

湿度对不同电场类型下电缆缓冲层局部放电特性的影响

李志坚¹, 李旭¹, 杜晓雨², 孔晓晓², 李进², 杜伯学²

(1. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300384;

2. 天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘要:依据电缆缓冲层结构,搭建了湿度环境可控的电缆缓冲层局部放电测试平台,设计了3种典型缺陷模型,采用脉冲电流法进行局部放电测试。结果表明:湿度变化对局部放电图谱几何形状影响较小,但对局部放电特征参数影响较大。随着湿度的增加,3种模型下的放电幅值均呈现先减小后增大的趋势。相同湿度与电压下,针板系统内局部放电活性高于其他模型,其在电压为180 V、湿度为90%时,最高脉冲幅值可达770 mV。

关键词:电缆缓冲层;局部放电;相对湿度;特征参数

中图分类号:TM855 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2021)07-0102-08

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.07.015

Effect of Relative Humidity on Partial Discharge Characteristics of Cable Buffer Layer Under Different Electric Field Forms

LI Zhijian¹, LI Xu¹, DU Xiaoyu², KONG Xiaoxiao², LI Jin², DU Boxue²

(1. Tianjin Electric Power Research Institute of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300384, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: According to the structure of cable buffer layer, a partial discharge test platform with controllable humidity environment for buffer layer was established. Three typical defect models were designed and conducted partial discharge tests by pulse current method. The results show that the variation of relative humidity has little effect on the geometric shape of partial discharge pattern, while has large effect on the characteristic parameters of partial discharge. With the increase of humidity, the discharge amplitude of three models decreases at first and then increases. Under constant humidity and voltage, the partial discharge activity in the needle-plate system is higher than that in the other models. Under 180 V of voltage and 90% of humidity, the maximum pulse amplitude reaches 770 mV.

Key words: cable buffer layer; partial discharge; relative humidity; characteristic parameters

0 引言

XLPE 电缆由于其良好的热学性能、力学性能与化学性能,被广泛应用于输电线路中^[1-3]。然而,近年来 XLPE 电缆故障频发,严重影响了电力系统的运行可靠性^[4]。针对故障电缆解剖发现,缓冲层

与铝护套表面均存在明显的放电痕迹。缓冲层是电缆结构的重要组成部分,位于绝缘屏蔽层与内护套之间,当缓冲层内部环境与接触状态变化时,易引起内部电场畸变并导致局部放电,最终引起电缆故障^[5]。

目前电缆缓冲层内部的放电问题引起了行业内的广泛关注。李陈莹等^[6]建立了电缆缓冲层仿真模型,发现当金布中铜丝直径小于编织模型布厚度时,局部场强会超过空气的电气强度从而引发局部

收稿日期:2020-08-19 修回日期:2020-11-06

基金项目:国网天津市电力公司科技项目(KJ20-1-02)

作者简介:李志坚(1965-),男(汉族),天津人,高级工程师,研究方向为电缆运行状态监测与故障诊断。

放电。宫瑞磊等^[7]建立了电缆铝护套松动时的放电模型,并用时域有限元法计算了其在空气中的电气强度,发现铝护套与缓冲带间接触不良时会有局部放电现象产生。JIANG Lei等^[8]复现了电缆缓冲层烧蚀过程,发现在烧蚀过程中伴随有局部放电现象。张玮玮等^[9]对故障电缆内灼烧位置进行理化分析,发现内部烧蚀痕迹是由气隙放电引起的,同时结合仿真计算结果发现气隙的存在是引发局部放电的最主要原因,此外缓冲层自身电导率升高与电网过电压入侵同样是局部放电的重要影响因素。然而,上述研究均未考虑敷设环境对缓冲层内部放电的影响。敷设环境会影响电缆运行状态,当电缆因外护套破坏而受潮时,缓冲层内部的湿度会发生较大变化,引起局部放电活动的改变,因此开展不同湿度下的缓冲层局部放电特性研究至关重要。

本研究依据天津市 220 kV XLPE 在运电缆实际结构,搭建可控湿度的电缆缓冲层局部放电测试平台,并设计 3 种典型缺陷模型,通过高频脉冲电流法进行局部放电测试,提取不同放电阶段下的局部放电特征参数,对不同湿度下的缓冲层局部放电特性进行规律总结。

1 试验

1.1 缺陷模型

采用厚度为 1 mm 的半导电阻水带,裁剪成直径为 5 cm 的圆形,其性能参数满足 IEC 60840:2020 要求。采用厚度为 1 mm 的绝缘屏蔽层,裁剪成直径为 5 cm 的圆形,其性能参数满足 GB 50217—2018 要求^[10]。测试前将半导电阻水带与绝缘屏蔽层在 100℃ 真空条件下处理 72 h,以去除试样中的水分。

