

湿热环境下配电自动化终端的腐蚀失效分析

史训涛¹, 黎智², 陈川², 向利², 张文强²

(1.南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510080; 2.中国电器科学研究院有限公司 工业产品环境适应性国家重点实验室, 广州 510663)

摘要: **目的** 解决配电自动化终端在湿热环境下的腐蚀失效问题, 保障配网自动化系统的安全运行, 延长配电自动化终端的使用寿命。**方法** 分别选用三台架空终端 FTU 作为研究对象, 研究配电自动化终端在湿热环境下的腐蚀失效特点, 并提出针对性防护措施。采用 SEM 和 EDS 表征方法展开配电自动化终端的腐蚀失效分析。**结果** 由 EDS 数据结果发现, 相比较于轻微腐蚀区域, 腐蚀区域的氧含量均大幅增加, 且出现硫元素和氯元素, 表明腐蚀环境主要是含硫和氯的潮湿环境。航空插头表面覆盖镍和铜两层镀层, 腐蚀后的试样表面不仅检测到铜, 有的甚至检测到基材铁, 说明腐蚀后镀层已逐步失效, 部分基材裸露, 且已开始腐蚀。结合 SEM 发现, 样品表面有大量颗粒粗大的腐蚀产物, 且明显看出镀层已被破坏。**结论** 材料腐蚀失效主要是由于高温、湿度、含氯及硫等大气环境加速终端设备腐蚀, 以及镀层被破坏或漏镀等问题造成基材裸露, 腐蚀进一步深入发展。因此, 根据湿热环境下配电自动化终端的腐蚀特点, 提出针对性的防护措施。保障配网自动化系统的安全运行的同时, 延长配电自动化终端的使用寿命, 为今后的实证测试提供可靠依据。

关键词: 南方电网; 配电自动化终端; 湿热环境; 腐蚀失效; 防护措施

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.07.021

中图分类号: TG174 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)07-0095-06

Corrosion Failure of Distribution Automation Terminal in Hot and Humid Environment

SHI Xun-tao¹, LI Zhi², CHEN Chuan², XIANG Li², ZHANG Wen-qiang²

(1. Southern Power Grid Research Institute Limited Liability Company, Guangzhou 510080, China;

2. State Key Laboratory of Environmental Adaptability of Industrial Products, China Academy of Electrical Appliances Research Limited, Guangzhou 510663, China)

ABSTRACT: Objective To solve the corrosion failure problem of distribution automation terminal in hot and humid environment, guarantee the safe operation of distribution network automation system, and extend the service life of power distribution automation terminal. **Methods** Three overhead FTU terminals were selected as the research objects, to study characteristics of corrosion failure of distribution automation terminal in hot and humid environment and develop effective protective measures. The corrosion failure of distribution automation terminal was analyzed by SEM and EDS. **Results** EDS data showed that the content of oxygen in corrosion region was significantly higher than that of the slight corrosion region, and the presence of sulfur and chlorine indicated that the corrosion environment was mainly a humid environment containing sulfur and chlorine. The surface of aviation plug is covered by two plating layers of nickel and copper. While surface of corrosion sample is not only detected of copper, but also some iron. It meant that the plating was destroyed, the part of the base material was exposed, and the corrosion appeared. Combined with the SEM, it was found

that the surface of corrosion products had a great number of coarse particles. The plating was destroyed obviously. **Conclusion** The corrosion failure of materials is mainly due to the accelerated corrosion of terminal equipment in the atmospheric environment of high temperature, humidity, chloride ion and sulfur, as well as the exposure of substrate caused by damage of plating layer or leakage plating, leading further development of corrosion. Therefore, targeted protection measures are developed according to the corrosion characteristics of the distribution automation terminal in the hot and humid environment. Then, the safety operation of distribution network automation system is guaranteed, and the service life of distribution automation terminal is extended at the same time, and the reliable basis will be provided for future empirical test.

