

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.10.009

不同老化条件对开关柜绝缘件绝缘性能的影响研究

李旭¹, 杨鼎革², 尚宇², 牛博², 高健², 张珩³

(1. 国网陕西省电力公司, 西安 710048; 2. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 西安 710100; 3. 国网陕西省电力公司西安供电公司, 西安 710032)

摘要: 开关柜是电力系统中重要的电力设备,开关柜内绝缘件会受到实际工况中不同老化条件(污秽、潮湿凝露、冷热循环、热老化等)的影响而产生老化现象。为了探究不同老化条件对开关柜绝缘件绝缘性能的影响,基于开关柜运行的实际工况,综合考虑了开关柜内导电回路发热、潮湿及凝露、冷热循环、污秽等多个因素对柜内绝缘件性能老化的影响过程,通过开展不同因素组合下的模拟试验,对不同老化条件处理下绝缘件表面局放、耐压进行测量。试验结果表明,污秽老化会使绝缘子表面起晕电压及熄灭电压降低,同时降低绝缘子的耐压能力,且污秽越严重,绝缘子耐压能力下降越明显;加入潮湿凝露老化条件会使绝缘子表面的起晕电压及熄灭电压大幅度降低,同时局放量大大增加;加入热老化后,绝缘子表面起晕电压和熄灭电压进一步减弱。同时,热老化会使套管及触头盒的起晕电压和熄灭电压明显下降,并使套管和触头盒的耐压性能略微降低。

关键词: 开关柜; 绝缘件; 污秽老化; 潮湿凝露老化; 冷热循环老化; 热老化

Research on the Influence of Different Aging Conditions on the Insulation Performance of Insulation in Switchgear

LI Xu¹, YANG Dingge², SHANG Yu², NIU Bo², GAO Jian², ZHANG Heng³

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710048, China; 2. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China; 3. State Grid Shaanxi Xi'an Electric Power Company, Xi'an 710032, China)

Abstract: Switchgear is an important power equipment in power system. The insulation components in the switchgear will be affected by different aging conditions (pollution aging, moisture condensation aging, cold and hot cycle aging, thermal aging, etc.) under actual working conditions. In order to explore the influence of different aging conditions on the insulation performance of switchgear insulation parts, based on the actual operating conditions of the switchgear, a comprehensive consideration of the influence process of the conductive circuit heating, moisture and condensation, cold and hot circulation, pollution and other factors on the performance of the insulation aging in the switchgear. The influence process of insulation performance aging of switchgear caused by conductive circuit heating, moisture and condensation, cold and hot circulation, pollution and other factors is comprehensively considered. By carrying out simulation tests under different combinations of factors, the partial discharge and withstand voltage, of the insulation under different aging conditions are tested to assess the impact of various aging factors on the insulation performance of the switchgear. The experimental results show that the dirty aging which reduces the halo and extinction voltage of the insulator can also reduce the withstand voltage of the insulator. The more serious the dirty aging is, the more obvious declining of the insulator's withstand voltage is. With consideration of the moisture condensation aging, the halo and extinguishing voltage of the insulator will be greatly reduced, as well as the partial discharge value will be greatly increased. If further considering the thermal aging, the halo and extinguishing voltage of the insulator is further weakened. Meanwhile, the thermal aging can reduce the halo voltage and extinction voltage of the bushing and contact box, and slightly reduce the withstand voltage performance.

Key words: switchgear; insulation component; pollution aging; moisture condensation aging; cold and hot cycle aging; thermal aging

0 引言

变电站大多地处沿海、城市、矿区或高山、高湿、高温等地区,受季节变化及周边环境影响,变电站内开关柜极易发生凝露、污秽等现象。在这种环境下,一方面空气的绝缘性能降低,另外空气中的水份、粉尘、带电粒子等附着在绝缘件表面,使电气设备的绝缘电阻降低,设备的泄漏电流大大增加,极易产生绝缘击穿及高压放电闪烁的现象,埋下安全隐患,造成安全事故。

电力系统之中高压开关柜是重中之重的一个电力设备。从长期运行经验看,外在环境条件对高压开关柜的绝缘性能影响作用甚大。开关柜性能质量好坏直接关系着开关柜的运行状态,从而对电网安全生产和电力系统的可靠性产生重要影响^[1-2]。开关柜的绝缘性能强度主要基于开关柜绝缘件的强度。

