

电缆护层电流监测对绝缘老化预警效果评估研究

张艺平

漳州新源电力工程有限公司 福建 漳州 363000

摘要：电缆绝缘老化严重威胁电力系统安全稳定运行，电缆护层电流监测为其预警提供了新方向。通过剖析电缆护层电流与绝缘老化机理，系统梳理基于电磁感应、无线传感、光纤传感的监测技术。采用多参数特征提取结合机器学习算法构建预警模型，融入动态阈值机制提升准确性。经实验室加速老化与现场数据验证，该监测方法在绝缘老化预警方面表现良好，经济性评估表明其具备工程应用价值，为电缆绝缘状态评估提供了可靠技术支撑。

关键词：电缆护层；电流监测；绝缘老化预警；效果评估

引言

随着电力需求增长，电缆在电网中的应用愈发广泛，其绝缘老化问题成为制约供电可靠性的关键因素。电缆护层电流与绝缘状态紧密相关，深入挖掘两者联系并实现有效监测，对绝缘老化预警意义重大。本文聚焦电缆护层电流监测技术，系统分析其与绝缘老化的内在机理，构建科学的预警模型，并提出多维度的预警效果评估方法，旨在为电缆绝缘状态的精准预警与高效运维提供理论依据和实践指导。

1 电缆护层电流与绝缘老化机理分析

1.1 电缆护层电流

电缆护层电流是高压电缆运行过程中因电磁感应产生的特殊电气现象。当高压电缆线芯通过交变电流时，会在电缆周围产生交变磁场，由于电缆护层处于该磁场中，依据电磁感应定律，护层中会感应出电动势。若电缆护层两端接地，便形成闭合回路，在感应电动势作用下产生护层电流。该电流大小受电缆线芯电流幅值、电缆长度、电缆排列方式、护层接地方式等多种因素影响。线芯电流幅值越大，产生的磁场强度越高，护层感应电动势和电流也就越大；电缆长度增加，感应电动势累积，护层电流相应增大；不同的电缆排列方式会改变磁场分布，进而影响护层电流大小；而护层接地方式直接决定回路电阻，对护层电流起着关键调节作用。通过对电缆护层电流的实时监测与分析，能够有效评估电缆运行状态，判断护层接地系统是否正常，及时发现可能存在的环流过大等故障隐患，为电缆的安全稳定运行提供重要依据。

1.2 绝缘老化

电缆绝缘老化是一个复杂的物理化学过程，涉及多种老化机理协同作用。热老化是绝缘老化的重要因素之一，在电缆长期运行过程中，由于线芯电流产生的焦耳

热以及周围环境温度的影响，绝缘材料分子链会发生热裂解，导致材料的物理机械性能下降，绝缘电阻降低。电老化则是在长期高电场作用下，绝缘材料内部会出现局部放电现象，放电产生的高温、活性粒子等会对绝缘材料造成侵蚀，引发分子链断裂和交联，形成电树，随着电树的不断生长和扩展，最终导致绝缘击穿。环境因素如水分、氧气、紫外线等也会加速绝缘老化进程。水分侵入绝缘层后，会在电场作用下形成水树枝，与电树相互促进；氧气会与绝缘材料发生氧化反应，破坏分子结构；紫外线则会使绝缘材料发生光降解反应。这些老化机理并非独立存在，而是相互关联、相互影响，共同作用于电缆绝缘材料，使其微观结构发生变化，宏观性能逐渐劣化，最终缩短电缆使用寿命，威胁电力系统的安全稳定运行。

2 电缆护层电流监测技术

2.1 基于电磁感应原理的监测技术

基于电磁感应原理的电缆护层电流监测技术，依托法拉第电磁感应定律构建监测体系。当电缆护层中有电流通过时，会在其周围产生变化的磁场，通过在电缆护层外部布置高精度的电磁感应传感器，如罗氏线圈或电流互感器，能够有效捕捉该磁场变化，并将其转换为相应的电压信号。该技术具备高灵敏度与良好的线性度，可实现对微弱电流信号的精确测量，测量范围能够覆盖从毫安级到千安级的电流变化。在实际应用中，基于电磁感应原理的监测设备具有结构紧凑、安装便捷的特点，可在不破坏电缆原有结构的前提下实现非侵入式安装。该技术响应速度快，能够实时反映电缆护层电流的动态变化，为电力系统运维人员及时发现电缆护层环流异常、绝缘缺陷等潜在故障提供关键数据支持，在高压、超高压电缆线路的长期在线监测中发挥重要作用^[1]。

