

宁夏地区运行复合绝缘子自然老化特性及其影响因素分析

韩红卫¹, 伍弘², 房子祎², 杨凯², 吴强³, 牟霖³, 付忠祥³, 王羽³

(1. 国网宁夏电力有限公司, 宁夏 银川 750001; 2. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 宁夏 银川 750011; 3. 武汉大学 电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘要:复合绝缘子的老化特性常通过实验室加速老化试验获得,但该方法很难模拟实际多样的复杂环境,且加速老化与自然老化的等效性有待进一步验证。本研究选取宁夏地区不同运行年限和运行环境的153支在运复合绝缘子开展多项试验,从硅橡胶材料理化特性、绝缘子电气特性和力学特性3个方面研究其自然老化规律。结果表明:运行年限、污秽度及污秽成分是影响硅橡胶材料老化的主要因素,化工污秽会加速材料老化;相同运行年限下,绝缘子电气和力学性能的劣化程度较硅橡胶材料理化特性的劣化程度低,在重污秽区运行超过15年的绝缘子芯棒还能保持较好的性能,芯棒与护套、芯棒与金具的交接处分别是绝缘子电气和力学性能的薄弱点;厂家配方和工艺是影响绝缘子自然老化的重要因素,低质量批次绝缘子可能出现集聚性性能退化。在复合绝缘子运维抽检中应重点关注重污秽区或化工污秽区运行年限长的绝缘子,并注意对同厂家批次出现性能集聚退化的在运复合绝缘子进行补充抽检。

关键词:复合绝缘子;自然老化特性;抽检分析;运维管理

中图分类号:TM216 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2021)06-0116-09

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.06.018

Analysis on Natural Ageing Characteristics and Influencing Factors of Composite Insulator in Operation in Ningxia

HAN Hongwei¹, WU Hong², FANG Ziyi², YANG Kai²,
WU Qiang³, MOU Lin³, FU Zhongxiang³, WANG Yu³

(1. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750001, China;

2. Power Research Institute of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750011, China;

3. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The ageing characteristics of composite insulators are often obtained by the accelerated ageing test at laboratory, but this method is difficult to simulate the actual complex environment, and the equivalence between accelerated ageing and natural ageing need further verification. In view of this, we selected 153 composite insulators in operation with different operating years and operation environments in Ningxia area to conduct multiple tests, and studied their natural ageing characteristics from three aspects, including the physical and chemical properties of silicone rubber material, the electrical properties and mechanical properties of insulator. The results show that the operating years, pollution degree, and pollution composition are the main factors affecting the ageing of silicone rubber material, and the chemical pollution can accelerate the ageing of materials. Under the same operating years, the ageing degrees of electrical and mechanical properties of insulator are lower than that of the electrical and mechanical properties of silicone rubber material. The mandrel of insulators operating for more than 15 years in heavy pollution areas can still maintain good performance. The junctions of mandrel and sheath,

收稿日期:2020-08-06 修回日期:2020-09-04

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(51607126)

作者简介:韩红卫(1982-),男(汉族),山东烟台人,高级工程师,研究方向为电力系统及其自动化、绝缘技术等。

mandrel and hardware are the weak points of the electrical and mechanical properties of insulator, respectively. The manufacturer formulation and process are the important factors affecting the natural ageing, and there will be agglomeration performance degradation in low-quality batches. In the operation and maintenance sampling inspection of composite insulators, it is necessary to pay attention to the insulators with long service life in the heavy pollution area or chemical pollution area, and the composite insulators in operation with performance aggregation degradation from the same manufacturer batch need to conduct supplementary sampling inspection.

Key words: composite insulator; natural ageing characteristics; sampling analysis; operation and maintenance management

0 引言

复合绝缘子具有质量轻、耐污闪性能好等优点,在输电线路中得到广泛应用^[1-2]。我国从20世纪70年代开始使用复合绝缘子,到目前已经有超过700万支复合绝缘子在网运行^[3-4],其中很多复合绝缘子运行时间已达到20年^[5]。复合绝缘子的芯棒和伞裙由有机高分子材料制成,在复杂外部环境和持续高场强条件下长期运行,其物化特性会发生改变,导致硅橡胶材料性能、绝缘子电气性能和力学性能劣化带来安全威胁。

目前国内外学者对复合绝缘子的老化特性开展了较为深入的研究,主要集中在硅橡胶材料的紫外老化、电晕老化、热老化和湿热老化等^[6-10]。其中,实验室加速老化试验由于试验周期短、易于控制变量、可实时监测老化状态、成本低廉等优点,成为研究复合绝缘子老化特性的主要手段,研究结果为复合绝缘子的实际寿命状态评估提供了理论依据。

