

地铁400V低压配电设备运行故障分析及运维优化策略

杨 文

成都地铁运营有限公司 四川 成都 610000

摘 要：地铁400V低压配电系统是车站照明、通风、给排水、电扶梯等设备运行的核心基础设施，其可靠性直接关系到运营安全。本文基于某城市地铁2021—2025年400V低压配电设备运维数据，系统分析了设备故障类型、诱因及时空分布特征，针对断路器跳闸、线路漏电、设备过热等典型故障提出差异化运维、状态监测、标准化作业等优化策略。实践表明，优化策略实施后设备月均故障率显著下降，供电可靠率明显提升。研究成果可为地铁低压配电设备运维管理提供参考。

关键词：地铁；400V低压配电；故障分析；运维优化；设备可靠性

引言：地铁400V低压配电系统承担通风空调、动力照明、电扶梯、信号通信等设备供电，是保障安全运营的关键基础设施。随着运营里程增长和设备年限增加，老化与性能劣化问题日益突出，故障频次呈上升趋势。低压配电设备故障在地铁供电系统故障中占比超三成，直接影响乘客出行与运营安全。当前国内多数线路仍采用计划检修和故障抢修为主的传统模式，缺乏基于运行数据的系统性故障分析与针对性优化手段。本文以某城市地铁2021—2025年运维数据为基础，分析故障特征与规律并提出优化策略，为提升系统可靠性提供参考。

1 系统概况与设备构成

1.1 400V低压配电系统结构

地铁400V低压配电系统采用两路独立进线加母联断路器的单母线分段接线方式，两段母线分别由两台干式配电变压器供电，正常时分列运行；一路失电时母联自动闭合，由另一路承担全部一、二级负荷，确保重要负荷不间断供电。系统主要设备包括10/0.4kV配电变压器、400V低压进线柜、母联柜、馈线柜、电容补偿柜、双电源切换装置、末端配电箱及电力监控终端等。低压配电采用三级模式：一级为变电所400V低压母线，二级为车站配电室分配电柜，三级为终端用电设备配电箱。

1.2 主要设备构成与功能

400V低压配电系统主要设备包括框架断路器、塑壳断路器、微型断路器、双电源切换装置、微机综合保护装置、智能电力仪表、通信管理单元及无功补偿装置等。框架断路器作为进线和母联主保护开关，承担短路、过载及接地故障保护；塑壳断路器用于馈线回路保护；双电源切换装置确保一级负荷在两路电源间自动切换，切换时间不大于0.2秒；无功补偿装置将功率因数维持在0.9以上。各变电所低压设备通过通信管理机接入

SCADA系统，实现运行参数实时采集与远程监控^[1]。

1.3 运行环境特点

地铁400V低压配电设备多安装于车站配电室、设备间等封闭空间，运行环境湿度大、粉尘多、温差大、通风条件有限。夏季高温时段低压室温度常超40℃；列车振动对设备连接件持续施加机械应力；隧道活塞风夹带的导电性粉尘易附着于设备表面降低绝缘性能；区间风井等潮湿区域设备面临凝露风险。

2 设备运行故障统计分析

2.1 数据来源与统计方法

本文以某城市地铁3条运营线路共28座车站的400V低压配电设备为研究对象，统计2021年1月至2025年12月五个完整年度的设备故障数据。数据来源包括SCADA系统故障报警记录、运行值班日志、巡检记录及检修报告等。共收集原始故障记录1628条，经筛选剔除误报警及外部停电因素影响后，有效故障记录为1384条。按设备类型、故障性质、发生时间、处理时长等维度进行归类统计。五年间，年度故障次数分别为2021年258次、2022年275次、2023年296次、2024年312次、2025年243次。2021至2024年呈逐年上升趋势，年均增长率为6.9%；2025年实施运维优化策略试点后，故障次数显著回落，较2024年下降22.1%。夏季6至9月故障频次最高，累计发生572次，占五年总数的41.3%。

