

# 电气化铁路供电系统安全风险评估体系研究

薛宇通

中国神华能源股份有限公司神朔铁路分公司 陕西 榆林 719316

**摘要:** 电气化铁路供电系统是列车安全运行的核心支撑,其安全稳定直接关系到铁路运输安全与效率。本文结合供电系统构成与风险特征,从设备、环境、人为、系统四维度识别风险,构建三级评估指标体系,采用层次分析法确定指标权重,结合模糊综合评价法构建评估模型,通过实例验证体系合理性与实用性,最终提出优化建议,为供电系统安全风险防控提供科学依据与技术支持。

**关键词:** 电气化铁路;供电系统;安全风险;评估体系

**引言:** 随着电气化铁路的快速发展与运营规模的不断扩大,供电系统运行环境愈发复杂,设备老化、极端天气、人为操作不当等多种因素易引发安全事故,严重影响铁路运输秩序与人员生命财产安全。当前现有评估体系存在指标不全面、评估方法不贴合实际等问题,难以满足风险精准防控需求。因此,开展电气化铁路供电系统安全风险评估体系研究,构建科学完善的评估框架,对提升系统抗风险能力、保障铁路安全运营具有重要现实意义。

## 1 电气化铁路供电系统相关理论与风险特征分析

### 1.1 电气化铁路供电系统构成与工作原理

(1) 供电系统核心构成:牵引变电所是核心枢纽,负责将电力系统的高压电能变换为适合电力机车的电压;接触网是电能传输的载体,直接向电力机车供电;馈线系统承担电能输送任务,连接牵引变电所与接触网;保护装置用于监测系统运行状态,及时切断故障电路,避免事故扩大。(2) 系统工作原理:首先从国家电力系统引入高压电能至牵引变电所,通过主变压器将高压电变换为牵引网所需电压,经馈线系统输送至接触网;电力机车通过受电弓与接触网接触取电,将电能转化为机械能驱动列车运行,用过的电能经回流线返回牵引变电所,形成完整供电回路。

### 1.2 电气化铁路供电系统安全风险核心特征

(1) 风险性特征:隐蔽性体现为接触网隐患、电缆破损等不易直观发现;关联性表现为一处设备故障可能引发连锁反应,如牵引变电所故障会导致整片区域供电中断;突发性多由雷击、设备绝缘击穿引发,无明显预兆;危害性体现在故障会造成列车停运、设备损毁,甚至危及人员安全,如接触网断线可能引发触电事故。(2) 特殊性特征:受自然环境影响显著,暴雨、暴雪会损坏接触网和牵引设备;行车负荷波动大,高峰时段负

荷骤增易导致设备过载;设备长期处于户外复杂环境,老化速度快,且不同设备老化相互影响,增加风险防控难度<sup>[1]</sup>。

### 1.3 供电系统安全风险影响因素分类

(1) 设备因素:设备长期运行易出现老化,如接触网线索磨损、变压器绝缘老化;部分设备存在制造缺陷,如电缆接头质量不达标;日常维护不当,如巡检不及时、检修流程不规范,均会引发安全风险。(2) 环境因素:极端天气如强降雨、雷电、台风会破坏接触网和变电所设备;复杂地质条件易导致线路杆塔倾斜;周边施工、树木生长等环境干扰,可能触碰接触网引发故障。(3) 人为因素:操作人员违规操作,如误合闸、误操作保护装置;人员技能不足,无法及时识别和处理设备隐患;管理疏漏,如安全管理制度不健全、培训不到位,会加剧风险发生概率。(4) 系统因素:系统设计存在缺陷,如保护配置不合理,无法快速响应故障;设备间协同性差,易出现配合失误,引发系统整体故障,影响供电稳定性。

## 2 电气化铁路供电系统安全风险识别与评估指标体系构建

### 2.1 安全风险识别方法与流程

(1) 风险识别方法:采用多种方法结合的方式全面识别供电系统安全风险,确保识别的全面性和准确性。文献调研法通过梳理国内外电气化铁路供电系统故障案例、相关研究成果,总结已有的风险类型和防控经验;实地调研法深入牵引变电所、接触网沿线等现场,排查设备运行、环境影响等方面的潜在隐患,掌握实际运行中的风险点;故障树分析法(FTA)以供电系统重大故障为顶事件,逐层分解导致故障发生的中间事件和基本事件,明确各因素间的因果关系,精准识别关键风险点。(2) 风险识别流程:遵循“全面覆盖、层层递进”的

