

基于全生命周期的地铁供电设备维保风险分级识别与动态防控机制

李红超

中铁电气化局集团有限公司 北京 100141

DOI:10.12238/ems.v7i7.14281

[摘要] 本研究聚焦地铁供电设备全生命周期的维保工作, 尝试搭建一套行之有效的风险分级识别与动态防控体系。把设备生命周期划分成制造安装调试、服役、改造淘汰三个阶段, 对各阶段风险传导过程展开分析, 从而构建起多维度风险分级识别模型。此模型从设备、环境、运维这三个维度选取评价指标, 运用专门方法计算各指标权重。另外搭建的动态防控机制, 涵盖实时监测数据流处理、风险阈值动态调整以及智能决策支持系统。最终借助某城市地铁牵引变电所的实际案例, 证实这套机制在改善地铁供电设备维保成效方面的有效性。

[关键词] 地铁供电设备; 全生命周期; 风险分级识别

引言

地铁在城市公共交通体系里占据核心地位, 其供电设备运行稳不稳定, 直接影响着地铁系统的安全和运营效率。供电设备要是出了故障, 地铁就可能停运, 不仅会给乘客出行带来麻烦, 严重时还可能引发安全事故。如今, 城市轨道交通发展迅速, 地铁供电设备的规模越来越大, 设备类型也愈发复杂, 传统设备维保方式渐渐难以适应实际需求。在这样的情况下, 将全生命周期管理理念引入地铁供电设备维保工作, 对维保风险进行分级识别, 搭建动态防控机制, 能助力实现设备精细化管理, 提高设备运行可靠性, 降低运维成本, 保障地铁系统安全稳定运行, 具有突出的现实意义和应用价值。

1. 全生命周期维保特征分析

制造或安装调试阶段, 大约 15% 的风险源存在。设备从生产车间转移至施工现场, 这期间设备质量以及安装工艺, 对后续设备运行的稳定性有着极大影响。曾有地铁气体绝缘金属封闭开关设备 (GIS), 因电缆绝缘层被击穿、金属护层接地不规范引发跳闸, 致使多个地铁站整站停电。服役期的风险源占比高达 65%, 此阶段是设备运行的关键时期。以重庆地铁平场主变电站来说, 自 2012 年投入运营, 至今已历经

13 年, 设备老化现象严重, 绝缘材料老化、电缆接头松动等故障频繁发生^[1]。而且, 设备服役状态明显受到运行环境以及运维管理水平的影响。当设备技术性难以满足运营要求, 或达到使用年限时, 便进入改造淘汰期, 这一阶段风险源占比 20%。不过, 淘汰环节若处理不当, 极有可能造成资源浪费与环境污染, 日本废电池污染井水事件, 便是一个惨痛教训。

1.2 各阶段风险传导机制

在制造安装调试阶段, 要是设计环节对实际工况考虑不周全, 让设备额定参数和实际不符, 设备就会长期处于过载或欠载状态, 老化速度也会加快。就拿某地铁项目来说, 由于供电设备容量设计过小, 在高峰期设备得长时间过载运行^[2]。另外, 一些企业在设备制造过程中使用劣质原材料, 像电缆绝缘层材质不达标, 这就给短路故障埋下了隐患。不仅如此, 安装施工不规范, 比如配电柜接线不牢固, 一开始接触电阻就会增大, 造成局部发热, 时间一长就可能引发线路短路。到了服役阶段, 运行环境、设备老化和运维管理之间相互作用, 形成一个错综复杂的风险传导网络。以变压器为例, 长时间运行会让绝缘油性能变差, 进而可能引发短路; 电缆接头要是松动, 电阻增大, 还有可能导致火灾。恶劣的