试验采用 3 种缺陷模型如图 1 所示,分别是柱板电极系统、球板电极系统与针板电极系统。其中,柱板系统与球板系统分别模拟电缆缓冲层内的稍不均匀电场,而针板系统模拟电缆缓冲层内的极不均匀电场。试验中的电极均为铝制电极,其中地电极直径为 10 cm,柱电极直径为 5 cm,球电极直径为 3 cm,针电极曲率半径为 0.3 mm。为模拟实际运行中铝护套松动的情况,高压侧铝电极与缓冲带之间留有 0.1 mm 的气隙。3 种电极系统安装在恒温恒湿箱内,以模拟不同的环境湿度。搭建模型时应确保地电极与缓冲层紧密接触,为防止回路中的电晕放电,导线连接处均用铝箔包裹,导线采用单芯

铜线。

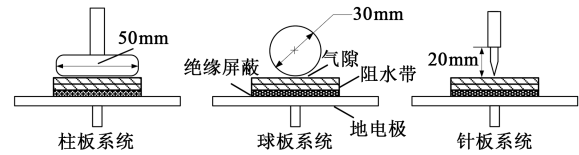


图1 典型缺陷模型

Fig.1 Typical defect models

1.2 局部放电测试系统

试验电路如图 2 所示,图 2 中调压器输出电压范围为 0~5 kV,交流保护电阻 R_x 为 2 M Ω ,耦合电容 C_k 为 800 pF, Z_D 为检测阻抗, C_x 为缓冲层试样。试验采用高频脉冲电流法进行局部放电检测,其中 PDCheck 局部放电检测仪通过检测阻抗内部的分压电容获取工频相位参考信息。试验中的噪声信号幅值低于 1 mV,同时局部放电测试电路符合 IEC 60270:2015^[11-12]。PDCheck 局部放电检测仪由意大利 Techimp 公司生产,主要参数如表 1 所示。

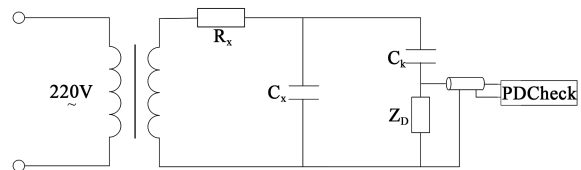


图2 局部放电测试电路

Fig.2 Partial discharge test circuit

表1 PDCheck 主要参数

Tab.1 Main parameters of PDCheck

主要参数	性能指标	主要参数	性能指标
带宽	16 kHz~30 MHz	幅值范围	0~5 V
采样频率	100 MS/s	检测阻抗	50 Ω

1.3 局部放电试验方法

试验前,应确保 PDCheck 的同步频率与外施电压频率一致,并且选择合适的阈值去除噪声信号,交流电源的阈值电流设置为 3 A。进行局部放电测试时,加压方式采用阶梯升压法,该方法可以加速局部放电发展进程。试验中设置了 4 种电压(60、100、140、180 V),每种电压下的加压时间均设定为 2 h。局部放电试验温度控制为 20℃,湿度设定为 40%、60%、80%,测试期间设置脉冲最大采集数为 5 000,记录每种电压下具有代表性的局部放电特征谱图。

2 试验结果

2.1 预试验

局部放电测试之前,首先进行预试验,主要目的是测试缓冲层的起始电压与击穿电压,其中同种条件下进行5次测试,并求取两类特征电压的平均值。图3是不同环境湿度下局部放电起始电压变化曲线。从图3可以看出,起始电压随着电场畸变程度的增加呈现出整体下降的趋势,在柱板系统下局部放电起始电压最高,针板系统下局部放电起始电压最低。同一模型下的局部放电起始电压随着外界环境相对湿度的增加不断下降,但其下降速率逐渐减小。

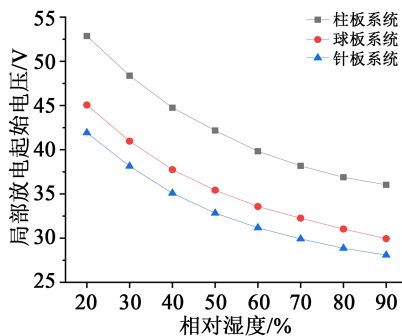


图3 不同环境湿度下局部放电起始电压变化曲线

Fig.3 Change curves of partial discharge initial voltage under different environmental humidity

