

变电站接地网腐蚀检测与防腐措施研究

唐保科 苏 宸 李明胜

国网新疆电力有限公司阿克苏供电公司 新疆 阿克苏 843000

摘 要: 变电站接地网是电力系统安全运行的核心隐蔽基础设施,长期埋设于复杂土壤环境中,受电化学腐蚀、化学腐蚀、微生物腐蚀及杂散电流腐蚀多因素耦合作用,易导致导体截面损耗、接地性能衰减,威胁设备与人身安全。本文系统分析了接地网腐蚀机理,梳理了传统检测、无损检测及智能检测三类技术,构建了多维度腐蚀评价与分级体系,并从材料、结构、环境及智能监测四方面提出综合防腐措施,为变电站接地网运维管理提供理论支撑。

关键词: 变电站;接地网;腐蚀检测;防腐措施

引言: 变电站接地网承担防雷泄流与电位均衡功能,其腐蚀劣化直接影响电力系统安全。由于接地网深埋地下、结构隐蔽,腐蚀难以直观发现,传统开挖检测效率低且破坏性强,已无法满足智能电网运维需求。本文围绕接地网腐蚀机理、检测技术、评价分级及防腐措施展开系统研究,重点探讨无损检测与智能监测技术的应用,构建多维度腐蚀评价体系,并提出材料、结构、环境与智能监测相结合的综合防腐策略,以期提升接地网运维智能化水平。

1 变电站接地网腐蚀机理分析

1.1 接地网材料与结构特征

变电站接地网是电力系统防雷、故障泄流、电位均衡的核心隐蔽基础设施,直接关乎变电站设备与人身安全,其材料与结构特性是腐蚀易发的基础条件。目前国内绝大多数变电站接地网主要采用低碳钢、热镀锌扁钢作为主体材料,部分新建高等级变电站采用铜覆钢、铜质导体等耐腐蚀复合材质,不同材质的导电性能、化学稳定性差异较大,直接决定接地系统的抗腐蚀能力与服役年限。接地网普遍采用水平网格主体搭配垂直接地极的复合结构,通过焊接、搭接工艺形成整体导电网络,深埋于 0.8 至 1.5 米的地下土壤层中^[1]。该结构具备敷设范围广、焊接节点密集、整体封闭隐蔽的特点,日常运维难以直观检查内部状态。同时,接地网长期埋设于复杂土壤介质中,弯折部位、焊接接头、埋深过渡区域易产生结构应力,造成表层防护层开裂破损,使得金属基体直接接触土壤电解质环境,成为腐蚀萌生与快速扩展的薄弱区域。

1.2 腐蚀类型与成因

变电站接地网处于地下多介质耦合环境,腐蚀类型

多样,以电化学腐蚀为核心主导,同时叠加化学腐蚀、微生物腐蚀和杂散电流腐蚀,多腐蚀耦合作用大幅加速基体劣化。土壤中含有的水分、无机盐、酸碱离子可形成导电电解质溶液,接地钢材材质不均、受力差异、防护层破损会形成电位差,构成大量微观原电池,阳极金属持续溶解流失,造成导体截面缩减,是最普遍、最主要的腐蚀成因。化学腐蚀主要为土壤酸碱介质与钢材发生直接化学反应,无电流参与,在干燥、高盐碱土壤环境中表现更为突出。土壤中硫酸盐还原菌、铁细菌等微生物会通过代谢作用改变局部土壤酸碱度与氧化还原环境,加速金属锈蚀,在潮湿低洼、有机质丰富的场地腐蚀效果尤为显著。

2 变电站接地网腐蚀检测技术

2.1 传统检测方法

变电站接地网传统检测方法是电力行业经典的基础检测手段,主要包含开挖直视检测法、接地电阻测试法、土壤电阻率检测法三类,具备设备简易、操作便捷、成本低廉、技术成熟的优势,广泛应用于早期变电站常态化运维检测中。开挖直视检测法通过破土开挖接地网敷设区域,可直观观察钢材锈蚀、破损、断裂情况,能够精准判断局部腐蚀缺陷,但仅适用于局部点位检测,无法覆盖整体接地网格,且破土作业工程量大、效率低下,还会破坏场地硬化结构与植被。接地电阻测试法通过专用仪器检测整体接地电阻,依靠参数变化间接推断接地网劣化状态,作业无破坏性,但检测精度有限,无法区分电阻异常是土壤环境变化还是钢材腐蚀导致,且不能定位具体腐蚀故障点位。土壤电阻率检测仅用于评估土壤腐蚀环境等级,无法直接反映接地网本体腐蚀状态,整体检测局限性较为突出。