绝缘子具有耐污闪性能优良、比强度高和价格低廉等优点,在电力系统中得到了广泛的运用。套管是一种将带电导体引入电气设备或穿过墙壁的一种绝缘装置,是开关柜的关键组件^[3-4]。触头盒为环氧树脂工艺压力凝胶成型结构,由于其绝缘强度高,因此广泛用于各种手车式开关柜,起绝缘隔离和联接过渡作用^[5]。这些都是保证开关柜稳定运行的关键。运行经验表明,开关柜故障的首要因素是绝缘故障^[6-7]。在开关柜运行过程中,开关柜中的绝缘件会因温度、湿度和材料表面污秽等因素逐渐老化^[8]。绝缘子在长期运行在极端环境中,会因为温度、湿度及污秽因素导致老化^[9-11],使得绝缘子经常发生异常发热、击穿断裂等事故取消时,严重威胁了电网的安全稳定运行^[12-15]。干燥地区运行的开关设备由于套管及触头盒位于开关柜内,在运行过程中受到污秽及潮湿凝露老化的影响较弱。但由于开关柜散热条件差,露天使用的开关柜还会因日照因素导致内部较大温升,加之开关柜内导体接头发热因素,因此热老化以及冷热循环老化是影响套管及触头盒寿命的首要因素^[16-19]。

文中对绝缘子、套管、触头盒进行老化试验,并对老化处理后绝缘件进行局放及耐压试验。对不同老化处理后绝缘件电气性能进行分析比较,以揭示不同老化条件对开关柜绝缘件的老化效果,为保证开关柜稳定安全运行提供试验参考。

1 试验方法

1.1 试验样品

文中采用当前电网 KYN61-40.5 手车式开关柜

通用型绝缘件,包括 40.5 kV 绝缘子、40.5 kV 套管及 40.5kV 触头盒进行老化试验。绝缘子、套管及触头盒,见图 1。

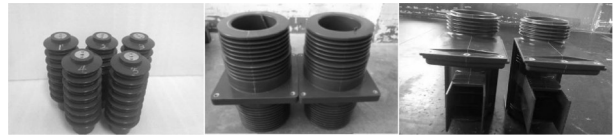


图1 40.5 kV 绝缘子、套管和触头盒样品

Fig. 1 40.5 kV test sample of insulator and bushing, spout samples

1.2 试验设备

1)工频局部放电及耐压设备:主要用于 40.5 kV 及以下电压等级的高压产品(负荷电容小于 2 000 pF)进行工频耐压、局部放电的测试。参照标准为:IEC 60270:2000 局部放电测量标准、GB/T 7354—2003 高电压试验技术—局部放电测量。

2)全屏蔽试验室:为排除空间干扰,我们将整个测试系统放置在电磁屏蔽的全屏蔽试验室内,测试系统与外界信号彻底的隔离,使外界电磁信号对局放测试的影响降至最低程度。执行标准为:GB/T 12190—2006 电磁屏蔽室屏蔽效能的测量方法。

3)电压击穿试验仪:主要用于固体绝缘材料试品在工频电压或直流电压下击穿强度和耐电压的测试。执行标准为 GB/T 16927.1—2011 高电压试验技术、GB/T 1408.1—2016 绝缘材料电气强度试验方法等。

4)高低温交变湿热试验箱:主要用于测试和确定试品进行高温、低温、交变湿热度或恒定试验的温度环境变化后的参数及性能。参照标准为:GB/T 2423.1—2008 试验 A 低温试验方法、GB/T 2423.2—2008 试验 B 高温试验方法、GB/T 2423.3—2006 试验 Ca 恒定湿热试验方法、GB/T 2423.4—2008 试验 Db 交变湿热试验方法等。

1.3 试验方法

由于绝缘子在开放环境遭受到的老化条件往往不是单独存在的,因此对绝缘子表面的老化状态不应进行单一的分析。近年来,设备内部绝缘子发生污闪占有很大比重^[20-21],而绝缘子上发生污秽老化往往伴随着潮湿凝露老化,热老化发生事故的比重较低^[22]。因此,对 40.5 kV 绝缘子分别进行 3 组老化:污秽老化、污秽老化加上潮湿凝露老化、污秽老化加上潮湿凝露老化及热老化。各种老化模拟方法如下:

1)污秽老化:在试品表面喷涂不同浓度的 NaCl 溶液,自然晾干 24 h。

2)污秽老化+潮湿凝露老化:在试品表面喷涂 10%浓度的 NaCl 溶液。

3)污秽老化+潮湿凝露老化+热老化:将绝缘件

放入高温烘箱中,加热至 120 ℃,取出后迅速喷涂 10%浓度的 NaCl 溶液。

由于 40.5 kV 套管及触头盒位于开关柜内部,经常由于开关柜高负荷运作,开关柜内温度急剧上升而发生热老化现象^[23-24]。同时,由于开关柜并不总是满负荷运作的,因此开关柜的发热量并不是一定的,这会导致开关柜内的温度是一个冷热循环的过程。因此,对套管及触头盒进行热老化以及冷热循环老化。各种老化模拟方法如下:

