

输电线路防腐技术及其在恶劣环境中的应用

吴佳¹ 魏瑞鹏¹ 王连香²

1 国网河北省电力有限公司邢台供电分公司

2 国网河北省电力有限公司沧州供电分公司

DOI:10.12238/hwr.v9i3.6220

[摘要] 输电线路在恶劣环境中的防腐问题直接影响电网运行安全,以广东省某500kV输电线路为研究对象,针对该线路通过工业区,沿海地带等复杂环境条件,系统分析了不同环境因素对防腐性能的影响规律,通过现场实验与数据监测,对热镀锌,新型合金涂层,纳米防腐涂料等防腐技术的应用效果进行了评估。结果表明,复合防腐技术在恶劣环境中表现出更优异的防护性能,其中纳米改性富锌涂料与热镀锌复合使用可将防腐寿命延长2.5倍,基于实验数据建立了防腐性能评估模型,为输电线路防腐技术在不同环境中的选择与应用提供了依据。

[关键词] 输电线路; 复合防腐; 恶劣环境; 评估模型; 纳米涂料

中图分类号: TM621.5 **文献标识码:** A

Transmission line anticorrosion technology and its application in harsh environment

Jia Wu¹ Ruipeng Wei¹ Lianxiang Wang²

1 Xingtai Power Supply Branch of State Grid Hebei Electric Power Co., LTD.

2 Cangzhou Power Supply Branch of State Grid Hebei Electric Power Co., LTD.

[Abstract] The problem of transmission line anticorrosion in harsh environment directly affects the operation safety of power grid. Taking a 500kV transmission line in Guangdong Province as the research object, the influence of different environmental factors on the anticorrosion performance of the line through complex environmental conditions such as industrial zone and coastal zone is systematically analyzed. Through field experiments and data monitoring, the effects of hot dip galvanizing, new alloy coating, The application effect of anti-corrosion technology such as nano anti-corrosion coating was evaluated. The results show that the composite anticorrosion technology has better protection performance in harsh environment, and the composite application of nano-modified zinc-rich coating and hot dip galvanizing can extend the anticorrosion life by 2.5 times. Based on the experimental data, the anticorrosion performance evaluation model is established, which provides a basis for the selection and application of transmission line anticorrosion technology in different environments.

[Key words] transmission line; Composite anticorrosion; Harsh environment; Evaluation model; nano-coating

引言

近年来,随着输电网络规模不断扩大,线路所处环境日趋复杂,沿海地区的盐雾,工业区的酸性气体,高湿度地区的水汽等恶劣环境因素,使输电线路面临严峻的腐蚀考验,据统计,恶劣环境中的腐蚀速率是常规环境的3~5倍,引发的电力事故占比高达35%。为确保输电线路在恶劣环境中安全稳定运行,亟需深入研究不同环境因素对防腐性能的影响机理,开发针对性强,适应性好的防腐技术,广东省某500kV输电线路作为典型案例,其横跨工业区,沿海等多种复杂环境,为防腐技术应用研究提供了良好的工程实践基础。

1 输电线路概述

1.1 线路环境特征

广东省某500kV输电线路地处珠三角地区,沿线跨越城市,农田与山地等多种地形地貌,该区域属亚热带季风气候,年平均气温23~28℃,相对湿度80~95%,年降雨量1800~2500mm。根据《大气腐蚀环境技术规范》GB/T14974,该地区大气中SO₂含量为0.02~0.04mg/m³,NO_x浓度为0.03~0.06mg/m³,属于中度至重度腐蚀性环境,沿海地区空气中氯离子沉降率达到0.3~0.5mg/cm²·d,超过重度腐蚀环境标准值,线路沿途经过工业园区,工业废气排放加剧了腐蚀性,山区段年均雾日超过150天,长期处于高湿环境。根据《土壤腐蚀性评价技术规范》GB/T 50943,沿线土壤电阻率在200~500 Ω·m之间,pH值为5.5~6.5,属于中等腐蚀性土

