

山东省输变电设备的大气腐蚀与评价现状

吴亚平^{1,2}, 宗立君², 米春旭^{1,2}, 田辉^{1,2}, 王倩^{1,2}

(1.山东中实易通集团有限公司, 济南 250010; 2.国网山东省电力公司电力科学研究院, 济南 250002)

摘要: **目的** 了解山东省辖属输变电设备的大气腐蚀现状, 衡量大气腐蚀图技术对输变电设备大气腐蚀评价的准确性。**方法** 通过实地调查的方式开展山东省典型大气环境下输变电设备腐蚀与评价现状的调研。**结果** 变电设备中, 壳体、箱体的腐蚀案例最多, 其次是变压器和紧固件, 钢构支架、铝合金构件、隔离开关等也发生了程度不一的腐蚀。输电设备的腐蚀主要集中于输电杆塔与紧固件。对比发现, 动态大气腐蚀图评价结果与现场调研获得的腐蚀评价结果一致性高, 受制于微环境的影响, 仅局部预测结果出现偏差。**结论** 应提高沿海地区、化工密集区域大气腐蚀检测站点的布点密度, 改善大气腐蚀图在局部高腐蚀性区域的成图准确性, 并从金属材料腐蚀特性、大气环境分类及大气腐蚀检测站点密度等方面综合优化大气腐蚀检测的精度, 以提升大气腐蚀图评价结果的准确性。

关键词: 输变电设备; 腐蚀调查; 大气腐蚀图; 腐蚀检测; 腐蚀评价; 典型大气环境

中图分类号: TG172.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)02-0105-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.02.012

Atmospheric Corrosion and Evaluation Status of Power Transmission and Transformation Equipment in Shandong Province

WU Yaping^{1,2}, ZONG Lijun², MI Chunxu^{1,2}, TIAN Hui^{1,2}, WANG Qian^{1,2}

(1. Shandong Zhongshi Yitong Group Co., Ltd., Jinan 250010, China;

2. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China)

ABSTRACT: The work aims to study the atmospheric corrosion status of power transmission and transformation equipment in Shandong province and measure the accuracy of atmospheric corrosion evaluation of power transmission and transformation equipment by atmospheric corrosion map technology. The corrosion and evaluation status of power transmission and transformation equipment was investigated in typical atmospheric environment of Shandong province through field survey. It was found that in the substation equipment, the corrosion cases of the shell and box were the most, followed by the transformers and fasteners, while the steel constructions, aluminum components and disconnectors were also corroded in varying degrees. The corrosion of transmission equipment mainly focused on transmission towers and fasteners. By comparison, it was found that the evaluation results of dynamic atmospheric corrosion map were in good agreement with the corrosion evaluation results obtained by field investigation, while the corrosion prediction results in local areas were deviated due to the impact of the actual environment. It is shown that the accuracy of atmospheric corrosion map should be improved by increasing the distribution density

收稿日期: 2024-07-18; 修订日期: 2024-08-13

Received: 2024-07-18; Revised: 2024-08-13

基金项目: 山东中实易通集团有限公司科技项目 (CG YF23-02)

Fund: The Special Funds of Science and Technology Project in Shandong Zhongshi Yitong Group Co., Ltd. (CG YF23-02)

引文格式: 吴亚平, 宗立君, 米春旭, 等. 山东省输变电设备的大气腐蚀与评价现状[J]. 装备环境工程, 2025, 22(2): 105-113.

WU Yaping, ZONG Lijun, MI Chunxu, et al. Atmospheric Corrosion and Evaluation Status of Power Transmission and Transformation Equipment in Shandong Province[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(2): 105-113.

of atmospheric corrosion monitoring points in coastal and chemical intensive areas. In addition, the accuracy of atmospheric corrosion detection method should be improved from the aspects of corrosion characteristics of metal materials, atmospheric environment classification and atmospheric corrosion detection site density, to enhance the accuracy of evaluation results of atmospheric corrosion map.

KEY WORDS: power transmission and transformation equipment; corrosion investigation; atmospheric corrosion map; corrosion detection; corrosion evaluation; typical atmospheric environment

输变电设备在电力系统中承担着输送、调整及分配电能的关键任务。输变电设备的可靠运行,直接影响着输变电工程乃至整个电网的安全稳定。然而,输变电设备地理分布范围跨度大,服役环境种类多,大气腐蚀已然成为导致输变电设备性能劣化不可忽视的原因之一^[1-3]。近年来,日益增多的工业生产活动使得自然环境气候复杂多变,在沿海及重工业污染环境地区,输变电设备构件受到严重大气侵蚀甚至破坏^[4-6]。防腐涂料、大气腐蚀图及腐蚀监测平台等新型技术的开发,有效提升了输变电设备防腐设计水平,保障了电网设备的安全运行^[7-11]。

山东省地处中国东部,东临海洋,海岸线全长超过3 000 km,气候属典型暖温带季风气候。作为国内的经济强省,山东省内重工业、化工业等第二产业具有种类多、规模大、发展速度快的特点^[12]。在山东发展海洋强省的战略指引下,沿海区域用电负荷高速增加,沿海电力工程多、载荷高,重要性日益凸显。显而易见,工业发达区与用电高负荷区高度重合。输变电设备的大气腐蚀不仅受到温度、湿度、表面润湿时间等气象环境因子的影响,大气环境中硫化物、氮化物等腐蚀性介质以及海洋周边的高氯环境进一步加剧了输变电设备的腐蚀速度,给输变电设备的腐蚀防护工作带来极大挑战。部分区域如临港化工区的输变电设备会受到海洋大气中 Cl^- 和工业污染大气中 SO_2 等腐蚀性环境因子的协同影响,加速了腐蚀破坏^[13-14]。

