

弱光条件下环氧树脂表面凝露形貌计量及其对闪络特性的影响研究

吴田^{1,2}, 陈宗菊^{1,2}, 冯平辉³, 贾子建^{1,2}, 杨展豪^{1,2}, 王少奇^{1,2}

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 湖北省输电线路工程技术研究中心, 湖北 宜昌 443002;
3. 国网浙江省湖州供电有限公司, 浙江 湖州 313000)

摘要: 凝露是导致高压开关柜绝缘故障的主要原因之一。为了根据凝露形态分析开关柜是否安全运行, 提出了一种弱光情况下基于凝露实时视频提取凝露大小、数量、面积占比等形貌参数的方法, 并分析凝露形貌特征对沿面放电的影响。首先, 人工搭建凝露模拟试验平台研究凝露的发展和形貌特征; 其次, 对不同时间段的凝露试验样品进行沿面放电试验; 最后, 结合凝露特征和沿面放电试验数据, 分析凝露的形貌特征和沿面放电的相关性。结果表明: 在高湿度环境下, 沿面放电电压迅速降低, 尤其是在凝露初期; 随着凝露面积的增大和数量的减少, 特别是在中后期, 大面积水膜的形成会导致绝缘表面的湿区占比增加, 液滴平均接触面积的增大, 环氧树脂表面的导电性增加, 从而导致闪络电压进一步降低, 可为基于视频监测的开关柜的凝露闪络评估提供参考。

关键词: 凝露; 闪络电压; 图像识别; 光照校正

Research on the Measurement of Condensation Morphology on Epoxy Resin Surface Under Low Light Conditions and Its Impact on Flashover Characteristics

WU Tian^{1,2}, CHEN Zongju^{1,2}, FENG Pinghui³, JIA Zijian^{1,2}, YANG Zhanhao^{1,2}, WANG Shaoqi^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Transmission Line, Hubei Yichang 443002, China; 3. State Grid Zhejiang Huzhou County Power Supply Co., Ltd., Zhejiang Huzhou 313000, China)

Abstract: Condensation is one of the main causes of insulation faults in high-voltage switchgear. To analyze whether the switchgear can operate safely based on the morphology of condensation, a method is proposed to extract morphological parameters such as the size, number, and area ratio of condensation in real-time videos under low light conditions, and to analyze the impact of these morphological characteristics of condensation on surface discharge. First, an artificial condensation simulation test platform is built to study the development and morphological characteristics of condensation. Next, surface discharge tests are conducted on condensation test samples at different time periods. Finally, combining condensation characteristics with surface discharge test data, the correlation between condensation morphological characteristics and surface discharge is analyzed. The results show that in a high humidity environment, the surface discharge voltage decreases rapidly, especially in the early stages of condensation. As the condensation area increases and the number of droplets decreases, particularly in the middle and late stages, the formation of large-area water films leads to an increase in the proportion of wet areas on the insulation surface, an increase in the average contact area of the droplets, and an increase in the conductivity of the epoxy resin surface, thereby further reducing the flashover voltage. This can provide a reference for condensation flashover assessment of switchgear based on video monitoring.

Key words: condensation; flashover voltage; image recognition; illumination correction

0 引言

随着社会的发展, 人们对电能质量的要求越来越高, 电力设备安全稳定的运行也越来越受到重视。高压开关柜作为电网运行中常见的电气设备之一, 它主要起到电能分配的作用^[1-3]。当环境比较潮湿且

温差较大时, 水蒸气非常容易在绝缘子表面凝结, 形成凝露现象。这个现象使得开关柜绝缘表面电阻率减小, 泄漏电流增加, 增大沿面闪络概率甚至导致爆炸起火, 对电网的安全稳定运行产生威胁^[4-7]。因此, 分析开关柜绝缘表面凝露的状态与其放电之

间的关系非常有意义。

目前,基于图像识别提取物体特征的应用非常广泛,但是在识别凝露特征方面应用较少且对凝露特征统计不精确^[8-14]。邱志斌等^[13]针对不同等级的喷水图求取图像增强后的纹理一致性,使用基于Otsu算法的Canny算子边缘检测算法提取凝露的边缘特征,然后通过形态学处理对提取的轮廓信息进行修正,从而实现对不同等级喷水图像的特征提取进而判断其憎水性。牛莉等^[14]使用ImageJ软件去计算和统计有机硅-SiO₂复合涂层表面凝露的出现时间、密度和大小,通过这3个指标去研究不同的涂层对凝露生长的影响,发现凝露出现的越快,30 min时凝露体积越大,涂层的防凝露效果越差。

