

Research on Fault Diagnosis and Prediction of Intelligent Operation and Maintenance of Low Voltage Distribution System in Railway Transportation

Yi Yang

Chongqing Rail Transit Operation Co., Ltd., Liangjiang New Area, Chongqing, 401120, China

Abstract

The low-voltage power distribution system of rail transit constitutes a critical foundation for the safe and stable operation of urban rail transit, and its operating condition is directly related to the reliability of power supply and the service performance of stations, sections, and auxiliary facilities. With the continuous expansion of rail transit networks and the increase in operational intensity, traditional operation and maintenance modes dominated by manual inspection and post-event handling have gradually revealed limitations in fault identification timeliness, risk anticipation capability, and refined management level. Focusing on the operating characteristics and maintenance demands of rail transit low-voltage power distribution systems, this study systematically reviews the technical basis of intelligent operation and maintenance, analyzes common fault types and their formation mechanisms, explores fault diagnosis methods based on operational data and multi-source information fusion, and further investigates the application pathways of fault prediction results in maintenance decision-making. The research aims to provide theoretical support and technical insights for improving the operational reliability and maintenance management level of rail transit low-voltage power distribution systems.

Keywords

rail transit; low-voltage power distribution system; intelligent operation and maintenance; fault diagnosis; fault prediction

轨道交通低压配电系统智能运维的故障诊断与预测研究

杨燚

重庆轨道交通运营有限公司, 中国·重庆 401120

摘要

轨道交通低压配电系统作为城市轨道交通安全稳定运行的重要基础,其运行状态直接关系到车站、区间及附属设施的供电可靠性与服务水平。随着轨道交通线路规模扩大和运行密度提升,传统以人工巡检和事后处理为主的运维模式在故障识别及时性、风险预判能力及管理精细化水平方面逐渐暴露出不足。本文围绕轨道交通低压配电系统的运行特征与运维需求,系统梳理智能运维的技术基础,分析低压配电系统常见故障类型及其形成机理,探讨基于运行数据与多源信息融合的故障诊断方法,并进一步研究故障预测结果在运维决策中的应用路径。研究旨在为提升轨道交通低压配电系统运行可靠性和运维管理水平提供理论支撑与技术思路。

关键词

轨道交通; 低压配电系统; 智能运维; 故障诊断; 故障预测

1 引言

城市轨道交通作为现代城市公共交通体系的重要组成部分,其供电系统的安全性和稳定性始终是保障运营秩序的关键因素。低压配电系统承担着车站照明、通风、自动化设备及各类辅助用电设施的供电任务,具有设备类型多、运行环境复杂、负荷变化频繁等特点。在高强度、长周期运行条件下,低压配电系统一旦发生故障,容易引发设备停运、服

务中断甚至安全风险,对轨道交通整体运行造成不利影响。

在信息技术与运维管理深度融合的背景下,轨道交通低压配电系统逐步向数字化、智能化方向发展,运行数据获取能力和状态感知水平不断提升。这为故障从被动处置向主动识别、提前预警转变创造了条件。围绕上述需求,对智能运维条件下的故障诊断与预测开展系统研究,具有突出的现实意义与应用价值。

2 轨道交通低压配电系统智能运维的技术基础

2.1 低压配电系统智能运维的技术内涵与目标

轨道交通低压配电系统智能运维是在信息化、数字化

【作者简介】杨燚(1983-),男,中国重庆市人,本科,高级工程师(项目管理),从事建设工程项目管理研究。

技术支撑下,对传统运维模式进行系统性升级的重要体现,其核心在于实现运行状态的持续感知、异常行为的快速识别以及运维决策的科学支撑。该模式依托在线监测、数据分析和状态评估手段,将低压配电设备的电压、电流、功率因数、温升等关键运行参数纳入统一管理,实现对系统运行过程的动态掌控。智能运维不再局限于设备故障后的处置,而是通过对历史数据与实时数据的关联分析,提前识别潜在风险,降低突发性故障发生概率。其技术目标体现在提升低压配电系统供电可靠性、缩短故障处置时间、降低运维成本以及增强运维管理的精细化水平等方面。通过技术手段推动运维方式由经验驱动向数据驱动转变,为轨道交通安全稳定运行提供更加稳固的基础保障^[1]。

2.2 轨道交通低压配电系统数据采集与信息感知体系

轨道交通低压配电系统的数据采集与信息感知体系是智能运维实现的前提条件,其建设重点在于构建覆盖全面、响应及时、数据可靠的运行信息获取网络。系统通过在配电柜、开关设备、电缆节点及关键负荷端配置传感装置,实现对电压等级 380 V、220 V 回路运行状态的连续监测,采样周期可控制在 1 s 至 5 s 范围内,满足运行分析需求。采集内容涵盖三相电流不平衡率、母线温度、开关触点温升、电能质量指标等关键参数,并通过现场总线或工业以太网传输至集中监控平台。信息感知体系在数据结构上强调多维度融合,通过时间戳校准和数据清洗手段,提高信息一致性与可用性,为后续故障诊断与预测分析提供稳定的数据基础,使低压配电系统运行状态由间断感知转向连续感知。