2.2 无损检测技术

接地网无损检测技术是无需破土、不破坏设备结构的新型检测技术,有效弥补了传统检测手段的弊端,目前已成为变电站接地网运维检测的主流方式。行业常用无损检测技术主要包括直流电位梯度法、电磁感应检测法、超声波检测法三类,适配不同检测场景与精度需求。直流电位梯度法依托地表电位分布差异,精准识别接地网腐蚀、断裂等缺陷点位,检测覆盖范围广、定位精度高,适用于大面积接地网故障排查^[2]。电磁感应检测法利用电磁耦合原理,通过收发电磁信号分析接地导体的截面损耗与锈蚀程度,检测效率高,适合变电站接地网整体普查工作。超声波检测法可精准检测钢材内部锈蚀、夹层缺陷,能够量化测量腐蚀损耗厚度,检测精度优异。无损检测技术全程无施工破坏、不干扰变电站正常运行、数据可靠性高,唯一短板是在高压设备密集、金属构件繁多的复杂场地,易受电磁场干扰,检测精度会小幅下降。

2.3 新型智能检测技术

随着智能电网数字化转型推进,物联网、大数据、人工智能、机器视觉等前沿技术逐步融入接地网检测领域,衍生出多种新型智能检测技术,实现了腐蚀检测从定期抽检向实时监测、人工判断向智能诊断的升级。当前主流智能检测技术包含物联网在线监测、机器视觉腐蚀识别、大数据腐蚀预测三大核心技术,适配现代化变电站运维需求。物联网在线监测通过在接地网关键节点布设智能传感器,全天候采集接地电阻、土壤温湿度、腐蚀电位等核心参数,突破传统检测的时间限制,实现24小时不间断监测。机器视觉技术结合高清采集设备与AI算法,自动识别钢材锈蚀、破损、变形特征,精准判定腐蚀等级,彻底规避人工检测的主观误差。大数据技术整合历年检测数据、环境数据与运行数据,构建腐蚀演化模型,可精准预判腐蚀发展趋势,提前预警风险。

3 接地网腐蚀评价与分级标准

3.1 评价指标体系

接地网腐蚀评价指标体系是实现设备状态精准评估的核心依据,遵循全面性、科学性、针对性原则,从本体状态、环境条件、运行性能三个维度构建多维度量化评价体系,覆盖腐蚀影响因素与劣化表征的全部核心参数。本体腐蚀指标为核心评价指标,包含钢材截面损耗率、腐蚀坑最大深度、锈蚀面积占比、焊接接头完好度、导体断裂数量等,可直观量化接地网本体的腐蚀损伤程度。环境影响指标为辅助评价指标,涵盖土壤电阻

率、酸碱度、含盐量、场地湿度、微生物含量及杂散电流强度,用于判定接地网所处环境的腐蚀恶劣等级。运行性能指标为安全评价指标,主要包括接地电阻、跨步电压、接触电压、故障电流泄放效率,直接反映接地网的实际运行安全能力。

3.2 腐蚀等级划分

结合电力行业标准规范与变电站接地网长期运行工况,可将接地网腐蚀状态划分为完好、轻微腐蚀、中度腐蚀、重度腐蚀、失效五个等级,各级别均设置明确的损伤特征与运维判定标准。一级完好状态下,接地导体无锈蚀、无截面损耗,焊接节点完整牢固,接地电阻参数稳定达标,无任何安全隐患,可正常长期运行。二级轻微腐蚀仅存在表层轻微氧化痕迹,无坑蚀、无截面损耗,接地性能正常,无需专项整改,仅需纳入常规监测即可^[3]。三级中度腐蚀表现为表层防护层完全失效,局部出现片状锈蚀,导体截面损耗率低于20%,接地电阻小幅波动,存在潜在隐患,需定期复查并开展局部防腐处理。四级重度腐蚀存在明显坑蚀、局部截面损耗率超20%,关键节点锈蚀严重,接地电阻超标,影响设备安全,需及时整改修复。五级失效状态为导体断裂、网格结构破损,接地功能完全失效,存在重大安全风险,必须立即停机更换改造。

3.3 综合评价方法

接地网腐蚀综合评价方法有效解决了单一参数判定片面、精度不足的问题,通过多指标融合分析,实现腐蚀状态的客观、精准量化评价,行业常用方法包括层次分析法、模糊综合评价法与加权评分法。层次分析法核心作用是指标权重分配,根据各参数对接地网安全运行的影响程度,科学区分核心指标与次要指标的评价权重,保障评价体系的合理性与针对性。模糊综合评价法依托模糊数学理论,将零散的检测数据转化为标准化量化等级,有效解决腐蚀边界模糊、难以精准界定的行业难题,规避人工评价的主观偏差。加权评分法整合本体腐蚀、环境、运行三类指标数据,结合对应权重计算综合得分,依据得分区间判定整体腐蚀等级。在实际工程应用中,多采用多种方法融合的评价模式,结合腐蚀发展规律与设备运行年限,综合判定接地网腐蚀等级、剩余使用寿命与安全风险,为运维整改、设备更换提供科学的理论依据。