然而模拟试验并不能完全复现实际自然条件,复合绝缘子的老化是环境、电场等因素共同作用的结果,且不同生产厂家的绝缘子质量也存在差别,从而导致同期并网的复合绝缘子老化程度不一,部分复合绝缘子运行寿命远达不到厂家给定的预计寿命。目前,复合绝缘子运行状态的检测评估已成为输电运维部门的一大工作重点,已有许多成熟的复合绝缘子寿命评估方案^[11-14],运维人员既能通过成套设备进行寿命精密分析,也能通过喷水分级、外观观察等简单手段进行寿命预估^[15-20]。然而这些手段均针对具体的复合绝缘子开展,而在网复合绝缘子数量庞大,运行环境不一,倘若对不同运行环境的所有复合绝缘子都采取同样的抽检频次和密度,工作量巨大,需要大量人力物力。因此,基于复合绝缘子的工作环境、运行年限、厂家等信息初步估算其寿命状态,有助于运维人员设置科学的抽检方案。

宁夏地区气候干燥少雨、风大沙多、南寒北暖,不同区域的污染源不同,污秽度各异,复合绝缘子的运行状态有明显差别^[21]。本研究抽取了宁夏6个地区不同运行年限多个厂家的复合绝缘子,分析其硅橡胶材料性能、绝缘子电气性能和力学性能的自然老化特性及其影响因素;根据试验结果,提出一套科学合理的复合绝缘子抽检方案,以期为检修人员的运维工作提供新思路。

1 试验

1.1 复合绝缘子抽样分布

为研究不同因素对复合绝缘子自然老化特性的影响,抽样绝缘子应涵盖不同电压等级、运行年限、厂家、环境。本次共在6个地区抽样153支复合绝缘子,运行年限包括1~19年,电压等级包括35~750 kV,具体分布如图1所示。样品绝缘子来自13个生产厂家,运行环境包括山地、化工厂、平原、沙漠、戈壁等,污秽度包括b~c级,运行条件丰富,具有可分析性。

1.2 抽检试验内容

复合绝缘子伞裙材料的老化程度和芯棒的电气性能对输电线路的耐污闪性能影响很大,芯棒的力学性能则会影响线路的力学结构稳定,因此为研究复合绝缘子的综合老化特性,拟对绝缘子硅橡胶材料理化性能、绝缘子电气性能和力学性能3方面进行试验检测,具体试验项目如下:①材料理化性能,包括外观检查、憎水性检测、红外光谱分析;②电气性能,包括水煮后陡波冲击试验、带护套芯棒水扩散试验;③力学性能,包括密封性能试验、机械破坏负荷试验、应力腐蚀试验。

1.3 试验分组与流程

由于机械破坏负荷试验、应力腐蚀试验和带护套芯棒水扩散试验会破坏样品,而密封性能试验又会对力学性能试验结果造成影响,因此将各个地区不同电压等级的试品按编号顺序分为4组分别进行

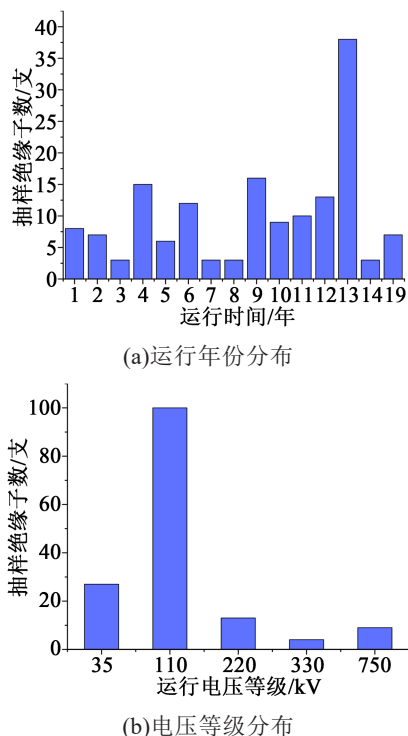


图1 抽样样品运行年限和电压等级分布图

Fig.1 Operating time and voltage grade distribution diagram of samples

试验, 试验顺序安排如表1所示。

表1 试验分组安排

Tab.1 Test grouping arrangement

编号	试验项目	1组	2组	3组	4组
1	外观检查	√	√	√	√
2	憎水性检测	√	√	√	√
3	带护套芯棒水扩散试验	√	—	—	—
4	密封性能试验	—	√	—	—
5	应力腐蚀试验	—	√	—	—
6	水煮后陡波冲击试验	—	—	√	—
7	机械破坏负荷试验	—	—	—	√
8	红外光谱分析	√	√	√	√

试验时先对所有试品进行外观检查和憎水性测试, 再在试品中间伞裙边缘截取尺寸为20 mm×5 mm的试片进行红外光谱分析, 然后按组别开展剩余试验, 其中第2组试品先进行密封性能试验, 再进行应力腐蚀试验。

2 试验结果及自然老化特性分析

2.1 硅橡胶材料性能

2.1.1 外观检查

外观检查异常试品共有21支, 具体异常分布如图2所示。复合绝缘子在户外要承受大温差、高湿度等恶劣环境, 并且会在伞裙表面积聚污秽, 在紫外线和电晕放电的侵蚀下, 伞裙会褪色、粉化、龟裂、被烧蚀等, 伞裙的破损或脱落会降低绝缘子的爬电距离, 影响其闪络电压。