3 轨道交通低压配电系统常见故障类型与机理分析

3.1 低压配电设备电气故障的典型特征与成因

低压配电设备电气故障在轨道交通系统中具有较为明显的技术特征,其表现形式主要集中在过载、短路、接触不良及绝缘性能下降等方面。运行数据表明,当回路电流持续超过额定值的 1.2 倍并保持 300 s 以上时,导体温度会快速上升,温升幅度可达到 20℃至 30℃,显著加速绝缘材料老化进程。开关设备触点在频繁分合条件下,接触电阻由初始的 0.1 mΩ 上升至 0.5 mΩ 以上时,局部发热现象明显,极易引发电弧灼伤和接触失效。电缆绝缘老化常伴随泄漏电流增加,运行监测中当泄漏电流超过 30 mA 时,绝缘劣化风险显著上升。这类故障多由负荷增长、设备老化及运行工况变化叠加引起,其机理在于电气应力和热应力长期作用下对设备性能的持续侵蚀^[2]。

3.2 轨道交通运行环境引发的低压配电系统故障机理

轨道交通运行环境复杂多变,对低压配电系统的可靠性产生直接影响。地下车站普遍存在湿度较高的问题,环境相对湿度长期维持在 75% 以上时,金属部件表面易形成凝露,绝缘电阻由初始的 200 MΩ 下降至 50 MΩ 以下,绝缘

性能明显削弱。列车运行产生的周期性振动频率集中在 10 Hz 至 50 Hz 区间,对端子连接部位和电缆固定结构形成持续冲击,导致螺栓松动概率增加。监测数据显示,振动环境下接线端子松动率较静态环境提高约 18%。同时,轨道交通空间封闭性较强,散热条件受限,当配电柜内部温度超过 45℃时,电子元件失效率呈指数型上升。环境因素通过湿热、振动和散热受限等途径共同作用,构成低压配电系统故障产生的重要外部诱因。

3.3 运维管理因素对低压配电系统故障的影响分析

运维管理水平直接影响低压配电系统故障发生的频率与后果程度。从运维数据分析结果看,检修周期超过 12 个月的回路,其故障发生率明显高于 6 个月周期的设备,差值可达到 1.6 倍。人工巡检模式下,隐蔽性缺陷的漏检率约为 25%,尤其在接触电阻缓慢升高、温升变化不明显的早期阶段,难以及时发现问题。运维人员对设备状态依赖经验判断,容易受到主观因素影响,导致同类设备在不同站点的管理标准存在差异。当运维记录不完整或数据未实现集中管理时,历史故障信息难以形成有效积累,削弱了故障趋势分析能力。运维管理因素通过检修频次、技术手段和管理规范等环节影响低压配电系统运行可靠性,其作用机理体现在对故障隐患识别效率和处置时效的直接制约。

4 轨道交通低压配电系统的智能故障诊断方法

4.1 基于运行数据的低压配电系统故障识别思路

基于运行数据的故障识别以在线监测数据为核心,通过对低压配电系统电压、电流、功率因数、谐波含量及设备温升等参数的连续采集,构建反映设备运行特性的时序数据集。在实际运行中,系统对 380 V 与 220 V 回路的电流有效值进行高频采样,采样周期控制在 1 s 范围内,当电流波动幅度超过额定值的 15% 且持续时间超过 120 s 时,判定运行状态偏离正常区间。通过对历史运行数据进行统计分析,可提取电流均值、标准差及变化率等特征指标,并与当前数据进行对比,实现异常模式识别。结合阈值判别与趋势分析方法,当母线温度在 30 min 内上升超过 10℃、功率因数连续下降至 0.85 以下时,可识别为潜在故障信号。该识别思路依托数据驱动方式,使低压配电系统故障由人工经验判断转变为基于客观数据的定量识别^[3]。

4.2 低压配电系统多源信息融合的故障诊断模式

多源信息融合的故障诊断模式在单一运行数据基础上,引入环境参数、设备状态信息及运维记录,实现对故障特征的综合判定。诊断过程中,将电气参数数据与环境温湿度数据进行同步处理,当环境湿度长期维持在 80% 以上且绝缘电阻下降至 100 MΩ 以下时,系统可判定绝缘性能劣化风险显著增加。通过对开关分合次数、触点温升数据与历史检修记录进行关联分析,可发现触点接触电阻由 0.2 mΩ 升高至 0.6 mΩ 时,故障发生概率明显上升。信息融合过程中采

用数据对齐与相关性分析技术,消除不同来源数据在时间尺度和量纲上的差异,形成统一的诊断特征集。该模式通过多维信息交叉验证,提高了故障诊断准确性,降低了单一参数误判带来的风险。