图4是不同缺陷模型下局部放电击穿电压随相对湿度变化的曲线。从图4可以看出,同一缓冲层缺陷模型下的击穿电压约是起始电压的5~7倍,且各模型呈现出明显的分层趋势。各缺陷模型的击

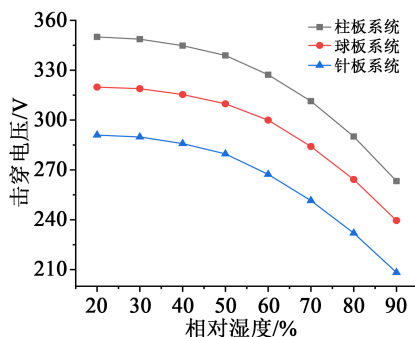


图4 不同环境湿度下局部放电击穿电压变化曲线

Fig.4 Change curves of partial discharge breakdown voltage under different environmental humidity

穿电压均随着相对湿度的增加而下降,当环境湿度超过60%后,击穿电压下降速率发生明显变化。对比图3与图4可知,在同一放电模型下,相较于起始

电压,相对湿度变化对击穿电压的影响更大。

2.2 局部放电相位特征

2.2.1 柱板系统

图5是柱板系统下电缆缓冲层在不同湿度下的局部放电特征谱图。由图5(a)可知,在湿度为40%的条件下,最大放电幅值随着外施电压的上升而增加。低电压条件下脉冲幅值较低,且放电次数较少,放电多集中于低幅值区域,放电形式以小幅度放电为主。

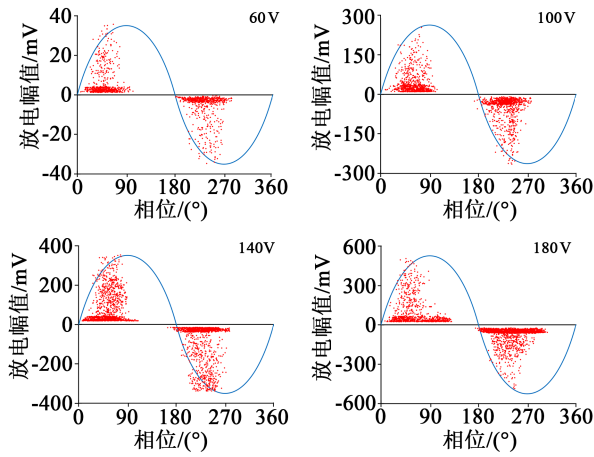
由图5(b)可知,当湿度为60%时,放电脉冲幅值在60V电压下不超过30mV,随着外施电压的提高,最大放电幅值不断提高,放电相位不断扩大,总放电次数不断增多。对比图5(a)可以明显看出,同一电压下的最大放电幅值明显下降,放电相位略有减小,放电次数略有增加。因此可以推测,在一定湿度范围内,水分会抑制缓冲层内的局部放电活动。

由图5(c)可知,同一电压下,湿度为80%时的最大放电幅值与放电次数达到最大。在高湿度环境下,局部放电不再完全以低幅值放电为主,当电压超过100V时,放电集中于近似三角形区域中,同时负半周的放电次数超过正半周。可以推测,在相对湿度为60%~80%存在临界值,当超过这一临界值后,外界环境湿度的提高会加剧缓冲层内的局部放电活动。

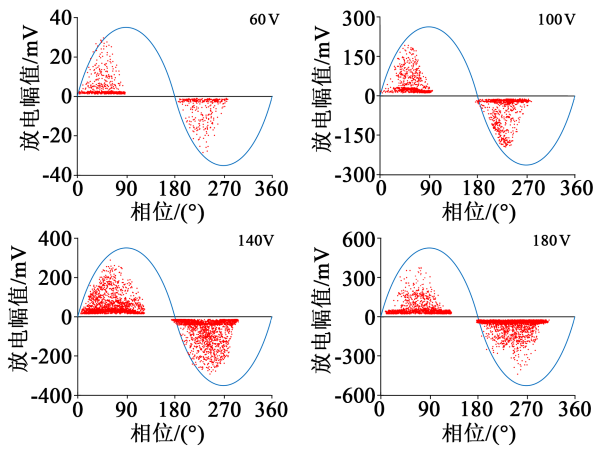
2.2.2 球板系统

图6是不同湿度下球板系统在不同电压下的放电谱图。从图6(a)可以看出,球板模型下的放电脉冲多集中于高幅值区域,且随着电压的升高,低幅值区域逐渐形成一个类似三角形的空穴,且该空穴的面积不断增大。在电压为60V的条件下,局部放电还处于起始阶段,最大脉冲幅值低于45mV,单次采样时间内总放电次数低于1000。当外施电压超过100V后,高幅值区域的放电脉冲数明显增多,负半周的放电次数明显高于正半周。当电压为180V时,正半周的最大脉冲幅值明显低于负半周的最大脉冲幅值。