运行环境,像高温、潮湿,再加上运维管理不到位,小故障很容易就发展成大故障。

2. 多维度风险分级识别模型

2.1 风险评价指标体系构建

地铁直流线缆在运行时,工作电压能达到 1500V,温度常常超过 90℃。一旦发生短路或过载,线缆温度会急剧上升,这无疑会加速绝缘材料的降解过程^[3]。为评估绝缘老化风险,一般会开展热老化试验,以线缆断裂伸长率降低至初始值的 50%作为老化的判定标准,再借助 Arrhenius 方程,推算出车载线缆的剩余寿命。接触电阻对车载设备的导电性能影响显著,不同类型的开关,对接触电阻的要求也不尽相同。部分开关要求接触电阻在 10-20mΩ 以下,而有些则要求在 0.1-0.5Ω 以下。按照 GB5095 标准规定,采用“接触电阻-毫伏法”对接触电阻进行检测,测试过程中,开路峰值电压不能大于 20mV,测试电流不能超过 100mA,以此来判断接触电阻是否超出标准范围。

夏季,地铁车站要把站厅层温度控制得比外界低 2-3℃,且不能超过 30℃,站台层温度在此基础上还要再低 1-2℃,同时将湿度维持在 40%-60%。一旦温湿度超出这个范围,设备绝缘就容易受潮,再加上酸碱盐雾的影响,金属部件腐蚀速度会加快。为应对这一情况,通常会在车站和隧道内安装温湿度传感器,对环境温湿度进行实时监测,还要定期检查设备腐蚀程度,从而评估腐蚀风险。列车运行时产生的振动频率集中在 30-80Hz。为评估振动冲击对设备结构和性能造成的影响,会在设备关键部位安装振动传感器,采集并分析振动数据,依据《城市区域环境振动测量方法》开展相关评估工作。

依据《城市轨道交通设施设备运行维护管理办法》,每个月对接触网的巡查不能少于 1 次,巡查期间还要对导高、拉出值等关键参数进行监测。为了让巡检更合理,得综合设备类型、运行环境,还有历史故障数据,来确定合适的巡检周期。备件周转率能直观反映备件管理的水平,它的计算方法

为 $\text{存货周转率}=\text{产品销售成本}/\text{平均存货成本}$ 。通过优化采购计划,做好库存管理,能够提升周转率,保证设备维修可以及时开展。

2.2 权重计算方法

层次分析法能够把复杂的决策问题,按照目标、准则和方案等不同层次进行拆解,将定性与定量分析结合起来,从而确定各个指标的权重。在地铁供电设备风险评估工作中,首要任务便是构建判断矩阵。可以邀请地铁供电设备领域的资深专家,围绕设备、环境、运维这三个一级指标,以及绝缘老化速率、温湿度腐蚀指标等二级指标,进行两两重要性的对比。按照特定标度进行量化打分,比如专家认为设备因素里的绝缘老化速率,比环境因素中的温湿度腐蚀指标更重要一些,就给它打 3 分。完成打分后,对判断矩阵的特征向量进行计算,并做归一化处理,这样就能得到各指标的相对权重。为了确保权重合理,还得计算判断矩阵的一致性指标和一致性比例。只有当一致性比例小于 0.1 时,判断矩阵才通过一致性检验,得到的权重结果才可靠。

熵权法基于信息熵理论,通过数据离散程度来确定指标权重。在地铁供电设备风险评估时,首先要对设备、环境、运维等各因素的指标数据开展标准化处理,以此消除量纲差异。比如,把绝缘老化速率、巡检周期这些单位不同的数据,统一转化为无量纲数据。依据信息熵定义,计算各指标的信息熵。信息熵数值越小,表明该指标离散程度越大,在风险评估里的作用就越重要,相应权重也就越高。实际操作中,通过特定公式算出各指标的熵权,并将其用作风险评估的权重。这种根据数据自身特征确定权重的方法,能够显著降低主观因素的影响,让评估结果更客观、准确。

3. 动态防控机制建构

3.1 实时监测数据流处理

为打造一套实时且全面的监测体系,地铁运维部门在接触网的关键节点,大量部署高精度的温度传感器、振动传感器和电流传感器。在国内某一线城市的地铁项目里,这些传

传感器每隔 50 米就会设置一组, 每 200 毫秒采集一次数据, 借此精准获取接触网的温度、振动频率和电流等运行参数。不少城市还借鉴上海地铁的成熟经验, 引入物联网技术, 把接触网悬挂状态检测车融入监测网络。检测车会在每日的非运营时段开展巡检, 收集接触网的拉出值、导高和磨耗等数据。此外, 配合视频监控、能耗监测以及可视化接地等系统, 地铁运维部门便能全方位感知接触网的运行状态, 成功解决了监测盲区的问题, 为接触网稳定运行筑牢了保障。