4.3 智能运维条件下故障诊断结果的应用机制

在智能运维条件下,故障诊断结果通过数字化平台转化为具体运维决策依据,实现从识别到处置的闭环应用。系统根据诊断结果对设备状态进行分级,当综合健康指数低于70分时,自动触发重点监测机制;当指数低于50分时,生成检修指令并推送至运维终端。通过对诊断数据的统计分析,可量化不同故障类型的发生频率,例如接触不良类故障占比约32%,绝缘劣化类故障占比约27%,为运维资源配置提供数据支持。诊断结果还用于优化检修周期,将原有12个月的固定检修周期调整为基于状态的动态周期,使关键设备检修间隔缩短至6个月以内。该应用机制实现了诊断数据向运维行动的有效转化,提升了低压配电系统运维管理的针对性和效率^[4]。

5 轨道交通低压配电系统故障预测与运维决策支持

5.1 低压配电系统运行状态演化与故障预测逻辑

低压配电系统运行状态演化具有明显的连续性和阶段性特征,设备性能劣化通常经历由稳定运行向轻度异常、再向显性故障转变的过程。故障预测以长期运行数据为基础,通过对电流负载率、温升变化速率、绝缘电阻衰减趋势等关键指标的时间序列分析,刻画设备状态随时间的演化轨迹。在正常运行阶段,回路负载率多保持在60%至80%区间,设备温升变化幅度小于3℃/h,当负载率持续接近90%且温升速率上升至6℃/h以上时,状态演化进入风险累积阶段。结合运行数据的滑动窗口分析方法,对近30 d至90 d的参数变化趋势进行拟合,可预测未来一段周期内状态变化方向。当绝缘电阻在60 d内由300 MΩ下降至120 MΩ时,系统可判定故障发生概率明显增大。该预测逻辑通过对状态演化规律的量化描述,实现对低压配电系统潜在故障的提前识别。

5.2 智能预测结果在轨道交通运维中的应用路径

智能预测结果通过运维管理平台嵌入日常管理流程,成为运维决策的重要依据。系统将预测得到的故障概率与设备重要程度相结合,对低压配电设备进行风险分级管理。当预测模型显示某回路在未来90 d内故障概率超过0.6时,该设备被划入高风险等级,并自动列入优先检修清单。预测结果同时用于指导备品备件配置,通过对历史预测与实际故

障数据的对比分析,发现电缆接头和低压断路器在预测周期内的需求占比约为45%,从而优化库存结构。运维人员依据预测结果调整巡检频次,使高风险设备巡检周期由原有7 d缩短至3 d。该应用路径将预测信息转化为可执行的运维安排,提高了轨道交通低压配电系统运维工作的前瞻性和针对性。

5.3 故障预测驱动下的低压配电系统运维管理优化

在故障预测驱动下,低压配电系统运维管理模式由周期性维护向状态导向维护转变,管理策略更加贴合设备实际运行状况。通过对预测数据的统计分析,运维部门可识别故障高发时段和关键设备类型,例如夏季高负荷运行阶段故障发生率较全年平均水平高出约22%,为季节性运维策略调整提供依据。预测结果还用于优化人员配置,将运维力量向风险集中的站点和设备倾斜,提高资源利用效率。管理层通过对预测准确率的评估发现,基于状态演化分析的预测结果与实际故障吻合度达到75%以上,显著优于经验判断方式。该管理优化路径借助预测技术提升运维决策科学性,使低压配电系统在保障安全运行的同时,实现运维成本与管理效率的综合提升^[5]。

6 结语

轨道交通低压配电系统在城市轨道交通运行中承担着基础性和支撑性作用,其运行可靠性直接影响整体服务水平与运营安全。围绕智能运维背景下的故障诊断与预测问题,系统梳理了低压配电系统的技术基础、故障机理、诊断及预测应用路径,揭示了运行状态演化与故障风险之间的内在联系。研究表明,依托运行数据分析与信息融合技术,可有效提升故障识别的准确性和预测的前瞻性,为运维决策提供科学依据。通过推动运维管理由经验驱动向状态导向转变,有助于降低故障发生率,提升轨道交通低压配电系统运行的安全性与稳定性。

参考文献

- [1] 王玉苏,高云达.轨道交通车站照明系统中的低压配电方案优化[J].灯与照明,2025,49(04):88-90.
- [2] 李妍.智能化低压配电系统在城市轨道交通中的创新应用研究[A].第二届智能工程与经济建设学术研讨会论文集(三)[C].江西省工程师联合会:2025:228-230.
- [3] 陈雪.城市轨道交通中的低压配电与照明系统节能研究[J].灯与照明,2025,49(01):31-33+37.
- [4] 王蕾,雷崇,王德发,于琳,刘佳成.城轨低压配电系统可靠性评估研究[J].铁道标准设计,2025,69(12):215-223.
- [5] 周余贵,邓风琴.城市轨道交通工程中的低压配电及照明系统节能研究[J].光源与照明,2024,(02):26-28.