

基于云边协同的配电电缆缺陷故障在线预警系统设计研发

纪坤华¹, 方恒福^{2*}, 朱启扬¹, 费 焯², 张 波²

(1. 国网上海市电力公司, 上海 浦东 200122; 2. 国网上海能源互联网研究院有限公司, 上海 浦东 200131)

摘要: 近年来暂态地电压法、高频电流法等在线监测预警方法和人工智能数据驱动模型方法开始在配电电缆中应用, 存在以下问题: 通过暂态地电压法、高频电流法等就地边端监测局部放电量进行评估预警不全面, 难以对配电电缆健康状况进行标定; 而将局部放电高频信号等全部上送云主站、融合其他数据通过人工智能数据驱动模型方法进行评估预警, 数据量过大、成本高。构建了配电电缆缺陷故障在线监测预警框架, 提出了云边协同的数据协同机制, 研发了配电电缆缺陷故障在线预警与超龄精益化管控模块。系统在实际配电网进行了部署应用, 验证了本文方法有效。

关键词: 配电电缆; 在线监测预警; 缺陷故障; 局部放电; 云边协同

中图分类号: TM764

DOI: 10.13882/j.cnki.ncdqh.2504A013

CSTR: 32400.14.ncdqh.2504A013

Design and Development of Online Warning System for Distribution Cable Defects and Faults Based on Cloud Edge Collaboration

Ji Kunhua¹, Fang Hengfu^{2*}, Zhu Qiyang¹, Fei Ye², Zhang Bo²

(1. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200122, China; 2. State Grid Shanghai Energy Internet Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200131, China)

Abstract: In recent years, online monitoring and early warning methods such as the transient ground voltage method, the high-frequency current method, and artificial intelligence data-driven model have been applied to distribution cables. However, there are the following problems: the evaluation and early warning of partial discharge through on-site edge monitoring methods such as transient ground voltage method and the high-frequency current method are not comprehensive, and it is difficult to calibrate the health status of distribution cables. Furthermore, uploading all partial discharge high-frequency signals to the cloud main station and integrating other data through artificial intelligence data-driven modeling methods for evaluation and warning results in excessive data volume and high cost. This paper has constructed an online monitoring and early warning framework for distribution cable defects and faults, proposed a data collaboration mechanism for cloud-edge collaboration, and developed an online early warning and age-overdue lean management module for distribution cable defects and faults. The system has been deployed and applied in the actual distribution network, and the effectiveness of the methods proposed in this paper has been verified.

Keywords: distribution cables; online warning; defect malfunction; partial discharge; cloud-edge collaboration

0 引言

配电电缆是配电网的重要组成部分, 相对于架空线路具有美观、故障水平低、运维少等优点。虽然配电电缆故障水平相对架空线路较低, 但是配电

基金项目: 国网上海市电力公司科技项目(配电电缆缺陷故障在线预警与超龄精益化管理关键技术研究)(SGSH0000SCJS2310650)。

收稿日期: 2025-04-08

电缆故障特别是局部放电导致的故障时有发生, 一旦发生停电, 影响范围大、修复时间长、经济损失大^[1-2]。因此对配电电缆缺陷故障进行监测预警意义重大、需求紧迫。对配电电缆缺陷故障监测预警主要是对潜伏性缺陷故障进行监测预警, 一般配电电缆故障发展可以分为初始微弱缺陷—局部放电—可恢复电弧故障—多发间隙性电弧故障—永久性故障几个阶段^[3-4], 监测预警主要是在永久故障之前的潜

