铁路牵引变电所常见电气故障分析及运维对策

王 浩
宁夏宁东铁路有限公司 宁夏 银川 750000

摘 要：铁路牵引变电所是铁路牵引供电系统的核心枢纽，设备稳定运行是铁路安全运输的关键保障。本文依托变电所设备结构与运行工况，系统梳理主变、开关设备、继电保护及二次回路的典型电气故障，深入剖析设备老化、人为操作、外部环境三类核心致因，总结故障多维度危害。同时从预防性运维、应急处置、智能运维、人员建设四方面提出优化对策，旨在提升设备运行稳定性，降低故障发生率，保障铁路牵引供电系统安全高效运行。

关键词：铁路牵引变电所；常见电气故障；运维对策

引言：随着我国铁路路网规模持续扩大、列车运行密度不断提升，牵引变电所供电负荷波动加剧，设备长期处于复杂工况中，电气故障频发，严重影响铁路运输安全性与时效性。牵引变电所设备受负荷骤变、恶劣环境、谐波干扰等多重因素影响，易出现绝缘破损、开关故障、保护误动等问题，引发供电中断、列车晚点等事故。为有效管控设备运行风险，本文结合变电所运行实际，全面分析各类电气故障成因，针对性制定科学运维对策，为现场运维工作提供参考。

1 铁路牵引变电所核心设备及运行工况

1.1 核心电气设备组成及工作原理

（1）牵引变压器：采用单相或V/v接线，将110/220kV降压至27.5/55kV，依托电磁感应实现变压。调压开关、油循环冷却及绕组绝缘状态直接影响供电可靠性与寿命。（2）断路器与隔离开关：断路器（SF_6或真空型）负责负载开断及短路故障快速切除，灭弧能力强；隔离开关无灭弧能力，用于检修时形成明显断开点。两者按“断路器先通断、隔离开关后操作”的联锁逻辑配合，确保倒闸与故障隔离安全。（3）互感器与继电保护：CT、PT将高电压、大电流线性变换为二次标准信号，供保护、计量及监测；继电保护（差动、过流、距离等）实时比对电气量，故障时毫秒级跳闸，配合自动重合闸提升供电连续性。

1.2 牵引变电所运行环境特点

（1）工况负荷特点：牵引负荷随列车运行图呈剧烈波动，短时过载可达额定容量的2~3倍，负荷变化速率高，导致变压器绕组热点温度循环交变，分接开关触头磨损加剧，断路器操动机构机械疲劳累积明显。（2）环境干扰特点：户外布置的变电所设备承受−25℃～+45℃温差及凝露侵蚀，绝缘子易发生污闪；雷电侵入波经进线传入时，氧化锌避雷器需频繁动作泄能；同时电力机车整流装置产生大量谐波（以3、5、7次为主）注入系统，引起电压畸变和谐振风险，影响保护定值准确性[1]。

1.3 电气设备故障诱发核心因素

（1）设备自身因素：长期电热联合作用下绝缘材料老化击穿、有载分接开关机械卡滞、断路器灭弧室触头烧蚀、互感器铁心饱和特性偏移等固有退化规律不可逆。（2）人为操作因素：倒闸操作票执行不严谨导致带负荷拉隔离开关、检修后异物遗留于母线侧、保护定值整定错误或压板投退失当，以及红外测温、油色谱分析等状态检测周期执行不到位。（3）外部环境因素：雷击过电压、邻线故障引起的系统电压暂降、鸟兽触碰带电体、施工机械外力破坏、风振导致引线舞动断股等随机性外因，叠加系统谐波谐振时易诱发保护误动或设备绝缘击穿。

2 铁路牵引变电所常见电气故障及成因分析

2.1 主变设备常见电气故障

（1）绝缘故障：长期运行中绝缘材料受潮、表面污秽积聚，加之过负荷引发的热老化效应，使绝缘纸板聚合度下降、介电强度降低，最终导致绝缘击穿，引发绕组对铁芯或外壳短路、漏电，造成供电回路异常跳闸，严重时产生电弧性放炮事故，威胁人员安全。（2）油温异常故障：冷却器风扇停转、油泵损坏或散热管堵塞导致散热效率下降，在持续高负荷工况下变压器顶层油温超出允许限值（通常85℃），加速绝缘油氧化分解，产生水分和酸性物质，进一步腐蚀固体绝缘，油质击穿电压下降，形成恶性循环，严重时引发热性故障甚至火灾。（3）绕组故障：短路电流冲击或系统电压骤变产生的巨大电动力使绕组轴向压缩或辐向鼓包，饼间绝缘磨损引发匝间短路，表现为油箱异响、局部过热、差动保护频繁动作，严重时可导致绕组烧毁，迫使主变停运检修。

