

轨道交通供电系统可靠性与安全管理研究

王洪彬¹, 王瑾怡², 孙效飞³

(1. 莱西市交通运输局, 山东 青岛 266600;

2. 青岛青铁智慧城市服务运营管理有限公司, 山东 青岛 266000;

3. 嘉祥光大环保能源有限公司, 山东 济宁 272000)

摘要 本文围绕城市轨道交通供电系统运行可靠性保障与安全风险管控的核心工程需求, 全面梳理了轨道交通供电系统的整体架构与可靠性量化评价指标体系, 从设备本体、网架拓扑、运维管理、外部环境四个维度明确了制约系统可靠性的关键影响因素, 构建了涵盖网架结构优化、设备全生命周期管控、智能继电保护、闭环安全管理的可靠性提升与安全管理一体化技术体系, 确立了管控成效的量化评估方法。工程应用结果表明, 该体系能够显著降低供电系统故障发生频次, 提升系统供电可用率与故障应急处置效率, 可为城市轨道交通供电系统的安全稳定运行提供技术参考。

关键词 轨道交通供电系统; 供电可靠性; 安全管理; 风险识别; 继电保护

中图分类号: U231.8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.023

0 引言

城市轨道交通供电系统是为列车提供牵引动力、为车站及区间运营负荷提供电力保障的核心能源基础设施, 其运行可靠性直接关系到轨道交通线路的运营安全、准点率与乘客服务质量。本文以轨道交通供电系统的可靠性核心特性为切入点, 系统阐述系统的核心组成与可靠性量化评定标准, 深入剖析了影响系统可靠运行与安全管控的各类关键因素, 构建一体化的可靠性提升技术框架与全流程安全管控机制, 确立管控成效的量化评估方法, 以期对轨道交通供电系统的设计优化、运维管理与安全防护工作提供参考。

1 轨道交通供电系统核心构成与可靠性评定指标

1.1 系统核心构成

轨道交通供电系统整体划分为外部电源系统与内部供电网络两个层级, 核心组成单元包括: 外部高压输电线路、主变电所、中压环网配电系统、牵引供电系统(含牵引变电所、整流机组、接触网/接触轨)、动力照明供电系统、继电保护与自动化监控系统、应急备用电源系统^[1]。该系统需要同时满足列车牵引过程中冲击性、波动性的负荷用电需求, 以及车站、区间动力照明等连续性负荷的稳定供电需求, 因此要求系统具备高运行可靠性、强抗外界干扰能力以及故障快速自愈能力。

1.2 可靠性核心量化指标

建立多维度的可靠性量化评定指标体系, 核心指标包括: 供电可用率, 即系统有效供电时间占总运营时间的比例, 城市轨道交通核心线路要求不低于 99.99%; 平均无故障工作时间(MTBF), 表征系统连续无故障运行能力; 平均故障修复时间(MTTR), 表征故障处置与恢复供电的效率; 牵引供电系统电压合格率, 要求控制在额定电压的 $\pm 5\%$ 范围内; 继电保护装置正确动作率, 要求不低于 99.95%; 年故障停电时间, 核心线路要求全年累计故障停电时间不超过 5 分钟。

2 供电系统可靠性与运行安全的核心影响因素

2.1 设备因素

设备是系统可靠性的基础单元, 核心影响包括: 设备元器件质量与设计裕度不足, 导致设备先天可靠性缺陷; 设备长期运行后的老化劣化, 绝缘性能下降、机械特性漂移, 引发设备故障; 设备选型与运行工况适配性不足, 牵引整流机组、变压器等设备无法适配负荷冲击与波动, 长期处于过载或低效运行状态; 设备配套的辅助系统故障, 如冷却系统、操作电源故障, 引发主设备停运^[2]。

2.2 网架结构与系统配置因素

网架结构决定了系统的供电冗余与故障隔离能力, 核心影响包括: 外部电源供电冗余不足, 单电源线路故

作者简介: 王洪彬(1978-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 交通工程。

障导致主变电所全停；中压环网结构不合理，环网分段、联络开关配置不足，故障影响范围无法有效隔离；牵引变电所、主变电所备用互供能力不足，单所故障后负荷无法有效转供；继电保护配置与定值整定不合理，存在保护拒动、误动、越级跳闸风险，扩大故障影响范围。

2.3 运行与运维管理因素

运维管理是系统长期可靠运行的核心保障，核心影响包括：检修策略不合理，定期检修模式存在过修或欠修问题，无法及时发现设备隐性缺陷；运维作业不规范，违规操作、误操作引发人为电气故障；隐患排查与风险管控不到位，无法提前识别并消除潜在安全隐患；人员技能水平不足，无法精准处置设备异常与突发故障，导致故障处置时间延长。