2.2 故障分类与分布特征

按设备类型统计，1384次故障中，低压开关柜本体故障占比最高，共394次（28.5%）；配电线路故障325次（23.5%）；保护装置及二次回路故障272次（19.7%）；双电源切换装置故障179次（12.9%）；配电变压器低压侧故障135次（9.8%）；其他设备故障79次（5.7%）。低压开关柜与配电线路两项合计占比达52.0%，是影响系统

可靠性的主要因素。

表1 2021—2025年400V低压配电设备故障分类统计

设备类型	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	合计	占比/%
低压开关柜本体	72	77	85	90	70	394	28.5
配电线路	60	64	68	72	61	325	23.5
保护装置及二次回路	52	55	59	62	44	272	19.7
双电源切换装置	35	36	38	40	30	179	12.9
配电变压器低压侧	25	26	29	30	25	135	9.8
其他	14	17	17	18	13	79	5.7
合计	258	275	296	312	243	1384	100

按故障影响程度分类，造成车站大面积停电的严重故障22次（占1.6%），单段母线停电的一般故障99次（占7.2%），单条馈线或单台设备故障1263次（占91.3%）。2025年试点优化策略后，严重故障由2024年的7次降至2次，单段母线停电故障由12次降至4次。故障平均修复时间为7.5小时，其中备件等待时间平均3.2小时，占修复总时长的42.7%。

2.3 主要设备故障成因分析

低压开关柜本体故障以操作机构卡滞为首要原因，共136次（34.5%），主要发生在运行超8年的抽屉式断路器上，表现为合闸不到位或分闸拒动；触头烧蚀100次（25.4%），多出现在负荷率超85%的大电流回路中；母线发热57次（14.5%），原因为螺栓松动致接触电阻增大；绝缘击穿45次（11.4%）。配电线路故障中，绝缘破损接地140次（43.1%），多由机械损伤和老化引起；端子过热94次（28.9%），因压接工艺不规范或热胀冷缩松动；过载老化61次（18.8%），集中于空调供电回路。保护装置故障中，误动或拒动92次（33.8%），定值整定不当64次（23.5%）；通信异常72次（26.5%），主因通信管理机死机或线路干扰；接线松动52次（19.1%）。双电源切换装置故障中，控制器失效81次（45.3%）；机构卡滞51次（28.5%）；电压检测漂移32次（17.9%）。

2.4 故障时空分布规律

从运行年限看，投运5年内的设备年均故障率为0.76次/百台·月，运行6至10年上升至1.16次/百台·月，运行超过10年的设备达1.94次/百台·月，表明设备老化是故障增长的主导因素。从空间分布看，换乘站与大型枢纽站的设备故障率显著高于标准站。三座换乘站年均故障分别为44次、39次和36次，而标准站平均为21次，这与换乘站负荷密度大、设备数量多、运行环境更复杂直接相关^[2]。

3 运维优化策略

针对开关柜本体故障率高（28.5%）、线路绝缘破损突出（43.1%）、保护装置误动频繁、超10年设备故障率为5年内2.6倍等问题，以及状态监测缺失、检修针对性不足等短板，从状态监测、分级运维、标准化检修、智能平台、人员培训五方面提出优化策略。

3.1 状态监测与预测性维护

构建400V低压配电设备状态监测体系是提升运维水平的核心举措。硬件层面，对重要馈线回路增设智能电力监测终端，实现电流、电压、功率、谐波、开关状态等参数的连续采集与上传；对关键连接点安装无线测温装置，实时监测母线接头、断路器触头及电缆接头温度；对双电源切换装置增加动作时间记录与波形捕捉功能。数据分析层面，建立基于历史数据的健康状态评估模型，综合温度变化趋势、分合闸电流波形特征、操作累计次数等参数识别设备劣化趋势。当监测参数达到预警阈值时自动生成检修建议，实现从“定期修”向“状态修”的转变。

3.2 设备分级与差异化运维

根据设备故障后的影响范围与重要程度，将400V设备划分为三级。一级设备为进线柜、母联柜及重要消防负荷馈线柜，故障将造成车站一级负荷断电，采用双重化配置，巡检周期每月一次，状态监测全覆盖；二级设备为通风空调、电扶梯、给排水等动力负荷馈线柜，故障影响车站舒适度与服务功能，巡检周期每季度一次，关键回路在线监测；三级设备为普通照明、商业用电等馈线柜，故障影响范围有限，按常规周期维护。