凝露放电研究的方向主要集中在凝露的发展特性、接触角等方面,很少考虑凝露的形貌特征对沿面放电的影响^[15-20]。刘勇等^[19]在研究凝露的盐雾污秽度、相对湿度对表面液滴吸附、凝露和分布特征等的影响的基础上研究这些特性对复合绝缘子沿面放电的影响,发现液滴尺寸分布盒子维数呈增大趋势时,绝缘子闪络电压呈减小趋势。刘轩东等^[20]搭建凝露模拟试验平台,研究温度、相对湿度、污秽度等环境因素对绝缘子凝露的影响,进而研究凝露状态对绝缘子闪络特性的影响,发现该情况下绝缘子的闪络情况与污闪情况基本一致,但凝露状态的情况相比于污闪情况更湿润,更容易达到闪络条件。

通过资料收集发现,凝露现象在高压开关柜上引起的闪络通常发生在温湿度变化剧烈的凌晨,白天凝露蒸发,难以确定事故发生的原因,给开关柜的稳定运行带来了巨大的不确定因素^[21-23]。文中针对夜间采集图像不清晰,凝露闪络条件不明确的问题,

探索在弱光条件下如何利用图像识别技术识别开关柜绝缘表面的凝露特征(包括大小、数量和形状等),以及这些凝露特征与开关柜绝缘表面沿面放电的相关性。这一研究对于电力系统的稳定运行和维护具有重要意义,尤其是在恶劣天气条件下。

1 方法

1.1 实验设计与准备

1.1.1 凝露的模拟方法

凝露模拟实验平台由人工雾室、超声雾加湿器、智能室温多参数传感器、数字温度控制箱组成。人工雾室的大小为90 cm×90 cm×90 cm(长×宽×高),正面有开关式窗口,便于拿取试验样品;顶部有一个可封闭的小窗口,放置智能室温多参数传感器;侧面有一个可封闭的窗口,用于超声波水雾输入;试验样品为50 mm×200 mm×2 mm(长×宽×厚)的环氧树脂板。在保证温度为26~28 °C和相对湿度88%~92%的条件下,分别提取加湿15、30、60、90、150 min时的试验样品相关凝露特征。

1.1.2 沿面放电试验

沿面放电试验平台主要由升压模块、试验电路模块、采集模块3个模块组成,具体接线图见图1。升压模块的电源部分采用AC-2010型交流高压试验控制台。试验变压器最大输出电压为150 kV,最大短路电流为1 A;试验电路模块由保护电阻、放电平台、电容分压器、采样电阻组成;采集模块由Handyscope HS5型号信号采集卡和计算机组成。将凝露模拟试验后的样品放置在试验平台上进行加压,电极间距设置为6 cm。加压时采用均匀升压法,均匀升压直至试验样品发生沿面闪络,记录下闪络

电压值。每个试验样品进行 5 次重复试验，出现与其他数据差距较大的数据时，重新测量该组试验样品取平均值为该组试验样品凝露状态下的沿面闪络电压值。

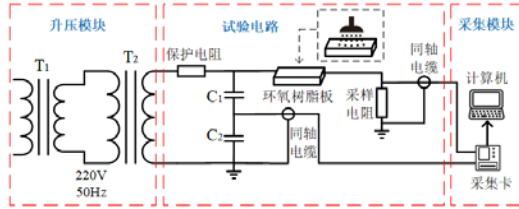


图 1 沿面放电试验接线图

Fig. 1 Surface discharge test circuit diagram

1.2 弱光条件下凝露图像特征提取

1.2.1 弱光条件下的图像光照校正

由于拍摄环境的限制或技术约束，许多低光图像常常面临曝光不足和高噪声的问题，导致图像质量受损、特征退化及对比度降低。这不仅影响视觉算法的普适性，还可能在图像处理过程中传输错误的信息。因此，提高图像的视觉质量至关重要。

为应对这一挑战，使用基于深度学习的低光图像增强方法，适用于光照条件不均匀和较差的环境。该方法的核心优势在于其不依赖任何参考数据，即它能独立于配对或不配对的训练数据运行，大大提高了处理效率。