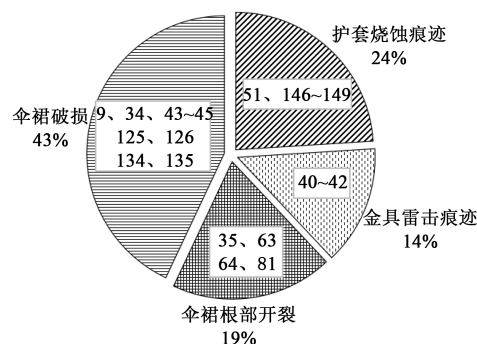


图2 外观异常分布

Fig.2 Abnormal appearance distribution

外观检测异常的绝缘子中, 其运行电压、年份、污秽度分布均较为分散, 没有明显规律, 但其中有17支来自A、B两个厂家, 并且与同线路绝缘子同时出现外观问题, 有明显集聚性。复合绝缘子的制作工艺已经非常成熟, 一般质量合格的复合绝缘子在生命周期内不会发生外观破损, 因此外观异常与运行电压、运行年份和污秽度没有关系。但对于制作工艺欠佳, 本身质量就存在缺陷的绝缘子, 如果运行于落雷密度较高或常年大风天气的地区, 在频繁放电烧蚀和应力撕扯下容易发生外观破损和电蚀。因此运行环境和生产工艺是其主要影响因素。日常维护中应关注出现过外观问题的线路以及同一厂家批次的复合绝缘子。

2.1.2 憎水性检测

憎水性检测采用喷水分级法, 当HC大于5时憎水性已经明显下降, 在积污严重且高湿天气下, 污秽中的电解质成分会慢慢被水溶解, 构成导电水膜通道, 极易发生沿面放电, 此时需要对复合绝缘子进行更换。

测试中发现29、73、77、107号绝缘子的憎水性等级达到HC5; 憎水性等级与运行电压和生产厂家无明显规律, 但与运行年限和污秽度关系密切。选

取3组具有普遍规律的试品进行分析,其憎水性分级结果与绝缘子运行情况如表2所示。从表2可以看出,29、102、112号复合绝缘子的运行电压都为35 kV,生产厂家相同,运行的地区都是石嘴山,憎水性等级随运行年限的增加呈提高趋势。绝缘子在户外服役过程中,会长期经受紫外辐射和电晕侵蚀,对伞裙材料的破坏随运行时间的延长而累积,因此无论外界环境如何,绝缘子憎水性随运行时间延长而下降,时间超过10年后,憎水性大幅下降。

表2 憎水性分级结果

样品编号	电压等级/kV	生产厂家	运行年限/年	污秽等级	憎水性等级
29	35	A	13	b	HC4~HC5
102	35	A	8	e	HC2~HC3
112	35	A	4	e	HC2
48	110	C	19	e	HC2~HC3
73	110	C	2	e	HC3~HC5
77	110	D	4	e	HC4~HC5
80	110	E	4	c	HC2

73号和48号绝缘子的运行电压均为110 kV,生产厂家相同,污秽等级相同,73号绝缘子运行地区为石嘴山,周围有化工厂,运行时间较短;48号绝缘子运行地区为中卫,周围是农田,运行时间较长。由表2可以看出,73号绝缘子的憎水性反而比48号绝缘子差,表明伞裙老化不仅与运行年限有关,也受污秽类型的影响,化工污秽中通常含有 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 等离子,容易形成酸性物质腐蚀伞裙材料,破坏硅橡胶甲基基团、切断主链化学键,导致憎水性下降,因此化工污染会加快伞裙的老化。

77号和80号绝缘子的运行电压均为110 kV,运行地区均为石嘴山,运行年限均为4年,环境污染源均为化工厂。77号绝缘子的污秽度等级为e级,比80号绝缘子污秽严重。憎水性测试结果显示80号绝缘子的伞裙憎水性好于77号,表明运行环境中较重的污秽可能加快伞裙的老化,也会减弱硅橡胶材料的憎水迁移性,使憎水性变差。

因此,在日常运维中,要重点关注运行时间较长(10年以上)的复合绝缘子老化状态;另外,重污秽或者有化工污染区域的复合绝缘子老化速度较

快,应增加检测频次,以便及时发现异常并更换。

2.1.3 红外光谱分析

复合绝缘子伞裙硅橡胶的主链为 Si-O-Si ,侧链为甲基基团 $\text{Si-(CH}_3)_2$,主链和侧链的完整度可以反映硅橡胶的老化程度;侧链甲基的表面能较小,非极性基团 C-H 紧密排列在主链的外部,使硅橡胶保持优异的憎水性。随着硅橡胶逐渐老化, C-H 、 Si-O 键断裂,引入或生成亲水性基团 -OH ,硅橡胶憎水性逐步丧失。为方便分析,继续使用憎水性分级检测的3组样本进行对比。