经测试, 5G 网络能将传感器数据传输延迟控制在 10 毫秒以内, 充分满足数据实时性的要求。面对海量、多源异构数据, 运维部门采用 Apache Flink 大数据流处理框架搭建数据处理平台。这个平台每日处理数据量超过 10TB, 通过既定清洗规则, 去除重复、错误数据, 运用降噪算法剔除环境干扰产生的噪声数据, 再借助关联分析技术, 挖掘不同设备数据间的潜在联系, 确保监测数据准确可用, 为接触网稳定运行筑牢保障。

3.2 风险阈值动态调节策略

针对地铁变压器, 收集了某地铁线路 50 台变压器近 3 年的绕组及铁芯温度、负载电流等多类数据, 运用梯度提升决策树算法进行建模。完成训练的模型经实际验证, 变压器故障预测准确率在 85% 以上。依据模型预测结果, 同时考虑设备重要程度和运行环境的改变, 运维团队实时对风险阈值作出调整。夏季高温期间, 一旦变压器运行环境温度超过 35℃, 便将绕组及铁芯预警阈值从 130℃ 降至 125℃, 从而提前预警。当变压器处于非高峰时段, 运行状态稳定, 各项参数波动较小时, 运维团队会将绕组及铁芯预警阈值升至 130℃, 以此减少误报。运维团队每季度还会组织专家评估和优化风险阈值, 根据新的运行数据和故障案例对阈值作出调整, 保障阈值的准确性与有效性。

3.3 智能决策支持系统设计

智能决策支持系统把设备全生命周期管理数据、实时监

测数据以及风险评估结果等多源数据进行整合, 搭建统一的数据中心。就拿某地铁线网来说, 数据中心存储了 10 余类设备从设计参数、采购信息, 到安装记录、维修历史的全生命周期数据, 还囊括 3000 余个传感器传来的实时监测数据。在此基础上, 系统运用数据挖掘和机器学习算法对数据开展深度剖析, 采用 Apriori 算法挖掘设备故障与运行参数、环境因素间的关联规则。分析结果显示, 当接触网温度突破 40℃, 电流超过额定值 120% 时, 故障发生概率会提升 80%。

一旦系统检测到某牵引变电所设备异常, 模型会依据故障类型和严重程度, 参考过往维修记录, 迅速生成最优维修方案。要是确定需更换故障部件, 系统自动匹配库存备件信息, 调度距离最近且具备相应资质的维修人员前去处理。系统还借助大屏展示设备运行状态、风险等级、维修建议等信息, 运维人员借此便能直观了解设备情况, 快速做出决策, 显著增强运维决策的科学性, 提升运维效率。

结论

本文聚焦地铁供电设备全生命周期维保工作, 创建风险分级识别和动态防控机制。剖析设备在各生命周期阶段的风险传导路径后, 从设备、环境、运维这三个维度搭建风险分级识别模型, 采用多种方式确定指标权重。在此基础上, 搭建起包含实时监测、阈值调节以及智能决策功能的动态防控机制。以地铁牵引变电所为例进行验证, 这套机制切实增强了设备维保成效。

[参考文献]

- [1] 于秋波, 齐雯, 刘畅. 天津轨道交通供电智慧运维的建设与应用[J]. 自动化应用, 2023, 64 (19): 175-178.
- [2] 林炳城, 张俊强, 余跃强. 基于智能化系统优化地铁供电设备运维工作的研究[J]. 电气技术与经济, 2023, (05): 25-28.
- [3] 张栋梁, 王刘辉. BIM 技术在地铁供电系统全生命周期应用[J]. 铁路技术创新, 2021, (05): 94-98.