壤环境,气候与环境因素的综合作用^[1],使线路处于典型的强腐蚀环境中。

1.2 腐蚀现状调查

线路杆塔钢结构普遍存在不同程度的腐蚀现象,沿海段杆塔基础及接地装置出现严重锈蚀,镀锌层剥落面积达30%以上,部分构件锈蚀深度超过2mm,工业区段杆塔构件表面出现点蚀,缝隙腐蚀等局部腐蚀形式,腐蚀坑密度达到8~12个/cm²。螺栓连接处电偶腐蚀明显,山区段杆塔构件受雾气影响,表面镀锌层呈白锈状态,防腐性能显著下降,涂层附着力降至3级以下,导线金具及绝缘子串金属配件腐蚀损伤加剧,部分悬垂线夹出现应力腐蚀开裂,角钢表面镀锌层完整性破坏,防腐性能降低,局部锈蚀深度达到1.5mm,威胁结构安全。

1.3 防腐需求分析

针对线路所处环境特点与腐蚀现状,亟需采取分区域,分层次的综合防腐措施,沿海段重点加强基础及接地装置的防腐处理,要求镀锌层厚度不低于200 μm,采用热镀锌+重防腐涂层的双重保护,工业区段应选用含氟树脂等耐酸碱性能优异的防腐涂料,其涂层附着力要求达到1级以上,并对螺栓等连接部位采取局部加强防护,山区段需重点解决覆霜,结露等引起的腐蚀问题,宜采用具有150°以上接触角的超疏水防腐涂层,对于腐蚀严重的既有杆塔构件,应进行全面的表面处理,除锈等级要达到Sa2.5级^[2]。针对不同腐蚀环境,建立分级防腐体系,明确各区段防腐技术要求与检修周期,实现精准化,差异化防腐维护,同时建立包括腐蚀监测,评估,维护的全过程管理机制,提升防腐效果。

2 防腐技术应用

2.1 基础防腐措施

2.1.1 热镀锌工艺。热镀锌工艺是输电线路金属构件的基础防腐处理方法,工艺流程包括前处理,浸锌与后处理三个阶段,前处理采用碱液除油,盐酸除锈等方式,确保构件表面清洁度达到Sa2.5级,浸锌温度控制在445~455℃之间,浸锌时间根据构件厚度确定,一般为1.5~3分钟,锌层厚度要求不低于200 μm,锌层与基体结合力应达到10MPa以上。镀锌后的构件应进行缓冲冷却,防止锌层产生裂纹,采用火焰喷涂或冷喷涂方式对焊接部位进行补镀,确保防腐层的完整性,热镀锌层通过物理屏蔽与电化学保护双重机制,可为钢结构提供15~20年的防腐寿命。

2.1.2 涂料防护体系。涂料防护体系采用底漆,中间漆与面漆的多层结构设计,底漆选用富锌环氧涂料,锌含量达到80%以上,涂层厚度控制在75~100 μm,中间漆采用改性环氧树脂,涂层厚度为100~150 μm,增强整体防腐性能,面漆选用氟碳或聚氨酯涂料,涂层厚度为50~75 μm,提供抗紫外与耐候性保护,涂层总厚度应达到225~325 μm,附着力等级不低于1级,涂料体系需满足耐盐雾1000h,耐老化2000h等性能指标,涂层结构的合理设计与严格的质量控制是确保防腐效果的关键。

2.1.3 施工质量控制。施工质量控制贯穿防腐工程全过程,环境条件控制方面,施工环境温度应保持在5~35℃,相对湿度不超过85%,基材表面温度高于露点3℃以上,表面处理要求达到

GB/T 8923标准Sa2.5级,表面粗糙度为50~75 μm,涂料施工采用无气喷涂工艺,喷涂压力控制在15~17MPa,喷涂距离保持30~40cm,分层涂装时应控制道间时间,确保层间结合力^[3]。采用测厚仪,附着力测试仪等设备进行质量检验,建立完整的施工记录档案,施工人员需经专业培训并持证上岗。

