

高速公路供配电系统防雷接地技术改进

刘伟杰 程宇佳

陕西高速公路工程试验检测有限公司 陕西 西安 710086

摘要：高速公路供配电系统设备沿线路分散布设，长期处于野外复杂恶劣环境，受雷电冲击、土壤腐蚀和温湿度变化影响显著。既有防雷接地系统存在接地电阻超标、接地体锈蚀断裂、防雷器件老化失效、等电位联结不完善等问题，极易引发设备损坏与系统瘫痪。本文结合现场检测调研结果，梳理隐患成因与风险等级，依据国家及行业标准制定系统性改造方案，优化接地结构与分级防雷体系，规范施工质控流程，有效提升配电系统防雷泄流与电磁抗干扰能力。

关键词：高速公路；供配电系统；防雷接地；技术改造

引言：供配电系统是高速公路监控、通信、照明等机电设备稳定运行的基础载体，直接关系路网通行安全与运营效率。高速公路沿线多为开阔野外与丘陵地形，雷雨天气频发，雷击成为机电设备故障的主要诱因之一。早期防雷接地工程设计标准偏低、施工管控不足，加之长期运维不到位，各类防护隐患持续累积。为彻底规避雷击风险、补齐防护短板，本文开展防雷接地隐患分析与专项技术改造设计，全面提升系统安全防护水平。

1 高速公路供配电系统及防雷接地基础理论

1.1 高速公路供配电系统组成与运行特性

(1) 供配电系统核心构成。系统由多类关键设备协同组成，核心包含高压配电设备、低压控制柜、UPS电源，同时覆盖沿线道路照明设备，以及监控、通信等机电系统供电终端，全方位保障高速公路机电设施稳定供电。(2) 系统运行特点。采用分布式布设模式，设备沿公路全线分散布置；负荷类型涵盖照明、监控、通信等，结构复杂；需满足全天候不间断运行要求，无间断保障路网通行；设备长期处于野外环境，对温湿度、风雨侵蚀等环境适配性要求极高。(3) 关键薄弱设备分析。户外配电箱、信号供电模块、接地干线等外露设备为雷击薄弱环节，长期暴露在野外，易受雷电冲击、环境腐蚀影响，是防雷防护的重点对象。

1.2 雷电灾害与防雷接地核心理论

(1) 雷电形成机理与雷击类型。大气云层电荷聚集形成雷电，主要分为直击雷、感应雷与雷电波侵入三类，三类雷击的产生方式、作用范围和破坏形式存在明显差异。(2) 雷电对电气系统的破坏机制。雷击产生热效应，高温灼烧损毁设备构件；伴随机械效应，产生冲击应力破坏设备结构；同时通过电磁感应产生干扰，扰乱电气系统信号与运行状态。(3) 防雷接地技术核心原理。核

心是通过电位均衡平衡系统电压，依托接地装置快速泄放雷电流，有效抑制线路瞬时过电压，同时通过屏蔽手段削弱雷电电磁干扰。

1.3 供配电系统防雷接地技术体系

(1) 外部防雷技术。依托接闪器、引下线、接地装置构成完整外部防护体系，拦截外部雷击，引导雷电流导入大地。(2) 内部防雷技术。通过过电压保护装置抑制线路高压冲击，借助等电位联结消除电位差，搭配电磁屏蔽技术阻断雷电电磁干扰。(3) 接地系统核心技术。包含工作接地、保护接地、防雷接地三类，分别保障系统正常运行、设备人身安全及雷电防护，各项技术均有严格施工与验收要求^[1]。

1.4 行业规范与技术标准

(1) 国家电气防雷接地相关规范：遵循国家通用电气防雷标准，明确电气设备接地电阻、防护装置安装、雷电防护等级等基础要求，统一防雷接地施工、检测的通用技术准则，为高速配电防雷体系搭建提供基础依据。(2) 高速公路机电工程防雷专项技术标准：针对高速公路野外特殊运行环境，制定专项标准，细化沿线配电设备、监控通信终端、户外箱体的防雷接地技术参数，规范施工工艺、验收标准，适配高速机电系统的专属运行防护需求。

2 高速公路供配电系统防雷接地现存问题及隐患分析

2.1 既有防雷接地系统现状调研

(1) 调研路段工程概况。本次调研路段运营年限较长，供配电系统整体为分布式布设，涵盖全线照明、监控、通信等机电供电设备。路段多处于野外开阔或丘陵地形，区域雷雨天气频发，雷电活动频繁，加之野外温湿度变化大、雨水冲刷、土壤腐蚀等环境影响，供配电防雷设施长期处于恶劣运行工况，防护压力较大。(2) 现有

