

地铁电气系统可靠性分析与提升措施

吴世耀

浙江海宁轨道交通运营管理有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i4.8861

[摘要] 随着城市轨道交通网络规模不断扩大, 列车运行密度不断增大, 电气系统对地铁安全运营起到越来越大的作用。电气系统一有故障就会引起连锁反应, 波及面大。本文从系统构成和运行特点入手, 对地铁电气系统在实际运行中出现的可靠性问题进行分析, 结合典型故障模式, 总结出其产生的原因, 并提出相应的优化措施, 为提高地铁电气系统的运行稳定性提供一定的参考。

[关键词] 地铁电气系统; 可靠性分析; 提升措施

Reliability Analysis and Enhancement Measures for Subway Electrical Systems by

Wu Shiyao

Zhejiang Haining Rail Transit Operation Management Co., Ltd.

[Abstract] With the continuous expansion of urban rail transit networks and increasing train operation density, electrical systems play an increasingly critical role in ensuring subway safety. Any failure in electrical systems can trigger chain reactions with extensive ripple effects. This study analyzes reliability issues in subway electrical systems during actual operations by examining system architecture and operational characteristics. Through case studies of typical failure modes, we identify root causes and propose corresponding optimization measures, providing actionable insights to enhance operational stability of subway electrical systems.

[Key words] subway electrical system; reliability analysis; improvement measures

引言

地铁运营体系当中, 电气系统牵涉到供电、控制、通信等诸多重要部分, 它是保证列车正常运转的根基支撑。从实际运营情况可知, 在高负荷的运行条件下, 由于设备老化、环境干扰、管理不善等各方面的问题逐渐暴露出来, 故障率也相应提高。尤其在早晚高峰时段, 一个小的电气异常也会变成运营事件。因此, 对电气系统可靠性进行系统的梳理并有针对性地提高, 已经成为目前运维工作的一个重点方向。

1 地铁电气系统构成及运行特点

1.1 电气系统主要组成

地铁电气系统一般由供电系统、牵引供电系统、低压配电系统和控制及监测系统组成。供电系统是将外部电源引入车站和区间, 牵引供电系统是直接给列车提供动力支持, 低压配电系统是为车站照明、通风、消防等辅助设备供电, 控制与监测系统是实现对整个电气网络运行状态的实时掌握。现场中各个子系统不是孤立存在的, 而是一层层地依靠电缆和通信链路形成一个高度耦合的系统。

1.2 系统运行特点

地铁电气系统是连续工作时间长、负荷变化大、环境恶劣的设备。一方面系统几乎全年不停机工作, 设备长时间带载运转; 另一方面列车启动、制动都会引起瞬间电流的变化, 对供电稳定性有较高的要求。另外地下空间湿度大、粉尘多, 会对设备的绝缘性能、接点的可靠性造成一定的影响, 加上这些因素一起存在, 使得系统的运行工况更加严格。

1.3 可靠性评价指标

实际评价时一般用故障率、平均无故障时间、供电可靠率等来反映系统的运行状况。供电可靠率属于体现运营影响程度的指标, 平均修复时间为运维响应速度。就运营单位而言, 不但关心故障出现的次数, 还更加看重故障恢复的速度以及它的影响范围。

2 地铁电气系统可靠性问题分析

2.1 设备层面问题

从已有线路运行情况可知, 设备老化不是单一部件性能下降那么简单, 而是表现出一种“系统性退化”的趋势。断路器触点在长时间的频繁分合闸中, 接触电阻增大、发热加剧, 初期只是温升异常, 但是当负荷较大时就会变成保护动作或者拒

动。类似这种情况，即使继电保护装置仍然可以正常使用，但是其动作值发生漂移、响应时间延长，一旦出现重要时刻无法及时切除故障的情况就出现了。另外一些早期建设的线路，在设备选型上更多的是根据当时所预测的客流以及负荷水平来进行选择，但是随着城市发展，实际用电需求远远大于当初的设计值。部分变压器、电缆、开关设备长时间工作在接近上限的运行状态，安全裕度不断被压缩。在这种情况下，即使没有明显的故障，也会出现“亚健康运行”的状态，当叠加环境或者操作因素时，就会引起异常。

2.2 运行环境影响

地铁地下空间的环境条件对电气设备影响是长期的、隐蔽的。以潮湿问题为例，在排水条件一般或者地下水位较高地段，设备间的湿度常年偏高，绝缘材料在这种环境下会慢慢吸湿，绝缘电阻降低，但是很难在短期内通过巡检发现。当发生闪络或者击穿的时候，故障已经发展到了比较严重的程度。粉尘问题也不能小视。隧道内列车运行时会产生大量的细微颗粒物，这些颗粒物沉积在配电柜、接线端子等地方之后，一方面影响散热，另一方面在潮湿的环境下还会形成导电通道。另外部分设备间通风条件差，热量积聚严重，在夏季高温时设备的实际运行温度比设计工况高很多，对电子元件、绝缘部件的寿命都有持续的影响。