随着用电负荷的不断提高,电力工程数量不断增加,对输变电设备智能化及差异化的防腐需求越来越迫切。传统的挂片暴露法周期长、数据少、成本高,而新型大气腐蚀在线检测技术的开发可实现输变电设备大气腐蚀的精准评价。研究人员根据金属腐蚀速率构建了相应的大气腐蚀图。大气腐蚀图技术可在地理图上描述区域大气环境腐蚀强弱,使用者可以方便、快捷地获取目的地的大气腐蚀数据^[8]。大气腐蚀图的动态化可实时更新输变电设备金属材料的腐蚀速率及腐蚀等级评价结果,能够用于指导输变电设备的选材及差异化防腐维护^[15-17]。针对山东省典型城市沿海高湿、工业污染的环境特点,开展山东省输变电设备大气腐蚀与评价现状的调查分析,可了解典型大气环境中现场输变电设备或部件的真实腐蚀情况,掌握山东省典型区域电力材料和设备部件的腐蚀类型,

比较大气腐蚀图数据与实际现场输变电设备腐蚀情况的对应性,分析现有大气腐蚀图评价方法存在的问题,以针对性地提升大气腐蚀图的准确性和实用性。

1 典型大气环境中输变电设备的腐蚀状况调查

在现有大气腐蚀检测站、暴露腐蚀试验站以及典型大气环境选择腐蚀调查站点。调研方法采用现场座谈和实地勘察的方式,以了解各公司的腐蚀现状,收集防腐运维历史资料。实地勘察的设备主要分为变电站内设备与输电线路设备。其中,变电站内设备包括变压器(外部)、传动机构、隔离开关、支构架、波纹管、导电母排(管)、导线、金具、箱体等。输电线路设备包括杆塔、横担、金具、导线、架空地线等。

本次腐蚀调查区域选择在烟台、淄博、日照、滨州、东营5个地市开展,既包括沿海区域、海岸浪花区,也覆盖了化工密集区,设备投运时间为1~30 a不等。收集统计碳钢、镀锌钢、不锈钢和铝合金4种材质为主的输变电设备腐蚀案例,重点分析输变电设备发生大气腐蚀的原因,并对输变电设备进行现场腐蚀评价。共调研110、220 kV变电站29座,110、220 kV输电线路19条,收集典型腐蚀案例156起。

1.1 变电设备大气腐蚀典型案例

调查了220 kV变电站23座,110 kV变电站6座。经统计发现,变电站腐蚀案例131例,其中设备壳体、箱体案例最多,共49例,占全部案例的37%。其次是变压器和紧固件,分别是26例和21例,占总数的20%和16%。钢构支架约占11%,铝构件约占11%,隔离开关占5%。变电站内设备腐蚀案例分布情况如图1所示。

1) 不锈钢箱体、壳体。变电站内各类操控机构箱体外壳的主要材质为304不锈钢,具有良好的耐腐蚀性,通常表面无需涂镀保护层而直接进行使用。调研发现,部分重工业、化工业密集区,不锈钢依然会发生点蚀,同时与其他种类金属接触部位还会发生电偶腐蚀。烟台SW 220 kV变电站于1998年投运,靠近海岸,同时周边有密集的化工厂区,大气环境恶劣,现场不锈钢壳体整体表面已经失去光泽,折弯处有明显的红锈,铰链处腐蚀异常严重,影响了正常的开合

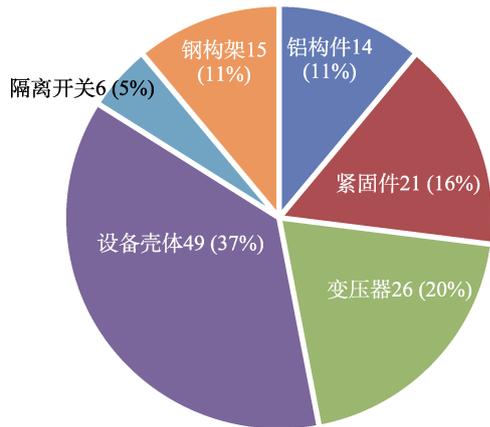


图 1 变电站内设备腐蚀案例分布
Fig.1 Corrosion cases of equipment in substation

功能。东营 LH 220 kV 变电站于 2015 年投运, 地处化工区域, 并且紧邻海岸线, 操作机构箱体的不锈钢外壳腐蚀严重。滨州某 110 kV 变电站于 1998 年投运, 该站深陷化工厂区, 不锈钢壳体同样发生严重腐蚀。滨州 DY 220 kV 变电站至今运行 20 余年, 虽然该站周围主要为农田, 不锈钢材质的地刀闸操作机构壳体在长时间服役的情况下已经发生点蚀。典型不锈钢箱体外壳腐蚀案例如图 2 所示。



图 2 操动机构箱体外壳
Fig.2 Shell of operating box

不锈钢目前在电力系统中典型的应用场景包括各种操作机构壳体、GIS 连接的波纹管、紧固螺栓以及护栏围栏等。不锈钢构件受力状况简单, 主要发挥隔离保护作用。大气环境中引起不锈钢腐蚀的主要因素是侵蚀性活性离子, 如 Cl^- 、 HSO_3^- 等^[18-19], 该类活性离子对不锈钢表面的致密氧化层有较强破坏作用, 氧化层的修复速度低而引起不锈钢腐蚀。调研发