伏性阶段发现配电网电缆缺陷故障。配电网电缆故障主要发生在终端头和中间接头处^[5-9]，约占配电网电缆故障的90%（除外破外）。针对配电网电缆监测预警国内外学者提出了许多方法^[10-17]，目前主要通过周期性带电检测和试验检测方法^[18-21]，但及时性差，难以有效发现局部放电等潜伏性缺陷，且运维成本高，实际配电网操作实施少。近年来，高频脉冲电流法和暂态地电压法等边端就地在线监测预警方法和人工智能数据驱动模型方法在配电网电缆监测预警中开始应用，具有一定价值。但通过暂态地电压法、高频电流法等就地边端监测局部放电量进行评估预警不全面，难以对配电网电缆健康状况进行标定；而将局部放电高频信号等全部上送云主站、融合其他数据通过人工智能数据驱动模型方法进行评估预警，数据量过大、成本高。因此，如何云边协同进行在线评估预警是当前配电网电缆监测预警技术难题。本文构建了配电网电缆缺陷故障在线监测预警框架，提出了云边协同的数据协同机制，研发了配电网电缆缺陷故障在线预警与超龄精益化管控模块。系统在实际配电网进行了部署应用，验证了本文方法有效。

1 云边协同框架

本文构建的云边协同的配电网电缆缺陷故障在线监测预警框架见图1。

感知层。感知层即边端，主要为暂态地电压传感器、高频电流传感器、零序电流传感器等局部放电和电弧故障传感器以及采集器（边缘网关）。对于配电网电缆缺陷故障在线监测预警，在感知层主要是在配电网电缆终端头和中间头配置局部放电和电弧故障传感器，其中终端头所处的开关站/环网柜现场一般有外接电源，可以配置暂态地电压传感器、高频电流传感器、零序电流传感器等局部放电和电弧故障传感器，中间头所处的电缆井等户外现场无外接电源，目前可以配置由电池供电的暂态地电压传感器。采集器（边缘网关）具备局部放电、电弧故障数据采集计算分析功能，应用边缘计算技术实现数据本地智能处理；可以接多个局部放电和电弧故障传感器。感知层通过网络层接入点，一方面将局部放电、电弧故障数据向应用层云服务器传输，另一方面，也可接受应用层云端下发的控制程序、推