通过设计一种基于自适应邻域窗口的光照增强曲线(LE)，自动将弱光图像映射到增强图像。这种方法依赖于输入图像自适应调整曲线参数，防止信息溢出截断，并保证图像增强后的像素值归一化在 $[0, 1]$ 区间内。为了实现这一目标，LE 曲线的形式简单且单调，以维持相邻像素间的对比度，并在梯度反向传播中易于处理。

此外，引入了深度曲线估计网络(DCE-Net)，一个轻量级网络，通过多层卷积和连接操作预测像素

级的高阶曲线，从而进行光照增强。该网络设计包含对称跳跃连接的 7 个卷积层，最后一层采用 Tanh 激活函数以调整输出至 $[-1, 1]$ 的范围，具体网络结构示意图见图 2。

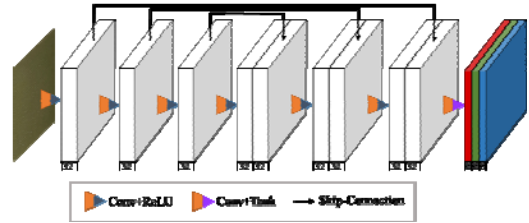


图 2 DCE-Net 网络结构示意图

Fig. 2 DCE-Net network structure diagram

为了优化网络性能，采用了 4 种非参考损失函数的加权和，包括空间一致性损失 L_{spa} 、颜色恒定损失 L_{col} 、曝光控制损失 L_{exp} 和总变差损失 L_{tv} ，这些损失函数保持图像的空间一致性，控制颜色平衡与曝光水平，通过调整权重优化，减少噪声并增加图像平滑度，光照增强效果见图 3。

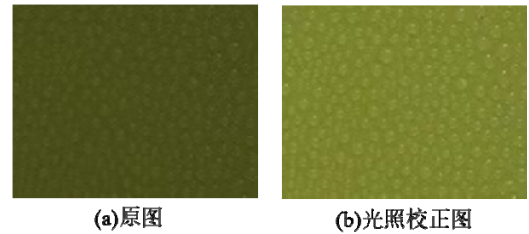


图 3 光照校正结果对比

Fig. 3 Comparison of illumination correction results

1.2.2 图像预处理与特征提取

彩色图像色彩丰富，这对图像特征提取存在一定的干扰。通常使用的方法是在预处理的时候先将原始彩色图像转换为灰度图像，以简化后续处理步骤；然后，利用自适应直方图均衡化技术对图像进行处理，旨在增强图像的对比；通过局部直方图均衡化，使图像中的细节得到更好的展现，有助于后续水滴分割的准确性和鲁棒性。对比结果图见图 4。

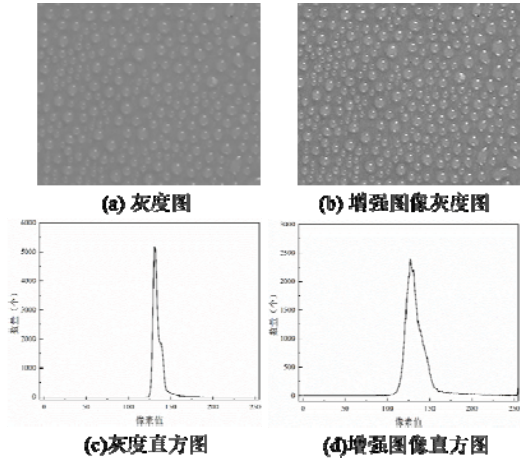


图 4 图像增强对比图

Fig. 4 Comparison of image enhancement results

在实际应用中，由于采集的图像存在分辨率的差异，传统的固定阈值二值化的方法往往难以适应所有场景。为提高图像二值化的准确性并适应不同分辨率的图像，提出了一种基于自适应邻域窗口的 Otsu 算法。这种方法可以动态调整阈值，从而更好地适应不同分辨率的图像。自适应邻域窗口的大小根据图像的分辨率动态调整，计算公式如下：

$$R_h = \text{round}(\sqrt{(C_w + R_H)}) \quad (1)$$

$$C_w = \text{round}\left(\frac{R_h \times C_w}{R_H}\right) \quad (2)$$

式(1)、(2)中： R_h 和 C_w 分别代表邻域窗口矩阵的行数和列数； R_H 和 C_W 是图像的尺寸； round 函数表示四舍五入取整。

在处理过程中，图像首先被分割成多个邻域窗口，对每个窗口使用 Otsu 算法来计算最适合的二值化阈值。Otsu 算法通过最大类间方差来确定阈值，这样可以有效地区分图像中的前景和背景。随后，应用计算得到的阈值对每个窗口进行二值化处理。处理后，将所有窗口的二值化结果合并成一个完整的图像，从而得到整体的二值化图像。