29、102、112号样品的红外光谱图如图3所示,主、侧链官能团的吸收峰面积如表3所示。

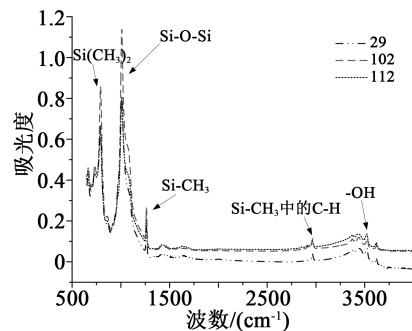


图3 29、102、112号样品红外光谱图

Fig.3 Infrared spectra of number 29, 102, and 112 samples

表3 吸收峰面积

样品编号	Si-O-Si	Si-(CH ₃) ₂	Si-CH ₃
29	56.46	8.90	1.54
102	73.26	15.00	2.16
112	57.35	10.04	1.57

由图3和表3可以看出,102号绝缘子伞裙主链和侧链吸收峰的面积都最大,这可能是由于伞裙的老化程度不均匀,导致伞裙边沿局部材料的红外光谱变化规律与整体的憎水性变化规律不一致。29号伞裙的主链吸收峰和侧链吸收峰面积最小,表明运行时间超过10年的复合绝缘子硅橡胶主、侧链被破坏的程度更严重,导致硅橡胶憎水性下降,这与憎水性的测试结果一致。

73号和48号样品的红外光谱图如图4所示,主、侧链官能团的吸收峰面积如表4所示。由图4和表4可以看出,73号伞裙主链和侧链的含量都低于48号,表明73号伞裙的老化较严重,憎水性基团

含量较少,可以推断伞裙硅橡胶的宏观憎水性较差,这与喷水分级检测的结果一致,表明特殊污秽成分可能促进硅橡胶官能团的破坏断裂。

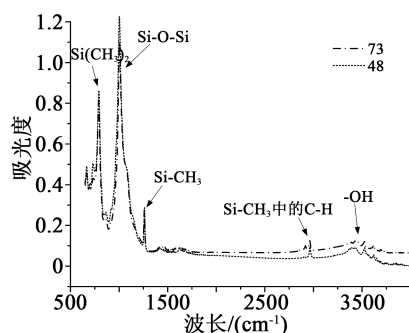


图4 73和48号样品红外光谱图

Fig.4 Infrared spectra of number 48 and 73 samples

表4 吸收峰面积

Tab.4 Absorption peak area

样品编号	Si-O-Si	Si-(CH ₃) ₂	Si-CH ₃
48	77.19	15.71	2.55
73	67.94	14.91	2.16

77号和80号样品的红外光谱图如图5所示,主、侧链官能团的吸收峰面积如表5所示。由图5和表5可以看出,80号绝缘子伞裙主链和侧链基团

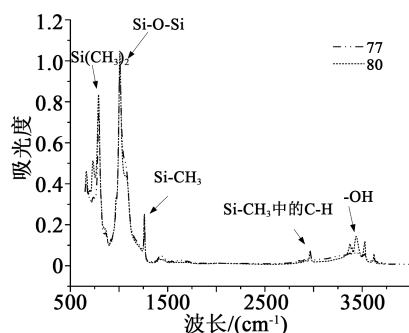


图5 77和80号样品红外光谱图

Fig.5 Infrared spectra of number 77 and 80 samples

表5 吸收峰面积

Tab.5 Absorption peak area

样品编号	Si-O-Si	Si-(CH ₃) ₂	Si-CH ₃
77	21.24	13.57	1.36
80	24.89	14.01	1.72

的含量都比77号绝缘子伞裙高,表明80号绝缘子伞裙老化程度较轻,憎水性基团含量较高,可以推

断伞裙硅橡胶宏观憎水性较好,这与憎水性的测试结果一致,说明较重的污秽沉积可能会加剧硅橡胶官能团的破坏。

红外光谱的测量结果与憎水性测试结果基本一致,在日常运维过程中可以结合两者综合判断复合绝缘子伞裙的老化程度,同时也要注意红外光谱的测量结果仅表示测量点的老化情况,可能存在差异,可对同一伞裙多处取样、多点测量来消除。

综上所述,运行时间、污秽类型和电压等级是影响复合绝缘子硅橡胶材料老化的重要因素,在运行时间超过10年、污秽等级为e、有化工污秽的情况下,复合绝缘子硅橡胶材料的理化特性老化程度较高,需要重点关注;而伞裙损伤通常有很强聚集性,需要对历史缺陷试样的同厂家批次绝缘子和同线路绝缘子加以关注。

2.2 绝缘子电气性能

2.2.1 水煮后陡波冲击试验

将绝缘子试品浸没在质量分数为0.1%的NaCl水溶液中保持沸腾42 h。沸腾结束后,试品仍保留在容器中,直到水冷却至大约50℃,在绝缘子两端施加陡度在1 000~1 500 kV/μs的正、负极性冲击波,冲击次数各为25次。试验结果表明,所有试品均无击穿、无损坏,合格率为100%。因此,可以认为无论运行年限长短和运行环境如何,在正常运行的情况下复合绝缘子几乎不会发生内绝缘击穿故障。整体耐冲击能力是绝缘子最重要的参数之一,复合绝缘子在设计时会留有安全裕度,再加上成熟的工艺,可以认为复合绝缘子在寿命周期内耐陡波冲击能力不会退化。