KEY WORDS: southern power grid; distribution automation terminal; humid and hot environment; corrosion failure; protective measures

配电自动化终端可对配电线路及设备进行电气参数监测和故障识别处理,具备遥信、遥测、遥控接点及远传功能,可将配电网设备的重要电气参数监测点和开关状态信号进行采集,并实时在线监控,用于智能电网自动化的建设与升级。由此可见,配电自动化终端的质量管理直接影响到配电自动化系统的长期稳定运行。

配电自动化终端不仅是智能电网自动化建设水平的重要组成部分,也是《电力发展“十三五”规划》中推广配电网智能调度控制系统的积极体现。为了使配电自动化终端在严酷的环境条件下能够稳定运行,其环境适应性问题应引起重视。

1 运行缺陷

南方电网五省大部分处于湿热、亚湿热气候区域,伴有“高温、高湿、高辐照、高盐雾”现象。广州供电局 2008—2017 年间终端缺陷次数如图 1 所示,其中配电自动化终端缺陷次数分析包含未投运、已投运、退出投运三种状态的数据。

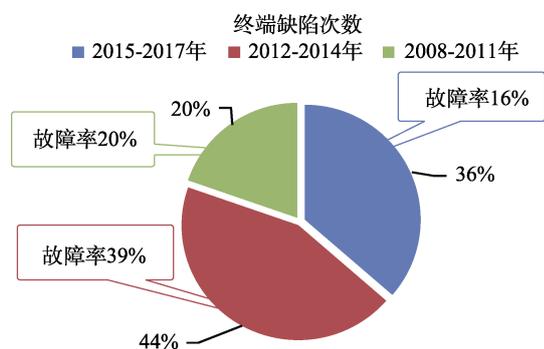


图 1 广州供电局 2008—2017 年间终端缺陷次数

分析得出,近三年出厂的终端设备运行较为稳定,故障率较低,主要的原因有逐步规范的入网检测及终端设备均处于生命周期初期。在 2008—2011 年间出厂的终端设备处于全生命周期的后段,理论上来说故障率应该是最高的,但故障率相对 2012—2014 年较低的原因是在此时间段出厂的终端近 50%已退

出投运,已处于不运行的状态。2012—2014 年间出厂的终端设备运行年限在 3~5 年之间,本该运行情况比较稳定,但却是缺陷率最高的。

在表 2 缺陷分析中,电源管理模块、主控板和蓄电池的缺陷类型是受到了湿热环境的影响。因为该类部件均为精密电子元件,容易受到高温、高湿等因素影响,且这些部件的故障处理费用高、周期长。

表 2 配电自动化终端主要缺陷分类统计

序号	缺陷类型	缺陷分析
1	通信模块	频发信号
2	数据设置异常	重新配置参数
3	电源管理模块	湿热环境因素
4	主控板	湿热环境因素
5	蓄电池	湿热环境因素

2 影响分析

2.1 高温、高辐照环境

在南方电网辖区的湿热环境区域,每当夏季到来时,气温会急剧升高,部分地表温度达到 40℃以上。架空终端在户外会受到太阳直射,导致表面长时间处于高温状态,甚至突破允许限值。因内部零部件运转散热等原因,配电自动化终端的内部温度会更高。由于配电自动化终端是一种密封性装置,不利散热,一旦温度持续过高,设备材料及导线绝缘层会加速老化,发生硬化及脆化裂纹的情况,如图 2 和图 3 所示。