现, 不锈钢发生大气腐蚀的主要原因有: 原材料材质不合格, 用普通不锈钢代替奥氏体不锈钢, 耐腐蚀性不足; 大气环境腐蚀性严重, 未针对不同大气环境开展差异化防腐设计, 运维过程难以进行有效防腐处理。

2) 变压器。变压器作为变电站的核心设备, 普遍采用碳钢, 主要采取涂刷涂料的方式实现防腐^[20]。易发生腐蚀的部位包括壳体、油枕、放油阀、散热片及法兰等。滨州 WD 110 kV 变电站内主变压器于 2001 年投运, 至今运行 20 余年, 如图 3 所示。虽处于乡村环境, 大气腐蚀性较弱, 但散热片、风机外壳均已有红锈流出, 油枕缝隙部位腐蚀严重。变压器的复杂外形、热胀冷缩效应及高温可导致有机涂层加速老化, 以及散热强风的冲刷作用均是变压器碳钢外层涂层加速腐蚀的重要原因。变压器外部发生腐蚀的原因主要有: 防腐涂层工艺不佳, 防腐涂层厚度不足, 或边角区域存在涂料漏喷少喷现象, 以及在设备安装过程中造成防腐涂层破损。



图 3 WD 110 kV 变电站主变压器和油枕
Fig.3 Transformer and oil tank in WD 110 kV substation

3) 隔离开关。隔离开关发生腐蚀的主要部位有连杆、操作机构和开关触头。其中连杆和操作机构的主要材质为碳钢、铝合金或不锈钢, 其主要防腐措施为热浸镀锌或涂刷涂料, 开关触头的主要材质为表面镀银的铜合金。滨州 CK 110 kV 变电站位于北部滩涂区, 投运时间为 1998 年 5 月。该站地处鲁北化工区域, 与化工厂仅一墙之隔。在潮湿环境、工业污染和长时间服役共同作用下, 隔离开关部件腐蚀现象明显, 如图 4 所示。引起隔离开关部件腐蚀的主要原因有: 在工业含硫大气环境中, 镀银层易发生腐蚀变黑;

防腐工艺不合格导致腐蚀；连杆与操作机构活动多，易造成磨损导致镀锌层破坏，导致腐蚀。



图4 滨州 CK 110 kV 变电站隔离开关
Fig.4 Disconnector in Binzhou CK 110 kV substation

4) 紧固件。紧固件主要通常选用碳钢、低合金钢和不锈钢,主要防腐措施采用热浸镀锌和涂刷涂料^[21]。调查发现,紧固件腐蚀现象普遍。日照 AD 220 kV 变电站于 2007 年投运,东北方向 1 km 内有钢铁厂和化工厂,站内避雷针螺栓锈蚀严重,有明显红锈流出,如图 5 所示。紧固件发生严重大气腐蚀的主要原因有:零部件执行不同的标准,设备整体防腐性能参差不齐,如紧固件的防腐涂镀层质量如厚度、涂层完整性等不能与主体材料相匹配,安装及运行过程中紧固件镀锌层发生破坏,同时缺乏有效的防腐方法。



图5 AD 220 kV 变电站避雷针螺栓
Fig.5 Bolt of lightning rod in AD 220 kV substation

1.2 输电设备大气腐蚀典型案例调查

经调查共发现输电线路腐蚀案例 25 例,其中杆塔和紧固件 23 例,导线 1 例,金具 1 例。

1) 输电铁塔。输电铁塔通常采用镀锌钢,设计服役寿命在 40 a 以上。烟台 220 kV LL 线于 1996 年投运,海水涨潮可直接淹没塔腿。因腐蚀严重,已于 2008 年更换 6 m 以下塔材,2016 年进行防腐加固,最近一次防腐于 2019 年完成。即使在高频防腐维护下,现场仍发现主材减薄明显,表面锈蚀严重,如图 6 所示。目前造成镀锌钢铁塔无法达到设计服役年限的主要原因是重腐蚀环境下的镀锌层消耗快、二次防腐保护效果差等。



图6 220 kV LL 线塔腿
Fig.6 Tower legs for 220 kV LL transmission line

2) 钢芯铝绞线。钢芯铝绞线其自身结构具有特殊性,存在外部铝材与内部镀锌层接触界面,易发生异种金属接触腐蚀^[22]。烟台 110 kV BS 线采用的是耐蚀钢芯铝合金导线,在运行 20 a 后发生严重的断股掉线事故,退役钢芯铝绞线如图 7 所示。从图 7 中可以看出,导线表面覆有严重的污秽,呈灰黑色。剥开外层之后,发现内层有大量白色腐蚀产物,腐蚀导致单丝缩颈明显。



图7 110 kV BS 线退役钢芯铝绞线
Fig.7 Steel-cored aluminium strand decommissioned from 110 kV BS transmission line

综上所述,由于沿海和化工等腐蚀环境,山东输电设备服役环境腐蚀性较重。同时,由于设备原材质不合格、防腐施工质量差、运维阶段开展防腐工作难度大、腐蚀专业人员缺乏等原因,导致现场腐蚀案例较多。