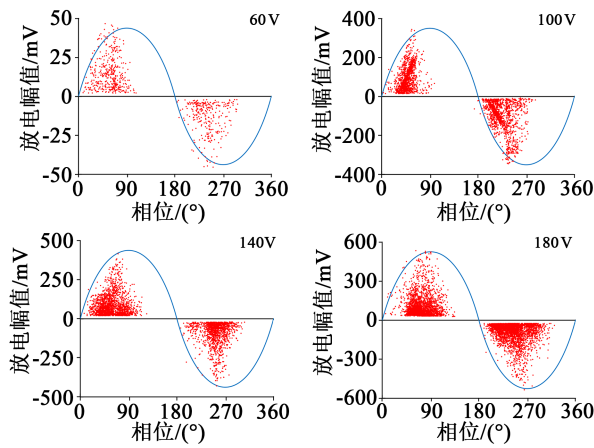
从图6(b)可以看出,当湿度为60%时,放电活动明显受到抑制,同一电压下最大脉冲幅值明显下降。PRPD图谱形状特征有明显变化,在低于100V的电压下,同一采样时间下放电次数相比于湿度40%时略有下降;而在高于100V的电压下,放电次数相比于湿度40%时略有上升。



(a)湿度为40%



(b)湿度为60%

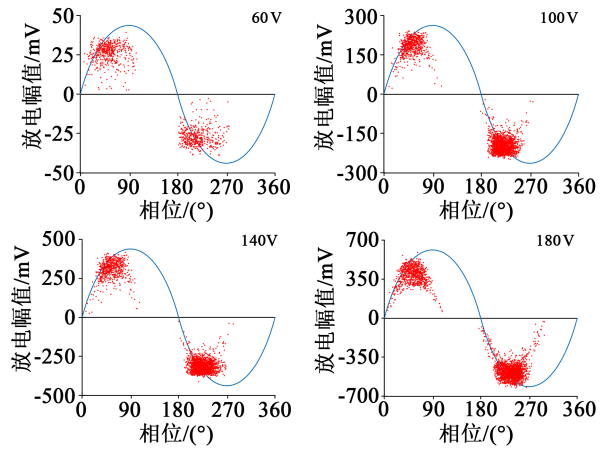


(c)湿度为80%

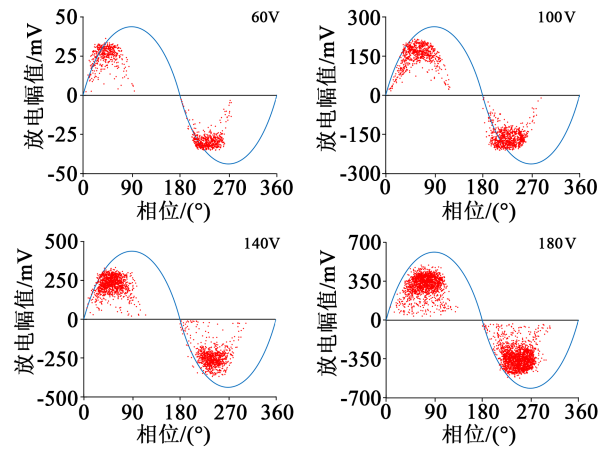
图5 不同湿度下柱板系统在不同电压下的放电谱图

Fig.5 The PRPD patterns of column-plane model under different voltages at different environmental humidity

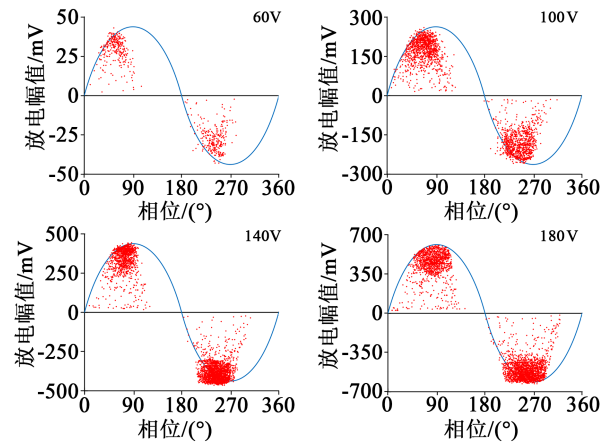
从图6(c)可以看出,随着湿度的进一步提高,局部放电活动加剧,放电次数明显增加,超过湿度为40%条件下的放电次数,同时放电相位达到最大,在180V电压下,放电相位超过135°。PRPD图谱在80%湿度下并未在低幅值区域形成明显的空穴