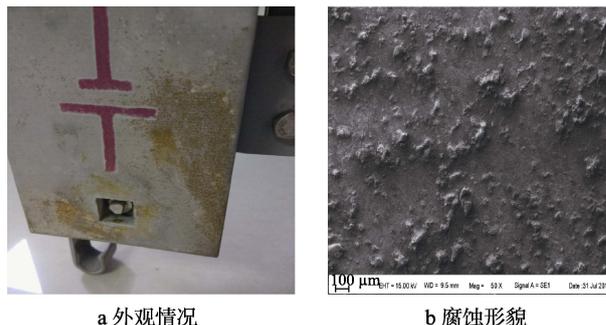


图 2 高温环境下 FTU 外箱的腐蚀形貌

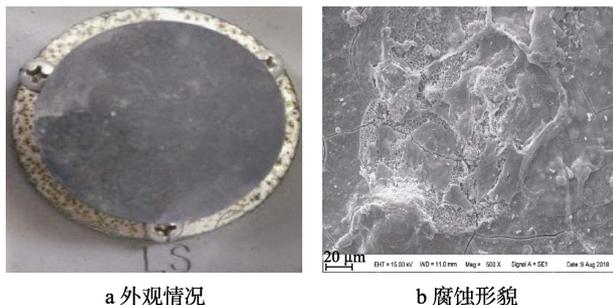


图 3 高温环境下 FTU 航空插座的腐蚀形貌

2.2 高湿环境

相对湿度大于 80% 称之为高湿, 小于 40% 则称之为低湿或干燥。南方电网五省的大部分地区均为高湿环境。湿热地区长期降雨, 湿度较大, 在沿海地区还伴随着高盐雾的情况, 这类气候容易导致配电自动化终端周边的湿度急剧上升。高湿环境对设备的影响绝对不低于高温环境下的影响, 设备表面会因受到湿气的影响而造成绝缘材料介电强度减弱, 发生表面击穿或漏电的情况, 严重时终端设备会发生瘫痪的情况。

长时间处于高湿环境下, 设备内部会发生凝露现象, 这是空气中湿度较大时发生的一种特有现象。凝露对设备的危害主要是形成的水珠造成设备腐蚀、绝缘强度降低、霉菌生长、短路, 甚至导致泄漏电流增大, 造成绝缘击穿, 最终引发事故。高湿环境下 FTU 操作手柄腐蚀形貌如图 4 所示。

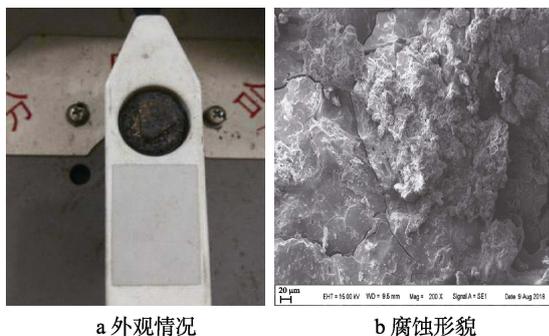


图 4 高湿环境下 FTU 操作手柄腐蚀形貌

2.3 高盐雾环境

在沿海地区的空气中会有掺杂海雾的情况, 里面还有大量的盐、硫等成分, 对于配电自动化终端设备而言属于有害物质, 会直接导致电气部件的损坏。同时还会造成钢铁部件锈变, 接触点出现锈迹, 易氧化膨胀或收缩而造成接触不良、断裂、损毁。从湿热地区自动化终端的使用情况来看, 一般镀锌和烤漆的金属构件在半年左右已开始生锈。

由于自动化终端设备由低压 220 V 供电, 作为操作动力, 通常与电源 PT 或其他低压电源点接取电源, 并与环网柜等电气设备进行三遥控制接线。设备间的

控制导线受盐雾环境影响, 导线产生被电离的过程, 外层会布满锈斑, 且腐蚀物粗而疏松, 如图 5 所示。

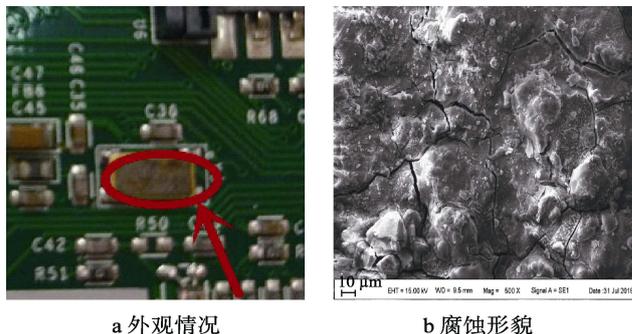


图 5 高盐雾环境下 FTU 的 PCB 板腐蚀形貌

3 实验室腐蚀试验

3.1 试验方法

利用扫描电镜 (SEM)、能谱仪 (EDS) 等测试方法分析已失效的配电自动化终端腐蚀产物, 对腐蚀产生的原因进行分析。分析包括终端的壳体、航空插头、PCB 板、操作手柄、接地端子、镀锌螺栓等不同材质, 并结合温湿度交变环境模拟试验研究材料腐蚀机理及防腐工艺, 具体流程如图 6 所示。测试数据能直接反映湿热环境下设备各个部位的腐蚀程度, 它的另一个重要作用是通过测试数据分析来调整改善终端设备的工艺参数。