2 输变电设备大气腐蚀的评价现状

传统大气腐蚀性评价主要通过人工暴露法,数据获取周期长,数据准确性受人为因素影响大。为更直观地对比各地域金属材料的腐蚀状态,研究人员根据不同地域的金属腐蚀速率绘制了多个地区的大气腐蚀图^[8]。起初的大气腐蚀图为静态大气腐蚀图,主要是基于历史腐蚀数据和人工暴露腐蚀数据绘制而成。随着大气腐蚀检测技术的发展,基于智能大气腐蚀监测仪获得腐蚀数据的动态大气腐蚀图技术发展起来。目前在山东省选择 100 个腐蚀站点安装大气腐蚀检

测仪,能够直接对该站点腐蚀速率进行检测。通过构建金属腐蚀速率与环境因子、服役时间的关系模型,可对未安装腐蚀检测仪的空白区域的腐蚀速率进行预测,同时对未来时刻的腐蚀速率进行预测。基于大气腐蚀检测仪采集的腐蚀数据及预测数据绘制出山东省大气腐蚀图,实现了对山东省输变电设备大气腐蚀的评价^[15]。从大气腐蚀图可查询典型输变电设备金属材料的腐蚀速率、腐蚀等级及服役寿命等腐蚀数据^[23]。

2.1 变电设备大气腐蚀的评价

变电设备腐蚀现状调查内容包括腐蚀案例数量、腐蚀外观形貌及涂镀层厚度等。将变电设备大气腐蚀程度的现场评价分为轻度腐蚀、中度腐蚀、重度腐蚀 3 个级别。由于变电站内涉及设备种类多,腐蚀案例的数量可真实反映变电站的腐蚀程度,因而将变电站内设备的腐蚀案例数量(n)作为变电站整体腐蚀程度的判断依据。当 $n \leq 1$ 时,将腐蚀程度视为轻度腐蚀;当 $1 < n \leq 5$ 时,将腐蚀程度视为中度腐蚀;当 $n > 5$ 时,将腐蚀程度视为重度腐蚀。同时,根据变电站的地理位置坐标,查询该站点在动态大气腐蚀图上的腐蚀等级。大气腐蚀图评价结果依据来源于 GB/T 19292.1—2018《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 第 1 部分:分类、测定和评估》,大气腐蚀性从弱到强分为 C1~CX 共 6 个等级。以 C1~C2 为轻腐蚀等级, C3 为中腐蚀等级, C4~CX 为重腐蚀等级^[24]。对比分析大气腐蚀图评价结果的准确度,当大气腐蚀图评级与现场腐蚀调查等级相符时,将准确度定为“高”,当二者不符时,将准确度定为“低”。

变电站的大气腐蚀调查与评价情况见表 1。从表 1 中可以看出,变电站均发生了一定程度的腐蚀,其中 220 kV 变电站发生轻度腐蚀、中度腐蚀与重度腐蚀的比例相当,110 kV 变电站发生重度腐蚀的比例较高。发生腐蚀的原因与大气环境种类及防护方法有关。例如淄博 MS 110 kV 变电站、滨州 CK 110 kV 变电站紧邻化工厂区,烟台 SW 220 kV 变电站位置近海、服役年限久,烟台 XF 110 kV 变电站位于沿海的重工业污染区,均发生了严重腐蚀。

由表 1 可知,大气腐蚀图查询结果与现场腐蚀评价结果一致性较好,对于建有大气腐蚀监测站点的变电站,大气腐蚀图对腐蚀等级的评价准确度高达 100%,精确反映了山东省变电站设备的大气腐蚀性强弱。对于建有大气腐蚀监测站的变电站,由于数据获取准确性高,无需使用空间插值进行计算,为直接测量所得。大气腐蚀图中标识的腐蚀等级与现场实际调查结果能够较好地对应起来。例如日照 DG 220 kV 变电站,从现场腐蚀情况来看,该站总体腐蚀较为轻微,同时大气腐蚀地图标识的近一年腐蚀等级为 C2,有较好的对应关系。淄博 ZC 220 kV 变电站紧靠化工

厂,现场腐蚀情况严重,大气腐蚀地图标识该站腐蚀等级为 C5,有较高的一致性。这说明,在保证数据来源精度的情况下,大气腐蚀地图能够很好地反映出真实腐蚀状况。

部分变电站腐蚀评价出现差异,主要原因是未建设腐蚀监测站点,该类变电站距离大气腐蚀监测站距离远,大气腐蚀图查询结果为插值计算预测数据。更重要的是,该类变电站通常距离腐蚀性因子排放源化工厂等工程较近,受现场实际化工生产活动影响大,插值算法依靠的连续性被较高浓度的腐蚀性因子打断,产生较大的预测误差。

2.2 输电设备大气腐蚀的评价

输电设备腐蚀状况调查内容包括输电线路紧固件、导线、架空地线、金具等相关构件以及输电铁塔的腐蚀。由于输电设备种类少,依据腐蚀外观的严重程度以及涂镀层厚度作为评判标准,将输电设备的现场腐蚀评价情况分为轻度腐蚀、中度腐蚀与重度腐蚀 3 个等级。当输电构件外观无明显变化,涂镀层厚度减小时,视为轻度腐蚀;当涂镀层开始脱落、金属基体有锈点出现,视为中度腐蚀;当大量红锈流出,金属基体明显减薄脱落的状态视为重度腐蚀。同样地,将现场腐蚀评价结果与大气腐蚀图评价结果进行对比,衡量大气腐蚀图的准确度。当大气腐蚀图评级与现场输电设备的腐蚀调查等级相符时,将准确度定为“高”,当二者不符时,将准确度定为“低”。输电设备腐蚀与评价状况的调查结果见表 2。调研发现,沿海、工业污染地区输电设备构件发生重度腐蚀的比例较高,只有在农田无污染环境中的输电铁塔腐蚀程度较轻。由于目前的大气腐蚀监测站点主要建设在变电站内,大气腐蚀图查询的输电线路的大气腐蚀数据结果全部为插值预测数据。经统计,大气腐蚀图预测评价结果与输电线路现场腐蚀评价结果具有良好的 consistency,准确率可达 80% 以上。