2.2 开关设备常见电气故障

（1）断路器分合闸故障：操动机构机械部件磨损、

润滑失效导致卡涩，储能弹簧疲劳或电机故障致使储能不足，加上控制回路接线松动、辅助触点接触不良，造成断路器拒分拒合或分合不到位，直接影响故障切除和倒闸操作可靠性，延长故障切除时间。（2）触头烧蚀故障：开断短路电流时电弧高温灼伤弧触头，同时触头弹簧压力衰减、接触面氧化膜增厚使接触电阻增大，运行中产生异常发热和打火，触头熔焊或烧损后灭弧室开断能力下降，严重时引发开关爆炸事故，危及设备及人员安全[2]。（3）隔离开关卡滞故障：户外环境雨水渗入、润滑脂老化干涸、沙尘侵入传动齿轮及轴承，导致操作力矩显著增大，手动或电动操作时卡滞、分合不到位，无法形成可靠隔离断口，危及设备检修人员安全，也影响正常倒闸作业效率。

2.3 继电保护及二次回路故障

（1）保护装置误动、拒动：电源板电容老化、出口继电器触点粘连、抗干扰滤波电路失效，加上整定值与实际运行工况匹配不当，导致雷击或区外故障时误跳闸，或区内故障时拒动越级扩大停电范围，增加故障排查难度。（2）二次回路接触故障：端子排压接松动、铜芯氧化、电缆绝缘破损受潮，导致直流接地、信号断续或通道衰耗增大，使保护采集的开关量变位错误、模拟量幅值偏移，影响保护动作精度和故障分析判断，易造成误判延误处理。（3）互感器故障：CT二次开路产生高压危及设备，PT铁磁谐振造成熔丝熔断，以及绝缘电阻下降引起测量偏差，导致保护采样的电流电压幅值相位失真，引发差动、距离等保护误判或拒动，严重影响保护选择性。

2.4 故障共性危害分析

（1）设备层面：各类故障均加速绝缘老化、机械磨损及导电回路劣化，缩短设备服役寿命，增加检修频次和备件更换成本，严重时造成主设备报废，带来重大资产损失。（2）供电层面：故障导致变电所跳闸或母线失压，牵引供电臂停电形成接触网无电区，相邻所越区供电能力受限，供电可靠性显著下降，影响全线电力供应平衡。（3）运营层面：供电中断直接造成列车途停、晚点，打乱调度运行图，旅客滞留或货物积压，同时抢修需封锁线路，进一步降低运输效率，带来显著经济损失与行车安全隐患，社会影响恶劣。

3 铁路牵引变电所电气设备运维优化对策

3.1 完善常态化预防性运维体系

（1）制定分级巡检制度：依据设备重要性及历史故障频次，将设备划分为A（核心主变）、B（断路器、保护装置）、C（辅助设备）三个等级，差异化制定日巡、周检、月试、年修内容；日巡重点检查主变油位油温、断路器SF 气体压力、保护装置运行指示灯状态；周检侧重设备外观、引线接头红外测温及接地装置完好性；月试进行保护压板投退核对、备用电源切换试验及蓄电池容量抽测；年修结合预防性试验开展全面检查，确保隐患早发现、早处置。（2）落实设备定期试验保养：严格执行DL/T596《电力设备预防性试验规程》和铁总运相关标准，按周期开展绝缘电阻测试（2500V兆欧表测主变高低压侧绝缘）、交流耐压试验（工频耐压1min）、回路电阻测量（断路器主触头接触电阻 ≤ 1.2倍出厂值）、保护定值校验（差动保护动作值偏差不超过±5%）及开关机械特性测试（分合闸不同期 ≤ 3ms）；对SF 断路器执行微水检测（ ≤ 150ppm）和气体泄漏排查（年泄漏率 ≤ 0.5%），对隔离开关触头进行打磨润滑保养，及时更换老化密封圈和磨损触头，将设备缺陷消除于萌芽阶段[3]。（3）建立设备全生命周期台账：以设备唯一编码为索引，完整记录出厂技术参数、安装调试数据、历次检修试验报告、故障跳闸记录及备件更换信息；采用数据库管理系统实现设备状态趋势可视化分析，根据运行年限和试验数据预判绝缘老化拐点及机械磨损周期，为状态检修决策提供可靠依据，同时实现备件库存与设备维修计划的智能联动。