2.3 运维管理问题

实际运维中出现的一些问题并不是由于设备本身的故障造成的，而是由管理方式引起的。目前还有部分线路仍然采用周期性检修的方式，这种模式在设备状态比较稳定的时候可以使用，但是在负荷波动大或者设备老化的时候，就会出现维护节奏和实际需要不匹配的情况。有些设备已经出现异常征兆，但是没有达到检修周期就被推迟了处理；而一些状态良好的设备却反复进行拆检，从而加大了人为干预的风险。故障记录以及数据管理方面也存在着不足。现场记录大多只停留在简单的描述上，没有对故障原因、处理过程以及后续的影响进行系统的整理，造成类似的故障问题反复发生而不能总结出规律。随着设备数量的增加，如果没有统一的数据平台的支持，单凭经验很难进行精细化的运维。

2.4 系统设计与协同问题

从系统角度来讲，可靠性问题有时候不是单个系统出现故障，而是各个子系统之间互相影响造成的。设计阶段接口划分不清、标准不统一，后期接入新设备或者进行系统升级时就会出现兼容性问题。不同的厂家设备之间的通信协议不一样，会造成监控数据不完整或者滞后，从而影响到调度的判断。另外，冗余设计如果没有针对性，也起不到真正的效果。实际运行中，有的备用电源虽然配置齐全，但是切换过程依靠人工确认或者逻辑判断比较复杂，在突然发生的情况下很难及时投入使用。

另外一些系统对于分区隔离考虑不够周全，在某个节点出现故障的时候，其影响范围会沿着供电或者控制链路向四周蔓延，从而产生不必要的扩大化影响。此类问题一般在设计阶段不容易被发现，在高强度的运行下才会慢慢暴露出来。

3 地铁电气系统典型故障模式及原因分析

3.1 供电系统故障

供电系统故障一般都会出现突发性，影响面广的现象。从实际运行情况可知，外部电源波动是造成牵引供电不稳定的一种常见原因，电网侧短时间内的电压下降或者频率异常都会直接传到地铁主变电所，从而对牵引供电产生影响。另外，主变压器长时间高负荷运行时，会出现绕组温升异常、油质变坏等状况，这些隐患如果不经检测就被忽略，后期就会变成保护跳闸或者设备损坏。接触网或者第三轨供电系统的故障形式更多是与运行环境、机械状态有关。受电弓与接触网接触不良、第三轨供电靴磨损严重都会造成供电不连续，引起列车牵引力波动或者短时失电。在弯道或者道岔区段，这类问题出现的概率较高，要结合线路条件进行分析。

3.2 配电系统故障

配电系统故障一般开始时不会很明显，具有一定的渐进性。以开关设备误动为例，可能是由于保护整定值设置不合理或者设备本身性能下降造成的，在负荷波动或者瞬时冲击电流出现的时候，很容易引起误跳闸。电缆绝缘击穿大多由于长期受潮、老化引起，在电缆沟排水条件差的地方，容易出现局部放电，进而发展成击穿故障。接线端子松动在现场也比较多见，在振动大的设备附近，比如风机、电机等回路中更容易发生。初期只会有接触电阻稍有增大，但是随着运行时间的增加，会产生局部发热，严重时会造成烧蚀或者短路。此类问题具有很强的隐蔽性，如果没有有针对性的检测手段，很难及时发现。

3.3 控制系统故障

控制系统故障更多是信息层面的异常，它的直接表现不一定是设备停运，而是“看不清、判不准”。通信链路断开或者数据丢失都会造成监控系统显示不全，调度人员不能及时了解现场情况。此时，即使电气设备本身还在运行，也会因为信息不准确而做出保守甚至是错误的调度决定。另外一些控制系统的软件逻辑设计存在一定的不足，当出现边界工况或者异常组合情况的时候，会出现逻辑判断不一致的情况。备用电源切换过程中信号反馈滞后，系统把切换失败当作一种错误来判断，于是会再次执行操作，从而加大系统的冲击。此类问题要依靠实际运行数据来不断修正，不能只依靠设计阶段的理论验证。

3.4 故障影响分析

从整体上看，地铁电气系统故障有很强的联动性。一个看起来很小的问题，在系统耦合的作用下很快就会扩大。配电柜故障跳闸会造成车站部分设备停电，进而影响通风、照明和信

号系统的正常工作,对列车的正常运行造成影响。此外,故障影响还与发生时段密切相关。高峰时段由于列车密度大、系统负荷高,同样的故障也会造成更大的运营干扰。而在低峰或者夜间检修时段,影响范围更容易被控制。因此,在对故障进行分析的时候,一方面要重视设备自身失效机理的分析,另一方面还要联系运行工况、系统结构和调度策略等各方面因素加以考虑,这样才能更加接近实际情况,为之后的改进工作给予支撑。