3 输变电设备大气腐蚀评价的问题分析

经过对山东省输变电设备的大气腐蚀与评价现状调查,表明大气腐蚀图获得评价等级与现场评价结果一致性较高,尤其是建有大气腐蚀监测站点的变电站,能准确反映设备服役环境的大气腐蚀性强弱。然而部分站点的腐蚀评价结果尚存在一定的偏差。大气腐蚀图对腐蚀程度评价依赖于现场大气腐蚀传感器对输变电设备金属材料的大气腐蚀性检测,而检测结果的准确性与输变电设备材料腐蚀特性、现场大气腐蚀环境分类以及大气腐蚀检测站点布点原则等因素密切相关。

表1 变电站大气腐蚀与评价情况
Tab.1 Corrosion and evaluation status of substation

地域	变电站	位置及环境	服役情况	现场腐蚀评价	大气腐蚀图评价等级 (*表示建有腐蚀站点)	大气腐蚀图的准确性
烟台	ZF 220 kV 变电站	距海岸 6.45 km, 市郊	1985 年投运, 2011 年后进行室内改造	轻度腐蚀	C3	低
	HW 220 kV 变电站	距海岸 10.61 km, 市郊	2019 年投运, 未进行防腐	轻度腐蚀	C3	低
	CY 200 kV 变电站	距海岸 13.51 km, 工业区	2007 年投运, 未进行防腐	中度腐蚀	C3	高
	FS 220 kV 变电站	距海岸 28.77 km, 远郊	2009 年投运, 未进行防腐	轻度腐蚀	C4	低
	SW 200 kV 变电站	距海岸 1.10 km, 沿海	1998 年投运, 2010 年室内化改造	重度腐蚀	C3	低
	XF 110 kV 变电站	距海岸 2.82 km, 工业区	1989 年投运	重度腐蚀	C3	低
淄博	ZC 220 kV 变电站	化工区	1991 年投运, 2016 年防腐, 2018 年更换主变、刀闸等	重度腐蚀	C5*	高
	HG 200 kV 变电站	电厂、化工区	2017 年建棚, 2018 年防腐, 室内站	中度腐蚀	C3*	高
	JL 220 kV 变电站	水泥厂、化工区	2018 年室内化改造	重度腐蚀	C3	低
	DT 110 kV 变电站	市郊	1999 年投运, 未进行防腐	中度腐蚀	C4	低
	MS 100 kV 变电站	化工区	2014 年更换设备, 2020 年带电防腐	重度腐蚀	C4	高
	MY 110 kV 变电站	农田	室内站	轻度腐蚀	C3	低
日照	LS 220 kV 变电站	距海岸 4.48 km	2002 年投运, 室内站	中度腐蚀	C4	低
	DG 220 kV 变电站	距海岸 5.88 km	2000 年投运, 2008 年室内改造	轻度腐蚀	C2*	高
	AD 220 kV 变电站	距海岸 7.13 km, 化工区	2007 年投运, 室内站	中度腐蚀	C4*	高
	SP 220 kV 变电站	距海岸 9.58 km, 紧临国道	2012 年投运, 室内站	中度腐蚀	C4	低
	XH 220 kV 变电站	距海岸 13.76 km, 农田	1984 年投运, 敞开站	重度腐蚀	C3	低
	JZ 220 kV 变电站	距海岸 63.96 km, 农田	1999 年投运, 2020 年扩建	轻度腐蚀	C3	低
滨州	DY 220 kV 变电站	距海岸 38.58 km, 农田	2001 年投运, 2014 年钢构防腐	轻度腐蚀	C2*	高
	XZ 220 kV 变电站	化工区	1999 年投运, 精益化处理中进行防腐维护	重度腐蚀	C4	高
	WM 220 kV 变电站	郊区	1998 年投运	中度腐蚀	C3*	高
	WD 110 kV 变电站	郊区	2001 年更新设备	中度腐蚀	C2	低
	CK 110 kV 变电站	紧邻化工厂	1998 年投运, 2020 年更换隔离开关, 进行防腐维护	重度腐蚀	C3	低
东营	SL 220 kV 变电站	距海岸 43.4 km, 市郊	2008 年投运, 室内站	轻度腐蚀	C3	低
	YA 220 kV 变电站	距海岸 16.7 km, 市郊	2009 年投运, 室内站	中度腐蚀	C3*	高
	LH 220 kV 变电站	距海岸 2.48 km, 化工区	2015 投运, 室内站	重度腐蚀	C5*	高
	LA 220 kV 变电站	化工区	2019 年大修, 同时进行防腐维护	重度腐蚀	C4*	高
	YJ 220 kV 变电站	化工区	2000 年投运, 2018 年底水泥杆防腐	中度腐蚀	C4	低
	DC 220 kV 变电站	市郊	1997 年投运, 2013 年对水泥架构进行防腐	中度腐蚀	C3	高

