

风力发电设备检修引起地电阻率变化的分析研究

赵波波

山西粤电能源有限公司 山西 太原 030000

摘要：本文聚焦风力发电设备检修引起地电阻率变化的分析研究，先分类阐述电气系统、机械系统检修及接地系统改造等典型检修作业类型，剖析其对土壤的潜在影响。接着从热效应、机械扰动、化学污染及多因素耦合等方面研究检修引起地电阻率变化的机理。然后介绍地电阻率动态监测技术、方案设计与实施以及数据处理方法。因此，评估地电阻率变化的危害性，提出检修工艺优化建议，并设计动态监测与预警系统，为保障风力发电设备安全运行提供理论支持与实践指导。

关键词：风力发电设备；检修扰动；地电阻率

1 风力发电设备检修作业类型与影响分析

1.1 典型检修作业分类

1.1.1 电气系统检修

电气系统是风力发电设备的核心组成部分，包括发电机、变压器、开关柜、电缆等。电气系统检修主要针对这些设备的电气性能进行检测、维护和修复。例如，对发电机的绝缘性能进行测试，检查电缆的接头是否松动或老化，对变压器进行油样分析等。电气系统检修通常需要断开部分或全部电气连接，使用各种电气测试仪器和工具，可能会涉及到电焊、切割等操作。

1.1.2 机械系统检修

机械系统检修主要针对风力发电设备的机械部件，如叶片、齿轮箱、主轴、轴承等。叶片作为风力发电的关键部件，长期暴露在恶劣的自然环境中，容易受到风沙、雨水、紫外线等的侵蚀，可能会出现裂纹、磨损等问题。齿轮箱是将风轮的低速旋转转换为发电机高速旋转的重要部件，其内部齿轮和轴承在高速运转下会产生磨损和疲劳。机械系统检修需要对这些部件进行拆卸、检查、更换或修复，通常使用起重设备、专用工具等进行作业。

1.1.3 接地系统改造

接地系统是保障风力发电设备安全运行的重要设施，它能够将设备上的雷电过电压和操作过电压引入大地，保护设备和人员安全。随着时间的推移和环境的变化，接地系统可能会出现腐蚀、断裂、接地电阻增大等问题，需要进行改造和升级。接地系统改造包括更换接地极、重新铺设接地网、改善接地土壤条件等作业^[1]。

1.2 检修作业对土壤的潜在影响

风力发电设备检修作业可能会对周围土壤产生多方面的潜在影响。在电气系统检修中，电焊、切割等操作

可能会产生高温和电火花，对土壤表层造成热损伤，改变土壤的物理和化学性质。机械系统检修过程中，使用起重设备和其他重型机械进行部件吊装和搬运，可能会对土壤产生压实作用，破坏土壤的结构和孔隙度，影响土壤的透气性和透水性。接地系统改造时，挖掘土壤、更换接地极等作业会直接扰动土壤，改变土壤的原有层次和组成。另外，检修过程中可能会使用一些化学物质，如润滑油、清洗剂等，这些化学物质如果泄漏到土壤中，可能会对土壤的化学性质产生污染，影响土壤中微生物的生存和活动，进而间接影响地电阻率。

2 检修引起地电阻率变化的机理研究

2.1 热效应导致的电阻率变化

在风力发电设备检修过程中，电气系统检修产生的电焊、切割等操作会产生大量的热量。这些热量会传递给周围土壤，使土壤温度升高。土壤的电阻率与温度密切相关，一般情况下，土壤电阻率随温度的升高而降低。这是因为温度升高会使土壤中的离子活动能力增强，导电性提高。然而，如果温度过高，可能会导致土壤中的水分蒸发，使土壤含水量降低，反而会使电阻率升高。此外，热效应还可能引起土壤中有机质的分解和化学变化，进一步影响土壤的电阻率。

2.2 机械扰动对土壤结构的破坏

机械系统检修和接地系统改造过程中使用的重型机械会对土壤产生压实和扰动作用。土壤压实会使土壤颗粒之间的孔隙减小，空气含量降低，导致土壤的导电性变差，电阻率升高。同时，机械扰动可能会破坏土壤的原有结构，使土壤颗粒重新排列，形成新的导电通道或阻断原有的导电通道，从而引起地电阻率的变化^[2]。例如，在挖掘土壤进行接地系统改造时，如果挖掘深度和范围不当，可能会破坏土壤的层次结构，使上层土壤与