1)热老化:将绝缘件放入高温烘箱中,加热至 120 ℃,取出后迅速进行局放、耐压测试,在测试时确保绝缘件表面温度大于(室温+65 ℃)。

2)冷热循环老化:将高低温交变湿热试验箱极限低温和极限高温分别设定为-15 ℃、110 ℃;对测试样品或样片进行冷热循环试验,极限低温-15 ℃维持 3 h,然后从-15 ℃升温至 110 ℃(1.5 h),在极限高温 110 ℃维持 3 h,然后从 110 ℃降温至-15 ℃(4.5 h)。高低温交变一次为一个循环周期,共 12 h。冷热循环周期,见图 2。在某一循环周期结束后,将测试样品取出,自然冷却至常温,然后进行相关的性能测试。对试品分别做 2、4、6、10 周期冷热循环试验。

对绝缘件进行不同老化处理前,先在常温条件下对绝缘件进行工频电压干耐受试验和局放试验,

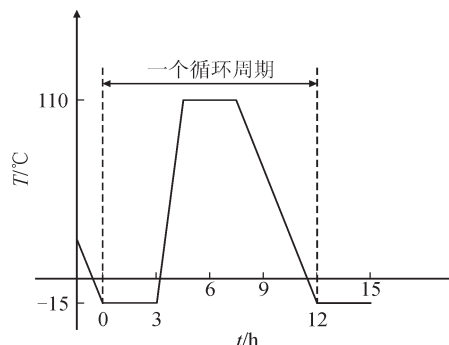


图2 冷热循环周期示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the hot and cold cycle

升高电压至绝缘件起晕(局放量大于 3 pC),后降低电压至绝缘件电晕熄灭(局放量小于 3 pC),然后升压至 95 kV,对绝缘件进行 1 min 工频耐压试验,然后降压至 1.1 U_0 进行局放试验,试验结束后电压降至零。然后,对绝缘件进行不同老化处理,处理后再重复开展上述绝缘件起晕和电晕熄灭过程耐受电压和局放试验。

2 绝缘子老化试验结果及分析

2.1 污秽老化试验结果及分析

对未经老化处理的绝缘子进行工频电压干耐受试验和局放试验,进行 5 次重复试验取其平均值,环境温度为 20 ℃,相对湿度为 44%,试验结果见表 1。

表1 未经老化处理绝缘子实验结果

Table 1 Test results of insulator without aging treatment

测试项目	起晕电压 (耐压前)/kV	熄灭电压 (耐压前)/kV	1.1 U_0 局放值 (耐压前)/pC	起晕电压 (耐压后)/kV	熄灭电压 (耐压后)/kV	1.1 U_0 局放值 (耐压后)/pC
平均值	63.42	61.90	0.19	63.00	61.60	0.19

从表 1 试验结果可以看出,在经过污秽老化前,耐压试验前的起晕电压和熄灭电压分别为 63.42 kV 及 61.9 kV,局放值为 0.19 pC。经过耐压试验后,起晕电压和熄灭电压分别为 63 kV 及 61.6 kV,局放值保持不变。没有经过老化的绝缘子经过耐压试验

后绝缘子的耐压性能和局放值保持不变。

对绝缘子表面进行污秽老化处理,通过改变试品表面喷涂的 NaCl 浓度来模拟污秽老化的严重程度。本试验选取的 NaCl 浓度分别为 2.5%、5%、7.5% 及 10%。进行 5 次重复试验取其平均值,结果见表 2。

表2 经污秽老化处理后绝缘子实验结果

Table 2 Test results of insulator after dirty aging treatment

测试项目	起晕电压 (耐压前)/kV	熄灭电压 (耐压前)/kV	1.1 U_0 局放值 (耐压前)/pC	起晕电压 (耐压后)/kV	熄灭电压 (耐压后)/kV	1.1 U_0 局放值 (耐压后)/pC
2.5%NaCl	60.72	58.00	0.180	53.94	49.34	0.180
5.0%NaCl	59.88	55.86	0.192	51.24	49.76	0.190
7.5%NaCl	54.64	51.60	0.190	50.80	48.22	0.191
10.0%NaCl	53.20	51.60	0.190	47.74	46.86	0.190