表 2 输电线路腐蚀与评价情况
Tab.2 Corrosion and evaluation status of transmission line

地域	线路	位置与环境	服役情况	现场腐蚀评价	大气腐蚀图评价等级	大气腐蚀图的准确性
烟台	220 kV LL 线	紧邻海岸线	1996 年投运, 2008 年更换 6 米以下塔材; 2016 年塔脚防腐加固	重度腐蚀	C4	高
	220 kV LS 线	紧邻海岸线, 化工厂区	1987 年投运, 2016 年塔脚防腐加固	重度腐蚀	C4	高
	220 kV LB 线	紧邻海岸线, 化工厂区	2016 年投运	重度腐蚀	C4	高
	110 kV BS 线	沿海, 重工业区	2001 年投运, 2014 年铁塔加固	重度腐蚀	C4	高
淄博	220 kV XZ 线 181#塔	紧邻化工厂	2010 年投运, 2020 年防腐维护	重度腐蚀	C5	高
	110 kV YG 线 T16 号塔	化工厂区	/	重度腐蚀	C4	高
日照	220 kV DC 线 1 号塔	紧邻化工厂	2020 年投运	中度腐蚀	C4	低
	35 kV LW 线 001 号塔	距海岸 4.5 km	2003 年投运	中度腐蚀	C4	低
滨州	110 kV YD 线 2 号塔	农田	2006 年投运	轻度腐蚀	C2	高
	110 kV YM 线 1 号塔	农田	2006 年投运	轻度腐蚀	C2	高
	220 kV BX 线	化工厂区	2013 年投运	重度腐蚀	C4	高
	220 kV XX 线	临近化工厂	2011 年投运, 2018 年涂银粉漆	重度腐蚀	C4	高
	220 kV MK 线	农田	1979 年投运	中度腐蚀	C3	高
	110 kV XD 线	临近化工厂	2009 年投运, 2018 年涂银粉漆	重度腐蚀	C4	高
	110 kV MA 线	农田	2010 年投运	轻度腐蚀	C3	低
东营	220 kV YG 线 70 号塔	湿地公园内	2003 年投运	中度腐蚀	C3	高
	220 kV YA 线 72 号塔	湿地公园内	2005 年投运	中度腐蚀	C3	高
	GB 线 3 号塔	沿海, 化工厂区	2018 年投运	重度腐蚀	C5	高
	TL 线 6 号塔	临近热电厂	2004 年投运	重度腐蚀	C4	高

3.1 输变电金属材料的腐蚀特性

镀锌钢是电力工程中应用量最大最广泛的工程材料, 常见的部件包括杆塔、构支架、金具和紧固件等。可通过检测镀锌钢表面元素组成, 判断出镀锌层的完整程度及对底材的保护能力^[25]。具有良好耐蚀性能的铝合金、不锈钢服役于存在卤素离子、酸性离子等侵蚀性活性离子的大气环境中时, 依然会发生明显的腐蚀现象。该类活性离子对表面的致密氧化层有较强穿透作用而引起铝合金、不锈钢的点蚀^[26-27]。

由于镀锌钢的腐蚀类型为均匀腐蚀, 腐蚀速率能够较准确表征该类金属的腐蚀发展, 而目前大气腐蚀图数据的获得基于金属材料在不同区域的腐蚀速率, 对于镀锌钢及其结构件的腐蚀评价具有较高的准确度。铝合金、不锈钢的典型腐蚀特性为点蚀, 腐蚀质量损失或腐蚀速率对于评价铝合金、不锈钢及其设备腐蚀进程缺乏直接参考作用。因此, 要实现大气腐蚀性的准确评价, 应综合考虑不同金属材料腐蚀特性的差异, 开发具有多种金属材质检测探头的多功能大气腐蚀检测仪, 实现不同金属材料腐蚀的检测与评价。

3.2 大气腐蚀环境分类

目前电网设备大气腐蚀环境分类参照 ISO 9223 《大气环境腐蚀性分级》, 将大气环境分为农村、城市、工业、海洋大气及化工 5 种。目前大气腐蚀环境分类无法为输变电设备防腐选型提供精确指导, 原因是当前新型工业高速发展, 生产力水平不断提高, 人类生产活动对大气环境的影响程度越来越大, 当前分类标准在指导电力工程防腐的未体现出差异化。因此, 需要开发新型电力设备服役大气环境分类标准。

大气中存在侵蚀性阴离子是造成金属材料发生腐蚀的主要因素。因此, 可将设备服役的大气环境中侵蚀性阴离子浓度作为环境分类的主要指标, 结合用电负荷, 开发适用于电网工程的大气腐蚀分类标准与方法。

3.3 大气腐蚀检测站点的布点原则

筛选关键大气腐蚀性环境因子是影响腐蚀检测站点建站的重要因素之一。通过对日照变电站点腐蚀性实地调查可知, 虽然部分变电站距离海岸 10 km 以内, 但实际腐蚀状况依然在中下水平, 而与部分腐蚀性严重的变电站对比来看, 紧邻化工厂是导致变电站

发生腐蚀的关键要素。因此,在进行大气腐蚀检测站点建设时,应重点关注化工厂区。

此外,山东省电网大气腐蚀检测站点的平均覆盖范围为 1 500 km², 站点密度相对较低,对于沿海、工业等人口密集、用电负荷较高的地区,当目标区域距离检测站点较远时,重污染区域的实际腐蚀状况与大气腐蚀图的对应性不佳。从实地调查结果可知,当前大气腐蚀监测站点存在的问题主要是现有布局站点数量不足,主要表现为部分大气腐蚀性严重区域站点分布距离远,新建化工厂区域范围未及时补建站点,导致大范围区域边缘腐蚀数据获取能力弱、精度低、插值计算误差大,容易造成判断失误及预报不准等不良后果。因此,应重点加强大气腐蚀监测站点建设,增加关键区域站点密度,提高数据来源质量与精度,减少插值计算区域比例。因此,可考虑增加化工行业密集区域、沿海高用电负荷区域环境暴露腐蚀站点密度,及时跟进更新大气腐蚀因子变化状况,增加新建厂区附近监测点,对重化工区域站点间最大容许距离提出明确规定。