采用这种基于自适应邻域的 Otsu 算法不仅能

够根据图像的具体情况调整邻域大小，而且当图像中的区域差异较大时也能合理设定阈值。这种方法在进行凝露液滴与绝缘表面的分割时表现出极高的自适应能力和精确度。

在此之后，利用高斯滤波器对图像进行平滑处理，以减少噪声对后续分割的影响。通过调整高斯滤波器的参数，可以有效平衡噪声抑制和图像细节保留之间的关系。

为了进一步清理二值图像并改善凝露的分割结果，采用了形态学操作。其中膨胀操作可以把二值化的图像中凝露的边界向外扩张，填补凝露区域中的空白部分。腐蚀操作可以把二值化的图像中凝露的边缘向内收缩，从而消除边缘的毛刺，还可以将凝露图像中的小的黑色部分去除。开运算先腐蚀后膨胀可以去除凝露图像中的噪声，让凝露轮廓边缘更平滑。闭运算先膨胀后腐蚀可以消除凝露轮廓内的小孔，还可以将断续的凝露轮廓连接起来，使得水滴的形状更加完整。使用这些方法得到的最终特征提取图见图 5。通过这些形态学操作的结合使用，能够有效地改善凝露的分割质量，提高后续分析的准确性。

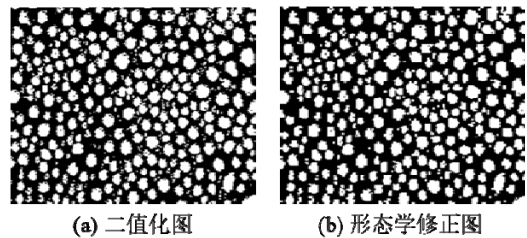


图 5 特征提取图

Fig. 5 Feature extraction diagram

在提取凝露面积和数量信息时，分别统计单个白色区域的像素个数作为凝露的面积、白色区域的个数作为凝露的数量；在提取凝露面积占比时，分别统计白色区域的总像素个数和整个图像的像素作

为凝露的总面积和图像的总面积；在提取凝露周长时，采用边界跟踪法，跟踪封闭区域轮廓线的每个白色像素的标号，记录凝露的边界。识别每个凝露的面积后，计算凝露面积占比 P

$$P = \sum_{n=1}^N \frac{S_n}{S} \quad (3)$$

式(3)中： S 为总图像面积； N 是凝露个数； S_n 为第 n 个凝露的面积。

凝露的几何因子 f_n 和最大凝露的几何因子 f_{\max} 的计算公式如下：

$$f_{\max} = \frac{4\pi S_{\max}}{l_{\max}^2} \quad (4)$$

$$f_n = \frac{4\pi S_n}{l_n^2} \quad (5)$$

式(4)、(5)中： l_{\max} 为识别到的最大凝露的周长； l_n 为第 n 个凝露的周长。

2 结果与分析

2.1 凝露图像处理结果

凝露图像处理结果图见图 6，对比图 6 中的原图 6(a)和光照校正图 6(b)可以发现，原图 6(a)的颜色较暗，且由于光照不足，图像中的细节难以辨认，表面纹理不明显。同时，原图 6(a)由于光照不均匀，导致图像的亮度和颜色分布不均，部分区域较暗。相比之下，光照校正图 6(b)的颜色较亮，显示出更鲜明的色彩。经过校正处理后，图像细节更加清晰，表面纹理明显可见，整体光照也更加均匀，亮度和颜色分布一致。总体而言，光照校正显著改善了图像的亮度、颜色和细节，使图像更加清晰和均匀，便于进一步的分析和处理。