(a)湿度为40%



(b)湿度为60%



(c)湿度为80%

图6 不同湿度下球板系统在不同电压下的放电谱图

Fig.6 The PRPD patterns of sphere-plane model under different voltages at different environmental humidity

结构,说明高湿环境下低幅值放电脉冲总数略有提高。

2.2.3 针板系统

图7是针板系统下电缆缓冲层在不同湿度、不同电压下的局部放电相位谱图。由图7(a)可知,电

缆缓冲层的最大放电脉冲幅值随着外施电压的升高而提高。总放电次数随着外施电压的提高呈现上升的趋势,放电在较低电压情况下集中于低幅值区域,随着电压的提高,放电脉冲向高幅值区域扩展。

由图 7(b)可知,最大脉冲幅值随着外施电压的提高不断增加,相比于图 7(a),同一电压下的最大脉冲幅值均有不同程度的下降,这说明在 40%~60% 的湿度环境下,水分对电缆缓冲层内局部放电行为有一定的抑制作用。

由图 7(c)可知,相比于图 7(b),同一电压下的最大放电幅值出现明显的提高,这说明在高湿度条件下,水分加剧了电缆缓冲层内的局部放电行为。同时湿度为 80% 时的放电幅值最高,表明在该湿度下缓冲层局部放电活动更为剧烈。相对湿度变化对放电相位有一定影响。在湿度为 60% 时,低电压下放电相位宽度明显减小,高湿状态下,放电相位宽度略有提升,但总体上小于 40% 湿度下的相位宽度。

对比 3 种模型不难看出,针板系统下的放电相位宽度较窄,且放电幅值较高,放电脉冲幅值分布比较分散,没有明显的集中区域。球板系统的放电相位宽度最宽,放电活动多集中于较高幅值区域。相比于其他两种电极系统,柱板系统下局部放电活动整体较弱,同一电压下其放电相位宽度介于针板系统与球板系统之间,较高电压下(180 V)放电相位宽度接近于球板系统的放电相位宽度。在针板系统下,随着湿度的增加,正、负半周的放电分布始终保持有一定的对称性。但在球板系统与柱板系统下,放电分布呈现出一定的极性效应,在高湿度条件下,正、负半周的放电脉冲相位分布开始出现不对称现象,负半周的最大脉冲幅值与放电次数超过正半周。

2.3 局部放电统计特征参数

2.3.1 60 V 电压下的统计特征参数

为深入研究电缆缓冲层放电特性,对不同缺陷模型下局部放电统计特征参数展开研究,分别提取最大放电幅值、平均放电幅值与放电重复率(每 1 s 的放电次数)等特征参数展开研究。最大放电幅值可以用来反映缓冲层结构破坏程度,60 V 电压下,最大放电幅值与相对湿度的变化关系如图 8 所示。从图 8 可以看出,3 种模型有着相似的变化趋势,在同一种缺陷下,随着外界环境湿度的增加,最大脉冲幅值先减小后增加,且在湿度增至 60% 之后,最大脉冲幅值增长速度较快。对于柱板系统,最大脉冲幅值变化规律具有一定的特殊性,在湿度低于