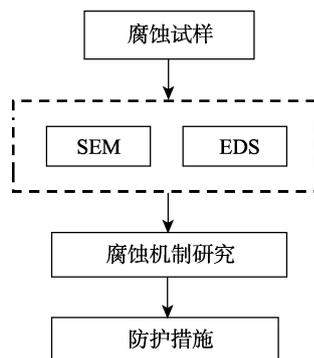


图 6 腐蚀试验流程

3.2 试样筛选

试验件为 3 台架空终端 FTU(珠海许继电气有限公司)。由于 2008—2011 年出厂的终端设备很多已退出投运, 而 2015—2017 年间出厂的终端设备目前正处于生命周期初期, 因此故障率较低。为了使测试数据更具代表性, 以 2012—2014 年间出厂、已失效的终端设备 FTU 作为测试样品, 并且完成试样上全部区域的腐蚀测试。



图7 已失效的架空终端 FTU 试样

4 结果与分析

4.1 试验结果

对试样各程度腐蚀区域进行能谱分析, 结果见表3。FTU 航空插头镀层质量缺陷微观形貌如图8所示。

4.2 数据分析

受湿热腐蚀环境的影响, 自动化终端设备不仅壳体受到腐蚀, 在开关操作手柄、整定值控制主板、接

端子以及所有航空插头等关键部位均有不同程度的腐蚀老化现象覆盖于其区域上。湿热腐蚀环境主要是含硫和氮的潮湿环境, 工业城市和沿海地区为主要代表。在典型站点用滤膜采样法进行的半定量污染物测试结果见表4。

在表4数据中可以看到, 广州、佛山等典型工业城市的二氧化氮、硫酸盐、氨气污染物较高, 明显高于其他站点。海边大气污染物则以海盐粒子为主, 其中以万山岛的浓度最高。对比分析三种试样 EDS 数据结果发现, 相比较于轻微腐蚀区域, 腐蚀区域的氧含量均大幅增加, 表明样品表面被大量氧化。出现硫元素和氯元素, 表明腐蚀环境是含硫和氯的环境。航空插头表面覆盖镀层, 数据分析发现, 其轻微腐蚀区域检测到镍, 表明腐蚀仅发生在表面。腐蚀后的试样不仅检测到铜, 有的甚至检测到基材铁, 说明腐蚀后镀层已逐步失效, 部分基材裸露, 已开始腐蚀。结合 SEM 发现, 材料表面由于腐蚀产生大量颗粒粗大的腐蚀产物, 材料腐蚀失效主要是由于镀层被破坏或漏镀等问题造成基材裸露, 腐蚀进一步深入发展。材料腐蚀机理反应式为:

表3 能谱(元素)分析(#1试样)