原则,明确四步核心流程。第一步,明确识别范围,界定电气化铁路供电系统的核心环节、设备及影响因素,确定识别边界;第二步,资料收集与准备,整合文献资料、现场运行数据、故障记录等相关信息,为风险识别提供支撑;第三步,多方法协同识别,结合上述识别方法,从设备、环境、人为、系统四个维度,全面排查潜在安全风险,建立初步风险清单;第四步,风险筛选与整理,剔除无效、重复风险点,明确各风险的核心特征和影响范围,形成最终风险识别清单<sup>[2]</sup>。

## 2.2 评估指标体系构建原则与框架

(1) 构建原则:逐一遵循五大核心原则,确保指标体系科学合理、切实可行。科学性原则要求指标选取基于供电系统运行规律和相关理论,数据来源可量化、可验证,避免主观臆断;系统性原则要求指标覆盖设备、环境、人为、系统全维度,全面反映供电系统安全状况;可操作性原则要求指标简洁明了,数据易于获取和计算,便于实际应用;实用性原则要求指标贴合供电系统实际运行需求,能够针对性反映风险隐患;动态性原则要求指标体系可根据技术发展、运行环境变化及时调整,保持评估的时效性。(2) 指标体系框架:确立目标层、准则层、指标层三级递进框架,明确各层级核心定位。目标层为电气化铁路供电系统安全风险综合评估,核心是全面衡量供电系统的安全水平,为风险防控提供依据;准则层分为设备安全、环境安全、人为安全、系统安全四个维度,对应供电系统安全风险的四大影响因素,是连接目标层与指标层的核心纽带;指标层是准则层的具体细化,选取各维度关键、可量化的具体指标,直接反映各环节的安全状况,确保评估工作落地。

## 2.3 具体评估指标选取与说明

(1) 设备安全指标:聚焦关键设备运行状态,选取核心可量化指标。牵引变电所设备指标包括主变压器绝缘老化程度、断路器动作可靠性、互感器精度;接触网指标包括线索磨耗量、导高偏差、零部件松动率;馈线系统指标包括馈线绝缘电阻、线路故障率、接头发热温度,全面反映设备运行的安全稳定性。(2) 环境安全指标:围绕环境影响因素,选取针对性指标。极端天气指标包括暴雨、雷电、暴雪等恶劣天气发生频率及影响程度;周边环境指标包括线路周边施工干扰、树木遮挡距离、异物入侵次数;地质条件指标包括线路途经区域地质稳定性、地基沉降量,精准衡量环境因素对供电系统的影响<sup>[3]</sup>。(3) 人为安全指标:聚焦人员与管理层面,选取核心指标。人员操作指标包括违规操作次数、操作失误率;技能水平指标包括人员专业培训合格率、

隐患识别能力评分;安全管理指标包括安全管理制度健全度、巡检频次及质量,反映人为因素对系统安全的影响。(4) 系统安全指标:针对系统整体运行,选取关键指标。系统设计指标包括设计方案合理性、设备匹配度;保护配置指标包括保护装置动作灵敏度、故障响应时间;运行稳定性指标包括系统电压波动范围、供电中断时长及频次,全面评估系统整体安全水平。

## 2.4 指标权重确定方法

(1) 权重确定方法选择:结合本研究特点,选取层次分析法(AHP)确定各评估指标权重。该方法适合多准则、多指标的综合评估问题,能够将定性分析与定量计算相结合,通过专家判断明确各指标的相对重要性,有效解决供电系统评估指标多、权重难以量化的问题,确保权重分配科学合理。(2) 权重计算步骤:明确四步核心流程,确保计算过程规范。第一步,构造判断矩阵,根据三级指标体系,邀请行业专家对各层级指标的相对重要性进行两两比较,按照1-9标度法赋值,构建各层级判断矩阵;第二步,一致性检验,计算判断矩阵的一致性指标和一致性比例,若比例小于0.1,则判断矩阵符合一致性要求,否则需调整赋值并重新构造;第三步,权重计算,通过特征根法计算判断矩阵的最大特征根及对应特征向量,对特征向量归一化处理,得到各指标的初步权重;第四步,权重验证与修正,结合供电系统实际运行情况,对初步权重进行验证,修正不合理部分,最终确定各指标的最终权重<sup>[4]</sup>。

