

高速公路供配电系统故障成因及运维防控要点分析

程子晨

陕西高速电子工程有限公司 陕西 西安 710000

摘 要：高速公路供配电系统是为监控、通信、收费、照明、通风及隧道机电等设施提供稳定电能的保障性基础设施，其运行可靠性直接关系到行车安全与运营效率。本文系统分析了高速公路供配电系统常见的故障类型，包括外网电源失电、配电设备故障、线路故障及雷击过电压等，并从设计缺陷、环境因素、设备老化、人为操作及管理缺失五个维度剖析了故障的深层成因。在此基础上，提出了覆盖规划设计阶段优化、设备选型与安装质量控制、预防性试验与状态检修、智能监测与预警系统建设、应急电源配置的全链条运维防控要点。本文旨在为高速公路供配电系统的可靠性提升和运维管理优化提供系统性技术参考。

关键词：高速公路；供配电系统；故障成因；运维防控；状态检修

引言

高速公路作为现代交通网络的大动脉，其安全、高效运行高度依赖于完善的机电设施系统。供配电系统承担着为沿线监控设备、通信基站、收费车道、道路照明、隧道通风照明及服务设施提供稳定电力的任务，是整个机电系统的“心脏”。一旦供配电系统发生故障，轻则导致局部设备停机、通行效率下降，重则引发隧道照明中断、监控失效甚至交通事故。近年来，随着高速公路里程快速增长和机电设备密集化部署，供配电系统的负荷规模与复杂度同步上升，但部分路段仍存在设计标准偏低、设备老化、运维粗放等问题，故障频发态势未能得到根本遏制。因此，深入剖析高速公路供配电系统故障的成因，并据此提出科学、系统的运维防控要点，具有重要的工程实用价值和安全保障意义。

1 高速公路供配电系统的构成与运行特点

1.1 系统基本构成

高速公路供配电系统通常由外部电源接入、高压配电装置、变压器、低压配电柜、不间断电源或应急电源、电力线路及末端配电箱等部分组成。外部电源一般采用 10kV 或 35kV 公用电力线路引入，重要路段或长隧道常设置双路电源或自备发电机组作为备用。高压侧配置断路器、隔离开关、避雷器及继电保护装置；变压器将电压降至 400V/230V 后进入低压配电系统，再通过放射式或树干式线路向各用电点供电。为保障关键设备在电网波动或断电时持续运行，收费站、隧道及监控中心通常配置在线式 UPS 或 EPS，大型隧道还设有柴油发电机组作为第二甚至第三备用电源。供配

电系统还包含接地与防雷装置、电力监控系统及计量仪表等辅助组成部分。

1.2 运行环境与负荷特征

高速公路供配电系统的运行环境具有以下显著特点：一是线路长、分布广，供电线路沿高速公路路侧或中央分隔带敷设，长度可达数十甚至上百公里，沿线地理条件复杂，跨越山区、河流、农田等不同地貌；二是负荷分散且波动大，照明、通风等设备具有明显的时段性和季节性特征，而监控、通信等设备则要求全年不间断供电；三是环境条件严酷，配电箱、变压器等设备长期暴露于日晒雨淋、粉尘、盐雾及温差剧烈变化的环境中，绝缘性能和机械强度加速劣化；四是电磁干扰严重，沿线大功率变频设备、雷击感应及相邻电气化铁路等可能对供配电系统产生谐波干扰和暂态过电压^[1]。上述特点决定了高速公路供配电系统的故障模式与常规建筑供配电存在显著差异，运维防控需要针对性地设计。

1.3 常见故障类型

高速公路供配电系统常见故障包括外网电源失电、电压质量异常、配电设备故障、电力线路故障、防雷接地故障以及备用电源故障。外网失电多由雷击、树障或外力破坏引发，备用电源若未及时投入将导致大范围停机；电压骤降、不平衡等异常可使电子设备重启或接触器误动。配电设备如断路器拒动、变压器过热等故障具有隐蔽性和累积性，常因过载、绝缘老化或潮湿环境突然爆发。电力线路以电缆为主，易发生单相接地、短路或断线，施工损伤、白蚁啃咬及雷击覆冰均为主因，且故障查找困难。防雷接地系统失效时，雷击易烧毁控制

板并中断通信,在山区隧道尤为突出。备用电源中 UPS 蓄电池高温下寿命骤减,柴油发电机组长期冷备用易致启动蓄电池亏电或发动机锈蚀,影响紧急切换成功率。

2 故障成因多维度分析

2.1 规划设计阶段的先天不足

部分高速供电系统设计之初存在缺陷:负荷预测偏保守,导致变压器容量偏小、电缆截面不足,长期过载加速绝缘老化;供电方案可靠性偏低,长隧道、特大桥等未按规定设双重电源,仅靠单路市电加无自动切换的发电机,切换时间无法满足监控设备不掉电要求;配电级数过多或保护选择性配合不当,下级故障时易越级跳闸,扩大停电范围;防雷接地设计未结合沿线土壤电阻率实测,接地体埋深和降阻措施不足,实际接地电阻超标;未充分考虑环境腐蚀,户外配电箱在沿海或工业污染区因未采用耐腐蚀材料而快速锈蚀。