4 地铁电气系统可靠性提升措施

4.1 优化系统设计

新建线路或者既有线路改造时,系统设计阶段的选择会影响到后期运行的稳定。从实际经验来说,仅仅增加设备数量并不能提高可靠性,关键在于结构是否合理。在供电系统中采用分区供电、分段隔离的方法,在局部发生故障的时候可以快速“切小范围”,不会影响到整条线路的运行。部分线路在改造之后,把原来跨度较大的供电区段进一步细分,故障处理的灵活性大大提高。接口标准统一也十分重要。不同系统、不同厂家设备之间如果没有统一规范,后期扩展或者替换时就会出现通信不稳定、信息不完整等问题。因此,在设计阶段就应该留出一定的兼容空间,尽量使用成熟、通用的技术标准,减少后期反复调整所造成的不确定性。

4.2 推进智能化监测

由于技术的发展,单靠人工巡检已经不能满足高强度的运营要求了。采用在线监测手段,可以对重要的设备进行“持续观察”,而不能只是“间断查看”。变压器油温、开关柜触点温度、电缆局部放电等参数进行实时采集,一旦出现异常趋势,系统就会提前预警,而不能等到故障发生后再处理。就实际应用的效果来说,这样的监测手段的价值不在于“发现故障”,而在于“发现变化”。很多设备在发生故障之前都会有一个缓慢变化的过程,如果可以对这些变化进行数据曲线的捕捉,那么就可以提前发现并处理问题,从而避免问题的扩大。但是这也对数据处理能力提出了更高的要求,不能只做简单的采集,还要结合运行经验来判断。

4.3 改进运维管理模式

运维方式由原来的“按周期修”向现在的“看状态修”转变是一个比较明显的趋势。实际操作时可以从重要的设备开始,逐渐形成状态评价体系,依靠运行数据、以往的故障记录等来动态地安排检修任务。既不会造成不必要的拆检,又能将精力集中到那些有风险的设备上。而且故障数据的积累和利用也要加强。许多现场问题具有重复性,若能把处理过程、原因分析、改进措施等整理成案例库,对以后的工作将起到很大的作用。一些单位已经开始了尝试,利用简单的信息化平台将分

散的经验逐渐沉淀下来,效果比较明显。

4.4 提升人员能力与管理水平

再好的系统也需要人的参与。从现场情况来看,各个班组、各个人对于同样的问题处理起来效率以及判断的准确性会有所不同,在一定程度上会影响到整个运行的质量。因此有针对性的培训就显得十分重要,特别是结合实际案例进行讲解,比单纯的理论培训更容易被接受。另外,故障复盘也是容易被忽略但是很有价值的一个环节。通过对典型事件的回顾可以找到技术层面的原因,也可以找到流程、沟通方面的问题。从管理的角度来讲,简化应急处置的程序,减少不必要的层次传递,使得一线人员在紧急情况之下可以立刻采取行动。

4.5 完善应急保障体系

由于电气系统故障不可避免的存在,所以建立完善的应急保障体系就显得尤为必要。从实践来看,分级响应机制可以加快处理速度,不同的等级的故障有不同的处理程序,不会造成资源分配过多或者过少的情况。从具体措施上看,一方面要在重要的地方设置应急电源或者临时供电设施,保证重要负荷不间断供电;另一方面要合理储备常用备品备件,缩短等待时间。另外定期开展应急演练也十分重要,通过模拟真实的场景可以及时发现存在的问题并加以改进。相比于纸面预案,经过多次演练改进的流程在实际操作中会更加顺畅,也更能符合现场情况。

结束语

地铁电气系统的可靠性不是由某个单一因素决定的,在设备状态、运行环境、系统结构、运维管理等各方面共同作用下形成的结果。通过不断改善系统结构、采用更加精细的运维手段,提高人员应对复杂情况的能力,在一定程度上可以降低故障发生的概率,减小故障的影响时间。后续工作要依照不同的线路具体情况采取差异化的改善,不断实践与反馈以不断改进有关的技术和管理措施,进而切实保证城市轨道交通的安全稳定运行。

[参考文献]

- [1]孟岑辉.基于Markov模型的高速列车牵引传动系统可靠性评估[J].铁道学报,2025,38(8):23-27.
- [2]刘志刚.城轨列车牵引逆变系统可靠性评估[J].铁道学报,2024,36(9):34-38.
- [3]褚敏,李小波,王睿轶,等.基于灰色优化的地铁牵引逆变系统可靠性预测[J].计算机仿真,2025,37(7):168-171.
- [4]宗刚,张超,王华胜.基于复杂网络理论的高速列车牵引系统部件可靠性研究[J].中国铁道科学,2024,35(1):94-97.
- [5]庞楠,贾鹏,王立权,等.水下连接器结构可靠性分析[J].哈尔滨工程大学学报,2024(37):1-7.