

金具金属材料缺陷和故障的腐蚀情况研究分析

缪春辉¹ 陈云² 陈军君³ 黎汉林⁴ 施成琰⁵

1. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院 安徽 合肥 230601

2. 国网智能电网研究院有限公司 北京 102200

3. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院 湖南 长沙 410006

4. 江苏亨通电力特种导线有限公司 江苏 苏州 215128

5. 固力发电气有限公司 安徽 合肥 230071

摘要: 本文收集总结国网公司各省份的金具金属材料运行缺陷和故障事例, 重点就腐蚀问题方面探讨分析金具金属材料的运行缺陷和故障。主要从大气环境以及金具自身特点等两个方面来分析腐蚀原因, 并提出相应的提升措施和验证措施。最后提出了相应的防护建议。

关键词: 金具; 环境腐蚀; 腐蚀疲劳; 制造工艺

近年来, 随着经济社会发展对用电需求越来越高, 电网输电线路规模快速增长, 以某省公司为例, 截止目前, 运行 35 千伏及以上输电线路超过 6.7 万公里, 运行铁塔超过 26.1 万基, 金具作为连接线路与铁塔的重要金属附件, 在架空输电线路中主要起到结构件的作用, 用于支持、固定和接续裸导线、导体及绝缘子连接成串, 或用于保护导线和绝缘体, 用量巨大、种类复杂, 其对电网安全运行的影响十分关键。统计某公司系统内已发生过多起金具断裂开裂、发热烧损、腐蚀磨损等事件, 严重影响电网安全^[1-3], 尤其是随着当前特高压工程的集中大量投运, 大电网一旦发生问题, 引起的连锁反应几乎是颠覆性的。在目前时有限电、保供电压力大的局面下, 金具出现问题导致停电跳闸是难以容忍的, 亟需对金具金属材料问题进行深入研究, 制定针对性措施解决, 减少事故概率, 提高供电可靠性。

1 金具缺陷/故障调研情况

梳理了某省内线路金具故障缺陷 41 例, 其他各省公司案例 97 例, 总计缺陷故障案例 138 例。对上述案例问题进行分类, 金具的运行问题主要分为发热、放电、断裂开裂、脱落、腐蚀、磨损 6 类。与金属材料完全无关的故障只有 7 例, 主要是放电类故障, 剩下 131 例都或多或少与金属材料相关。与金属材料有关的 6 类问题详细统计情况见图 1 所示。

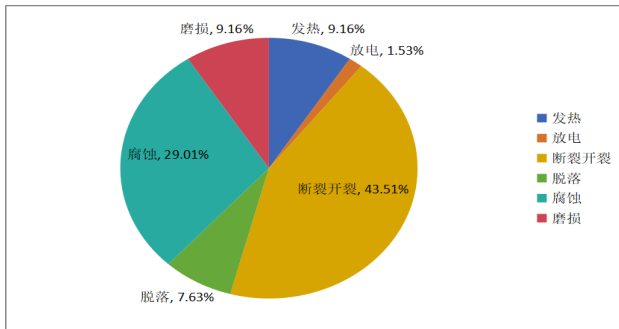


图 1 金具各类问题占比

从图 1 中可以发现, 腐蚀问题占到电力金具总问题的 29.01%, 另外断裂故障中至少还有 7 成与腐蚀因素相关, 发热、放电、脱落、磨损故障中也有很多与腐蚀相关, 结合我省的实际经验看, 腐蚀问题在金具总问题中的实际占比超过 29.01%, 估计可达 33% ~ 50%。基于此, 本文重点就腐蚀问题

导致的金具运行故障和缺陷情况进行分析, 并提出相应的措施。

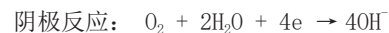
2 金具腐蚀的原因分析及提升、验证措施

2.1 金具腐蚀的原因分析

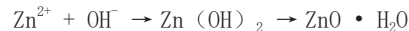
腐蚀问题是金具运行中最常见、最普遍的一类问题, 前期以腐蚀缺陷形式存在, 表现为金具表面覆盖黄锈、力学性能等下降, 如果处理不及时, 材料性能持续劣化, 后期会发展成更严重的故障, 导致断裂、脱落等恶性事件发生。

(1) 大气环境对腐蚀的影响

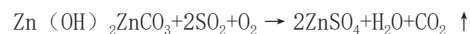
常温条件下碳钢在大气中的腐蚀基本都属于电化学腐蚀, 钢质金具先是表面热镀的 Zn 发生腐蚀, 然后是 Fe 的腐蚀。Zn 作为牺牲阳极先于 Fe 腐蚀, 当有雨水或潮气吸附于锌表面时, 即发生微观腐蚀电池反应, 阳极反应与阴极反应的反应式如下:



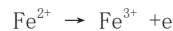
一般阳极发生在 Zn 的表面缺陷处, 表现为 Zn 的溶解反应, 结果显示 Zn 的表面缺陷处出现肉眼可见的小孔。而小孔周围处作为阴极, 发生氧化反应。反应的反应式如下:



当工业大气有 S 元素形成的 SO_2 在溶解及氧化过程会显示 H^+ , 这样使得 Zn 表面薄层液膜发生酸化。一是由于 H^+ 作为去极化剂参与阴极反应, 加快了阳极锌的溶解。二是在酸性环境中, 原本较致密的 $\text{Zn}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ 保护膜也与 S 反应生成 ZnSO_4 , 生产的 CO_2 气体就出现逃逸。具体反应式如下:



ZnSO_4 是可溶性, 从而会出现表面被冲刷后新的锌层不断暴露, 接着继续被腐蚀和冲刷, 如此循环, 这样极大地加剧了镀锌层的消耗速度。当表面的镀锌层腐蚀完全是, 基体材质 Fe 就会失去阴极保护, 这样就及其容易产生严重的锈蚀情况。Fe 的腐蚀反应式如下:



Fe 失去两个电子先成为 Fe^{2+} , 接着继续失去一个电子成为 Fe^{3+} 腐, 最终的腐蚀产物为氧化物 FeO 或 Fe_2O_3 或 Fe_3O_4 , 但不管是哪种铁的腐蚀产物, 其结构都是疏松的, 不像 Zn 能产生致密保护膜, 疏松多孔的结构反而容易积水吸潮进一步加

速腐蚀,因此Fe的腐蚀速度很快,挂片试验表明在短短2~3年内就可彻底锈穿。大气中有污染的情况下,Fe的腐蚀速度更快,形成的锈层也会更疏松,表现为锈层有分层起壳现象。

因此金具腐蚀的速度与大气环境紧密相关,标准电力金具镀锌层平均厚度一般 $\geq 86\mu\text{m}$ 。根据GB/T 19292.1-2018中的规定,南方潮湿多雨大气环境一般对应腐蚀环境等级C3,Zn腐蚀速率可达 $2.1\mu\text{m/a}$,正常情况下可运行 $86\div 2.1\approx 41.0$ 年;城区工业大气环境一般对应腐蚀环境等级C4,锌腐蚀速率可达 $4.2\mu\text{m/a}$,正常情况下可运行 $86\div 4.2\approx 20.5$ 年;恶劣大气环境如化工厂旁一般对应腐蚀环境等级C5,锌腐蚀速率可达 $8.4\mu\text{m/a}$,正常情况下可运行 $86\div 8.4\approx 10.2$ 年。

(2) 金具自身特点对腐蚀的影响

金具本身独有的一些特点,使其在实际环境中的腐蚀要快于理论计算寿命,正常情况下腐蚀速度也快于铁塔和导线。

①金具的结构形状较为复杂。作为导地线与绝缘串或铁塔的连接部件,需要设计出一些特殊形状方便连接安装,导致形状复杂,存在较多的缝隙,容易发生接触腐蚀和缝隙腐蚀。

②金具一般承受较大拉应力。各种金具一般承载100N以上的拉力,在拉应力的作用下,加速了应力腐蚀,且有证据表明,拉应力作用下,腐蚀速度最高可达到无应力作用下的7倍。

③在正常的运行中,金具存在狭小的活动空间,在冰或者风等外在条件下会引起震动或者舞动,金具之间会发生轻微摩擦,在腐蚀环境下会发生微动腐蚀。

④部分金具部件镀锌层较薄。一是镀锌质量不合格,厚度未达到标准要求;二是在运输、安装中,局部镀锌层易受到损伤;三是某些有装配精度要求的部件如螺栓,按标准镀锌层厚度平均值为 $50\mu\text{m}$,远小于一般金具的 $86\mu\text{m}$ 。

2.2 提升措施

(1) 采用合金镀层代替热浸镀锌层

对于重腐蚀环境的金具,最理想的措施是采用合金镀层代替传统热浸镀锌层。热镀锌铝合金和铝锌合金的抗大气污染腐蚀较强,可用于工业区、沿海盐雾区等重腐蚀环境的金具防腐。同时批量化生产合金镀层金具还存在一定障碍,需要解决批量生产合金镀层质量稳定性问题。

(2) 增加原有金具镀锌厚度

对于大部分环境,更容易做到的措施是提升镀锌层厚度。金具可在出厂前加强镀锌质量提高耐蚀性,应尽量增加镀锌厚度。增加镀锌厚度需要结合腐蚀地图推广应用,在可研规划与设计阶段针对腐蚀恶劣环境提前提出技术要求,并在采购阶段招标技术规范中进行明确。