2.2.2 带护套芯棒水扩散试验

若复合绝缘子芯棒与护套连接处有破损,其绝缘性能将会退化从而带来风险。试验时用细砂纸将长度为30.0 mm的带护套芯棒样品切面打磨光滑,再用异丙醇清洗并用滤纸擦净样品表面,然后放入质量分数为0.1%的NaCl水溶液中煮沸100 h。最后对样品施加12 kV的工频电压,记录其1 min工频耐压试验中泄漏电流有效值,测试结果不超过100 μA为合格。

试验结果发现,43支绝缘子试品中,总体合格率仅为27.9%,各影响因素下绝缘子的合格率情况如图6所示,其中生产厂家只考虑样品超过5支的厂家。从图6可以看出,不同运行时间绝缘子的合格率分布较为分散,理论上运行时间越长,各种老

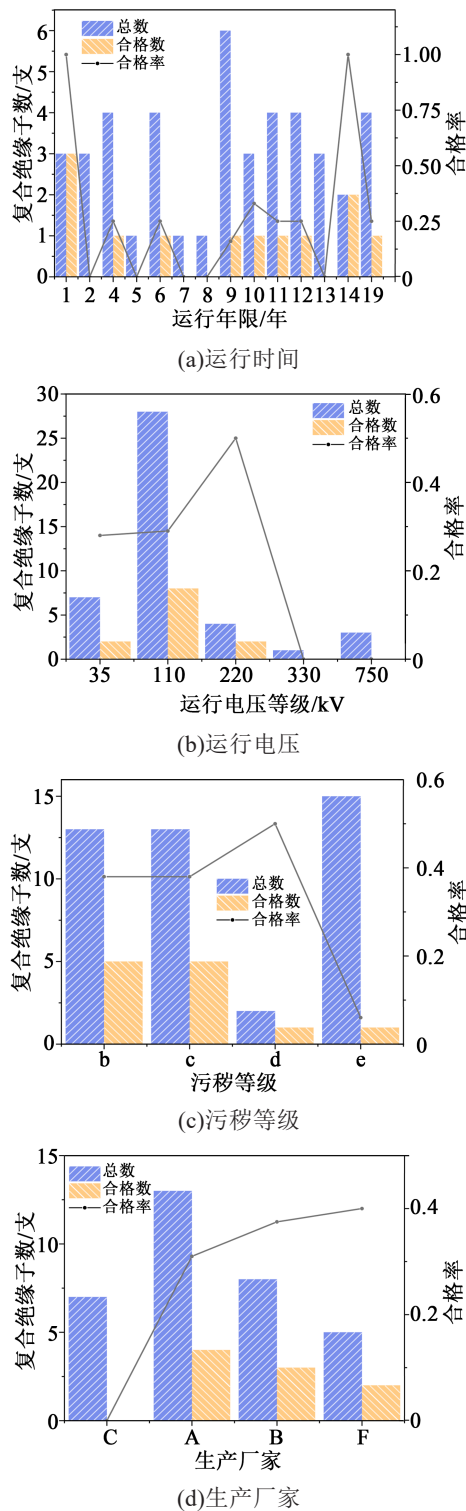


图6 各影响因素下绝缘子的合格率分布图
Fig.6 Qualified rate distribution chart of insulators under each factors

化作用累积会导致合格率越低,但可能由于本次抽样数较少导致结果较为分散,故无法得出上述结论;运行电压为330 kV和750 kV的复合绝缘子带护套芯棒试样的整体绝缘性能较差,原因可能是芯棒

直径较大,导致芯棒护套交界面的面积较大,制作时容易出现粘接不良区域;高污秽度地区的污秽累计可能会使护套硬化,导致护套与芯棒之间的粘接性下降;不同厂家之间的材料配方和浇注工艺存在差别,可能会导致复合绝缘子的护套与芯棒的粘接性能不同,但是由于样本较少,有待进一步确定。

此外从试验结果来看,另有9支绝缘子泄漏电流超过100 μA但未发生闪络,相比于水煮后陡波冲击试验的合格率100%,一定程度上说明复合绝缘子的电气性能尚佳,但本试验的合格率仅为27.9%,差距较大,表明相关规程关于带护套芯棒水扩散试验的泄漏电流值不超过100 μA的规定值可能偏严格^[22-24]。

综上所述,复合绝缘子的水煮后耐冲击电压能力几乎不会退化,可适当放宽试验抽样数;高电压等级线路和重污秽地区的复合绝缘子护套与芯棒的粘接性可能劣化较快,应重点关注这些护套的完整性;不同厂家由于工艺和配方的不同,可能导致其生产的复合绝缘子电气性能老化程度不一,对易出现问题厂家的绝缘子应给予更多关注。