3.3 标准化检修与质量管控

编制覆盖各类设备的标准化检修作业指导书，明确检修项目、工艺标准、质量验收要求及安全注意事项。以抽屉式断路器检修为例，须规定操作机构动作电压测试、触头磨损量检测与更换判据、灭弧室状态检查、绝缘电阻测试、保护定值核对等项目的操作方法和合格标准^[3]。推行检修作业卡制度，逐项执行确认并签字留存。建立检修质量追溯机制，历次检修记录电子化归档，形成完整设备健康档案。

3.4 智能化运维平台建设

建立低压配电智能化运维管理平台，集成设备信息管理、实时监控预警、检修计划排程、故障辅助诊断、备品备件管理等功能。平台通过统一通信接口汇集各变电所运行数据，运用大数据分析自动识别异常状态、生成预警信息和维修工单。故障发生时，平台根据保护动作信息和状态数据快速定位故障点、辅助判断原因。

3.5 人员培训与能力提升

建立分层分类培训体系：面向全体运维人员开展400V系统基础知识、安全操作和标准化检修工艺的常态化培训；选拔技术骨干开展保护装置调试、智能仪表配置、通信协议分析等专项技能培训；定期组织故障模拟演练与技能竞赛^[4]。建立技术人员能力矩阵和认证制度，关键岗位须通过理论考核与实操鉴定后方可上岗。

4 优化策略实施效果

4.1 故障指标对比

2025年初在某地铁线路逐步实施上述运维优化策略，至2025年底已连续运行一年。优化后，年故障次数从2024年的312次降至2025年的243次，降幅为22.1%。严重故障从7次降至2次，母线停电故障从12次降至4次。故障平均修复时间从7.5小时缩短至4.4小时，备件等待时间占比从42.7%降至21.5%。供电可靠率由99.76%提升至99.90%。

表2 优化策略实施前后主要指标对比

指标	2024年 (实施前)	2025年 (实施后)	变化幅度
年故障总数/次	312	243	-22.1%
严重故障/次	7	2	-71.4%
母线停电故障/次	12	4	-66.7%
故障平均修复时间/小时	7.5	4.4	-41.3%
供电可靠率/%	99.76	99.9	+0.14%

4.2 运维效率与成本效益

智能化运维平台上线后，日常巡检工作量减少约36%。在线监测与智能预警使设备异常得以及早发现处

理，故障返修率从实施前的11.2%降至4.0%。备品备件库存周转率提升27%。以该线路12座车站为统计范围，年度运维综合成本较优化前降低约21.0%。状态监测设备和智能化平台建设投入约138万元，投资回收周期约1.7年。

结束语

地铁400V低压配电设备的运行可靠性直接关系到运营安全与服务质量。本文基于2021—2025年故障数据的系统分析，揭示了以开关柜本体和配电线路为主的故障分布特征及夏季高发的时空规律，并据此提出了状态监测、分级运维、标准作业和智能平台相结合的综合优化策略。实施数据表明，上述策略在降低故障率、缩短修复时间和节约运维成本方面成效显著。后续应进一步深化设备全生命周期管理，探索基于人工智能的故障预测技术，并将优化经验向相邻专业设备运维推广，持续提升地铁设备系统整体运维水平。

参考文献

[1]康崇皓,周文卫,胡剑强.城市轨道交通牵引供电系统双向变流装置设计方案及综合效益[J].城市轨道交通研究,2025,28(1):267-272.

[2]高勋.地铁低压配电系统安装的供电可靠性[J].中国航班,2022(32):167-170.

[3]庞浩,倪海超,郝志升.基于大数据的地铁供电系统运行状态预测与维护[J].价值工程,2024,43(2):45-47.

[4]李昕,孙有恒,罗珊,等.城市轨道交通低压配电物联网方案[J].电工技术, 2026(6): 230-234.