将表 2 中绝缘子喷涂不同浓度 NaCl 溶液前后各项测试数据的下降值汇集,见图 3。

从图 3 中可以看出,绝缘子在经过污秽老化处

理后,在进行耐压试验前,材料表面的起晕电压、熄灭电压均明显有所减小,但随着污秽浓度的增加,起晕电压和熄灭电压并没有明显的降低趋势,而是

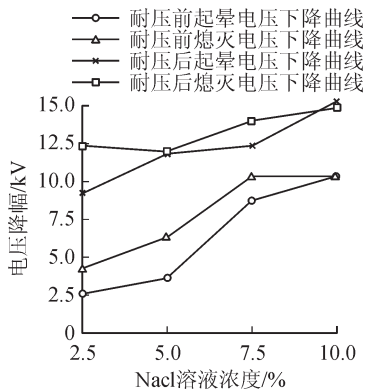


图3 不同污秽老化导致的绝缘子起晕和熄灭电压降幅

Fig. 3 Decrease of the halo and extinction voltage of the insulator due to different dirty aging

略有升高的趋势。耐压试验前的局放值也没有明显的变化。在经过耐压试验后,可以看出老化绝缘子的起晕电压和熄灭电压相较于耐压试验前有着明显的减小。但绝缘子表面的局放值仍然没有明显的上升。以上试验结果证明,在污秽老化处理

后,未进行耐压试验前,绝缘子的起晕电压和熄灭电压均有一定的下降,但局放值并没有发生变化;在进行老化试验后,绝缘子表面起晕电压与熄灭电压进一步明显降低,局放值也没有明显的变化。同时,随着 NaCl 浓度的升高,无论是耐压前还是耐压后,绝缘子的绝缘性能下降值会有明显的提高。可见污秽老化对绝缘子造成最明显的影响是使绝缘子表面的起晕电压和熄灭电压降低,同时降低绝缘子的耐压性能,使绝缘子耐压试验后表面起晕电压和熄灭电压进一步降低。且污秽程度越严重,绝缘子表面性能劣化就越严重。

2.2 污秽老化+潮湿凝露老化试验结果及分析

污秽老化的发生往往伴随着潮湿凝露老化,选取上节 10%NaCl 污秽条件,在绝缘子表面涂抹 10% NaCl 溶液后未经晾干便进行耐压及局放试验,结果见表 3。

表3 污秽老化及潮湿凝露老化前后试验结果(10%NaCl)

Table 3 Test results before and after dirty and moisture aging treatment (10%NaCl)

测试项目	起晕电压 (耐压前)/kV	熄灭电压 (耐压前)/kV	1.1U ₀ 局放值 (耐压前)/pC	起晕电压 (耐压后)/kV	熄灭电压 (耐压后)/kV	1.1U ₀ 局放值 (耐压后)/pC
未处理	63.42	61.9	0.190	63.00	61.60	0.19
污秽老化	53.20	51.6	0.190	47.74	46.86	0.19
污秽+潮湿凝露老化	38.54	36.7	7.238	31.88	26.58	68.32

绝缘子在经过 10%NaCl 溶液污秽老化及潮湿凝露老化后,在未进行耐压试验前,绝缘子表面的起晕电压及熄灭电压就已经下降了约 25 kV 左右,局放值也达到了 7.238 pC。当绝缘材料的局放值大于 5 pC 时,代表绝缘材料的绝缘性能已经被严重破坏。在经过耐压试验后,可以看出绝缘子的起晕电压进一步降低约 7 kV 左右,局放值又进一步提升到 68.32 pC。可以看出单独进行污秽老化的绝缘子局放值并没有发生明显的变化;加入了潮湿凝露老化之后,相比单独的污秽老化,起晕电压和熄灭电压均大幅度减小,而对应的局放值也大幅度上升,即

丧失了其本身的绝缘性能。可见潮湿凝露老化对于绝缘子的电气性能的破坏是十分严重的,不仅使绝缘子的起晕电压和熄灭电压明显降低,而且令其局放值明显上升,绝缘性能大幅度下降,最重要的是,潮湿凝露老化进一步减弱了绝缘子的耐压能力,使其在经受耐压试验后,绝缘性能减弱的更加明显。

2.3 污秽老化+潮湿凝露老化+热老化及分析

依旧选取 10%NaCl 溶液条件。对老化后的绝缘子进行耐压及局放试验,试验结果见表 4。

表4 污秽、潮湿凝露及热老化后试验结果(10%NaCl)

Table 4 Test results after dirty, moisture and heat aging (10%NaCl)

测试项目	起晕电压 (耐压前)/kV	熄灭电压 (耐压前)/kV	1.1U ₀ 局放值 (耐压前)/pC	起晕电压 (耐压后)/kV	熄灭电压 (耐压后)/kV	1.1U ₀ 局放值 (耐压后)/pC
平均值	46.640	35.440	12.528	24.860	16.560	64.600