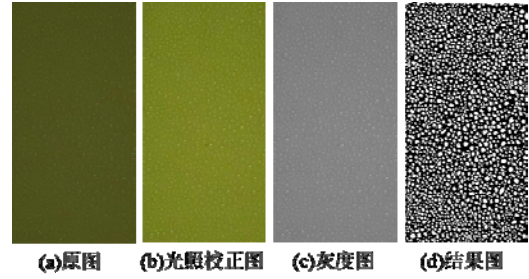


图 6 凝露图像处理结果图

Fig. 6 Condensation image processing results diagram

图 6 显示的是最终的处理结果图，其中图像识别出的凝露个数 N 的值为 2 107；凝露面积占比 P 为 0.359 4；最大凝露面积 S_{\max} 为 242 mm^2 ；面积最大的凝露几何因子 f_{\max} 为 0.2。

2.2 凝露特征提取结果与分析

在分析液滴面积和数量随时间变化的数据时，凝露液滴的面积主要集中在 0.04 mm^2 到 3 mm^2 之间，而超过 3 mm^2 的液滴极少，因此后续主要针对范围内的液滴特征进行分析。凝露面积与数量随时间变化图见图 7。

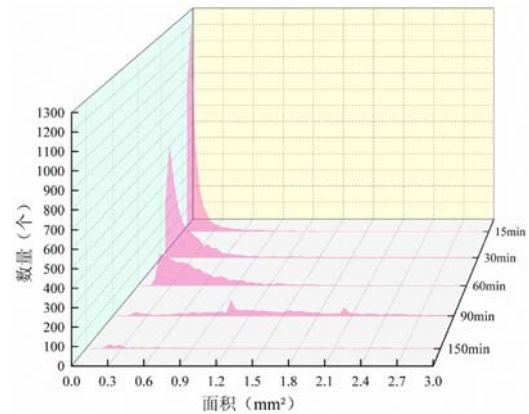


图 7 凝露面积与数量随时间变化图

Fig. 7 Condensation area and quantity variation over time diagram

图 7 的试验数据显示，凝露面积与数量随时间变化显著。初期，15 min 时，凝露面积主要集中在 0.04 mm^2 到 0.3 mm^2 之间，数量达到约 3 430 个的高峰，凝露主要以小面积液滴的形式存在，数量多且分布均匀。此时，小面积凝露数量最多，凝露面积

小且分布均匀；中期(30~60 min)，30 min 时，凝露面积逐渐增大，0.3 mm²到 0.6 mm²的液滴数量增多，到 60 min 时，0.5 mm²到 1.0 mm²的液滴数量显著增加，液滴增大且密度增加，相邻液滴间距减小，开始出现融合现象。此时，较大面积凝露开始增多，液滴面积增大，分布密集；后期(60 min 到 150 min)，60 min 以后，1.0 mm²到 3.0 mm²的凝露液滴数量显著增加，但总数量减少至约 1 000 个，90 min 和 150 min 时，液滴继续增大，逐渐融合形成更大的水膜，这一阶段凝露形态趋于稳定，大面积液滴和水膜占据主要位置。60 min 及以后，大面积凝露明显增多，数量趋于稳定。90 min 及以后液滴进一步增大并融合，形成较大面积水膜。

凝露的发展阶段可以分为初期的小液滴分散阶段、中期的液滴增大密集阶段和后期的大液滴融合形成水膜阶段，具体情况见图 8。随着凝露面积的增大和数量的减少，特别是在中后期，大面积水膜的形成会导致绝缘表面的湿区占比增加，从而降低闪络电压，增加闪络风险。防护措施应侧重于防止长时间的湿气积累和液滴融合，可以通过加强通风、降低环境湿度等方式来减缓凝露的发展。特别是在 60 min 以后，需格外注意凝露对绝缘性能的影响。

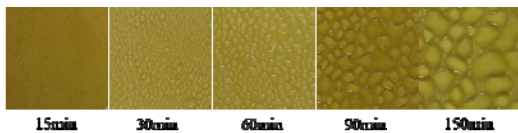


图 8 凝露特征分布图

Fig. 8 Condensation feature distribution diagram

不同时间点凝露形状的几何因子统计情况见图 9，其中几何因子 f 用于描述凝露形状的规则性。当几何因子 f 值为 1 时，凝露液滴形状是标准圆形；当 f 值接近 1 时，形状大致为圆形但可能略有不规