%

		元素成分及其质量分数	
		轻微腐蚀区域	腐蚀区域
1#试样	操作手柄	C:0.83;O:3.78;Cr:9.13;Mn:15.17;Fe:7.1.09	C:0.62;O:35.13;Si:0.71;S:2.22;C1:2.58;Cr:5.02;Mn:4.34;Fe:49.38
	SPS 航空插头	C:0.61;O:2.06;Cr:5.78;Ni:91.55	C:1.61;O:32.77;Si:1.52;S:4.79;C1:1.11;Ca:1.00;Ni:24.99;Cu:8.37;Zn:23.84
	BATT 航空插头	C:1.04;O:4.99;Cr:25.72;Ni:62.73;Zn:5.52	C:2.27;O:28.49;Al:0.58;Si:1.70;S:6.41;C1:1.39;Ca:1.07;Cr:3.83;Ni:10.78;Cu:15.99;Zn:27.48
	TA 航空插头	C:0.71;O:31.07;Co:2.98;Ni:65.24	C:1.50;O:30.51;Si:0.71;S:6.21;C1:1.10;Ca:0.81;Ni:4.41;Cu:13.87;Zn:40.88
	LS 航空插头	C:0.91;O:9.41;Cr:32.37;Ni:39.71;Zn:17.60	C:2.07;O:31.62;S:5.83;C1:1.48;Ni:2.39;Cu:15.09;Zn:41.52
	GND 端子	C:1.09;O:14.52;Cl:0.66;Cr:8.42;Mn:13.51;Fe:61.80	C:3.03;O:35.51;Al:1.51;Si:4.26;S:4.17;C1:1.67;Ca:2.19;Cr:3.21;Mn:2.88;Fe:41.57
2#试样	供电插头	C:0.78;O:4.19;Cr:1.18;Cu:7.48;Ni:17.44;Zn:68.93	C:1.73;O:32.57;Al:0.86;Si:1.36;S:4.77;C1:2.09;Ni:8.65;Cu:26.13;Zn:21.83
	操作手柄	C:0.83;O:3.78;Cr:9.13;Mn:15.17;Fe:7.1.09	C:0.62;O:35.13;Si:0.71;S:2.22;C1:2.58;Cr:5.02;Mn:4.34;Fe:49.38
	SPS 航空插头	C:0.61;O:2.06;Cr:5.78;Ni:91.55	C:1.61;O:32.77;Si:1.52;S:4.79;C1:1.11;Ca:1.00;Ni:24.99;Cu:8.37;Zn:23.84
	BATT 航空插头	C:1.04;O:4.99;Cr:25.72;Ni:62.73;Zn:5.52	C:2.27;O:28.49;Al:0.58;Si:1.70;S:6.41;C1:1.39;Ca:1.07;Cr:3.83;Ni:10.78;Cu:15.99;Zn:27.48
	TA 航空插头	C:0.71;O:31.07;Co:2.98;Ni:65.24	C:1.50;O:30.51;Si:0.71;S:6.21;C1:1.10;Ca:0.81;Ni:4.41;Cu:13.87;Zn:40.88
	操作手柄	C:1.02;O:4.66;Cr:7.51;Mn:17.06;Fe:69.75	C:0.88;O:28.84;S:2.78;C1:2.28;Cr:4.01;Mn:23.29;Fe:37.92
3#试样	SPS 航空插头	C:0.75;O:3.12;Cr:4.63;Ni:91.50	C:1.22;O:26.24;Al:0.97;S:3.16;C1:0.97;Ni:31.68;Cu:7.64;Zn:28.11
	BATT 航空插头	C:0.92;O:5.74;Cr:20.08;Ni:57.51;Zn:15.75	C:1.33;O:22.45;S:3.30;C1:2.36;Cr:2.99;Ni:14.17;Cu:10.18;Zn:43.22
	TA 航空插头	C:1.09;O:29.07;Co:1.71;Ni:68.13	C:9.87;O:21.29;Si:1.15;S:2.94;C1:1.65;Ca:1.09;Ni:25.29;Cu:22.22
	LS 航空插头	C:1.11;O:7.55;Cr:22.71;Ni:34.51;Zn:34.12	C:1.40;O:21.62;S:2.53;C1:4.39;Cr:5.18;Fe:2.04;Ni:28.97;Cu:14.39
	GND 子	C:0.99;O:15.24;Cr:9.28;Mn:17.18;Fe:57.31	C:10.45;O:31.93;Al:1.28;Si:1.01;S:4.91;Cr:2.57;Cr:3.21;Mn:12.87;Fe:34.98
	供电插头	C:0.56;O:5.93;Cr:2.32;Cu:6.55;Ni:19.41;Zn:65.23	C:1.47;O:31.53;Si:0.93;S:4.67;C1:1.51;Ca:0.94;Ni:34.64;Zn:24.32