绝缘子在经过 10%NaCl 溶液进行污秽、潮湿凝露及热老化后,在未经耐压试验前,绝缘子表面的起晕电压相较于未进行老化情况下降低了 16.78 kV,但熄灭电压却降低了 28.22 kV。经过老化处理的绝缘子局放值明显增大,达到了 12.528 pC。在经过耐

压试验后,起晕电压降低到了 24.86 kV,熄灭电压降低到了 16.56 kV,而局放值也进一步增大到了 64.6 pC。可以看出,在三种老化条件共同作用下,相比污秽及潮湿凝露老化条件,可以看出耐压前绝缘子的熄灭电压和起晕电压是进一步减小了。热老化对绝

缘子造成的最大影响是使其耐压性能进一步下降。在经过耐压试验后,起晕电压下降了38.14 kV,而熄灭电压也下降了45.04 kV,这个下降幅度远大于污秽老化条件及污秽潮湿凝露老化条件。

绝缘子受到老化后发生绝缘性能的劣化,起晕电压及熄灭电压会发生明显降低,同时降低了绝缘子的耐压性能,并且使绝缘子的局放值提高。产生此现象的原因是绝缘子经过多次老化后,表面粗糙度明显增加,处处布满孔洞^[25]。老化还会使绝缘子

表面的大分子链断裂,且出现大量如C=O、-OH等强极性基团,从而改变了绝缘子表面的相关特性^[26]。

3 套管老化试验结果及分析

3.1 热老化试验结果及分析

对未经老化处理的套管进行工频电压干耐受试验和局放试验,进行2次重复试验取其平均值,环境温度为26℃,相对湿度为50%,结果见表5。

表5 未经老化处理套管实验结果

Table 5 Test results of bushing without aging treatment

测试项目	起晕电压 (耐压前)/kV	熄灭电压 (耐压前)/kV	起晕电压 (耐压后)/kV	熄灭电压 (耐压后)/kV	1.1U ₁ 局放值 (耐压后)/pC
平均值	58.25	56.40	57.90	56.15	1.34

从表5试验结果可以看出,在经过老化前,耐压试验前的起晕电压和熄灭电压分别为58.25 kV及54.6 kV。经过耐压试验后,起晕电压和熄灭电压分别为57.9 kV及56.15 kV,局放值为1.34 pC。没有经

过老化的套管经过耐压试验后套管的起晕电压和熄灭电压基本保持不变,而套管的局放值小于5 pC,绝缘性能保持着较高的水平。

在经过热老化处理后,套管试验结果见表6。

表6 热老化处理后套管实验结果

Table 6 Test results of bushing after thermal aging

测试项目	起晕电压 (耐压前)/kV	熄灭电压 (耐压前)/kV	起晕电压 (耐压后)/kV	熄灭电压 (耐压后)/kV	1.1U ₁ 局放值 (耐压后)/pC
平均值	58.10	55.20	52.80	51.30	1.02

在经过热老化后,套管的起晕电压及熄灭电压无明显降低;在经过耐压处理后,可以发现套管的起晕电压进一步下降了5.1 kV,熄灭电压也下降了4.9 kV。经过耐压处理后的局放值为1.02 pC,证明套管的绝缘性能仍然保持着较高的水平。从结果中可以看出,热老化并不会对套管的初始起晕电压和熄灭电压造成明显的影响,但在经过耐压后,套

管的局部放电性能会发生明显的降低。套管性能发生老化的原因是由于受到了热老化,会使套管内产生热应力,进而造成套管内部产生了微缺陷^[27-28]。

3.2 冷热循环老化试验结果及分析

对套管进行不同循环次数的冷热循环老化,环境温度为25℃相对湿度为53%,结果见表7。

表7 冷热循环老化处理后套管实验结果

Table 7 Test results of bushing after cold and hot cycle aging

测试项目	起晕电压 (耐压前)/kV	熄灭电压 (耐压前)/kV	起晕电压 (耐压后)/kV	熄灭电压 (耐压后)/kV	1.1U ₁ 局放值 (耐压后)/pC
未老化	53.25	49.9	52.00	49.25	0.45
2周期	52.45	49.2	49.15	47.00	0.65
4周期	53.00	49.9	52.50	49.00	0.65
6周期	53.00	50.3	53.25	51.00	0.65
10周期	52.50	50.5	52.35	50.50	0.65

从表7结果中可以看出,虽然对套管表面进行了冷热循环老化处理,但并没有对套管的绝缘性能造成明显的影响。耐压前的起晕电压维持在53 kV左右;而熄灭电压也保持在50 kV左右。在进行耐压试验后,起晕电压也都保持在49~53 kV的范围