则； f 值较低时，形状偏离圆形，可能呈细长的椭圆、矩形或不规则形状；而 f 接近 0 时，形状非常不规则或周长相对于面积非常大。图 9 中 Y 轴表示凝露的数量，表示了不同时间点凝露的总数； X 轴表示几何因子 f ，从 0 至 1 变化，1 表示完全圆形，接近 0 则形状非常不规则； Z 轴从 15 min 到 150 min，显示了不同时间点的凝露分布。

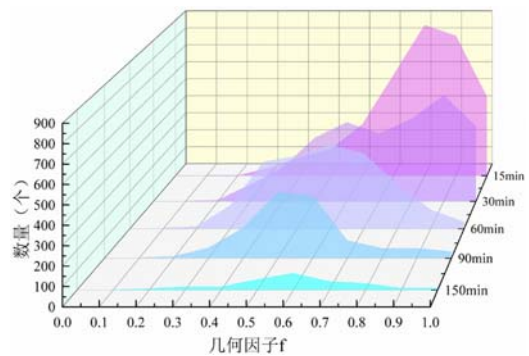


图 9 几何因子 f 随时间变化图

Fig. 9 Variation of geometric factor f over time diagram

从图 9 中可以看到，初始阶段(15 min)，大部分凝露的几何因子接近 1，表明形状为圆形或近似圆形，这可能是因为凝露较小且相互间距较远，未发生显著合并。随着时间推移，尤其在 30 min 至 90 min 内，凝露几何因子 f 开始减小，表示凝露形状开始变为偏细长的矩形或椭圆形，这表明凝露之间的距离减小，相互融合使得形状越来越不规则。到 90 min 至 150 min 时，几何因子值再次增大，凝露的形状趋向于更规则的圆形，这是因为新形成的较大水滴在表面张力的作用下趋向于能量较低的圆形状态。这一凝露形状的演变不仅反映了物理过程如凝露液滴生长和合并的复杂互动，而且可能影响绝缘材料表面的电学性质和湿润性。

湿区占比与闪络电压关系图见图 10，从图 10 的数据可以看出，闪络电压初始值为 35.12 kV，但在前 60 min 内迅速下降至 12.71 kV，此阶段下降最

显著,之后电压缓慢下降,在 150 min 时降至约 7.93 kV。在干燥条件下,试验样品的沿面干闪电压为 35.54 kV,但随着凝露时间的增加,湿区占比从零开始逐渐增加,在 30 min 时显著上升,在 30 min 到 90 min 期间增长迅速,并最终在 90 min 后趋于稳定,稳定值接近 60%。这一增长导致试验样品表面的电阻率减小,从而增大了表面泄漏电流,进一步导致沿面闪络电压的持续下降。

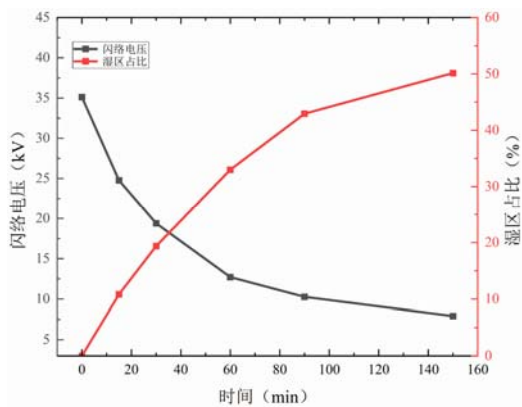


图 10 湿区占比与闪络电压关系图

Fig. 10 Relationship between wet area proportion and flashover voltage diagram

图 10 反映出随着湿区占比的增加,绝缘子的闪络电压显著降低,尤其是在凝露初期。这种电压的快速下降与湿区的快速增加在前 30 min 内尤为明显,可能与绝缘子表面的材料特性和环境条件(如温度和湿度)有密切关联。这些变化表明,在高湿度环境下,绝缘子的绝缘性能迅速降低,湿度对绝缘性能存在影响,尤其是在凝露初期,湿区的增多可能会导致水膜形成,从而进一步增加闪络风险。

液滴平均接触面积与闪络电压关系图见图 11,根据图 11 中的试验数据可以看出,闪络电压从 35.12 kV 开始,随时间迅速下降至 12.71 kV,初期下降非常显著。在约 60 min 内电压下降到 12.71 kV 左右,然后缓慢下降至 150 min 的 7.93 kV 左右。