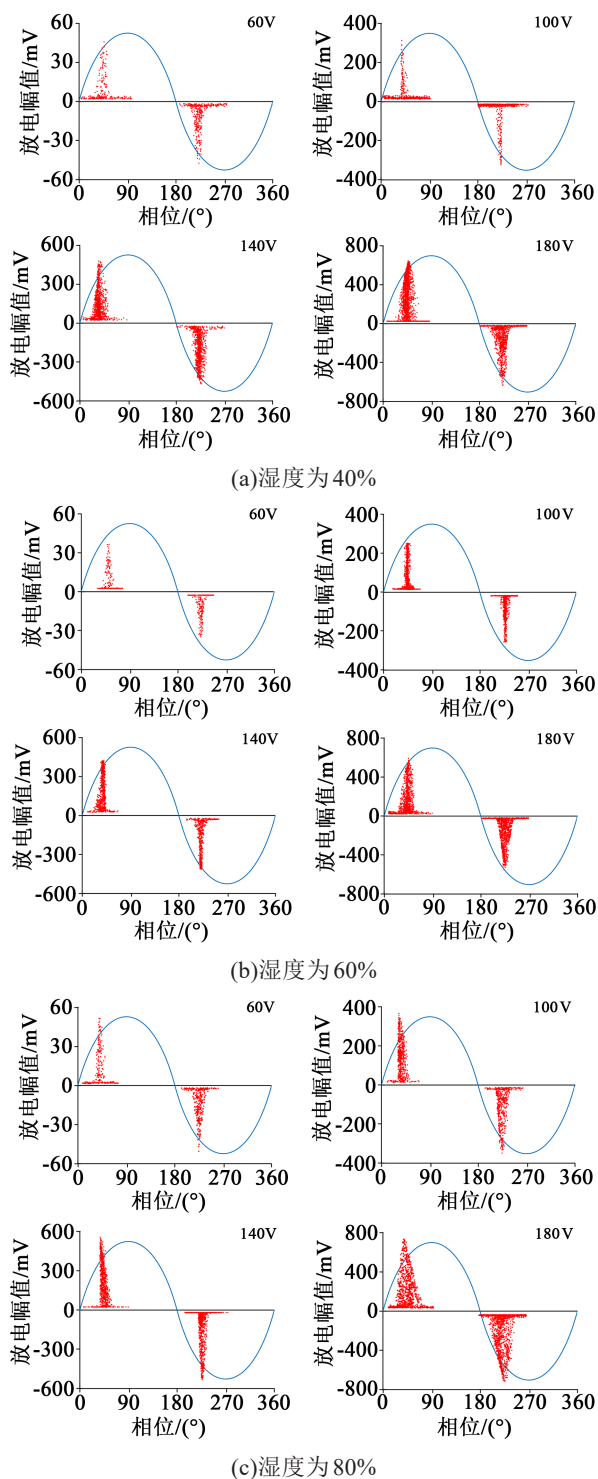


图 7 不同湿度下针板系统在不同电压下的放电谱图

Fig.7 The PRPD patterns of needle-plane model under different voltages at different environmental humidity

40% 时,最大脉冲幅值几乎不随湿度变化,在湿度为 40%~60% 时,最大脉冲幅值下降较快,而在湿度超过 80% 时,最大脉冲幅值仅有小幅提升。

平均脉冲幅值可以用来反映放电过程中的能量变化,60 V 下平均脉冲幅值与相对湿度的关系如

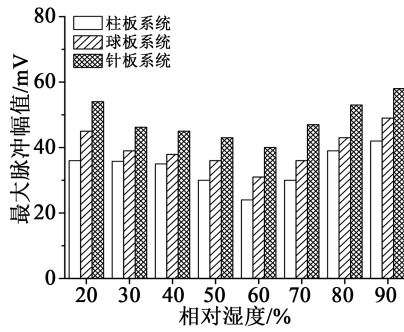


图8 60 V下最大脉冲幅值与相对湿度关系柱状图

Fig.8 The histogram of maximum pulse amplitude with relative humidity at 60 V

图9所示。由图9可以看出,柱板系统下的平均脉冲幅值明显低于其他两个系统,说明柱板系统在整个放电阶段释放能量较少。在低湿度环境中,球板系统的平均脉冲幅值高于针板系统,但在高湿度环境下,针板系统的平均幅值略高于球板系统。说明在低电压下,湿度对极不均匀场下的平均放电脉冲幅值有着较大的影响。

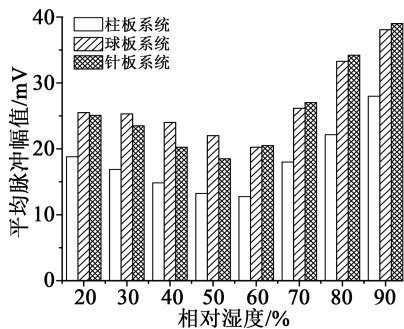


图9 60 V下平均脉冲幅值与相对湿度关系柱状图

Fig.9 The histogram of average pulse amplitude with relative humidity at 60 V

放电重复率随着湿度的变化关系如图10所示。由图10可以看出,不同缺陷模型下的放电重复率在湿度为50%~60%下最低,90%湿度下的放电重复率基本与20%湿度下的放电重复率相近,随着湿度的提高,放电重复率呈现出先减小而后增大的趋势。同一湿度下,柱板系统下的放电重复率最低,而针板系统下的放电重复率最高,相同采集时间下极不均匀电场中的放电脉冲总数最多,可以认为低电压下,针板系统下的局部放电活动更为剧烈。

从3类不同的统计特征参数可以看出,在低电压下,总体放电较弱,虽然在不同的环境湿度下,针板系统下的统计特征参数较高,但与其他两种系统下的特征参数差距不大,且缓冲带试样没有明显的