内,熄灭电压保持在47~51 kV范围内,并没有十分明显的差异,相较于耐压前的起晕电压及熄灭电压也没有明显的降低。老化后套管的局放值相较于未老化的套管也并没有太大差异,均保持在一个极低的水平。因此,从以上结果可以得出,冷热循环

老化并不能够使套管的绝缘性能发生老化。

4 触头盒老化试验结果及分析

4.1 热老化试验结果及分析

对未经老化的触头盒进行工频电压干耐受试验和局放试验,进行2次重复试验取其平均值,环境温度 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度为50%,结果见表8。

表8 未经老化处理触头盒实验结果

Table 8 Test results of spout without aging treatment

测试项目	起晕电压 (耐压前)/kV	熄灭电压 (耐压前)/kV	起晕电压 (耐压后)/kV	熄灭电压 (耐压后)/kV	1.1U ₁ 局放值 (耐压后)/pC
平均值	76.15	70.60	75.40	69.80	1.45

在经过热老化处理后,套管试验结果见表9。在经过热老化后,触头盒的起晕电压及熄灭电压明显基本保持不变。在经过耐压处理后,可以发现触头盒的起晕电压明显下降了3.2 kV,熄灭电压下降了4 kV。经过耐压处理后的局放值为1.7 pC,证明触头盒的绝

缘性能仍然保持着较高的水平。从结果中可以看出,热老化对于触头盒的耐压性能影响与套管类似,并不会影响触头盒的初始绝缘性能。在经过耐压试验后,触头盒的起晕电压和熄灭电压有了明显的下降。其下降原因也与套管绝缘性能下降原因类似。

表9 热老化处理后触头盒实验结果

Table 9 Test results of spout after thermal aging

测试项目	起晕电压 (耐压前)/kV	熄灭电压 (耐压前)/kV	起晕电压 (耐压后)/kV	熄灭电压 (耐压后)/kV	1.1U ₁ 局放值 (耐压后)/pC
平均值	76.3	70.2	72.2	65.8	1.7

4.2 冷热循环老化试验结果及分析

对触头盒进行不同循环次数的冷热循环老化,环境温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相对湿度为51%,结果见表10。

从表10结果中可以看出,虽然对触头盒表面进行了冷热循环老化处理,但并没有对触头盒的绝缘性能造成明显的影响。耐压前的起晕电压维持在80.5 kV 以上;而熄灭电压也保持在73 kV 以上。在

进行耐压试验后,起晕电压也都保持在79~85 kV 的范围内,熄灭电压保持在72~81 kV 范围内,相较于耐压前的起晕电压及熄灭电压也没有明显的降低。老化后触头盒的局放值相较于未老化的套管也并没有太大差异,均保持在一个极低的水平。因此,从以上结果可以得出,冷热循环老化对触头盒的绝缘性能影响较小。

表10 冷热循环老化处理后触头盒实验结果

Table 10 Test results of spout after cold and hot cycle aging

测试项目	起晕电压 (耐压前)/kV	熄灭电压 (耐压前)/kV	起晕电压 (耐压后)/kV	熄灭电压 (耐压后)/kV	1.1U ₁ 局放值 (耐压后)/pC
未老化	80.5	78.4	79.75	77.50	0.255
2周期	82.0	81.0	79.00	72.45	0.225
4周期	85.0	82.0	85.50	81.00	0.255
6周期	87.0	73.0	80.00	76.00	0.240
10周期	83.0	80.5	83.50	81.00	0.275

5 结论

文中通过对开关柜内绝缘件进行老化试验,对老化后的绝缘件进行局放和工频干耐受电压试验,来分析各老化条件对于各绝缘件绝缘性能的老化

程度。由于绝缘子所受老化的复杂性,对绝缘子分别进行污秽老化、污秽+潮湿凝露老化、污秽+潮湿凝露+热老化,对套管及触头盒进行热老化及冷热循环老化。老化绝缘件的试验结论如下:

1)污秽老化会使绝缘子表面起晕电压及熄灭电

压降低,同时降低绝缘子的耐压能力,且污秽越严重,绝缘子耐压能力下降越明显;加入潮湿凝露老化条件后,绝缘子表面的起晕电压及熄灭电压大幅度降低,同时表面局放值大大提升,绝缘性能被严重破坏,并且进一步减弱了绝缘子的耐压能力;加入热老化后,使绝缘子表面起晕电压和熄灭电压进一步略微减弱。这是由于老化会使绝缘子表面粗糙度增大,孔洞增多;同时使绝缘子表面大分子链断裂,产生极性基团,使绝缘子表面的性质改变。