防雷设施配置情况。路段现有防雷体系包含避雷器、接地极、接地干线及等电位联结装置等基础设备。整体设施按早期标准布设,基础防护框架完整,但存在设备布设不均、部分路段防护设备稀疏、老旧设备未更新等问题,整体防护统一性和完整性不足。(3)现场检测方案与检测内容。针对路段防雷系统制定专项现场检测方案,核心检测内容包含接地电阻数值检测、高低压配电设备绝缘性能测试,同时排查防雷器件老化、破损、失效情况,全面摸排接地系统、防雷设备、线路防护的现存缺陷。

2.2 系统存在的主要技术问题

(1)接地系统问题。接地系统为核心薄弱环节,普遍存在接地电阻超标问题,无法满足泄流标准;长期土壤侵蚀导致接地体严重老化锈蚀,部分接地干线出现断裂、脱落现象;早期接地网布局缺乏科学性,布设间距不合理、覆盖范围不足,雷电流泄放能力大幅下降。(2)防雷器件问题。长期野外运行致使避雷器出现老化、性能衰减、失效等故障,丧失过电压防护能力;部分路段防雷器件型号参数与现有配电系统不匹配,防护适配性差;同时存在器件安装位置不规范、固定不牢固、接线松动等施工遗留问题,防护效果大打折扣。(3)等电位与屏蔽问题。现场多处设备存在等电位联结缺失、连接不牢固的情况,设备间电位不平衡,易产生电位差击穿设备;线路屏蔽层老化破损、脱落缺失,雷电电磁屏蔽能力不足;强弱电线路混敷现象普遍,电磁交叉干扰严重,影响机电设备稳定运行。

2.3 雷电灾害隐患成因分析

(1)设计层面成因。路段防雷系统沿用早期偏低的设计标准,防护参数、设计方案未适配区域强雷电野外环境;系统防护冗余设计不足,仅满足基础防护需求,无法应对极端雷雨天气,整体抗风险能力薄弱。(2)施工层面成因。施工过程中部分工艺落实不规范,接地、防雷隐蔽工程施工质量把控不严;接地及防雷材料选型老旧,耐腐蚀性、抗雷击性能较差,长期运行后易出现故障,埋下安全隐患。(3)运维层面成因。日常运维巡检工作流于形式,对隐蔽性、轻微老化问题排查不到位;老化、失效防雷设备未及时更换修复,缺乏常态化检测、维护、更新机制,隐患长期累积扩大^[2]。

2.4 隐患风险等级划分与影响评估

(1)隐患等级划分标准。结合隐患危害程度、故障概率、影响范围,将现存隐患划分为高危、中危、低危三个等级。高危隐患为接地失效、避雷器大面积失效等可直接引发设备瘫痪的问题;中危隐患为器件老化、屏蔽破损等影响设备稳定性的问题;低危隐患为轻微接线

不规范等潜在隐患。(2)风险影响评估。高危隐患易导致雷击后供配电设备烧毁、监控通信系统瘫痪,直接影响高速公路正常运营,引发通行安全风险;中危隐患会降低系统防雷性能,增加设备故障概率,提升运维成本;低危隐患长期累积会逐步恶化,逐步演变为中高安全隐患,威胁机电系统安全稳定运行。

3 高速公路供配电系统防雷接地技术改造方案设计

3.1 改造总体原则与改造目标

(1)改造基本原则。本次改造严格遵循安全性、经济性、适用性、兼容性及标准化五大原则。安全性为首要原则,彻底消除雷击安全隐患,保障设备与路网运营安全;经济性兼顾改造成本与长期运维效益,避免过度改造与资源浪费;适用性贴合高速公路野外复杂工况,适配沿线地形、气候及雷电环境;兼容性保证新改造设备与原有供配电系统适配联动,不影响原有设备正常运行;标准化严格依照国家及行业规范,统一施工、设备选型与验收标准。(2)总体改造目标。通过系统性技术改造,彻底解决现有防雷接地系统缺陷,实现接地电阻全面达标,满足高速公路机电设备防护规范要求;构建全覆盖、分级化的防雷防护体系,填补局部防护空白;全面排查并消除接地失效、防雷器件失效等重大安全隐患;显著提升供配电系统的雷电抵御能力、过电压抑制能力和电磁抗干扰能力,保障机电系统全天候稳定运行,降低雷击故障发生率。(3)改造范围界定。本次改造覆盖高速公路全线关键供电及防雷设施,核心范围包含沿线配电房高低压接地与防雷系统、道路户外配电箱及信号供电设备箱、全线供电主干线路与分支线路,以及监控、通信、照明等终端用电设备,实现从供电核心站点到终端设备的全链条防雷接地改造。