3.2 优化故障应急处置与检修流程

（1）制定分类故障处置预案：针对绝缘击穿、油温超限、开关拒动、保护误动、二次回路接地等典型故障，分别编制标准化应急操作票，明确故障现象快速判别方法、信息上报时限与流程、安全隔离操作顺序、故障排查路径及恢复送电步骤；各预案附应急处置流程图和关键操作风险提示卡，确保突发故障时响应有序、处置高效。（2）规范故障排查与修复流程：严格执行“故障报修→现场勘查→安全措施布置→逐级排查→修复验证→恢复运行”的闭环流程，优先采用分段隔离法缩小故障范围，借助故障录波数据、保护动作时序和在线监测历史曲线精准锁定故障点位，针对性实施修复作业，杜绝盲目换件或经验性扩大停电范围；修复完成后进行带负荷试验和保护联动校验，连续监测30分钟确认设备完全恢复正常后方可撤离[4]。（3）强化故障复盘机制：每次故障处置结束后48小时内组织复盘分析会，从设备自身、人为操作、环境因素三个维度深入剖析故障根因，绘制故障时序因果链图，形成故障分析报告并纳入案例知识库；针对暴露的运维制度短板，及时修订巡检条目、完善预案内容、补充备件储备，实现“一故障一提升”的持续改进闭环。

3.3 推进智能化运维技术应用

（1）搭建在线监测系统：部署变压器油中溶解气体在线监测（监测H_2、CO、CH_4、C_2H_4、C_2H_2等七种特征气体浓度及产气速率）、铁芯接地电流监测（≤100mA预警）、局部放电超高频传感（放电量≥100pC触发报警）、断路器机械特性在线诊断（分合闸线圈电流波形分析）及触头无线测温（测温范围-25℃~+200℃，精度±1℃）等装置，对关键状态量实施全天候实时采集，设定多级阈值预警策略，异常时自动推送告警信息至运维终端。（2）引入故障诊断智能算法：基于历史故障样本和实时运行数据，运用支持向量机（SVM）和深度神经网络构建设备健康状态评估模型，自动识别绝缘老化速率、机械磨损趋势和热劣化进程，实现故障超前预警（提前7~15天发出风险提示）和剩余寿命预测（预测误差控制在±10%以内），推动运维模式从“计划检修”向“状态检修”转型，有效减少不必要的停电检修次数[5]。（3）应用智能化检修检测设备：配置高精度红外热像仪（热灵敏度≤0.05℃）用于带电设备发热点快速筛查，采用地电波和超声波联合检测技术进行开关柜局部放电普查（定位精度≤0.5m），利用蓄电池内阻测试仪和直流接地查找仪提升二次回路检测效率，同时引入无人机辅助巡检系统对变电所架构、母线及引线进行高空巡视，以先进装备替代人工经验判断，大幅提高故障定位精准度和检测工作效率。

3.4 强化运维人员专业能力建设

（1）开展常态化技能培训：制定年度培训计划，每季度组织一次集中理论培训，内容涵盖牵引供电系统原理、设备结构拆解、保护定值整定计算、智能监测系统操作等专业知识；每月开展一次技术问答和事故预想训练，同时结合季节性特点开展防雷、防污闪、防寒防冻等专项培训，保持人员知识体系持续更新。（2）搭建实操考核机制：依托变电检修实训基地，定期开展倒闸操作模拟演练（涵盖正常倒闸和事故应急倒闸两种模式）、继保装置故障排查实作考核（设置3~5个隐蔽故障点限时排查）、高压开关机械调整实操比武，通过情景化实战训练强化人员现场应变能力；实行持证上岗和等级评定制度，考核结果与绩效奖金挂钩，激发人员钻研业务的主动性和积极性。（3）落实岗位责任制与标准化作业：细化所长、值班员、检修负责人等各岗位安全职责和任职资格要求，修订完善标准化作业指导书，将每项操作分解为可量化、可检查的步骤；建立操作票三级审核（填写人自审、值班长复审、所长终审）和操作监护制度（一人操作一人监护），从管理源头杜绝带负荷拉合隔离开关、误投退压板、走错间隔等人为失误，确保运维作业安全可控、质量可溯。

结束语

铁路牵引变电所电气故障具有诱因复杂、随机性强、危害范围广的特点，设备运维管理是一项长期性、系统性工作。本文通过梳理各类典型电气故障及成因，构建了常态化预防、应急处置、智能升级、人员赋能的全方位运维体系。落实各项优化对策，可有效规避设备运行隐患，减少故障停机损失，提升牵引供电系统可靠性。未来需持续融合智能技术，持续优化运维模式，适配铁路高质量发展的供电保障需求。

参考文献

[1]成雄.电气化铁路牵引变电所常见供电故障分析及运维应对措施[J].低碳世界,2024,14(01):142-144.

[2]解绍锋,晏寒,王辉.电气化铁路牵引变电所馈线接地故障特性与运维防控技术[J].电力自动化设备,2023,43(06):178-184.

[3]李岩,张建成.牵引变电所继电保护误动故障多因素耦合分析及运维优化[J].铁道标准设计,2023,67(11):156-161.

[4]王军,刘凯.重载铁路牵引变电所高压开关设备故障分析与状态检修策略[J].电气化铁道,2022,33(05):45-49.

[5]张斌.牵引变电所电气设施局部放电故障风险评估与运维预警技术[J].电气时代,2025,11(06):68-72.