2.3 绝缘子力学性能

2.3.1 密封性能试验

将绝缘子端部连接金具清洗干净,均匀喷涂渗透剂,对其施加70%额定机械负荷并保持1 min,待渗透剂浸染超过10 min后,清洗并均匀喷涂显像剂,观察缺陷的痕迹。结果所有试品均未发现裂痕,可以认为抽检的所有绝缘子试品无论运行年限和环境,均没有密封性问题。端部连接方式为压接式的复合绝缘子目前生产技术较为成熟,具有优异的密封性能。

2.3.2 应力腐蚀试验

剥削绝缘子中间部位长度为150 mm的伞套和伞裙,将裸露芯棒用浓度为1 mol/L的硝酸溶液浸泡,同时施加67%的额定机械负荷保持96 h,试验后观察芯棒的耐酸能力。结果发现26支绝缘子试品中有10支维持时间小于96 h,其中有5支问题绝缘子来自同一厂家B,表明芯棒耐酸性能与厂家的生产工艺有较大关系。10支不合格绝缘子在运行时间、电压等级、污秽度上分布较为分散,可以认为抗应力腐蚀能力与运行年限和运行环境关系不大,这可能是因为材料老化发生在绝缘子表面,而内部芯棒受到外部材料的保护老化不明显,而且应力腐蚀考验的是芯棒的极端力学性能,因此不同运行环境和年限对其影响较小。

2.3.3 机械破坏负荷试验

复合绝缘子除承担绝缘任务外,还需负责悬挂导线,因此芯棒需要有一定的机械强度,否则会出现脆断、掉串等事故。

机械破坏负荷试验是将绝缘子挂在卧式机上,并施加拉伸负荷,拉伸负荷先迅速而平稳地从0上升到额定机械负荷的75%,然后在30~90 s内逐渐升高直至样品破坏。根据规程,若破坏负荷超过复合绝缘子的额定负荷,则本项测试合格。

试验结果发现所有试样均合格,机械破坏负荷与额定机械负荷之比如图7所示,最终的破坏形式如图8所示。经检查所有的复合绝缘子样品均采用压接式连接,表明压接式绝缘子的力学耐受性能符合规程要求。从破坏形式来看,球头抽出和球窝抽出的情况占总体破坏情况的68.1%,说明复合绝缘子力学性能的薄弱点在芯棒与金具的连接处,且芯棒自身的强度远高于金具和连接处。运行检修部门可以加强对芯棒和金具连接部分的检测,以减少复合绝缘子芯棒脆断损坏事故的发生。

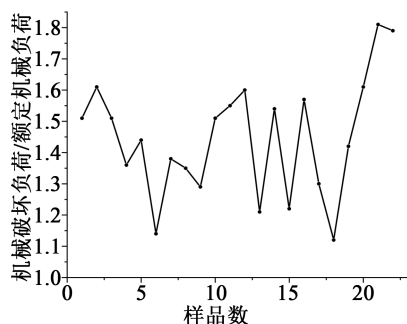


图7 机械破坏负荷测试结果

Fig.7 Test results of mechanical damage load

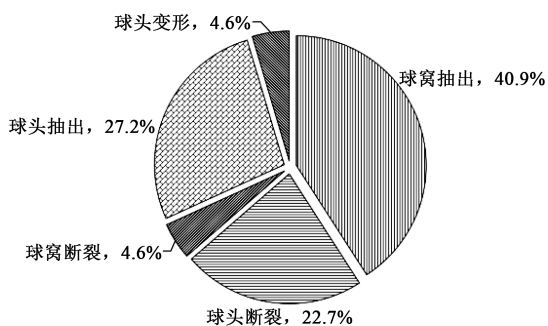


图8 机械破坏情况分布图

Fig.8 Distribution of mechanical damage situation

综上所述,复合绝缘子机械老化特性总体来说较为良好,在高污秽地区运行超过10年也能保持较好的力学性能,但需要注意的是,有些厂家可能由于配方或批次工艺问题导致芯棒耐应力腐蚀能力

下降,需要对同批次的复合绝缘子加以注意。

3 复合绝缘子自然老化影响因素分析及抽检建议

影响复合绝缘子老化特性的因素众多,包括运行年限、电压等级、污秽等级与种类、生产厂家、雷击、鸟害等,一般而言,发生雷击故障或者涉鸟故障跳闸后,运维人员会及时检查事发绝缘子状态,并及时维护或更换,而鸟粪实际上还可以认为是一种特殊污秽,因此本研究在自然老化中不考虑这两个因素。此外,由于同一个地区的光照、温差、湿度等自然条件比较类似,可以认为该地区的复合绝缘子由于上述条件产生的老化相似,对于运维人员抽检复合绝缘子来说,需要关注的是老化之间的差异,根据对不同复合绝缘子老化程度的判断制定科学的抽检方案,并根据抽检结果评估所有绝缘子的运行状态,因此本研究在自然老化中也不考虑这3个因素。最终以运行年限、电压等级、污秽、生产厂家为影响复合绝缘子自然老化的关键因素。