2.4 外部环境及工况因素

外部因素是系统运行安全的重要诱因，核心影响包括：外部电网故障、电压波动、谐波污染，传导至轨道交通内部供电系统，引发设备保护动作；自然环境因素，雷击、暴雨、地质沉降、高温高湿环境，导致设备绝缘损坏、线路短路；异物侵入、外力破坏，引发接触网短路、电缆故障；列车运行工况变化，高峰时段高密度行车引发牵引负荷骤增，导致供电设备过载、电压跌落。

从国内城市轨道交通已投运线路的运维统计数据来看，绝大多数供电系统停运故障并非单一影响因素独立引发，而是设备、网架、运维、外部环境四类因素耦合叠加形成的连锁失效。设备绝缘老化带来的性能劣化，会大幅放大雷击、外部电网波动等外部冲击的故障风险；网架结构冗余度不足的先天缺陷，会让单台设备故障快速扩散至整条供电分区，扩大停电影响范围；而运维检修不到位导致的隐性缺陷未及时处置，更是绝大多数故障从隐性隐患演变为显性事故的核心推手。当前国内部分早期投运的轨道交通线路已进入设备老化集中期，叠加网络化运营后客流持续攀升带来的牵引负荷增长，供电系统的可靠性管控压力持续加大。传统碎片化、被动式的故障处置与管控模式，已无法适配新形势下的安全运营需求，亟需构建全流程、一体化的可靠性提升与安全管控体系，从根源上化解系统运行的各类风险。

3 轨道交通供电系统可靠性提升技术体系

3.1 网架结构优化与冗余配置技术

以“分区供电、冗余互备、故障隔离、快速转供”为核心优化网架结构：外部电源采用双回路独立电源供电，两路电源来自不同区域变电站，避免同塔架设，保障外部电源可靠性；主变电所采用两台主变压器分

列运行、互为备用，相邻主变电所之间设置联络通道，实现故障情况下的负荷转供；中压环网采用双环网结构，合理设置分段开关与联络开关，实现故障区段快速隔离，非故障区段持续供电；牵引变电所采用双机组冗余配置，单台整流机组故障时，剩余机组可满足高峰时段牵引负荷需求，保障牵引供电连续性^[3]。

3.2 设备全生命周期可靠性管控技术

构建覆盖设备选型、安装调试、运行监测到退役更换的全生命周期管控体系：设备选型阶段，采用高可靠性、免维护或少维护设备，明确可靠性指标要求，开展型式试验与可靠性验证；安装调试阶段，严格执行施工验收规范，开展绝缘试验、耐压试验、保护定值校验，保障设备安装质量；运行阶段，搭建设备状态在线监测系统，对变压器、整流机组、高压开关柜、电缆等核心设备的温度、局放、绝缘参数、机械特性进行实时监测，实现健康状态动态评估；基于设备健康状态推行状态检修模式，替代传统定期检修，精准消除隐性缺陷，避免过修与欠修。

3.3 继电保护与故障快速自愈技术

优化继电保护配置，构建“主保护、后备保护、异常告警”三级保护体系：牵引供电系统采用光纤差动保护作为主保护，故障动作时间控制在30 ms以内；中压环网配置自适应过流保护、零序保护，优化备自投装置逻辑，实现故障隔离后负荷自动转供，转供时间控制在200 ms以内；搭建故障智能定位系统，基于行波法、阻抗法实现电缆、接触网故障点精准定位，定位误差控制在5 m以内，缩短故障排查时间；构建智能自愈控制架构，实现故障自动识别、自动隔离、自动恢复，最大限度缩小故障停电范围^[4]。

3.4 智能化监控与预警技术

升级供电监控系统，构建“边缘感知—边缘计算—云端管控”的智能化监控体系：基于SCADA系统整合设备状态监测、继电保护、电能质量监测数据，实现全系统运行状态集中监控与统一调度；搭建供电系统数字孪生模型，模拟不同工况下的系统运行状态，开展故障仿真与风险预判，提前识别系统薄弱环节；采用人工智能算法构建设备故障预警模型，基于历史与实时数据预测设备劣化趋势，提前发出预警信号，实现从“事后处置”向“事前预防”的转变。

3.5 电能质量优化与抗扰动技术

针对牵引整流机组非线性负荷产生的谐波污染、无功功率波动，以及外部电网电压扰动引发的系统可靠性问题，构建全流程电能质量治理体系。在牵引变电所配置有源电力滤波器与静止无功发生器，实现谐

波动态治理与无功功率就地平衡,将系统谐波总畸变率控制在 5% 以内,功率因数稳定在 0.95 以上,消除谐波引发的设备附加损耗、绝缘老化与保护误动风险。在关键负荷节点配置动态电压恢复器,抑制电压暂降、暂升对敏感控制设备的影响,提升系统抗电网扰动能力。同时,建立电能质量在线监测系统,实现谐波、电压偏差、三相不平衡度等指标的实时监测与动态治理,从电能质量维度筑牢系统运行可靠性基础。