2)热老化会使套管及触头盒的起晕电压和熄灭电压明显下降,并使套管和触头盒的耐压性能略有降低。但冷热循环老化并不能对它们的性能造成明显的影响。这是由于热老化会使套管和触头盒内部产生热应力,破坏了其结构,从而使套管和触头盒性能降低。

参考文献:

- [1] 庞先海,冀立鹏,景皓,等. 40.5 kV 高压开关柜绝缘故障原因分析及处理[J]. 河北电力技术, 2017, 36(3): 31-33.
PANG Xianhai, JI Lipeng, JING Hao, et al. Analysis and treatment of insulation failure of 40.5 kV high voltage switchgear[J]. Hebei Electric Power Technology, 2017, 36(3): 31-33.
- [2] 陈强,李庆民,丛浩熹,等. 高压开关设备触头温度监测技术研究进展[J]. 高压电器, 2015, 51(9): 146-153.
CHEN Qiang, LI Qingmin, CONG Haoxi, et al. Research progress of contact temperature monitoring technology for high voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(9): 146-153.
- [3] 李维江. 基于介电频域特性的套管绝缘状态评估研究[D]. 大连:大连理工大学, 2015.
LI Weijiang. Study on the evaluation of bushing insulation based on dielectric frequency domain characteristics[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [4] 王海燕,朱志豪,费翔,等. 40.5 kV 空气绝缘开关柜穿墙套管电场优化与结构设计[J]. 高压电器, 2019, 55(1): 59-63.
WANG Haiyan, ZHU Zhihao, FEI Xiang, et al. Electric field optimization and structural design of 40.5 kV air-insulated switchgear wall bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1): 59-63.
- [5] 操李节,汪霄飞,徐勇,等. 存在气泡缺陷触头盒电场仿真研究[J]. 高压电器, 2017, 53(5): 141-145.
CAO Lijie, WANG Xiaofei, XU Yong, et al. Simulation study on electric field of contact box with bubble defects[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(5): 141-145.
- [6] 叶成刚. 35 kV 在役开关柜绝缘结构改进研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
YE Chenggang. Research on the improvement of insulation structure of 35 kV switchgear in service[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013.
- [7] 马琳悦. 高压开关柜停电带电检修技术[J]. 中国科技信息, 2020(10): 46-48.
MA Linyue. Power-over maintenance technology for power failure of high-voltage switchgear[J]. China Science and Technology Information, 2020(10): 46-48.
- [8] 白婧婧,王凤林,刘纯常,等. 开关柜绝缘隔板热老化状态综合评估方法研究[J]. 电子世界, 2017(7): 100-102.
BAI Jingjing, WANG Fenglin, LIU Chunchang, et al. Research on comprehensive evaluation method of thermal aging state of insulation separator of switchgear[J]. Electronic World, 2017(7): 100-102.
- [9] 李智勇,周华. 关于开关柜内部绝缘缺陷的检测与研究[J]. 科技创新与应用, 2020(12): 77-78.
LI Zhiyong, ZHOU Hua. On the detection and research of internal insulation defects in switchgear[J]. Science and Technology Innovation and Application, 2020(12): 77-78.
- [10] 郭沁,张炜琦,郭雨,等. 温湿度对户外设备凝露现象的影响研究[J]. 高压电器, 2018, 54(8): 60-64.
GUO Qin, ZHANG Weiqi, GUO Yu, et al. Research on the influence of temperature and humidity on the condensation of outdoor equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(8): 60-64.
- [11] 杨芳,潘岐泽. 12 kV 高压开关柜受潮凝露防治技术研究[J]. 高压电器, 2018, 54(8): 40-47.
YANG Fang, PAN Qize. Research on the prevention and cure technology of moisture condensation of 12 kV high-voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(8): 40-47.
- [12] 曾磊磊,张宇,邓志斌,等. 复合绝缘子芯棒湿热老化特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2020(2): 196-203.
ZENG Leilei, ZHANG Yu, DENG Zhibin, et al. Research on wet heat aging characteristics of composite insulator core rods[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(2): 196-203.
- [13] 苏金刚,杜伯学,李进,等. 直流电场中高压电缆绝缘电树枝劣化研究现状[J]. 广东电力, 2019, 32(12): 66-72.
SU Jingang, DU Boxue, LI Jin, et al. Research status of electrical tree degradation in high voltage cable insulation in DC electric field[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(12): 66-72.
- [14] 卢明,刘泽辉,张中浩,等. 复合绝缘子异常发热实验室模拟及机理研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(1): 66-71.
LU Ming, LIU Zehui, ZHANG Zhonghao, et al. Laboratory simulation and mechanism study on abnormal heating of composite insulator[J]. Smart Power, 2019, 47(1): 66-71.
- [15] 刘柯健,黄静,郑华东,等. 基于特征尺寸测量的绝缘子型号在线识别系统研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(6): 82-87.
LIU Kejian, HUANG Jing, ZHENG Huadong, et al. Insula-