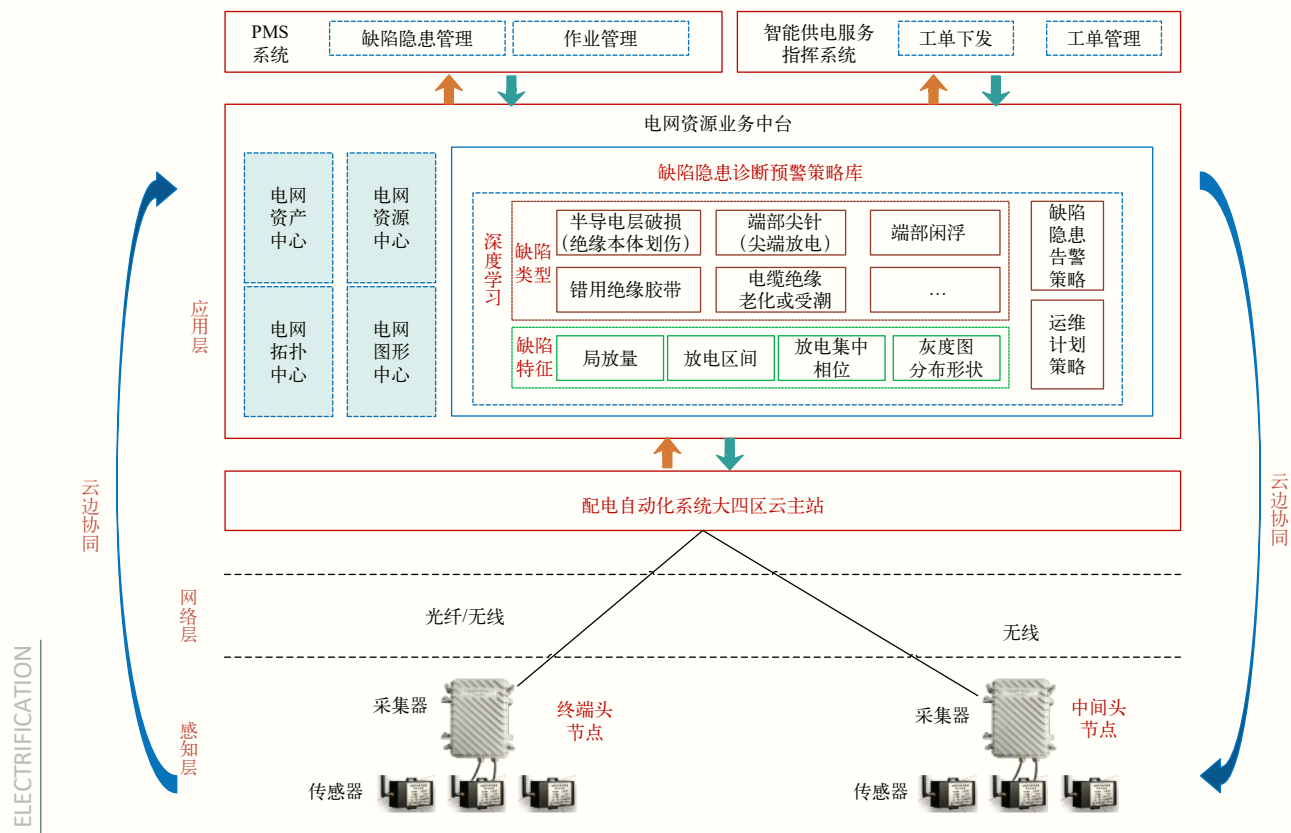


图1 配电网电缆缺陷故障在线监测预警云边协同框架

理模型，从而实现感知层边端业务自主化运行。

网络层。网络层主要是规范数据信息传输通道，对于终端头节点，采集器（边缘网关）进行局部放电和电弧故障数据采集时，如配电电缆终端头所处的开关站/环网柜实现了光纤覆盖或在建光纤通道，边缘网关可以利用已有光纤通道的管理通道将局部放电、电弧故障数据上传至配电自动化四区云主站；如无光纤通道，可以通过 4G/5G 直接将局部放电、电弧故障数据上传至配电自动化四区云主站。对于中间头节点，所处的电缆井等户外现场一般只能通过 4G/5G 直接将局部放电数据上送配电自动化四区云主站，信号相对光纤通信稳定性较差。

应用层。应用层即云端，是所有业务数据汇总、集成、分析处理中枢。在电网资源业务中台中基于深度学习算法，对局部放电、电弧故障数据进行集中存储、集中训练，构建配电电缆缺陷故障智能识别模型，并将模型参数下发至采集器（边缘网关）应用，实现配电电缆缺陷故障智能化精准诊断预警。在配网缺陷故障智能化精准诊断预警基础上，融合电网资源业务中台电网资源中心、设备状态中心等配网设备运行信息、负荷信息、运维历史信息和设备状态信息等数据，制定配网缺陷故障告警策略和运维计划策略，辅助作业人员高效作业。支撑系统端和手机 App 同时应用，实现配网主动运维和工单化。

2 云边协同模式

配电电缆缺陷故障在线监测预警框架云边协同机制如图 2 所示，主要包括数据协同和模型协同 2 个方面，两者相互融合，保证云边协同的可行性和有效性，实现提升运营效率、降低运维成本的目的。