2.2 无线传感监测技术

无线传感监测技术通过将微型化的电流传感器与无线通信模块相结合,构建起一套灵活高效的电缆护层电流监测系统。电流传感器负责采集电缆护层的电流数据,经内置的信号处理单元进行滤波、放大等预处理后,通过无线通信技术,如ZigBee、LoRa或NB-IoT等,将数据实时传输至远程监控中心。这种技术摆脱了传统有线监测方式对通信线缆的依赖,极大地降低了布线成本与施工难度,尤其适用于地理环境复杂、人工布线困难的场合,如跨江、跨海电缆线路或山区电缆通道。无线传感节点具备低功耗设计,可采用电池供电或能量收集技术维持长期运行,减少了维护频率。其网络拓扑结构具有较强的自组织与自愈能力,当某个节点出现故障时,网络能够自动调整数据传输路径,保障监测数据的完整性与连续性,为电缆护层电流的分布式、广域化监测提供了可靠的技术手段。

2.3 光纤传感监测技术

光纤传感监测技术基于光纤的光弹效应、喇曼散射效应等光学特性,实现对电缆护层电流的高精度监测。在该技术中,传感光纤作为敏感元件,当电缆护层电流产生的电磁场作用于传感光纤时,会引起光纤的折射率、光强等光学参数发生变化。通过光时域反射(OTDR)、布里渊光时域分析(BOTDA)等先进的光学检测技术,能够精确测量这些光学参数的微小变化,并将其转换为对应的电流信息。光纤传感技术具有本质安全、抗电磁干扰能力强的显著优势,特别适用于强电磁干扰环境下的电缆护层电流监测,如变电站、高压输电走廊等区域。光纤传感系统可实现长距离、分布式监测,一根光纤能够覆盖数公里的电缆线路,实时获取沿线各点的电流数据,为电力系统运维人员全面掌握电缆运行状态、精准定位故障点提供了有力支撑,在智能电网的电缆在线监测领域展现出巨大的应用潜力。

3 电缆护层电流监测对绝缘老化的预警模型构建

3.1 多参数特征提取

电缆护层电流监测数据中蕴含丰富的绝缘老化信息,需通过多参数特征提取挖掘潜在规律。在时域层面,电缆护层电流的幅值、均值、均方根值等基础统计量,可直观反映电流强度的变化趋势与波动程度,当绝缘老化致使护层环流异常时,这些统计量会呈现显著改变。频域分析同样关键,借助傅里叶变换将时域信号转换至频域,可获取不同频率成分的能量分布,绝缘老化产生的局部放电等现象会在特定频段引发能量突变,通过分析特征频率的能量占比、谱峰位置等参数,能够捕捉到绝缘状态恶化的早期征兆。结合电缆运行环境参

数,如温度、湿度等,环境因素会影响电缆绝缘性能,温度升高会加速绝缘老化,湿度增加可能导致绝缘受潮,将这些参数与护层电流数据进行耦合分析,提取相关性特征,构建多维度特征向量,从而全面刻画电缆绝缘老化进程中的物理变化,为后续模型构建提供丰富且有效的数据基础。

3.2 机器学习预测模型

构建高效的机器学习预测模型是实现电缆绝缘老化准确预警的核心。基于多参数特征提取所得到的特征向量,可选用多种机器学习算法进行建模。支持向量机(SVM)凭借其在高维空间中寻找最优分类超平面的能力,能够有效处理非线性可分问题,在电缆绝缘老化预测中,可通过合适的核函数将特征向量映射到高维空间,精准识别老化状态与正常状态的边界,实现对绝缘老化程度的分类预测。随机森林算法以其强大的鲁棒性和对复杂数据的处理能力脱颖而出,通过构建多个决策树并综合其结果,可降低模型的方差,提高预测的稳定性和准确性,能够充分挖掘多参数特征之间的复杂关系,对电缆绝缘老化的发展趋势进行有效预测。深度学习中的长短期记忆网络(LSTM),因其独特的门控机制,能够有效处理时间序列数据,可学习电缆护层电流及相关参数随时间变化的长期依赖关系,捕捉绝缘老化过程中的动态演变规律,实现对未来绝缘状态的精准预测,为电缆维护提供可靠的决策依据^[2]。

3.3 动态阈值预警机制

建立动态阈值预警机制是保障电缆绝缘老化预警时效性与准确性的重要环节。传统固定阈值无法适应电缆运行工况的动态变化,动态阈值预警机制通过实时分析电缆护层电流及相关多参数数据,结合机器学习预测模型输出的结果,依据电缆的历史运行数据、当前运行环境及设备健康状态,利用自适应算法动态调整预警阈值。在电缆运行初期,绝缘性能良好,阈值可设置相对宽松;随着运行时间增长和环境因素影响,根据预测模型对绝缘老化趋势的判断,逐步收紧阈值。例如,当预测模型显示绝缘老化速度加快时,动态降低预警阈值,提前发出预警信号,以便运维人员及时采取措施。考虑到数据的波动和噪声,引入置信区间对阈值进行优化,避免因偶然数据波动导致的误报警,确保预警机制既能及时捕捉绝缘老化的异常情况,又能保持较高的可靠性,实现对电缆绝缘状态的有效监测与预警。