3.2 接地系统专项改造设计

(1)老旧接地网优化改造。针对原有接地网老化、布局不合理、干线断裂等问题开展专项优化。对锈蚀严重、导通失效的接地干线全部更换为耐腐蚀镀锌接地材料;在接地网格稀疏、泄流能力不足的区域新增接地极,加密接地点位;重新梳理接地网格布局,优化接地环路结构,解决局部接地盲区问题,提升整体接地网的导通稳定性和雷电流泄放效率^[3]。(2)特殊地段接地改造。针对山区、盐碱地、高土壤电阻率等特殊路段制定差异化改造方案。山区地形复杂、土壤松散,采用深埋接地结合外延接地的方式,规避岩石层接地难题;盐碱地土壤腐蚀性强,选用抗腐蚀接地材料,增加设备防腐保护层,延长接地设施使用寿命;高土壤电阻率路段接地难度大,通过专项降阻工艺优化接地环境,解决接地电阻超标难

题。(3) 接地电阻达标控制方案。为确保改造后接地电阻完全达标,采用多元化降阻技术措施。合理选用高效环保降阻剂,填充接地极周边土壤,降低土壤接触电阻;采用深埋接地工艺,将接地极深入地下湿润土层,提升接地导通效果;对接地条件较差的区域,实施外延接地施工,拓展接地面积,全方位保障各路段接地电阻符合行业标准。

3.3 防雷保护系统优化改造

(1) 避雷器升级与优化布设。全面排查全线高低压侧避雷器,对老化失效、参数不匹配的器件全部更换。依据配电系统电压等级,精准选型适配的高压、低压避雷器,保障防护参数匹配系统运行需求;严格按照标准化施工要求规范安装位置,纠正原有倾斜、松动、接线不规范等问题,合理布设避雷器点位,确保每段线路、每台关键设备均配备专属过电压防护装置。(2) 雷电过电压防护体系完善。搭建分级化雷电过电压防护体系,按照配电房总进线、线路中段、终端设备三级防护标准配置防雷器件。在高压进线端设置一级防雷保护,抑制直击雷高压冲击;在低压配电回路设置二级防护,削弱残余过电压;在终端设备处加装浪涌保护装置,精准吸收瞬时过电压,层层递进降低雷电过电压对电气设备的损坏风险^[4]。(3) 电磁屏蔽与等电位改造。对全线设备开展等电位联结整改,补齐缺失的等电位连接线,紧固松动接点,实现配电设备、金属箱体、支架的统一等电位联结,消除设备间电位差。修复破损、脱落的线路屏蔽层,对强弱电混敷线路进行分隔规整,减少电磁交叉干扰。同时对所有外露金属构件统一做接地处理,强化系统电磁屏蔽能力。

3.4 改造施工工艺与质量控制方案

(1) 核心施工工艺流程。本次改造严格遵循规范化施工流程,分步有序推进。第一步开展旧设施拆除作业,安全拆除老旧失效的接地构件、故障避雷器及废弃线路连接件。第二步实施接地系统施工,包含接地极布设、接地干线铺设、降阻处理、接地网规整等工序。第三步进行防雷器件安装与接线,完成新型避雷器、浪涌保护

器的标准化安装与固定。最后开展系统整体调试,对接地电阻、设备绝缘、防雷性能、系统导通情况进行全面检测调试,确保改造后系统稳定达标运行。(2) 关键施工质量控制要点与安全施工措施。质量控制方面,严格执行材料进场验收制度,核对设备型号、参数及质量合格证,杜绝不合格材料进场。重点把控接地深埋、降阻剂填充、器件接线等隐蔽工程施工质量,全程做好施工记录与影像留存。施工完成后逐项开展专项检测,确保所有技术指标符合标准。安全施工方面,作业前严格执行断电、验电、接地防护流程,杜绝带电作业风险。野外施工路段设置安全警示标识与防护围挡,规避道路通行及野外作业风险。电气施工人员持证上岗,配备专业防护用具,严格落实安全操作规程,保障改造工程安全、高质量完工^[5]。

结束语

本文针对高速公路供配电防雷接地系统现存的接地失效、防雷性能衰减、电磁防护薄弱等突出问题,完成隐患溯源、风险评估与专项改造方案设计。通过老旧接地网翻新、特殊地段差异化降阻、分级防雷体系完善、等电位与屏蔽整改及全过程质量管控,有效补齐原有系统防护缺陷。改造后可实现接地参数全面达标,显著增强系统雷击抵御能力,降低设备故障与停运风险,为高速公路机电系统长期稳定、安全可靠运行提供坚实技术保障。

参考文献

- [1]陈志强.高速公路机电系统过电压保护与防雷接地设计研究[J].价值工程,2024,43(11):50-52.
- [2]徐晋萍.高速公路隧道机电设施防雷接地技术研究[J].百科论坛电子杂志,2023,14(8):122-127.
- [3]陶杰,梁尊人.高速公路机电系统过电压保护与防雷接地设计[J].交通世界,2021,30(33):137-138.
- [4]丁立言.高速公路机电系统防雷的重要性与防护技术[J].交通世界,2021,12(33):141-145.
- [5]李萌.探讨高速公路机电系统中过电压保护和防雷接地的设计[J].科学技术创新,2023,9(33):130-131.