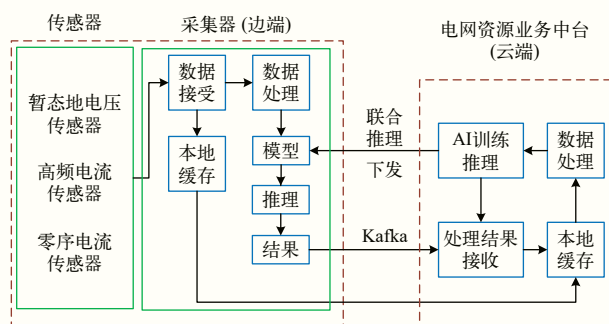


图2 云边协同示意图

2.1 云边数据协同

在基于云边协同的配电电缆缺陷故障在线监测

预警框架中，终端设备主要有高频电流互感器 HFCT、地电波局放传感器、零序电流传感器 3 类，这些终端设备会产生许多数据，采集器（边缘网关）等边端设备负责数据收集，按照预先制定的规则对数据进行初步处理与分析，将处理后的数据上传至云端的配电电缆缺陷故障在线监测预警系统；云端持续接收边缘计算节点数据并基于大数据统计分析，模型持续训练和优化，边端与云端数据需协同。

依据图 2 云边协同示意图，在数据协同方面，3 类传感器数据保存或传输给采集器（边缘网关），采集器（边缘网关）处理并在本地缓存数据，将处理后数据进行模型推理，并将核心和不确定数据上传云端。云端利用采集器（边缘网关）传输的数据进行模型训练和优化，然后将优化好的模型下发给采集器（边缘网关）。若采集器（边缘网关）推理不确定，可采用云端与采集器（边缘网关）进行联合推理。用 Kafka 消息中间件在边端和云端搭建数据通道，实时传输数据，完成云边之间的数据协同。

2.2 云边模型协同

一般的高精度深度学习模型难以部署到采集器（边缘网关），并且很难达到实时性，因此将模型进行终端适配和划分，使得在不损失过多精度的基础上将模型进行修剪，将模型划分下发至采集器（边缘网关），采集器（边缘网关）与云端协同推理，减少推理时间。根据图 2 可知，在模型协同方面，在云端基于深度学习进行模型训练，然后将模型进行修剪划分，将划分后的部分模型下发到采集器（边缘网关），采集器（边缘网关）与云端实时对采集的数据联合进行模型推理、监测分析、异常告警，在采集器（边缘网关）存储分析结果并实时向云端上传。如何对模型进行训练、修剪、划分、下发是非常重要的，目前模型修剪比较主流的是剪枝法，利用无监督端对端训练剪枝网络中冗余的异质结构，通过快速迭代与收缩算法解决、优化问题，稳定移除冗余结构，提升剪枝效率，以更好地在云端和边端进行联合模型推理。

3 配电电缆在线预警系统设计

按照本文方法研发了配电电缆缺陷故障在线预警与超龄精益化管控模块，如图 3 所示，模块包括配电电缆精益化管控总览、配电电缆台账管理、配



图3 总览单元界面

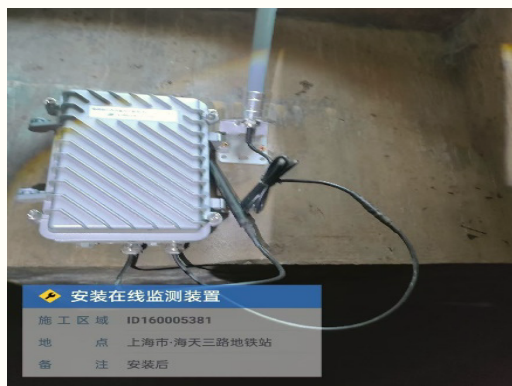
电电缆监测装置台账管理、配电网电缆接头运行状态监测、配电网电缆健康评估、配电网电缆改造辅助决策等6个单元。具体功能如下：1) 配电网电缆精益化管控总览，实现可视化展示接入系统配电网电缆总条数、长度，可视化展示接入配电网电缆监测装置的总数、在线率，可视化展示配电网电缆接头绝缘状态分布信息，可视化展示配电网电缆健康评估的健康、亚健康、一般缺陷、严重缺陷、危急缺陷状态分布信息，可视化展示配电网电缆的寿命预测、运行策略和改造策略信息。2) 配电网电缆台账管理单元。实现可视化展示系统接入的配电网电缆的台账，包括运维管理负责班组、服役年限、敷设方式等信息。3) 配电网电缆监测装置台账管理单元。实现可视化展示系统接入的各类型配电网电缆监测装置的台账，包括监测