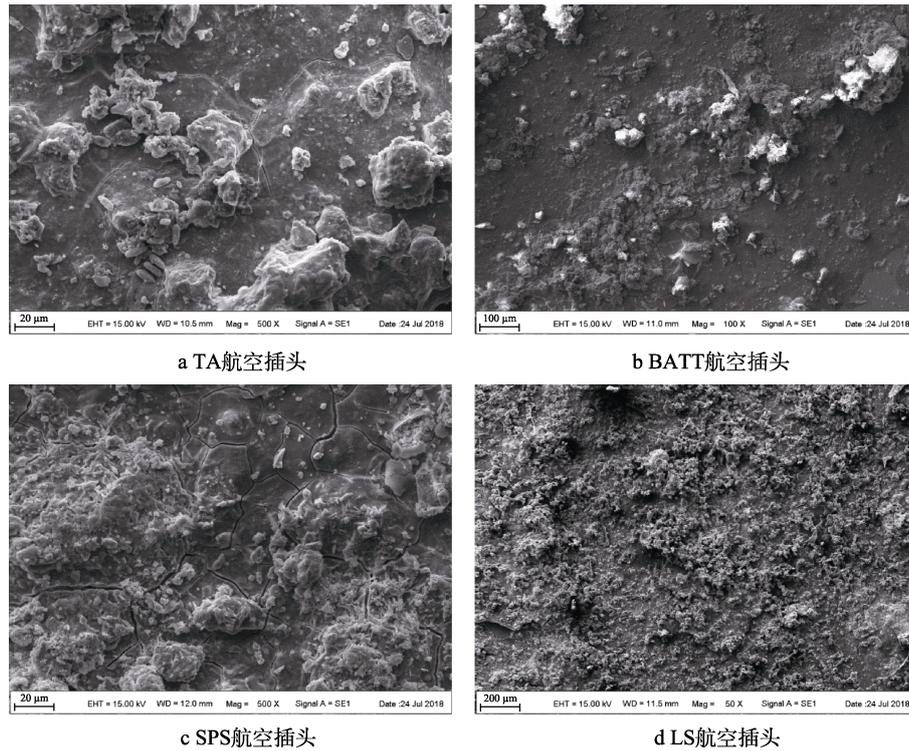
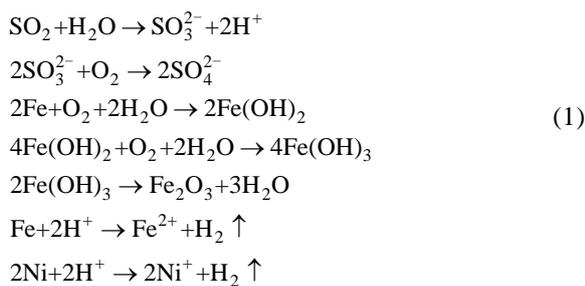


图 8 FTU 航空插头镀层质量缺陷

表 4 典型工业城市、海边大气污染物的监测数据

地点	质量浓度/(mg·100 cm ⁻² ·d ⁻¹)			
	二氧化氮	硫酸盐	氨	海盐粒子
广州	0.036 275	0.032 85	0.029 425	0.005 475
佛山	0.329 4	0.427 6	0.312 0	0.023 1
琼海	0.021 912 5	0.052 775	0.036 25	0.028 575
万山岛	0.010 5	0.017 7	0.018 7	0.556



环境中的 SO₂ 溶于水形成酸性介质，腐蚀镀层与基体，而 Cl 破坏致密的氧化膜，使得腐蚀加剧。由试验结果论证，配电自动化终端设备发生腐蚀的主要原因为：高温、湿度、氯离子及 SO₂ 等大气环境因子加速终端设备腐蚀，各部件腐蚀产物主要以氧化物、硫化物及氯化物为主；各部件镀层质量不良，局部存在漏镀，基材裸露等现象。