4 变电站接地网防腐措施研究

4.1 材料防腐措施

材料防腐是变电站接地网源头防腐的核心手段,通

过优化导体材质与表层防护工艺,从根本提升接地系统的耐腐蚀能力,适配各类复杂土壤腐蚀环境。传统接地所用低碳钢耐腐蚀性较差,仅适用于土壤条件优良的变电站,长期运行易出现锈蚀损耗。现阶段防腐改造与新建工程多采用铜覆钢、锌覆钢、复合不锈钢等新型接地材料,这类材料兼具高导电、高强度、强耐腐蚀的优势,可大幅延长接地网服役周期。同时,表层防护处理是普及度最高的防腐方式,主流工艺包含热镀锌、冷镀锌、环氧涂层包覆、专用防腐涂料涂刷等,通过在钢材表面形成致密隔离防护层,隔绝金属基体与土壤电解质的接触,阻断腐蚀原电池的形成条件。针对老旧变电站改造,可对原有接地导体进行彻底除锈、补涂防腐层,修复破损防护体系。

4.2 结构防腐措施

结构防腐依托优化接地网设计与施工结构,消除结构缺陷引发的腐蚀隐患,通过改良布局、节点构造和敷设方式,延缓接地网整体腐蚀进程。在设计阶段,可优化接地网格布局,适当增大接地导体截面,预留充足的腐蚀损耗余量,避免长期腐蚀造成的截面不足、性能失效问题。焊接节点是腐蚀高发薄弱区域,施工中需采用满焊、搭接加固工艺,杜绝虚焊、漏焊等工艺缺陷,焊接完成后对接头打磨除锈,并做专项防腐包覆处理,消除节点腐蚀隐患。敷设施工时,主动规避低洼积水、高腐蚀土壤区域,严格控制标准埋深,保证导体敷设平整无挤压弯折,减少结构应力导致的防护层开裂破损。

4.3 环境防腐措施

环境防腐以改良接地网周边土壤腐蚀环境为核心,通过调控土壤介质参数、优化场地环境,削弱外部腐蚀条件,是老旧变电站防腐改造的重要手段。针对高盐分、强酸碱、高电阻率的强腐蚀土壤场地,可采用局部土壤置换技术,将接地网周边腐蚀土壤替换为中性、低阻、稳定性强的优质回填土,从根源降低介质腐蚀能力。同时,可添加膨润土、专用降阻防腐剂等改良材料,优化土壤酸碱度与电阻率,破坏腐蚀原电池的反应条件,弱化土壤腐蚀性能^[4]。场地积水是加速腐蚀的关键因素,通过完善变电站排水系统、疏通地下积水通道,可有效避免接地网长期浸泡在潮湿环境中,减少干湿交替引发的加速腐蚀效应。针对微生物活跃的土壤区域,可投放专用抑菌材料,抑制硫酸盐还原菌等腐蚀微

生物繁殖代谢。

4.4 智能防腐监测措施

智能防腐监测是依托数字化、智能化技术构建的主动式防腐防控体系,突破传统被动维修、定期检测的局限,实现接地网腐蚀状态实时监测、风险提前预警、隐患精准管控。该体系以物联网感知、大数据分析、智能预警终端为核心,在接地网关键腐蚀点位、主干导体节点布设高精度传感器,全天候采集土壤温湿度、含盐量、接地电阻、腐蚀电位、杂散电流等核心数据,实时监控腐蚀环境与设备运行状态。所有监测数据实时上传云端平台,通过大数据算法建模分析腐蚀速率变化规律,精准识别异常腐蚀隐患,自动触发预警信号,为运维人员提供精准的故障定位与处置依据。运维人员可依托预警信息提前开展防腐维护、隐患整改,杜绝腐蚀持续恶化引发的安全事故。同时,系统可积累长期运行数据,构建接地网全生命周期腐蚀模型,为防腐方案优化、设备更换周期制定提供数据支撑,实现防腐运维智能化升级。

结束语

本文系统研究了变电站接地网腐蚀机理、检测技术、评价分级与防腐措施,明确了多因素耦合腐蚀是接地网劣化的主因,无损检测与智能监测技术可实现精准化、实时化诊断,多维度评价体系为腐蚀分级提供了科学依据。材料、结构、环境与智能监测四位一体的综合防腐策略,能有效延长接地网服役寿命。未来应深化人工智能与数字孪生技术融合,推动接地网防腐运维向全生命周期智能化管理升级。

参考文献

- [1] 张文龙,张劲松,孟垂懿,等.变电站接地网腐蚀状态下的性能参数研究[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2026,22(1):52-58.
- [2] 郑涛.变电站接地网腐蚀及防腐途径[J].全面腐蚀控制,2022,36(1):139-140.
- [3] 秦倩飞,卫泽众,邱国斌,等.变电站接地网腐蚀机理及防腐措施研究综述[J].全面腐蚀控制,2025,39(4):214-219,223.
- [4] 韦瑞尧,王熙俊,吴华成,等.变电站接地网腐蚀诊断研究进展及其应用[J].东北电力技术,2024,45(5):16-21,25.