下层土壤混合,改变土壤的电阻率分布。

2.3 化学污染物的导电性改变

检修中使用的润滑油、清洗剂等化学物质,若泄漏到土壤中会造成化学污染。这些污染物会与土壤中的矿物质和有机质发生反应,改变土壤离子组成和浓度,进而影响导电性。比如,部分有机污染物分解会产生导电离子,增加土壤溶液离子浓度,降低土壤电阻率;另一些化学物质会与土壤离子发生络合反应,形成不导电络合物,减少自由离子数量,升高土壤电阻率。此外,化学污染还会改变土壤酸碱度,不同酸碱度下土壤中离子的存在形式和活度不同,如酸性土壤中氢离子促进金属离子溶解,增强导电性;碱性土壤中氢氧根离子与金属离子形成沉淀,降低导电性。

2.4 多因素耦合效应

在实际的风力发电设备检修过程中,地电阻率的变化往往是多种因素共同作用的结果,即多因素耦合效应。例如,在电气系统检修时,电焊操作产生的热效应会使土壤温度升高,同时电焊过程中可能会溅出少量的金属熔渣,这些金属熔渣进入土壤后会引发化学污染。而此时,如果周围有机机械系统检修正在进行,重型机械的碾压又会对土壤产生机械扰动。这三种因素相互影响、相互叠加,使得地电阻率的变化更加复杂。热效应可能会导致土壤水分蒸发,改变土壤的含水量,进而影响机械扰动对土壤结构的作用效果;化学污染物的存在可能会改变土壤的化学性质,影响热效应下离子的活动能力。多因素耦合效应使得准确预测和评估检修引起地电阻率变化的难度大大增加。

3 地电阻率动态监测与数据分析

3.1 监测技术与方法

目前,常用的地电阻率监测技术主要包括四极法、三极法和高密度电法等。四极法是一种传统的地电阻率测量方法,通过向地下注入电流,测量两个测量电极之间的电位差,进而计算出地电阻率。该方法原理简单,操作方便,但测量效率较低,适用于小范围的监测。三极法是在四极法的基础上发展而来的,它利用一个无限远的极作为电流极,减少了电极布置的复杂性,提高了测量效率。高密度电法是一种集电法勘探与计算机技术于一体的物探方法,它通过在测线上布置大量电极,自动采集多个测点的电阻率数据,能够快速、准确地获取地下电阻率的分布信息,适用于大范围、高精度的地电阻率监测。另外,随着物联网技术的发展,无线传感器网络技术也逐渐应用于地电阻率监测领域。通过在监测区域布置多个无线地电阻率传感器,能够实时、连续地

采集地电阻率数据,并将数据通过无线通信方式传输到监控中心,实现对地电阻率的远程动态监测。

3.2 监测方案设计与实施

设计地电阻率动态监测方案,需综合考量风力发电场规模、布局、检修作业频率与范围等因素。首先,依据监测目的和精度要求确定监测点数量与分布。监测点要覆盖检修作业可能影响区域,着重监测作业频繁、对土壤扰动大的地方,像电气系统检修车间附近、机械系统检修场地周边及接地系统改造区域,应适当加密监测点;其次,挑选合适的监测设备与技术。依据监测区域地质条件和精度要求选监测方法,小范围、精度要求高用四极法或三极法;大范围、需快速获取电阻率分布信息用高密度电法^[3]。同时,要保证监测设备稳定可靠,定期校准维护;最后,制定详细监测计划与时间安排。结合风力发电设备检修计划,在检修作业前、中、后分别监测,获取不同阶段地电阻率变化数据。还要建立长期监测机制,定期监测,掌握地电阻率长期变化趋势。

3.3 数据处理与变化特征提取

采集到的地电阻率数据往往包含大量的噪声和干扰信息,需要进行预处理以提高数据的质量。常用的数据预处理方法包括滤波、平滑处理等。滤波可以去除数据中的高频噪声,平滑处理可以使数据曲线更加平滑,便于后续的分析。在对数据进行预处理后,需要提取地电阻率的变化特征。可以通过计算地电阻率的变化率、变化幅度等指标来描述地电阻率的变化情况。例如,计算检修作业前后地电阻率的差值与检修前地电阻率的比值,得到地电阻率的变化率,以评估检修作业对地电阻率的影响程度。同时,可以采用时间序列分析方法,分析地电阻率随时间的变化趋势,判断地电阻率的变化是否具有周期性或规律性。此外,还可以结合地理信息系统(GIS)技术,将地电阻率数据与监测点的地理位置信息相结合,绘制地电阻率分布图,直观地展示地电阻率在空间上的变化情况。

4 影响评估与防控对策

4.1 地电阻率变化的危害性评估

地电阻率变化会对风力发电系统产生诸多危害。当地电阻率升高,接地系统电阻增大,雷击或电气设备故障时,设备过电压难以及时泄入大地,可能损坏设备绝缘,引发火灾、爆炸,威胁人员生命安全,还会降低设备可靠性与使用寿命。当地电阻率降低,虽利于过电压泄放,但在潮湿环境下,可能使接地装置周围积水,加快金属部件腐蚀,削弱接地系统性能。此外,地电阻率不均匀变化会在接地系统形成电位差,引发地电位反