复合绝缘子的自然老化过程是在多种因素的共同作用下缓慢发生的,其老化特性包含硅橡胶材料理化性能劣化、绝缘子电气性能劣化和力学性能劣化3个方面,相互之间存在一定的作用关系。但是从本研究的抽检试验结果来看,不同老化特性与不同影响因素之间依然存在一定的关系:

(1)材料理化特性方面,主要是伞裙和护套的硅橡胶材料老化。伞裙和护套是以羟基封端的硅氧烷作为基础胶料,在交联剂等的的作用及高温下交联形成三维网状结构的高分子硅橡胶。硅橡胶的主链为Si-O-Si,侧链为甲基基团Si-(CH₃)₂,在运行过程中,紫外线照射、电晕放电、化学物质的侵蚀等的能量累积均能直接或间接破坏Si-C、Si-O键,导致憎水性基团甲基消失,引入或生成亲水性基团-OH,表现为憎水性下降。从试验结果来看,随着运行年限的增加,硅橡胶基团的破坏不断叠加,使得材料憎水性能逐步丧失,运行年限是影响材料性能的最主要因素。其次,因为积污中的一些成分会与硅橡胶发生反应,尤其是化工污秽,一般呈现一定的酸碱性,侵蚀作用更强,容易生成羟基等亲水性基团,所以污秽度和污秽类型是影响材料老化的另一因素。此外,由于不同厂家的配方和生产工艺不同,伞裙护套等材料会出现物理损伤,如大伞裙是二次浇注的话,伞裙根部容易出现开裂,但这往往

具有很强的集聚性,问题一般出现在同地区的同一批次复合绝缘子上。

(2)电气性能方面,芯棒的电气性能是复合绝缘子绝缘能力的重要体现。从试验结果来看,在重污秽地区运行19年的复合绝缘子依旧可以通过冲击电压耐受试验,符合预期寿命设计。但是污秽的积累和侵蚀容易使得护套老化硬化,使得护套与芯棒的粘接性下降;此外,高电压等级复合绝缘子芯棒护套交界面的面积较大,也更容易出现粘接性下降,使得芯棒护套间的泄漏电流增加,引发绝缘故障。另外厂家的工艺可能也会影响芯棒护套的粘接性,但是由于本研究同一厂家试验样品较少,无法验证这一观点,因此认为电压等级和污秽是影响护套电气性能的两大大因素。

(3)力学性能方面,考验的是复合绝缘子芯棒、金具及其连接处的力学性能,是复合绝缘子最基本的能力。从试验结果来看,复合绝缘子的力学性能随运行时间和运行环境的变化劣化并不严重,即使在重污秽地区常年运行,其力学性能也能保持较好的状态,这可能是因为复合绝缘子表面由伞裙和护套包裹,伞裙和护套是最易老化的部位,但其并不承担载荷,因此不影响其力学性能。但值得注意的是,由于某些厂家的制作工艺不稳定,可能导致某批次的产品存在一定的质量问题,这同样有明显集聚性,发现问题时需要关注同厂家同批次的复合绝缘子。

综上分析,同一地区的复合绝缘子运行时间和所处地区污秽等级、污秽种类是影响其自然老化的主要原因,其自然老化特性有一定的规律。根据本研究分析,运维人员在开展复合绝缘子抽检工作时,可参考以下原则:①对于在污秽等级达到d级及以上重污秽区、含化工污秽区中运行年限超过10年的绝缘子,增加抽检频次和抽样密度;②对于在污秽等级为c级及以下轻污秽区、非化工污秽区中运行年限小于5年的绝缘子,可减少抽检频次和抽样密度;③抽检试验中某一厂家同批次多个绝缘子出现指标不合格率异常高时,应对该厂家同批次的绝缘子补充抽样,某区域或范围内多个绝缘子指标不合格率异常高时,应对该区域或范围内绝缘子补充抽样。

在开展抽检试验时,应重点关注以下测试项目:

(1)硅橡胶材料性能方面:外观检查和憎水性

检测是必要项目,可直观反映材料的老化状态;红外光谱分析理论上是对憎水性检测的补充说明,且其结果与采样点、检测手法有较大关系,是非必要项目。

(2)电气性能方面:带护套芯棒水扩散试验是重点项目,其合格率较低,可反映芯棒与护套之间绝缘性能好坏;一般而言,试样水煮后陡波冲击试验合格率极高,可减少试样数,是次重点项目。

(3)力学性能方面:应力腐蚀试验是重点项目,其合格率稍低,可反映芯棒极端力学性能高低;密封性能试验和机械破坏负荷试验合格率极高,可减少试样数,是次重点项目。

4 结 论

(1)复合绝缘子硅橡胶材料的老化主要由运行时间、污秽程度和污秽类型引起,运行年份超过10年或在重污秽区的复合绝缘子材料老化严重,憎水性明显下降甚至丧失;化工污秽会加速硅橡胶的老化速度。