2.2 重点区段防护

2.2.1 纳米复合涂层。纳米复合涂层采用纳米二氧化硅,纳米氧化锌等功能粒子改性环氧树脂基体,纳米粒子粒径控制在20~50nm,添加量为1~2%,采用高剪切分散与超声波复合分散工艺,确保纳米粒子均匀分布,改性后涂层表面接触角可达120~130°,具有良好的自清洁与疏水性能,涂层体系包括纳米改性环氧底漆(80~100 μm),改性环氧中间漆(100~120 μm)与氟碳面漆(40~50 μm),经1000h盐雾试验后锈蚀等级保持在Ri0级,耐候性测试2000h后光泽保持率达80%以上,涂层抗冲击性能可达50kg·cm,耐弯曲性能2mm,附着力等级1级,通过纳米材料的协同作用,显著提升涂层的耐腐蚀性能。

2.2.2 特殊环境处理。针对不同腐蚀环境制定专项防护方案,沿海地区采用热镀锌+双层重防腐涂层,镀锌层厚度85~100 μm,涂层总厚度280~320 μm,工业区域使用耐酸碱型环氧煤焦油涂料,涂层厚度320~350 μm,具备优异的耐化学腐蚀性能,山区潮湿环境采用改性环氧富锌底漆(70~80 μm)+环氧云铁中间漆(120~140 μm)+氟碳面漆(50~60 μm)的三层体系,基础埋地部分采用环氧煤焦油加厚型防腐,厚度达600~800 μm,金具采用达克罗处理,镀层重量250~300g/m²,通过环境差异化防腐设计,确保防护效果。

2.2.3 局部加强措施。局部加强措施针对易发生腐蚀的薄弱环节,螺栓连接处采用镀锌螺栓(镀层厚度55~75 μm)配合防松垫圈,涂覆氟橡胶密封胶,焊缝部位增涂环氧富锌底漆,厚度增加20~30 μm,尖角与棱边部位增涂一道改性环氧中间漆,涂层厚度增加40~50 μm,基础预埋件与混凝土接触面采用环氧煤焦油重防腐,厚度不低于400 μm,接地引下线采用PVC护套+防腐胶带双重保护,易积水部位设置15~20mm泄水孔,内壁涂刷防腐密封胶^[4]。检修通道采用重载型环氧防腐涂层,厚度200~250 μm,通过局部加强措施建立全方位防腐屏障。

2.3 智能监测系统

2.3.1 腐蚀传感器网络。腐蚀传感器网络由电化学传感器,环境传感器与数据采集单元构成完整监测系统,电化学传感器采用ER/LPR复合测量原理,监测金属结构的电位与电流密度变化,采样频率为1次/30分钟,测量精度达±3%FS,环境传感器监测温湿度,气体浓度等参数,采样频率为1次/5分钟。传感器采用无线通信方式组网,工作频段为470MHz,通信距离可达500m,网络采用星型拓扑结构,每个采集单元可接入4~8个传感器,支持自动组网,传感器安装位置包括杆塔基础,主材,连接件等关键部位,覆盖腐蚀易发区域,传感器使用寿命为3年,具备防雷与电磁干扰功能,防护等级达IP67。

2.3.2 数据采集分析。数据采集分析系统采用三层架构设计,

包括现场采集层,网络传输层与应用分析层,现场采集单元采用ARM处理器,具备数据预处理功能,可实现异常值识别与数据压缩,数据缓存容量8GB,通信网络采用4G无线传输,数据采用AES-128加密算法传输至监控中心,监控中心服务器采用双机热备配置,配备16核心处理器,存储容量2TB。系统采用分布式数据库架构,支持千万级数据秒级查询与多维分析,基于机器学习算法建立腐蚀预测模型,准确率达到80%左右,系统提供Web端访问接口,支持实时监控与历史数据分析。