击,导致雷电流或故障电流在设备外壳与接地装置间反向流动,损坏内部电子元件。同时,不均匀的地电阻率分布还可能干扰设备正常运行信号,造成误动作,影响电力生产连续性。

4.2 检修工艺优化建议

4.2.1 电气系统检修工艺优化

电气系统检修优先采用激光焊、电子束焊等低温焊接技术,其在保证焊接质量的同时,能降低热量传递,减少对土壤的热损伤。合理安排电气设备检修顺序与时间,避免同一区域长时间高温作业,防止热量在土壤中积累;电气设备拆卸和安装要用专用无损检测工具与拆卸技术,减少对土壤的机械扰动。如用液压千斤顶吊装搬运部件,避免重型机械碾压土壤。检修时做好设备密封,防止润滑油、清洗剂泄漏,可在设备周围设防泄漏围挡,及时收集处理泄漏的化学物质。

4.2.2 机械系统检修工艺优化

机械系统检修时,依设备重量和尺寸选合适的起重设备与吊装方法,减少对土壤压实。如用分布式起重系统分散设备重量,降低单个支撑点压力。吊装时控制速度和高度,避免部件与地面剧烈碰撞;机械部件拆卸和维修尽量在专门维修车间进行,减少现场大规模拆卸。现场维修要做好地面保护,如铺防护垫板。及时清理维修产生的金属碎屑、油污等杂物,防止污染土壤。

4.2.3 接地系统改造工艺优化

接地系统改造前要详细地质勘察,了解土壤电阻率分布、地下水位等,制定科学改造方案。依结果选合适接地极材料和接地网布局,挖掘时控制深度和范围,用分层挖掘、回填保持土壤层次结构。接地极安装采用压力灌注、振动沉桩等先进技术,保证连接质量,严格检测验收,确保接地电阻达标,采取镀锌、用降阻剂等防腐蚀措施,延长使用寿命^[4]。

4.3 动态监测与预警系统设计

4.3.1 系统架构设计

该系统采用分层架构,涵盖数据采集层、传输层、处理层和应用层。数据采集层以地电阻率传感器、气象传感器等为主,可实时采集地电阻率、土壤温湿度、降雨量等数据。数据传输层运用ZigBee、LoRa等无线通信技术,将采集的数据传至数据处理层。数据处理层负责数据的存储、分析与处理,提取地电阻率变化特征,并与预设阈值对比。应用层依据处理层结果发出预警信

息,提供决策支持。

4.3.2 预警指标设定

预警指标设定是系统关键。需结合风力发电场实际情况与历史数据,确定地电阻率变化预警阈值,可设黄色、橙色、红色多级预警。当地电阻率变化率或幅度超黄色预警阈值,系统发黄色预警,提醒关注;超橙色预警阈值,发橙色预警,启动进一步检查评估;超红色预警阈值,发红色预警,立即停止相关检修作业并紧急处理。同时,要考虑气象条件、检修作业类型和强度等相关因素。如降雨天气或大规模机械检修作业时,应适当调整预警阈值,增强预警敏感性。

4.3.3 系统功能实现

系统应具备实时监测、数据存储、分析、预警发布和决策支持等功能。实时监测可实时显示地电阻率等数据变化,助操作人员掌握现场信息。数据存储能长期留存数据,为后续分析研究提供支持。数据分析采用时间序列分析、神经网络分析等算法,准确提取特征、预测趋势。预警发布及时准确通知相关人员,方式包括短信、邮件、声光报警等。决策支持依预警结果和实际情况,提供调整检修计划、采取防护措施等合理建议。

结束语

风力发电设备检修引起地电阻率变化的研究意义重大,通过深入分析检修作业类型与影响、变化机理,以及开展地电阻率动态监测与数据分析,我们清晰认识到检修作业对地电阻率的复杂影响。危害性评估表明,地电阻率变化威胁设备与人员安全,影响电力生产。而提出的检修工艺优化建议和动态监测与预警系统设计,为降低影响提供了有效途径。未来,需持续完善研究,加强实践应用,不断提升对地电阻率变化的应对能力,保障风力发电系统的稳定运行,推动风电行业可持续发展。

参考文献

- [1]高熹微,张宇,郭宇鑫,等.风力发电设备检修引起地电阻率变化的分析研究[J].中国地震,2025,41(1):114-125.
- [2]邓佳,谭代伦.基于旅行商路径与任务指派的风力发电设备检修问题研究[J].通化师范学院学报,2024,45(2):52-59.
- [3]乌友坦达来.风力发电设备检修维护中的火灾风险挑战与应对策略研究[J].消防界,2024,10(16):76-78.
- [4]刘强强,王冬林.风力发电机组检修中的状态检修技术探析[J].电力设备管理,2024(14):128-130.