(2)复合绝缘子的电气性能和力学性能一般没有材料理化特性劣化严重,长期运行于恶劣环境的复合绝缘子一般还可以保持较好的电气和力学性能;芯棒与护套的交接面是其电气性能的薄弱点,芯棒和金具的连接处是其力学性能的薄弱点。

(3)个别厂家的配方和工艺可能会影响复合绝缘子的自然综合老化,随着配方的改良和工艺升级,影响会不断减弱。

(4)运维人员在开展抽检工作时,应对在重污秽区、有化工污秽区服役时间超过10年的复合绝缘子加大抽检频次和抽样密度,对有明显集聚性不合格的绝缘子补充抽样。抽检试验中应加强对外观检查、憎水性检测、带护套芯棒水扩散试验和应力腐蚀试验的关注。

参考文献:

- [1] 崔江流,宿志一,易辉.我国硅橡胶合成绝缘子的应用与展望[J].中国电力,1999,32(1):38-41.
- [2] 吴光亚,蔡炜.复合绝缘子运行性能分析[J].电瓷避雷器,2000(3):19-22.
- [3] 梁曦东,高岩峰,王家福,等.中国硅橡胶复合绝缘子快速发展历程[J].高电压技术,2016,42(9):2888-2896.
- [4] 陈奇.高压复合绝缘子应用及老化状态研究综述[J].绝缘材料,2016,49(4):7-13.
- [5] 巢亚锋,王成,黄福勇,等.中国输电线路复合绝缘子运行状况分析[J].高压电器,2015,51(8):125-130.

- [6] 石倩. 不同湿度条件下HTV硅橡胶材料的紫外老化特性研究[D]. 北京:华北电力大学,2014.
- [7] 甘永叶. 复合绝缘子运行发热及热老化机理研究[D]. 广州:华南理工大学,2017.
- [8] 董平平,杨茹,陈永明,等. 高温硫化硅橡胶电晕加速老化试验参数研究[J]. 高压电器,2019,55(1):143-148.
- [9] 曾磊磊,张宇,童超,等. 复合绝缘子HTV硅橡胶伞套的湿热老化特性研究[J]. 电瓷避雷器,2020(1):214-221.
- [10] 曾磊磊,张宇,缪雪梅,等. 复合绝缘子芯棒湿热老化与吸湿特性研究[J]. 绝缘材料,2020,53(1):58-63.
- [11] 夏云峰,宋新明,何为. 复合绝缘子老化状态核磁共振分析方法[J]. 高压电器,2020,56(2):197-201,209.
- [12] 夏云峰,宋新明,何建宗,等. 复合绝缘子用硅橡胶老化状态评估方法[J]. 电工技术学报,2019,34(z1):440-448.
- [13] 董平平,田毅,高丽娟,等. 基于FTIR的不同运行条件对复合绝缘子老化特性的影响研究[J]. 高压电器,2019,55(2):110-117.
- [14] 王晨晖,蒋濛,姚龙. 基于红外光谱和憎水性的运行复合绝缘子老化特性[J]. 电瓷避雷器,2019(5):213-215,222.
- [15] 常彬,刘世涛,马波,等. 复合绝缘子伞裙微观特性试验分析[J]. 宁夏电力,2018(1):28-32.
- [16] 刘勇,杜伯学,陆宇航,等. 复合绝缘子表面液滴形貌特征及其对闪络电压的影响[J]. 高电压技术,2014,40(4):1017-1021.
- [17] 李晓明,任贵清,柳耀强,等. 棒形悬式复合绝缘子伞裙和护套间界面粘接性能研究[J]. 电瓷避雷器,2019(3):228-232.
- [18] 王康,朱亚洲,周辛南,等. 运行棒形悬式复合绝缘子机械性能[J]. 电瓷避雷器,2018(5):169-177.
- [19] 梁英,郭兴五. 基于FTIR的硅橡胶绝缘材料的老化程度评估[J]. 高压电器,2015,51(8):62-67.
- [20] 李兴,张晓萌,石延辉,等. 基于傅立叶变换红外光谱测试的硅橡胶老化分析[J]. 电瓷避雷器,2019(5):216-222.
- [21] 郭飞,刘世涛,李秀广,等. 宁夏典型环境绝缘子污秽成分分析[J]. 绝缘材料,2017,50(4):61-66.
- [22] 全国绝缘子标准化技术委员会. 架空线路绝缘子标称电压高于1000V交流系统用悬垂和耐张复合绝缘子定义、试验方法及接收准则:GB/T 19519—2014[S]. 北京:中国标准出版社,2014.
- [23] 电力行业绝缘子标准化技术委员会. 标称电压高于1000V交流架空线路用复合绝缘子使用导则:DL/T 864—2004[S]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [24] 电力行业绝缘子标准化技术委员会. $\pm 500\text{kV}$ 及以上电压等级直流棒形悬式复合绝缘子技术条件:DL/T 810—2012[S]. 北京:中国电力出版社,2012.