2.2 设备选型与安装质量缺陷

设备选型不当表现为用低等级工业品代替户外型产品,或未按短路电流配置足够分断能力。安装质量缺陷包括电缆中间接头制作不规范、二次接线端子未压紧、变压器倾斜、接地扁钢搭接焊接不达标等。这些缺陷在验收阶段难以充分检出,运行期逐步暴露,诱发故障。

2.3 环境侵袭与设备老化累积

沿线恶劣环境加速设备劣化:高温季节箱式变电站内部可超 60℃,电子元件电解电容干涸、外壳变形、保护误动风险大增;隧道等高湿环境易凝露,导致绝缘下降甚至相间短路;粉尘与盐分在绝缘子表面形成导电污层,引发污闪。同时,设备本身存在寿命周期,断路器触头磨损、电缆绝缘水树老化,故障率随年限呈指数增长。

2.4 人为操作失误与维护缺失

运维人员专业素质参差不齐:操作失误如带负荷拉合隔离开关、停送电顺序颠倒、接地线未拆除即送电;维护缺失表现为预防性试验和检修流于形式,未复核绝缘电阻、保护定值,未更换老化避雷器、未做蓄电池核对性放电试验。部分单位外包给低资质第三方,以巡检代检修,隐患积存终酿大灾。

2.5 管理制度与应急预案不完善

管理层面突出问题:职责划分不清,供配电设施分属机电、养护或外委单位,故障时相互推诿;故障记录与数据分析缺失,无法指导预防性维护;备品备件管理混乱,关键设备无库存或型号不对应,修复周期长;应

急演练不足,尤其是发电机组带载切换、UPS 转旁路等实战演练频次低,外网失电时无法快速恢复供电。制度短板放大了技术与管理风险,使系统长期亚健康运行。

3 运维防控要点

3.1 规划设计阶段的前置优化

从源头上降低故障发生概率,应在规划设计阶段落实以下防控要点:首先,开展详细的负荷调研与增长预测,按近期和远期分别核算容量,变压器和电缆选型应留有不低于 20% 的裕度。其次,依据路段重要性等级确定供电方案,长度超过 1000 米的隧道、省级以上收费站及监控中心应配置双重电源且实现自动切换,柴油发电机组的容量应满足全部重要负荷的启动和运行需求。第三,优化保护配合计算,上下级保护装置的动作电流和时间级差应满足选择性要求,避免越级跳闸。第四,加强防雷接地设计,根据沿线土壤电阻率实测值确定接地体型式和降阻措施,对高电阻率地区可采用深井接地或外引接地极^[2]。第五,明确户外设备的防护等级要求,沿海及污染地区配电箱外壳应达到 IP65 以上且材质为不锈钢或经重防腐处理。设计图纸应经过专项审查,重点复核短路电流、电压降及接地电阻等关键参数。

3.2 设备选型与安装质量控制

设备选型应坚持“可靠性优先”原则,选用具备国家强制性认证且具有同类高速公路运行业绩的产品。变压器应选用低损耗节能型,且根据安装环境选择干式或油浸式;高压开关柜应配置真空断路器,额定短路开断电流满足系统最大运行方式要求;UPS 应选用在线式双变换结构,并配置免维护铅酸蓄电池,电池组设计后备时间应不少于 30 分钟。在安装阶段,应严格执行电力工程施工及验收规范:电缆敷设时应控制牵引力和弯曲半径,中间接头应采用热收缩或冷缩工艺并制作防水密封;接线端子应使用力矩扳手紧固至规定扭矩值;接地系统应进行实测,确保接地电阻符合规范,并保留影像资料^[3]。安装完成后,应按标准进行交接试验,包括绝缘电阻、直流耐压、回路电阻、保护传动及带负荷极性校验等,试验报告作为竣工资料的重要组成部分。

3.3 预防性试验与状态检修常态化

预防性试验是发现设备潜在缺陷、预防运行中突发故障的核心手段。应依据《电力设备预防性试验规程》制定年度试验计划,试验项目包括:变压器绝缘电阻、绕组直流电阻、介质损耗因数及油色谱分析;高压开关绝缘电阻、回路电阻及机械特性测试;避雷器泄漏电流及阻性电流分量检测;电缆绝缘电阻及耐压试验(根据