液滴平均接触面积从零开始,随时间缓慢上升,在 90 min 时快速增加,直到 150 min 面积接近 5.4 mm²。

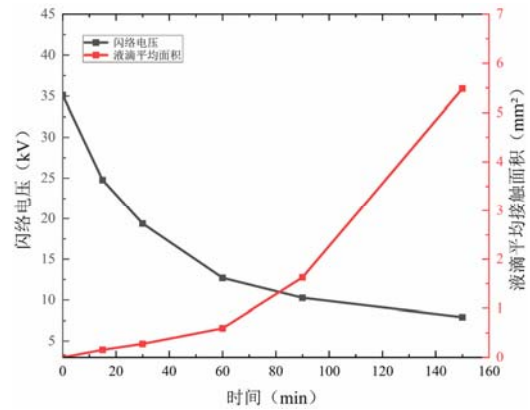


图 11 液滴平均接触面积与闪络电压关系图

Fig. 11 Relationship between average contact area of droplets and flashover voltage diagram

图 11 中闪络电压的快速下降与液滴接触面积的增大呈现相反的趋势。随着液滴平均接触面积的增加,绝缘体表面的导电性增加,从而导致闪络电压降低,这种现象在液滴平均接触面积迅速扩大的阶段更为明显。当绝缘表面的液滴接触面积增加时,液体可能形成连续的导电路径,降低绝缘性能,使得绝缘体更易于发生闪络。在液滴接触面积快速增加的后期阶段,闪络电压的下降速度有所减缓,但持续降低,这可能与液滴之间形成更大的连通域有关。

3 结论

通过搭建凝露闪络实验平台,研究了凝露形貌特征对闪络特性的影响规律。文中主要结论如下。

1)凝露的发展经历了 3 个阶段:初期是小液滴分散阶段、中期是液滴增大变密集阶段,后期是大液滴融合形成水膜阶段。

2)随着凝露面积的增大和数量的减少,特别是在中后期,大面积水膜的形成会导致绝缘表面的湿区占比增加,从而降低闪络电压,增加闪络风险。

3)在高湿度环境下,绝缘表面的绝缘性能迅速降低,尤其是在凝露初期,湿区的增多可能会导致水膜形成,进一步增加闪络风险。

4)随着液滴平均接触面积的增大,绝缘表面的导电性增加,从而导致闪络电压降低,液滴之间形成更大的连通域也会降低绝缘性能,使得绝缘表面更易于发生闪络。

5)在后期阶段,闪络电压的下降速度有所减缓,但持续降低,这可能与液滴之间形成更大的连通域有关。

参考文献:

- [1] 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 on condensation phenomenon mechanism of switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(10): 80-84.
- [2] 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.
- [3] JINLEI H, YANGYANG L, JUNJU L, et al. Analysis of condensation problem in high voltage switchgear and design of anti-condensation system[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021(1754): 012032.
- [4] 张炜,闫志强,王也,等.基于有限元法的户外环网柜防凝露方法研究[J].高压电器,2017,53(9):101-106.
ZHANG Wei, YAN Zhiqiang, WANG Ye, et al. Anti-condensation method for outdoor rmu based on finite element analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(9): 101-106.
- [5] ZHANG Fuzeng, WANG Liming, GUAN Zhicheng, et al. Influence of composite insulator shed design on contamination flashover performance at high altitudes[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(3): 739-744.
- [6] 苏东,马仲能,李成翔,等.配网开关柜全生命周期成本模型及敏感度分析[J].电力系统保护与控制,2018,46(1):150-155.
SU Dong, MA Zhongneng, LI Chengxiang, et al. Life cycle cost model and sensitivity analysis of switchgear[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 150-155.
- [7] SHU Shengwen, XU Junwei, SHI Shaomei, et al. Corona onset characteristics of contact box in switchgear with condensation under high humidity and pollution conditions[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2022, 12(6): 939-947.
- [8] 周利军,李杰,权圣威,等.基于改进Canny算法与深度残差网络的车顶绝缘子憎水性识别方法[J].高压电压技术,2023,49(10):4297-4306.
ZHOU Lijun, LI Jie, QUAN Shengwei, et al. Hydrophobicity identification method of roof insulator based on improved canny operator and deep residual network[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4297-4306.
- [9] 秦中涛,洪明坚,徐征.局部自适应复合绝缘子检测与憎水性分类网络[J].电子测量技术,2022,45(18):49-54.
QIN Zhongtao, HONG Mingjian, XU Zheng. Region adaptation network for composite insulator segmentation and hydrophobicity recognition[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(18): 49-54.
- [10] DU B X, LIU Yong. Pattern analysis of discharge characteristics for hydrophobicity evaluation of polymer insulator[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(1): 114-121.
- [11] 闫康.基于MATLAB平台的复合绝缘子憎水性分析软件开发[J].电力工程技术,2018,37(5):126-131.
YAN Kang. The development of composite insulators hydrophobicity analysis software based on MATLAB platform[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2018, 37(5): 126-131.
- [12] 王身丽,严利雄,杜勇,等.基于纹理对比度的复合绝缘子表面水珠区域检测算法[J].电测与仪表,2019,56(19):131-135.
WANG Shenli, YAN Lixiong, DU Yong, et al. Surface droplet area detection algorithm of composite insulator based on texture contrast[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(19): 131-135.