## 3 电气化铁路供电系统安全风险评估方法与体系验证

### 3.1 常用安全风险评估方法对比与选择

(1) 常用评估方法:模糊综合评价法以模糊数学为基础,可有效处理评估指标中的模糊性问题,通过隶属度函数量化定性指标,适合多因素、多层次的综合评估;灰色关联分析法适用于数据不完备、信息模糊的场景,通过分析各指标与安全风险的关联程度实现评估,计算简便;故障模式与影响分析(FMEA)聚焦设备故障模式,分析其对系统的影响程度,侧重设备层面的风险评估,但对系统整体风险的综合考量不足。(2) 评估方法选择:结合本文构建的三级评估指标体系(涵盖设备、环境、人为、系统多维度,含定性定量指标),确定模糊综合评价法为最优评估方法。理由是该方法可兼顾定性定量指标,能有效处理指标体系中部分难以精准量化的因素(如人员技能水平、管理健全度),且贴合三级指标的层次结构,可通过多轮模糊运算实现系统整体风险的综合评估,与本文评估需求高度契合。

### 3.2 安全风险评估模型构建

(1) 模型构建思路:以模糊综合评价法为核心,结合本文构建的评估指标体系,构建多层次模糊综合评估模型。先确定各层级指标的隶属度函数,将定量指标标准化处理、定性指标通过专家打分量化,再结合层次分析法确定的指标权重,通过一级、二级模糊综合运算,最终得出供电系统安全风险综合评估结果,实现风险等级的划分。(2) 模型计算流程:明确四步核心流程,确保评估可重复、可验证。第一步,指标标准化处理,对定量指标采用极值法归一化,定性指标转化为量化分值;第二步,确定隶属度矩阵,根据指标标准划分等级,建立各指标的隶属度函数,构建隶属度矩阵;第三步,模糊综合运算,结合各指标权重,先对指标层进行一级运算,再对准则层进行二级运算,得到综合隶属度向量;第四步,风险等级判定,根据最大隶属度原则,结合综合隶属度向量确定系统安全风险等级<sup>[5]</sup>。

### 3.3 实例验证与分析

(1) 实例选取:选取某繁忙干线电气化铁路供电系统作为研究实例,该线路全长120km,设有2座牵引变电所,接触网采用全补偿链形悬挂,日均行车量80对,运行年限5年,涵盖平原、丘陵两种地形,受极端天气影响较明显,具有典型代表性。(2) 数据收集与处理:通过实地巡检、设备运行记录、管理台账等方式,收集实例中设备、环境、人为、系统四大维度的相关数据;对缺失数据采用插值法补充,对异常数据进行剔除,按照模型要求完成指标标准化和量化处理,形成评估所需的基础数据。(3) 评估结果分析:运用构建的模糊综合评估模型计算,得出该实例供电系统安全风险等级为“中等风险”。其中,接触网线索磨损超标、人员违规操作、暴雨天气干扰为主要关键风险点,设备老化和系统保护响应滞后为次要风险点,为后续风险防控提供明确靶向。

### 3.4 评估体系合理性验证

(1) 验证方法:采用“结果对比法”验证评估体系合理性,将实例评估结果与该线路实际安全运行状况(近1年故障记录、隐患排查结果)进行对比。对比发现,评估得出的关键风险点与现场实际存在的隐患高度吻合,风险等级划分符合实际运行情况,验证了评估体系的合理性和实用性。(2) 优化建议:结合验证结果,提出两点完善建议。一是补充极端天气预警相关指标,提升环境维度评估的针对性;二是优化定性指标的量化标准,邀请更多行业专家参与打分,减少主观误差,进一步提升评估体系的精准度。

### 结束语

本文围绕电气化铁路供电系统安全风险评估体系展开全面深入研究,明确了系统的风险特征与主要影响因素,构建了涵盖多维度、多层次的评估指标体系与评估模型,并通过实例验证了体系的合理性和可行性。研究虽取得一定成果,但仍存在不足,后续将结合智能监测技术,进一步优化指标设置与评估方法,提升评估精准度,为电气化铁路供电系统安全稳定运行提供更有力的支撑。

### 参考文献

- [1]周丹,何治新.轨道交通隧道内牵引网感应电压研究[J].都市轨道交通.2022,35(2):127-130.
- [2]解绍锋,孙镜堤.高速铁路对邻近普速铁路电力电缆的干扰机理[J].西南交通大学学报.2021,7(1):92-94.
- [3]陈民武,谢崇豪.牵引供电系统对架空电力贯通线感应电耦合特性及安全防护技术研究[J].中国铁道科学.2023,21(6):76-78.
- [4]张刚,谢崇豪.电气化铁路电力贯通线感应电测试与分析[J].中国铁路.2024,35(11):201-203.
- [5]彭涛,陈剑云.AT牵引供电对电力电缆感应电压仿真分析[J].华东交通大学学报.2022,10(5):80-83.