(3) 在金具表面再涂刷耐磨有机涂层

现实中最为易于执行的增强防腐措施,是在新金具表面上再涂刷一次耐磨有机涂层。这种措施不影响原有的金属镀层工艺,方便实行,有机涂层与镀锌层的复合作用可起到双重防护效果,使涂料屏蔽作用与镀锌层的电化学保护作用互相增强。在工业区原有镀锌层必然不能满足要求,此时可采取这种加强防护措施。特别为阻止微动腐蚀与振动摩擦的影响,一般的有机涂层不能满足要求,需在镀锌表面涂覆一道柔性耐磨涂层,显著提高防腐寿命和抗微动腐蚀特性。通常可选择玻璃鳞片涂料或添加纳米二氧化硅颗粒等的纳米涂料,这些涂料耐磨性较好。针对C5及以上腐蚀环境,可用增加镀锌厚度与涂刷耐磨有机涂层相结合的措施,也能显著加强金具防腐性能^[4]。

2.3 验证措施

(1) 规划、设计阶段审查防腐差异化设计

推进腐蚀地图应用和防腐差异化设计。应根据服役环境不同,对金具进行差异化防腐设计,提高重腐蚀地区的防腐性能。

按GB/T 19292.1-2018的规定将大气腐蚀环境划分为C1、C2、C3、C4、C5和CX六个腐蚀等级。C1~C3腐蚀等级的环境为一般腐蚀环境,C4及以上为重腐蚀环境。当设备所在地区5km范围内存在如化工、钢铁等腐蚀源时,应采取加强的防腐措施。这些措施应明确写进规划可研报告或工程设计文件中,技术监督单位进行检查核实。设计审查依据标准Q/GDW 11717-2017中的规定,对重腐蚀环境中设备及部件的防腐性能应进行设计复核,其材质及覆盖层应满足规范要求”。

C5及以上重腐蚀环境,优先选用合金镀层,依据标准Q/GDW 11717-2017中的规定,对于碳钢部件,首先应采用热浸镀锌钢材,当热浸镀锌钢材不能满足当地的防腐要求时,可更换为不锈钢、铝合金等更加耐蚀的材料,或者在热浸镀锌钢材表面采用锌铝合金镀层、铝锌合金镀层等耐蚀性更好的镀层。

(2) 采购、验收阶段加强镀锌质量把关

在设备采购阶段对镀锌厚度进行把关,确定是否对重腐蚀环境或易腐蚀金具类型提出了镀层增厚要求。

设备验收阶段对镀锌质量进行监督抽检,抽检主要对象为易发生腐蚀的金具类型如连接金具、悬垂线夹、耐张线夹钢锚,现场检查镀锌层外观质量并测量厚度,留存检测结果^[5]。

(3) 设备安装阶段检验耐磨有机涂层

对C5及以上腐蚀环境,在安装阶段对新金具表面再涂刷耐磨有机涂层。依据DL/T 1453-2015中的规定要求,电力金具防腐涂装宜采用耐磨涂层体系,如玻璃鳞片涂料和纳米耐磨涂料,同时核查涂料质量证明文件符合标准要求。

结束语

金具是结构复杂度相对不高的一类电网设备,但小而全,涉及到镀锌钢、不锈钢、铝、铜等电网最常用金属材料,以及铸造、锻造、焊接、压接等各种成型工艺,而运行条件比一般设备更严苛,需要承受较大应力,且长期露处野外经受风、冰、腐蚀的影响,某种程度上是电网金属材料的缩影,所面临的问题具有典型意义。绝大部分故障都与金属材料腐蚀问题密切相关。由于金具高空中运行,后期检修困难,更适合通过规划设计、采购验收、设备安装全过程技术监督来提升安全运行水平。

参考文献

- [1] 张培军,李新梅,杨现臣等.特高压输电线路连接金具磨损对腐蚀的影响分析[J].新疆大学学报(自然科学版)(中英文),2023,40(02):250-256.
- [2] 何玉峰.特高压直流绝缘子金具腐蚀机理的研究[D].西南交通大学,2022.
- [3] 樊平成,李军,李龙等.电网设备金属部件的腐蚀与防护[J].黑龙江电力,2021,43(04):307-311.
- [4] 吴天博,王宗江.架空输电线路金具腐蚀失效分析研究[J].电气开关,2020,58(01):69-72.
- [5] 陈友.超/特高压直流绝缘子金具电化学腐蚀及其防治措施研究[D].西南交通大学,2019.