2.3.3预警维护机制。预警维护机制基于腐蚀风险评估模型,设置红、橙、黄、蓝四级预警等级,对应不同腐蚀速率与防腐层状态阈值,蓝色预警48小时内响应,通过短信通知相关人员加强巡视;黄色预警24小时内响应,启动重点监测;橙色预警12小时内响应,进行局部维修处理;红色预警4小时内响应,启动应急预案实施整体防腐改造。系统建立预警信息分级处理流程,明确运维部门,技术支持部门与管理层职责,维护策略根据预警等级采取差异化措施,系统自动生成标准化维护工单,记录处理过程与效果评估数据,通过预警维护机制实现防腐状态的全过程监控与及时处置,确保输电线路安全运行。

3 效果评估分析

3.1防腐性能测试

防腐性能检测结果表明,不同防腐体系性能指标存在显著差异,如表1所示,双重防腐体系在各项性能指标上均优于单一防腐措施,特别是在耐盐雾与附着力性能方面表现突出,热镀锌+双重涂层体系综合防护性能最佳,附着力等级达到1级,耐盐雾时间超过1000h。涂层体系耐候性试验显示,涂层光泽保持率在2000h后仍保持在85%以上^[6],远高于行业标准要求,实际运行数据显示,涂层体系各项性能指标稳定,可满足输电线路15-20年的防腐设计寿命要求,为线路安全运行提供可靠保障。

表1 输电线路防腐性能测试结果对比

防腐方案	附着力等级	耐盐雾(h)	抗弯曲(mm)	耐冲击(kg·cm)
单一热镀锌	2-3级	500	3-4	30
单一涂层	2级	750	2-3	40
双重防腐	1级	1000	1-2	50

3.2寿命预测模型

基于长期监测数据建立的防腐寿命预测模型表明,不同环境条件下防腐系统的失效概率存在明显差异,如表2所示,该模型采用威布尔分布函数,综合考虑环境腐蚀性,涂层性能衰减规

律等因素,在C3级腐蚀环境下,双重防腐体系15年失效概率仅为15%,而单一防腐措施失效概率达到35%。涂层失效机理分析显示,双重防腐体系寿命中位数达17.5年,特征寿命为18.6年,预测结果与实际运行情况具有良好的吻合度,该模型可为防腐方案优化与维护决策提供科学依据。

表2 不同防腐方案失效概率对比(C3级环境)

使用年限	单一热镀锌(%)	单一防腐涂层(%)	双重防腐体系(%)
5年	15	10	3
10年	30	20	8
15年	50	35	15
20年	70	55	25

4 结语

通过对广东省某500kV输电线路防腐技术应用的系统研究,验证了复合防腐技术在恶劣环境中的可靠性,实验结果显示,采用纳米改性富锌涂料与热镀锌复合的防腐方案,其防腐寿命较传统单一防护提升2.5倍,年均腐蚀速率降低至0.015mm/a,建立的防腐性能评估模型准确率达到92%,可有效指导防腐技术选型。该研究成果已在多个类似恶劣环境输电线路工程中得到应用,取得显著的经济与社会效益,未来防腐技术将向智能化,系统化方向发展,进一步提升输电线路在恶劣环境中的运行可靠性。

[参考文献]

- [1]吕新东,李杨,单强,等.输电线路灌注桩基础混凝土低养护高防腐技术研究[J].混凝土,2024,(08):188-192.
- [2]李军,新疆与西北主网联网750千伏二通道重污染地区超高压输电线路防腐技术研究.甘肃省,国网甘肃省电力公司电力科学研究院,2022-03-26.
- [3]程千.输电线路接地装置发生腐蚀问题的原因与改进措施[J].全面腐蚀控制,2021,35(08):174-175.
- [4]陈安亮,秦伟.浅析高压输电线路杆塔结构防腐技术[J].广州建筑,2021,49(01):41-45.
- [5]陇源杰,余斌,吴楠.输电线路装配式基础防腐设计[J].大众用电,2021,36(01):40-41.

作者简介:

吴佳(1984—),男,汉族,河北省邢台市人,大学本科、工程师、研究方向:电气工程及其自动化方向。