破坏。

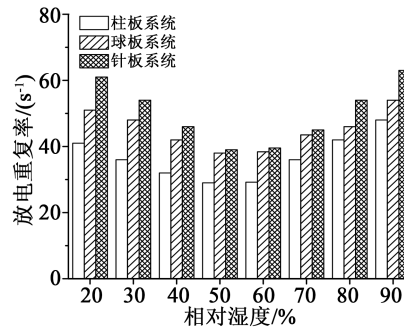


图10 60 V下放电重复率与相对湿度关系柱状图

Fig.10 The histogram of discharge repetition rate with relative humidity at 60 V

2.3.2 180 V电压下的统计特征参数

图11是180 V电压下最大脉冲幅值随湿度的变化关系图。从图11可以看出,与60 V电压下的放电脉冲幅值相比,180 V电压下的脉冲幅值明显提高。柱板系统下的局部放电最大脉冲幅值在湿度为20%~70%呈现逐渐减小的趋势,在湿度为60%与湿度为70%条件下,最大脉冲幅值几乎不随湿度变化而变化。70%~80%湿度下,最大脉冲幅值增长速率最快,而在80%~90%湿度下,最大脉冲幅值增长速率较慢。其他两种模型下,最大脉冲幅值随湿度变化曲线有着相似的规律,但最大脉冲幅值明显高于柱板系统。

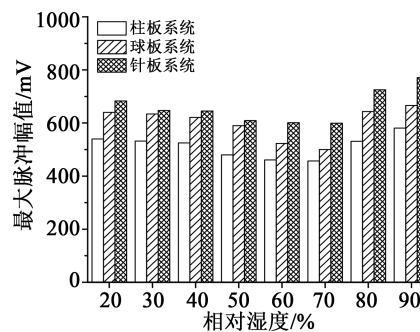


图11 180 V下最大脉冲幅值与相对湿度关系柱状图

Fig.11 The histogram of maximum pulse amplitude with relative humidity at 180 V

图12是180 V电压下平均脉冲幅值随湿度的变化关系图。从图12可以看出,180 V电压下,缓冲层内平均脉冲幅值均超过200 mV,相比于低电压下的放电幅值有着明显的提高。同一放电模型下,平均脉冲幅值变化趋势与最大脉冲幅值一致,呈现出先减小后增大的特点。柱板系统下的平均脉冲幅

值远低于针板系统与球板系统下的脉冲幅值,在湿度为50%~70%时,球板系统与针板系统的脉冲幅值几乎相同,且随着湿度的增加下降速率达到最低。平均脉冲幅值在湿度为70%~90%时明显增大,且不同模型下的增长速率几乎相同。

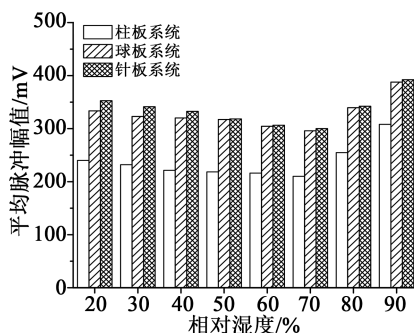


图12 180 V下平均脉冲幅值与相对湿度变化柱状图

Fig.12 The histogram of average pulse amplitude with relative humidity at 180 V

图13是电压180 V下放电重复率随湿度的变化关系图。从图13可以看出,180 V电压下,放电重复率变化趋势与60 V电压下的变化趋势存在差异,放电重复率在湿度较低时几乎保持不变,当湿度高于70%后,放电重复率迅速增长,针板系统下放电重复率增长幅度最高,湿度为90%时,针板系统下的放电重复率接近1 100 s⁻¹。

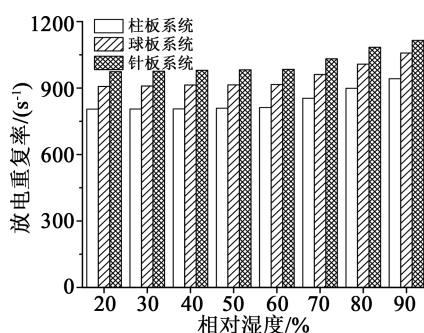


图13 180 V下放电重复率与相对湿度关系柱状图

Fig.13 The histogram of discharge repetition rate with relative humidity at 180 V

3 分析与讨论

在同一湿度条件下,3种不同放电模型下的局部放电特征图谱的几何形状存在明显差异,说明局部放电活动会受到缓冲层自身电场分布的影响。在3类缺陷系统中,针尖处曲率半径最小,因此电场在针板系统下畸变最严重。柱板系统下的电场畸变程度最轻,球板系统内的电场畸变程度介于针板

系统和柱板系统之间。因此在相同湿度下,针板系统下的局部放电活动更为剧烈,较高电压下对缓冲层的破坏更为严重。相比于其他两种模型,柱板系统下的放电活动较弱,对缓冲层的破坏程度最小。