鉴于以上因素，应结合配电自动化终端的安装环境和腐蚀情况，设计选用合理的防护方案和措施。

4.3 腐蚀防护

通过对配电自动化终端的不同腐蚀机制分析，结

合腐蚀环境监测、环境试验标准，建议对湿热环境下的配电自动化终端采取以下防护措施。

1) 通过腐蚀机理分析，需选择更加适应环境的材料才能达到一定的防腐效果。对不同处理工艺及不同加工方法的不同材料开展环境模拟试验，评价筛选出最佳工艺处理的材料，并建立环境技术要求。

2) 提高镀层质量，开展镀层相关试验，优选出最佳镀层厚度以及电镀工艺。

3) 通过气相防锈和干燥剂组合使用，控制电气设备运行环境中的温度和湿度。在实验室开展腐蚀性气体环境模拟试验验证，并选择有代表性的电气设备进行现场应用，验证其防护效果。

4) 采用化学催化过滤模块对进风过滤，控制电气柜内环境，使腐蚀环境变温和，进而达到减缓腐蚀的效果。通过微环境腐蚀测试铜片以及腐蚀在线监测技术，表征应用该技术后的环境腐蚀等级。

5 结论

通过配电自动化终端 FTU 试样的实验室腐蚀试验分析，得出以下结论。

1) 通过开展腐蚀试验，得出终端设备的腐蚀数据，真实反映了其在湿热地区服役的腐蚀特点。

2) 针对高温、高辐照、高湿、高盐雾环境对配电自动化终端的影响，提出腐蚀防护措施，为下一阶段的失效评估工作提供可靠数据。

3) 重点分析湿热环境下配电自动化终端的腐蚀机理，可让设备管理人员在湿热环境下更加关注终端

设备的安全性能,加强现场腐蚀环境的监测能力,及时排除终端设备运行中的异常情况,保障工作人员和电力系统的安全,为南方电网的智能化发展提供有效、可行的验证方法。

参考文献:

- [1] 卓惠荣. 电器产品的防霉、防锈技术[J]. 电工电气, 1995(2): 7-10.
- [2] 唐其环. 海洋大气腐蚀性分类分级[J]. 环境技术, 2003, 2(1): 2-4.
- [3] 丰卫东. 海洋环境对金属材料的腐蚀及评价方法[J]. 装备环境工程, 2005, 2(5): 86-89.
- [4] 王涵, 王绍源. 配网自动化系统终端设备环境的安全运行管理[J]. 制冷空调与电力机械, 2010(5): 97-99.
- [5] 孔祥玉, 赵帅, 贾宏杰, 等. 智能电网中电力设备及其技术发展分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(2): 21-26.
- [6] 李慧, 黄海军, 王俊, 等. 湿热沿海地区环境条件对风电机组的影响分析[J]. 装备环境工程, 2013, 10(5): 17-20.
- [7] 刘成臣, 王浩伟, 杨晓华, 等. 不同材料在海洋大气环境下的加速环境谱研究[J]. 装备环境工程, 2013, 7(2): 18-24.
- [8] 陈川, 黄海军, 王俊, 等. 我国湿热海上风电大气区金属重防腐涂料的性能研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4): 89-94.
- [9] 杨大宁, 汪川, 王振尧, 等. 变电站常用金属的大气腐蚀行为及其防护[J]. 装备环境工程, 2016, 13(1): 126-129.
- [10] 马长李, 马瑞萍, 白云辉. 我国沿海地区大气环境特征及典型沿海地区大气腐蚀性研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(8): 65-69.
- [11] 孙芳萍, 张盈盈, 张志浩, 等. 某油气集输管线腐蚀失效分析[J]. 装备环境工程, 2018, 15(8): 26-32.
- [12] 夏昕鸣, 邢路阔, 宋泓清, 等. 模拟南海大气环境下耐候钢腐蚀性能研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(3): 39-44.
- [13] 文孟军. 提升汇流环湿热环境适应性方法研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(8): 50-54.
- [14] 张磐, 苏毅方, 韩寅峰等. 配电终端失效分布类型判断及失效率估算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(2): 61-65.
- [15] 吕旺燕, 黄建业, 阮红梅, 等. 湿热海洋环境下接插件带电腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(2): 102-109.