4 结论

1) 大气腐蚀状况调查结果表明,山东省输变电设备的服役环境地处沿海和化工区等重腐蚀环境,大气腐蚀性较强,从而导致山东省输变电设备腐蚀案例较多。

2) 山东省大气腐蚀图与输变电设备的现场腐蚀评价结果具有较高的一致性。大气腐蚀图对建有腐蚀监测站点变电站的腐蚀评价准确率高达 100%,对输电线路的腐蚀评价准确率达 80% 以上。

3) 利用大气腐蚀图技术实现腐蚀的动态在线检测与评价是输变电设备大气腐蚀评价的发展方向。通过在沿海地区、化工密集区增加腐蚀监测点的布点密度,可改善大气腐蚀图成图效果。同时,基于材料类别绘制出相应的大气腐蚀等级图,从而实现对输变电设备大气腐蚀的准确评价。

参考文献:

- [1] 王志高,海潮,姜杰,等. Q235 钢在德阳大气环境中腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2021, 41(6): 871-876.
WANG Z G, HAI C, JIANG J, et al. Corrosion Behavior of Q235 Steels in Atmosphere at Deyang District for One Year[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2021, 41(6): 871-876.
- [2] 潘玉霞,王玫,王志高,等. 大气腐蚀环境对四川电网输变电设备腐蚀的影响研究[J]. 材料保护, 2018, 51(4): 110-113.
PAN Y X, WANG M, WANG Z G, et al. Influence of Atmospheric Corrosive Environment on Corrosion of Power Transmission and Transformation Equipment in

Transmission and Transformation Equipment in Sichuan Power Grid[J]. Materials Protection, 2018, 51(4): 110-113.

- [3] 夏晓健,金焱,乔汉文,等. 输变电设备腐蚀状况调查与分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2019, 31(2): 121-127.
XIA X J, JIN Y, QIAO H W, et al. Survey on Corrosion of Power Transmission and Transformation Equipment[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2019, 31(2): 121-127.
- [4] 朱义东,张春艳,刘松,等. 辽宁省内输变电设备腐蚀情况调研与分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2015, 27(6): 613-616.
ZHU Y D, ZHANG C Y, LIU S, et al. Investigation and Analysis on Corrosion of Power Transmission and Transformation Equipment in Liaoning Province[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2015, 27(6): 613-616.
- [5] 李文翰,尹学涛,周学杰,等. 电网输变电设备钢结构和镀锌构件的大气腐蚀与防护措施[J]. 材料保护, 2018, 51(10): 114-118.
LI W H, YIN X T, ZHOU X J, et al. Summary on Atmospheric Corrosion and Protection Measure of Steel Components and Galvanized Components for Transmission and Distribution Projects[J]. Materials Protection, 2018, 51(10): 114-118.
- [6] 李斌,孟晓波,王国利,等. 南方沿海地区架空导线腐蚀情况调研分析[J]. 电线电缆, 2018(4): 6-9.
LI B, MENG X B, WANG G L, et al. Investigation and Analysis on the Corrosion of Overhead Conduction in the South Coastal Areas[J]. Wire & Cable, 2018(4): 6-9.
- [7] 刘鑫,姚硕,李文静,等. 环氧基水性带锈防腐涂层的制备及性能研究[J]. 山东电力技术, 2022, 49(2): 29-35.
LIU X, YAO S, LI W J, et al. Preparation and Performance of Waterborne Epoxy-Based Coating on Rusty Surface[J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(2): 29-35.
- [8] 樊志彬,李辛庚,王晓明,等. 区域性大气腐蚀图绘制技术研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(1): 29-37.
FAN Z B, LI X G, WANG X M, et al. Review of Regional Atmospheric Corrosion Mapping Technologys[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43(1): 29-37.
- [9] 于金山,万闪,赵鹏,等. 高压电网大气腐蚀在线监测技术进展[J]. 装备环境工程, 2020, 17(4): 27-33.
YU J S, WAN S, ZHAO P, et al. Advances of Atmospheric Corrosion On-Line Monitoring Techniques for Electric Power Grid[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(4): 27-33.
- [10] 王军,陈军君,谢亿,等. 湖南地区大气腐蚀严酷性的环境因素与大气腐蚀监测仪评定[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2021, 41(4): 487-492.
WANG J, CHEN J J, XIE Y, et al. Evaluation of Environmental Factors Related with Atmosphere Corrosivity in Hunan Provice by Atmospheric Corrosion Monitoring Technique[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2021, 41(4): 487-492.