运行年限确定试验电压)；接地电阻复测及接触电势测量；蓄电池组核对性放电及内阻测试。试验数据应建立历史趋势数据库，当某参数较初始值或历次值发生明显变化时，即使未超限也应判定为注意值，安排进一步诊断或缩短试验周期。状态检修以在线监测数据为基础，在预防性试验框架内引入振动、温度、局放等传感器，实现从“定期修”到“当修则修”的转变，避免过度检修引入的新风险。

3.4 智能监测与预警系统建设

依托现代传感与物联网技术，构建高速公路供配电系统的智能监测网络。在关键节点部署以下监测装置：变压器顶层油温及绕组温度传感器、开关柜触头温度在线测温装置（光纤或无线无源型）、剩余电流监测器、电缆护层电流监测以及三相电压电流质量分析仪。对于重要负荷的 UPS 和蓄电池组，应配置电池巡检仪，实时监测单体电压、内阻及极柱温度。所有监测数据汇集至电力监控系统或综合运维平台，设置多级预警阈值。例如，当触头温度超过 80°C 时发报警，超过 100°C 时联动跳闸；当蓄电池内阻偏差超过 30% 时提示更换异常电池^[4]。系统还应具备故障录波和事件顺序记录功能，为故障溯源提供精确的时间序列数据。智能监测系统的价值在于将隐蔽的、渐变的故障征候转化为可见的、可预警的数字信号，从而将事故消灭在萌芽状态。

3.5 应急电源配置与管理强化

针对外网电源失电这一最严重的故障场景，必须强化应急电源的配置与管理。配置方面，每座隧道变电所、收费站及监控中心应至少配置一套 UPS，容量按照所带重要负荷的 1.2 倍选取，电池后备时间结合发电机启动时间确定，通常不少于 30 分钟。对于长度超过 3 公里的隧道，除配置 UPS 外还应设置柴油发电机组，并实现市电故障后 15 秒内自动启动并带载。管理方面，应建立应急电源定期巡检与带载试验制度：UPS 每月进行一次电池放电至 50% 容量的浅放电测试，每年进行一次满载放电试验，验证实际后备时间；柴油发电机组每周空载试运行一次（不少于 15 分钟），每季度带载试验一次（负载率不低于 75%），试验期间检查冷却水温度、机油压力、输出电压频率等参数。应急电源的油料、滤清器、蓄电池等备件应按双倍用

量储备，存放于阴凉干燥处。

3.6 防雷与接地系统专项维护

防雷与接地系统容易被忽视，但其失效后导致的设备损坏往往是毁灭性的。专项维护应包括：每年雷雨季节前对接闪器、引下线及接地装置进行外观检查，发现锈蚀、断裂或松脱立即修复；每两年测量一次接地电阻，对于独立接地体应不大于 4Ω ，共用接地体应不大于 1Ω ，超标时应进行降阻处理（如补充降阻剂、增设接地极或使用电解地极）。浪涌保护器应检查其窗口指示是否变红（表示已失效），并通过压敏电压及泄漏电流测试判断性能，一般每 3 至 5 年或经历强雷击后更换。等电位连接方面，应确保所有金属管道、设备外壳、电缆屏蔽层及防雷接地母线可靠连通，防止地电位反击。在每年雷雨频发期前，可安排一次全面的防雷专项检查，并委托具有防雷检测资质的机构出具检测报告。

4 结语

高速公路供配电系统故障成因复杂，涉及规划设计、设备质量、环境条件、操作维护及管理等环节。常见故障包括外网失电、设备故障、线路故障、防雷失效及应急电源故障，其深层原因可归结为设计缺陷、安装质量差、环境老化、人为误操作及管理缺失。为此，需构建全生命周期运维防控体系：优化规划设计，严控设备选型与安装质量，开展预防性试验与状态检修，部署智能监测预警，强化应急电源及防雷接地管理。各运营单位应结合自身路段特点、设备状况与资源条件，制定差异化防控方案并持续迭代。只有将故障防控关口前移、管理重心下沉、技术手段智能化，才能真正实现供配电系统安全、稳定、高效运行，为高速公路行车提供可靠的能源保障。

参考文献

- [1] 王明德, 张华. 高速公路隧道供配电系统可靠性分析与提升措施 [J]. 公路交通科技, 2022, 39(5): 112-118.
- [2] 陈志刚, 李建平. 基于状态监测的电力设备预防性试验策略优化 [J]. 高压电器, 2021, 57(8): 203-209.
- [3] 赵晓东, 周敏. 高速公路机电设施防雷接地系统常见问题及整改措施 [J]. 中国交通信息化, 2023(2): 67-70.
- [4] 孙伟, 刘洋. UPS 蓄电池健康状态评估及智能运维技术研究 [J]. 电源技术, 2022, 46(11): 1289-1293.