装置的类型、生产厂家、所属配电网线路、安装位置等信息。4) 配电网电缆接头运行状态监测单元。实现可视化展示配电网电缆接头的局放采集信息和运行状态信息。5) 配电网电缆健康评估单元。基于配电网电缆历史故障次数、服役年限、负荷情况、敷设方式等影响配电网电缆老化因素，根据配电网电缆状态评估与寿命预测模型，可视化展示配电网电缆健康评估的健康、亚健康、一般缺陷、严重缺陷、危急缺陷状态信息和寿命预测信息。6) 配电网电缆改造辅助决策单元。基于配电网电缆资产规模结构、运行状态、健康水平、使用寿命、利用效率等多源差异化因素，根据配电网电缆状态评估/资产墙综合模型，可视化展示超龄配电网电缆维修更新标准化、差异化策略制定。

选择上海地区配电网电缆线路进行部署试点应用，

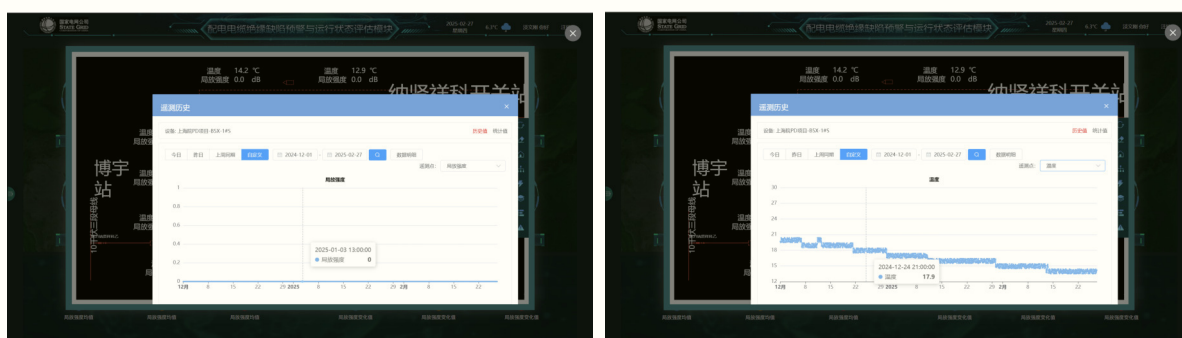


(a) 暂态地电压传感器安装图



(b) 采集器安装图

图4 传感器和采集器现场图



(a) 配电电缆接头运行状态监测单元接头局放信息监测界面

(b) 配电电缆接头运行状态监测单元接头温度信息监测界面

图5 配电电缆接头运行状态监测单元界面

安装暂态地电压传感器 427 台、采集器 109 套, 实现暂态地电压局放温度一体化在线监测, 精准掌握配电电缆接头(中间接头、终端接头)状态, 抓早抓小, 精准预防故障, 提升配电电缆精益化运维水平和供电可靠性。自 2024 年 12 月正式部署应用以来, 传感器、采集器和“配电电缆缺陷故障在线预警与超龄期精益化管控模块微应用”运行正常, 见图 4。传感器、采集器在线率达到 99%。目前系统未监测到应用范围配电电缆接头异常局放和异常温度情况, 见图 5。

4 结束语

本文针对配电电缆监测预警就地评估预警难以标定、全部上传云主站成本高的难题, 构建了配电电缆缺陷故障在线监测预警云边协同框架, 提出了云边协同的数据协同机制, 研发了配电电缆缺陷故障在线预警与超龄精益化管控模块, 实现了配电电缆在线监测预警简洁高效。随着人工智能大模型更深入应用, 本文方法将更加轻量化, 在云边端便捷部署, 将大力提升配电电缆监测预警准确率。