- [11] 李波,孙清,刘卓毅,等. 贵州大气环境中耐候钢在电网应用中的关键技术[J]. 材料保护, 2023, 56(3): 142-149.
LI B, SUN Q, LIU Z Y, et al. Key Technology of Weather Resistant Steel Used in Power Grid in Guizhou Atmospheric Environment[J]. Materials Protection, 2023, 56(3): 142-149.
- [12] 孙伟善,戚志强,蔡恩明,等. 大力推进园区产业高质量发展的“新集结”——来自山东省化工园区整合优化的调研报告[J]. 中国石油和化工, 2020(12): 23-28.
SUN W S, QI Z Q, CAI E M, et al. Vigorously Promote the “New Assembly” of High-Quality Industrial Development in the Park—A Survey Report from the Integration and Optimization of Shandong Chemical Industry Park[J]. China Petroleum and Chemical Industry, 2020(12): 23-28.
- [13] 陈文娟,郝龙,董俊华,等. 模拟工业-海岸大气中 SO_2 对 Q235B 钢腐蚀行为的影响[J]. 金属学报, 2014, 50(7): 802-810.
CHEN W J, HAO L, DONG J H, et al. Effect of SO_2 on Corrosion Evolution of Q235B Steel in Simulated Coastal Industrial Atmosphere[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(7): 802-810.
- [14] 郭明晓,潘晨,王振尧,等. 碳钢在模拟海洋工业大气环境中初期腐蚀行为研究[J]. 金属学报, 2018, 54(1): 65-75.
GUO M X, PAN C, WANG Z Y, et al. A Study on the Initial Corrosion Behavior of Carbon Steel Exposed to a Simulated Coastal-Industrial Atmosphere[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(1): 65-75.
- [15] FAN Z B, LI X G, JIANG B, et al. Mapping Atmospheric Corrosivity in Shandong[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2020, 231(12): 569.
- [16] 周梦鑫,吴军,樊志彬,等. 大气腐蚀在线监测技术研究现状与展望[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(1): 38-46.
ZHOU M X, WU J, FAN Z B, et al. Current Situation and Prospect of On-Line Monitoring Technology for Atmospheric Corrosion Testing of Metallic Materials[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43(1): 38-46.
- [17] 刘祖涵,齐述华,王莉莉,等. 动态大气腐蚀区域地图数据处理方法及系统设计[J]. 南昌工程学院学报, 2018, 37(1): 68-71.
LIU Z H, QI S H, WANG L L, et al. Processing Method and System Design of Regional Map Data of Dynamic Atmospheric Corrosion[J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2018, 37(1): 68-71.
- [18] 陈俊航,白子恒,薛伟,等. 304 不锈钢在青岛污染海洋大气环境中的腐蚀寿命预测模型[J]. 材料保护, 2019, 52(12): 48-55.
CHEN J H, BAI Z H, XUE W, et al. Corrosion Life Prediction Model of 304 Stainless Steel in Qingdao Polluted Marine Atmospheric Environment[J]. Materials Protection, 2019, 52(12): 48-55.
- [19] 陈昊,樊志彬,陈志坚,等. Cl^- 与 HSO_3^- 对建筑用 439 不锈钢腐蚀行为的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2022, 42(3): 493-500.
CHEN H, FAN Z B, CHEN Z J, et al. Effect of Cl^- and HSO_3^- on Corrosion Behavior of 439 Stainless Steel Used in Construction[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2022, 42(3): 493-500.
- [20] 刘保磊,陈以满,陈钊聪. 变压器用水性环氧酯防腐底漆的制备与研究[J]. 中国涂料, 2017, 32(11): 53-56.
LIU B L, CHEN Y M, CHEN Z C. Preparation and Study of Waterborne Epoxy-Ester Anticorrosion Primers for Transformers[J]. China Coatings, 2017, 32(11): 53-56.
- [21] 樊志彬,李辛庚,王晓明,等. 输变电钢结构镀锌层修复技术研究进展[J]. 山东电力技术, 2022, 49(7): 47-51.
FAN Z B, LI X G, WANG X M, et al. Review of Galvanized Layer Repairing Technology for Power Transmission and Transformation Steel Structure[J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(7): 47-51.
- [22] 祝志祥,陈保安,张强,等. 架空输电导线的腐蚀分析与防护[J]. 中国电力, 2016, 49(5): 8-13.
ZHU Z X, CHEN B A, ZHANG Q, et al. Corrosion Analysis and Protection Technology for Overhead Transmission Conductors[J]. Electric Power, 2016, 49(5): 8-13.
- [23] 郝文魁,陈新,徐玲玲,等. 电网碳钢、镀锌钢大气腐蚀等级图绘制研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(4): 795-802.
HAO W K, CHEN X, XU L L, et al. Drawing of Atmospheric Corrosion Map of Carbon Steel and Galvanized Steel for Power Grid[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43(4): 795-802.
- [24] 中国国家标准化管理委员会. 金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 第 1 部分: 分类、测定和评估: GB/T 19292.1—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Corrosion of Metals and Alloys—Corrosivity of Atmospheres: Part 1: Classification, determination and Estimation: GB/T 19292.1—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [25] 闫风洁,冯长征,李辛庚,等. 输电铁塔镀锌钢腐蚀状态与表面成分关系研究[J]. 山东电力技术, 2016, 43(7): 8-11.
YAN F J, FENG C Z, LI X G, et al. Study on Relationship between Corrosion State and Surface Composition for the Galvanized Steel[J]. Shandong Electric Power, 2016, 43(7): 8-11.
- [26] 万晔,金雨楠,申轩宇. 浅述铝合金点蚀的研究进展[J]. 材料保护, 2020, 53(8): 133-144.
WAN Y, JIN Y N, SHEN X Y. Research Progress on Pitting Corrosion of Aluminum Alloy[J]. Materials Protection, 2020, 53(8): 133-144.
- [27] 陈昊. 不锈钢在海洋大气环境中的腐蚀行为研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2021.
CHEN H. Study on Corrosion Behavior of Stainless Steel in Marine Atmospheric Environment[D]. Beijing: General Institute of Mechanical Science Research, 2021.