4 电缆护层电流监测对绝缘老化的预警效果评估方法

4.1 实验室加速老化验证

(1) 通过构建可控环境模拟平台,在实验室中对

电缆样本实施多应力协同加速老化处理。具体而言,把样本置于高温、高湿度及局部放电等极端恶劣条件下,综合运用循环升温、脉冲电压冲击等先进技术手段,全方位加速电缆绝缘材料的化学降解与物理损伤进程,从而在较短时间内模拟出接近实际运行多年的老化状态。

(2)在加速老化过程中,同步采集电缆护层电流数据,结合局部放电量、介质损耗角正切值等传统绝缘状态参数,构建多维监测数据体系。运用高速数据采集系统,以毫秒级采样频率捕捉护层电流的动态变化特征,分析电流谐波分量、幅值波动与绝缘老化程度之间的内在联系。(3)基于采集的老化数据,建立数学模型与算法,验证电缆护层电流监测对绝缘老化的敏感性与准确性。通过对比不同老化阶段的护层电流特征参数与实际绝缘劣化程度,量化评估其预警能力,为现场应用提供可靠的理论依据与数据支撑,明确护层电流监测在早期绝缘老化识别中的有效性与局限性^[3]。

4.2 现场运行数据评估

(1)收集电缆线路长期运行过程中的护层电流历史数据,涵盖不同电压等级、敷设方式及环境条件下的运行场景。结合电缆的负荷曲线、环境温湿度变化等运行参数,对护层电流数据进行细致多维度筛选与精准分类整理,建立具有高度代表性的现场运行数据库。(2)采用数据挖掘与机器学习算法,对现场数据进行深度分析。通过模式识别技术,提取护层电流的异常波动模式,结合绝缘电阻下降、局部过热等实际故障案例,建立护层电流特征与绝缘老化故障之间的关联规则。利用神经网络、支持向量机等模型,对历史数据进行训练与验证,构建基于现场数据的绝缘老化预警模型。(3)在实际电缆线路中部署护层电流监测系统,通过长期在线监测,实时验证预警模型的准确性与可靠性。对比监测系统的预警结果与电缆实际检修、故障情况,统计预警的漏报率、误报率等关键指标,综合评估护层电流监测在现场复杂运行环境下对绝缘老化的预警能力,为优化监测方案提供实践依据。

4.3 经济性评估

(1)对电缆护层电流监测系统的全生命周期成本进行细致核算,包括设备采购、安装调试、数据传输与存储、系统维护等方面的费用支出。分析不同类型监测设备的价格差异与性能特点,结合电缆线路的规模与重要程度,确定合理的设备选型与配置方案,降低初期投资成本。(2)评估护层电流监测系统投入使用后带来的经济效益,主要体现在减少电缆故障停电损失、降低维修成本以及延长电缆使用寿命等方面。通过建立经济模型,量化计算因提前预警绝缘老化故障而避免的停电损失,对比传统定期检修模式与基于监测数据的状态检修模式下的维修费用差异,评估系统的成本节约效果。

(3)运用投资回报率(ROI)、净现值(NPV)等经济评价指标,对电缆护层电流监测系统的经济性进行综合评估。考虑资金的时间价值与项目周期,分析不同运行年限下系统的经济效益变化趋势,为电缆运维单位在监测系统的投资决策、设备更新等方面提供科学的经济依据,确保监测技术的应用具备良好的成本效益比^[4]。

结语

综上所述,通过对电缆护层电流与绝缘老化机理的深入分析,结合先进监测技术构建的预警模型,在实验室和现场评估中均展现出良好的绝缘老化预警效果,且具备一定经济性。实际应用中仍存在环境干扰、数据实时性等挑战。未来需进一步优化监测技术,深化多源数据融合分析,提升预警系统的适应性与可靠性,推动电缆护层电流监测在绝缘老化预警领域的广泛应用。

参考文献

- [1]蒋礼.高压电力电缆护层电流在线监测及故障诊断技术[J].电力设备管理,2024(15):30-32.
- [2]张庚喜.高压电缆金属护层环流在线监测系统的研究和应用[J].模型世界,2024(31):4-6.
- [3]朱博,于晓洋,田立刚,等.基于阻性电流和护层电流的交叉互联电缆绝缘监测及诊断[J].电机与控制学报,2023,27(2):79-88.
- [4]单嘉诚,钱程蔚.高压电力电缆护层电流在线监测及故障诊断技术[J].数码设计,2022(19):128-130.