- tor model on-line identification system based on characteristic dimension measurement[J]. Smart Power, 2019, 47(6): 82-87.
- [16] 陈家旺. 浅谈低压开关柜的温升[J]. 科技与创新, 2019(23): 140-141.
CHEN Jiawang. On the temperature rise of low-voltage switchgear[J]. Science and Technology and Innovation, 2019(23): 140-141.
- [17] 孙进, 谢诗琪, 董翠翠, 等. 硅橡胶复合绝缘子老化评估的研究进展[J]. 石油化工, 2020, 49(1): 202-208.
SUN Jin, XIE Shiqi, DONG Cuicui, et al. Research progress of aging evaluation of silicone rubber composite insulators[J]. Petrochemical Industry, 2020, 49(1): 202-208.
- [18] 陶诗洋, 冯义, 张天辰, 等. 基于脉冲电流法的高压开关柜局部放电在线监测装置[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 145-149.
TAO Shiyang, FENG Yi, ZHANG Tianchen, et al. High-voltage switch cabinet partial discharge on-line monitoring device based on pulse current method[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 145-149.
- [19] 潘岐泽, 杨芳, 杨志. 12 kV 高压开关柜受潮凝露机理及防治关键技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 160-172.
PAN Qize, YANG Fang, YANG Zhi. Discussion on mechanism of the dampness and dewing inside 12 kV high-voltage switchgear and its key control techniques[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 160-172.
- [20] 关伟, 张晓星, 程政, 等. 高压开关柜支柱绝缘子污秽绝缘状态的试验研究及诊断[J]. 高压电器, 2017, 53(2): 178-185.
GUAN Wei, ZHANG Xiaoxing, CHENG Zheng, et al. Test research and diagnosis of the pollution and insulation state of high-voltage switchgear pillar insulators[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(2): 178-185.
- [21] 曲永政, 裴继东, 蒋延磊. 高压开关柜内支柱绝缘子污闪问题研究[J]. 电工技术, 2015(6): 5-6.
QU Yongzheng, PEI Jidong, JIANG Yanlei. Research on pollution flashover of post insulators in high-voltage switchgear[J]. Electrical Engineering and Technology, 2015(6): 5-6.
- [22] 龚亮. 低压开关柜触头发热原因分析及解决措施[J]. 中国设备工程, 2020(1): 176-177.
GONG Liang. Analysis of causes of touching heat of low-voltage switch cabinet and solution measures[J]. China Equipment Engineering, 2020(1): 176-177.
- [23] 丁乾城. 10 kV 开关柜安装运行中存在的问题[J]. 科技资讯, 2020, 18(1): 27-28.
DING Qiancheng. Problems in the installation and operation of 10 kV switchgear[J]. Science and Technology Information, 2020, 18(1): 27-28.
- [24] 刘若溪, 白宝军, 郭沁, 等. 开关柜凝露现象机理分析研究[J]. 高压电器, 2018, 54(10): 80-84.
LIU Ruoxi, BAI Baojun, GUO Qin, et al. Analysis and research on the mechanism of condensation phenomenon in switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(10): 80-84.
- [25] 宋伟, 申文伟, 王国利, 等. 电晕放电老化对高温硫化硅橡胶材料陷阱特性的影响[J]. 高电压技术, 2013, 39(4): 979-986.
SONG Wei, SHEN Wenwei, WANG Guoli, et al. Effect of corona discharge aging on trap characteristics of high temperature vulcanized silicone rubber materials[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(4): 979-986.
- [26] 申文伟, 宋伟, 王国利, 等. 复合绝缘子 HTV 硅橡胶材料老化特性的研究[J]. 高压电器, 2013, 49(2): 1-7.
SHEN Wenwei, SONG Wei, WANG Guoli, et al. Research on the aging characteristics of HTV silicone rubber materials for composite insulators[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(2): 1-7.
- [27] 吴康宁. 湿热环境中环氧树脂复合材料力学性能[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
WU Kangning. Mechanical properties of epoxy resin composites in hot and humid environment[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [28] 钱星宇, 职山杰. 湿热环境下环氧复合材料力学性能研究[J]. 南方农机, 2019, 50(20): 207.
QIAN Xingyu, ZHI Shanjie. Study on the mechanical properties of epoxy composites under humid heat environment[J]. South China Agricultural Machinery, 2019, 50(20): 207.

李旭(1984—), 男, 高级工程师, 主要从事输变电设备运维检修管理和技术监督(E-mail: 184039454@qq.com)。