4 供电系统全流程安全管控体系构建

4.1 全周期闭环安全管控机制

构建覆盖设计、施工、运维、退役全生命周期的闭环管控机制:设计阶段开展系统可靠性仿真与安全风险评估,优化系统设计,预留充足安全裕度;施工阶段严格执行安全技术交底与隐蔽工程验收制度,杜绝施工质量隐患;运维阶段建立“作业有票、操作有令、过程有控、事后有评”的作业管控机制,严格执行工作票、操作票制度,规范现场作业行为;退役阶段对老旧设备开展安全评估,制定更换计划,避免设备超期服役引发安全风险^[5]。

4.2 风险分级管控与隐患排查双重预防机制

建立双重预防机制,实现安全风险源头管控:基于系统风险辨识结果划分风险等级,制定分级管控措施,明确管控责任主体,实现重大风险重点管控;建立常态化隐患排查治理机制,制定隐患排查清单,开展日常排查、专项排查、季节性排查,对排查出的隐患实行闭环管理,做到责任、措施、资金、时限、预案“五落实”,实现隐患动态清零。

4.3 应急处置与联动管控体系

构建系统化应急处置体系,提升突发故障应对能力:制定分级应急预案,针对外部电源故障、主变电所全停、牵引供电系统故障等不同场景,制定专项处置方案,明确处置流程与责任分工;定期开展应急演练,提升运维人员故障处置能力与应急响应速度;建立与电网企业、轨道交通运营、应急管理等部门的联动机制,实现故障信息快速共享与协同处置,最大限度降低故障影响。

4.4 人员与制度保障体系

完善安全管理制度体系,制定涵盖设备管理、运维作业、安全管控、应急处置的全流程管理制度,明确各岗位安全职责;建立常态化人员技能培训体系,开展设备操作、故障处置、安全防护等专项培训,定期开展技能考核,提升运维人员专业能力与安全意识;落实安全生产责任制,将安全管控责任分解到各岗位、各环节,形成全员、全过程、全方位的安全管控格局。

5 管控效果量化评定方法

构建多维度的管控效果量化评定体系,采用层次分析法确定各指标权重,开展综合评定。核心评定维度包括:可靠性指标提升率,重点考核供电可用率、MTBF、故障发生率的变化情况;安全管控合规率,考核制度执行、作业规范、隐患整改的合规情况;故障处置效率提升率,考核 MTTR、故障定位时间、负荷转供时间的优化情况;电能质量达标率,考核电压偏差、谐波畸变率、三相不平衡度的合规情况。通过优化前后的指标对比,扣除外部工况变化的影响,量化评定可靠性提升与安全管控的实际效果,实现管控体系的持续迭代优化。在实际工程应用中,可将上述量化指标纳入月度运维考核体系,结合线路客流变化、设备老化程度动态调整管控重点,定期复盘典型故障处置流程,不断完善应急预案与检修计划,使管控体系始终适配线路的实际运营需求。

6 结束语

本文围绕轨道交通供电系统的运行可靠性保障与安全风险管控需求,全面梳理了系统的核心组成架构与可靠性量化评价指标体系,深入剖析了四大维度的关键影响因素,构建了融合网架结构优化、设备全生命周期管控、智能继电保护与闭环安全管理的一体化技术体系,确立了管控成效的量化评估方法。该体系覆盖源头设计、过程管控、智能预警与应急处置全流程环节,能够显著提升供电系统的运行可靠性,有效降低各类故障发生风险,最大限度缩小故障影响范围,为城市轨道交通线路的安全、稳定、高效运营提供坚实的技术支撑。未来研究可深入推进人工智能与数字孪生技术在供电系统全生命周期管控中的融合应用,研究轨道交通供电系统与新型电力系统的协同运行与互动机制,构建更具智能化、高效化与韧性的轨道交通供电安全管控体系。

参考文献:

- [1] 左大军.地铁供电系统的可靠性和安全性分析方法研究[J].冶金管理,2023(17):82-84.
- [2] 王昶.城市轨道交通直流牵引供电系统杂散电流危害分析及对策[J].电气时代,2026(02):101-104.
- [3] 裴艳霞.基于 ICPT 的轨道交通非接触式牵引供电系统可靠性研究[D].兰州:兰州交通大学,2021.
- [4] 王先磊.城市轨道交通通信智能运维系统体系构建关键技术研究[J].城市轨道交通研究,2025,28(07):217-221.
- [5] 潘泉良,田名扬,肖晓琳.地铁接触轨供电系统故障诊断与快速恢复策略[J].现代城市轨道交通,2025(11):119-121.