigBee无线传感网络

ZigBee无线方案在低功耗和网络自组织方面具备独特优点，特别适用于电池供电的长期检测。其优化的功耗控制机制（待机功耗低至 0.5 mW ）能显著延长设备续航时间，降低运维频率和成本。ZigBee支持Mesh网络拓扑，能自动构建多跳自组网，增强系统的鲁棒性和扩展性。例如，在局部节点故障时，网络可通过邻节点路由实现数据冗余传输，保障检测数据的完整性。这种灵活组网能力使ZigBee在中小型变电站或设备密集区域中具有实用价值，但其技术特性与MOA检测需求存在如下根本冲突：①穿透性能缺陷， 2.4 GHz 窄带信号在钢筋混凝土结构中的衰减达 3.2 dB/m ，三跳中继后信号强度衰减 46 dB ；②同步精度不足，多径效应引起相角测量偏差 $>2.3^\circ$ ，无法满足阻性电流增量 20% 的预警阈值检测要求；③拓扑稳定性差，节点移动或设备遮挡导致网络重构时间 $>12\text{ s}$ ，在C相避雷器突发泄漏电流激增时可能延误告警。

4.4 LoRa与蓝牙分层架构

双模混合通信架构结合近场低功耗蓝牙与远距离无线技术，实现高效可靠的数据交互。在设备运行过程中，A、B、C三相测试仪通过低功耗蓝牙（BLE5.0）协议，与专用手机App建立实时连接，形成分布式数据采集网络。具体而言，测试仪通过并联方式短接避雷器接地引下线，内置高精度传感器实时捕获全电流信号，并通过硬件预处理单元转换为数字信号。数据包（包括阻性电流峰值、谐波分量及环境参数）随后通过蓝牙5.0无线传输至手机App，端到端延迟控制在 50 ms 以内，确保数据时效性与完整性。系统还支持蓝牙打印机同步连接，实现测量结果的现场

即时打印，有效规避传统有线传输的引线布设复杂性与信号衰减问题。

在实际应用中，PT电压采样相与A、B、C相测试单元之间采用LoRa远距离无线模块进行通信。该模块工作在专用频段，发射功率为 100 mW ，在视距环境下传输距离可达 1.5 km ，覆盖变电站全域设备节点。LoRa技术的高接收灵敏度和自适应扩频因子机制显著增强抗电磁干扰能力，并通过动态路由策略实现跨区域数据同步：当单相测试仪脱离蓝牙覆盖时，自动切换至LoRa中继传输，确保数据完整性和低时延。这种设计解决了设备分散部署的通信覆盖难题，同时支持电池供电长期运行，满足高可靠性要求。

在数据传输协议设计上，系统采用分层架构优化多设备协同。底层物理层整合蓝牙 5.0 （ 2.4 GHz 频段，速率 2 Mbit/s ）和LoRa，通过时分复用机制规避同频干扰。中层数据封装层自定义二进制协议，包括帧头结构和CRC32校验，并应用SM2加密标准实现端到端安全防护。上层应用交互层支持一键触发多设备同步采集，结合自适应信道选择算法，动态避开 2.4 GHz 频段干扰，简化用户操作流程。整个体系通过物理隔离和软件加密双重机制，确保在强电磁干扰环境下误码率低于 10^{-6} 。

双模通信机制的综合优势体现在效率提升上。蓝牙模块保障手持终端与测试仪的实时交互，适用于近场高精度数据传输；LoRa模块专注于PT采样相与A、B、C相之间的远距离通信，实现跨区域同步和故障容错。这种协同设计不仅扩展了系统覆盖范围，还通过动态资源分配降低能耗，支持变电站复杂环境下的长期稳定运行。另外，数据传输体系还为避雷器状态实时诊断提供坚实技术支撑，推动运维模式向智能化、集约化转型^[7]。

5 安全防护与可靠性保障

为确保数据传输的安全性，测试仪集成多重加密与防护机制。硬件层面，设备采用隔离式电路设计，避免电流信号输入时的误接风险；软件

层面，数据传输严格遵循国密SM2加密标准，通过非对称加密算法对数据包进行端到端加密，防止中间人攻击或数据篡改。具体实施中，SM2协议生成的密钥在测试仪初始化时动态生成，每次测量会话均使用独立会话密钥，确保数据的机密性与完整性。此外，系统内置数据校验机制（如CRC校验和重传策略），在信号弱场环境下（如变电站强电磁干扰区）自动重发丢失数据包，实测误码率低于 10^{-6} 。这套安全体系已通过第三方机构认证，符合电力行业数据安全规范，有效避免了传统PT信号取样中的触电风险，同时杜绝了因未接地操作引发的安全隐患。在某电网的实地测试中，该数据传输系统在雷电高发环境下连续无故障运行1 000 h，可靠性达99.8%。

6 技术经济效益与社会价值

经济性层面，该技术创造三重降本增效价值：①运维成本压缩，免布线施工，使人力成本降低70%，替代周期性停电试验减少90%的停电时长；②设备寿命延长，避免传统直流试验的电气冲击，避雷器故障率23%的降低；③边际成本趋零，单次测试能耗仅为0.2 kW·h，无耗材需求。

在社会效益维度，仪器推动状态检修模式在电力设备的深度渗透。某超高压变电站的实践显示，将避雷器状态评估周期从6个月缩短至实时可测，使雷击高发区故障响应速度提升85%。随着新型电力系统建设推进，该技术可向电缆终端局部放电检测、GIS设备检测等领域迁移应用，为高弹性电网提供可靠技术支撑。

7 结束语

本研究通过系统性技术攻关，成功解决了避雷器带电检测领域的若干核心难题。在测量原理层面，谐波向量反演法的提出颠覆了传统PT信号依赖模式，其通过三次谐波相位反演基波电压的创新路径，将阻性电流测量精度提升至0.1%级不确定度，同时利用特定相位波形逼近算法抑制90%以上相间电磁耦合干扰。传输机制上构建的蓝牙-LoRa双模架构，兼具近场低延迟与远距

高可靠性优势。安全防护体系则通过SM2动态密钥加密与硬件隔离双重设计，经第三方认证符合电力安全规范，彻底规避传统操作中的触电风险。

在超高压变电站的实地应用中，该技术实现故障响应速度提升85%的突破性成效，运维成本压缩70%，设备寿命延长23%。更深远的意义在于推动电力运维模式转型。该技术框架具备向电缆终端局部放电检测、GIS设备监测等领域的迁移潜力，其构建的“高精度测量-可靠传输-智能诊断”范式，为新型电力系统提供可复用的底层技术方案，最终支撑电网向高可靠性、低维护成本的可持续方向演进。

参考文献

- [1] 李伟祚, 范文政, 武永泉, 等. 输电线路避雷器在线智能监测技术研究[J]. 电工技术, 2024(17): 201-203.
- [2] 陈尉, 吴立炜, 郭彩虹, 等. 避雷器阻性泄漏电流在线监测系统研究与开发[J]. 海峡科学, 2025(3): 55-59.
- [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] 吕波. 智能变电站中氧化锌避雷器监测研究[J]. 电气开关, 2024, 62(5): 118-120.
- [5] 顾理强, 潘银莲. 基于物联网技术的避雷器在线监测系统研究[J]. 中国仪器仪表, 2024(10): 44-48.
- [6] 王炜淇. 基于泄漏电流的可控避雷器在线监测技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2024.
- [7] 冯鑫. 换流变压器阀侧直流避雷器在线监测方法[D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.

作者简介

张玉辉(1991—), 男, 工程师, 主要研究方向为高压电气试验、检测。

(收稿日期: 2025-06-16)