同一缺陷模型下,电缆缓冲层在不同湿度下的局部放电特性存在明显差异,在低湿度环境下,电缆缓冲层含水量较低,水分子总量较少。一般认为,水分子是极性分子,其本身具有一定的电负性^[13]。低湿度环境下,水分子会吸附气隙内的自由电子,降低初始自由电子数量,抑制电子崩形成过程。因此低湿度环境下随着相对湿度的提高,局部放电活动会受到抑制。放电发生后气隙内会积聚大量表面电荷,其自身产生的电场会抑制局部放电活动^[14-15]。在高湿度条件下,水分子大量积聚,会在气隙内形成具有半导电性质的薄层,加快气隙内表面电荷的耗散速率,削弱反向电场,导致局部电场过高,因此在70%~90%湿度下,放电幅值显著提高。

4 结论

(1)环境湿度相同时,同种电压下的局部放电活动受缓冲层电场分布影响较大,其中针板系统的局放统计参数(放电幅值、放电重复率)达到最高,且对缓冲层的破坏较为严重;柱板系统下的局放统计参数最低,对缓冲层的破坏程度最轻。

(2)同种缺陷模型与外施电压下,随着湿度的提高,局部放电活动先被抑制,局部放电幅值呈现下降趋势,当湿度达到临界值时,湿度升高将会加剧局部放电活动,局部放电幅值呈现上升趋势,高湿环境下局部放电活动强度最高;针板系统在高湿环境(90%)下最大放电幅值可达770 mV。

(3)环境湿度对缓冲层局部放电特性有着较大影响,因此需要注意对高湿度敷设环境下运行的电缆进行状态监测,避免严重的局部放电现象出现。在电缆生产制造过程中,要关注缓冲层内部接触状态与铝护套的表面状态,金属突起与气隙均是引发局部放电的重要因素。

参考文献:

- [1] 周远翔,赵健康,刘睿,等.高压/超高压电力电缆关键技术分析和展望[J].高电压技术,2014,40(9):2593-2612.
- [2] 吴明祥,欧阳本红,李文杰.交联电缆常见故障及原因分析[J].中国电力,2013,46(5):66-70.
- [3] 李亚莎,代亚平,花旭,等.杂质对交联聚乙烯电缆内部电场和空

- 间电荷分布影响[J]. 电工技术学报,2018,33(18):4365-4371.
- [4] 唐捷,俸波. 高压电缆金属护套与绝缘屏蔽层放电研究[J]. 电缆技术,2017(1):14-16.
- [5] 陈云. 高压XLPE电缆缓冲层故障特征与机理[D]. 广州:华南理工大学,2019.
- [6] 李陈莹,李鸿泽,陈杰,等. 高压XLPE电力电缆缓冲层放电问题分析[J]. 电力工程技术,2018,37(2):61-66.
- [7] 宫瑞磊,燕飞,刘凤华,等. 基于时域有限元法的电缆局部放电分析[J]. 绝缘材料,2005,38(3):41-43.
- [8] JIANG Lei, XIN Yue, YAN Wenbo, et al. Study on ablation between metal sheath and buffer layer of high voltage XLPE insulated power cable[C]//2019 2nd International Conference on Electrical Materials and Power Equipment. Guangzhou, China: IEEE, 2019:372-375.
- [9] 张玮玮,严有祥,王蕾,等. 110kV XLPE 电缆缓冲层放电灼伤问题的理化分析与仿真研究[J]. 高压电器,2020,56(5):155-162.
- [10] 汪传斌,金海云. 高压XLPE绝缘电力电缆缓冲层与金属护层结构设计仿真计算与优化[J]. 电线电缆,2018(3):6-12.
- [11] 李熙宁,汲胜昌,崔彦捷,等. 水分对交直流复合电压下油纸绝缘沿面放电特性影响研究[J]. 高压电器,2018,54(11):184-193.
- [12] CUI Yanjie, ZHU Lingyu, JI Shengchang, et al. Partial discharge development in needle-plane configuration of oil-paper insulation under AC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(4):2469-2476.
- [13] 李颖,王鹏,郑昌江. 重复短脉冲下相对湿度对变频电机绝缘局部放电及耐电晕寿命影响研究[J]. 绝缘材料,2020,53(4):33-38.
- [14] 康爱亮,田慕琴,李玮,等. 环境湿度对高压电机主绝缘端部放电分布规律的影响[J]. 绝缘材料,2020,53(2):46-52.
- [15] 朱闻博. 复杂工况下换流变压器阀侧套管用油纸绝缘电荷积聚与沿面闪络机理研究[D]. 天津:天津大学,2019.