参考文献

- [1] 朱梦瑶, 李欢, 张瑞祥. 热老化对XLPE电缆本体中典型缺陷所引发的电场畸变的影响[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(22): 9076-9087.
- [2] 刘昊, 李福生. 浅析10 kV配电电缆运行维护与管理[J]. 农村电气化, 2023(1):89-90.
- [3] 常雪. 中压配电电缆潜伏性故障辨识方法研究[D]. 山东大学, 2023.
- [4] 刘金凯. 中压配电电缆潜伏性故障检测与定位方法研究[D]. 中国石油大学(华东), 2021.
- [5] 谭焱. 10 kV电缆中间接头(终端头)故障的管控[J]. 农村电气化, 2024(5):30-32.
- [6] 徐翀, 王鹏博, 杨帆, 等. 三芯电缆中间接头压接缺陷多物理

- [7] 孙欣宇, 王宜静, 杨浩烁, 等. 10 kV电缆中间接头结构参数统计分析[J]. 南方电网技术, 2023, 17(6):136-144.
- [8] 杜清, 杨绍才, 胡晓. XLPE电缆中间接头内部放电射频信号的时频分析[J]. 电网技术, 2023, 47(12):5266-5273.
- [9] 于志鹏, 许永鹏, 钱庆林, 等. 潮湿环境下中压电缆接头早期故障的演变规律及特性[J]. 高压技术, 2024, 50(3):1311-1321.
- [10] 张可, 高建, 武康宁, 等. 高压电缆缓冲层烧蚀致绝缘屏蔽损伤的机理研究[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-10[2025-04-03].
- [11] 侯帅, 何文, 展云鹏, 等. 电力电缆半导体屏蔽料导电炭黑研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(4):1632-1645.
- [12] 周旭, 李欢, 朱梦瑶, 等. 高压XLPE电力电缆阻水缓冲层烧蚀故障研究综述[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-15[2025-04-03].
- [13] 赵书静, 龚梁涛, 詹博博, 等. 基于FMCW的10 kV配电电缆故障定位及类型识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(11): 4452-4463.
- [14] 王昊月, 孙茂伦, 赵凯杰, 等. 电缆绝缘老化的高压频域介电谱诊断评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(9):3630-3642.
- [15] 王璨, 赵学童, 张杰, 等. 基于超低频介损和U-I滞回曲线的XLPE电缆水树老化状态评估[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(13):5261-5271.
- [16] 吴阳, 张品佳. 基于漏电流测量的配电网电缆高精度状态感知技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8):2929-2940.
- [17] 李盛涛, 王诗航, 杨柳青, 等. 高压电缆交联聚乙烯绝缘的关键性能与基础问题[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(11):4247-4255.
- [18] 沈谢林, 王利, 郭建钊, 等. 10 kV配电电缆绝缘耐压与局放一体化测试方法研究[J]. 高压电器, 2023, 59(2):120-126.
- [19] 王超, 陈云, 肖佳朋, 等. 配电电缆试验方法的研究现状和发展趋势[J]. 高压电器, 2024, 60(4):173-184, 220.
- [20] 李登雕, 陈海洋, 胡亮. 在运电缆健康状况带电检测评估仪的研究与应用[J]. 农村电气化, 2025(1):82-86.
- [21] 高二超, 汪森. 电力电缆局部放电机理及检测方法探究[J]. 农村电气化, 2022(2):85-87.

作者简介

纪坤华(1982—), 男, 硕士, 高工, 研究方向为配电网运维管理, E-mail: jikunhua@sh.sgcc.com.cn.

方恒福(1984—), 男, 硕士, 教授级高工, 研究方向为配电网运维, E-mail: kenty.fang@163.com.

(责任编辑:袁航)