- [13]邱志斌, 于小彬, 霍 锋, 等. 基于一致性测度区间分类的复合绝缘子喷水图像处理与憎水性智能识别[J]. 高电压技术, 2020, 46(9): 3008-3017.
- QIU Zhibin, YU Xiaobin, HUO Feng, et al. Spray image processing of composite insulators based on interval classification of uniformity measure and intelligent identification of hydrophobicity[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3008-3017.
- [14]牛 莉, 方佳鹏, 李媛媛, 等. 有机硅-SiO₂复合涂层表面结构对其凝露和闪络特性的影响[J]. 武汉大学学报: 理学版, 2023, 69(4): 536-544.
- NIU Li, FANG Jiapeng, LI Yuanyuan, et al. Effect of surface structure of Silicone-SiO₂ composite coatings on its condensation and flashover characteristics[J]. Journal of Wuhan University. Natural Science Edition, 2023, 69(4): 536-544.
- [15]SHU Shengwen, ZHAN Zhaoxuan, XU Junwei, et al. Three-dimensional numerical simulation and experiment of moisture condensation mechanism inside high voltage switchgear[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023(151): 109129.
- [16]蒋兴良, 陈爱军, 张志劲, 等. 盐密和灰密对 110 kV 复合绝缘子闪络电压的影响[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 150-154.
- JIANG Xingliang, CHEN Aijun, ZHANG Zhijin, et al. Effect of both salt and non-soluble deposit densities on flashover voltage of 110 kV composite insulator[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 150-154.
- [17]LIAN W, ZHAO T. Design of insulation online monitoring and Anti-Condensation control system for distribution switchgear[J]. Academic Journal of Engineering and Technology Science, 2021, 4(2): 45-51.
- [18]ZHENG Xuejing, HU Fangshu, WANG Yaran, et al. Optimization on airflow distribution for anti-condensation of high-voltage switchgear using CFD method[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021(28): 101479.
- [19]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.
- LIU Yong, DU Baixue, LU Yuhang, et al. Morphologic characteristics of water droplets on composite insulator surface and their effects on flashover voltage[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(4): 1017-1021.
- [20]刘轩东, 胡钰骁, 李亚伟, 等. 凝露状态对硅橡胶绝缘表面闪络特性影响的实验研究[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 3047-3054.
- LIU Xuandong, HU Yuxiao, LI Yawei, et al. Experimental research of influence of condensation on flashover characteristics of silicone rubber surface[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 3047-3054.
- [21]魏登峰, 黄 勇, 卞志文, 等. 基于有效加热空间的 12 kV 开关柜加热器布置策略研究[J]. 高压电器, 2023, 59(6): 74-81.
- WEI Dengfeng, HUANG Yong, BIAN Zhiwen, et al. Study on layout strategy of 12 kV switchgear cabinet based on effective heating space[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(6): 74-81.
- [22]WANG P, SUN J, ZHANG P, et al. Numerical simulation of the condensation process in high voltage switchgear based on the temperature and humidity distribution[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021(2087): 012082.
- [23]舒胜文, 许俊炜, 占兆璇, 等. 高湿环境下 40.5 kV 开关柜凝露发展特性与加热器布置方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 493-504.
- SHU Shengwen, XU Junwei, ZHAN Zhaoxuan, et al. Condensation development characteristics and heater arrangement method of 40.5 kV switchgear under high-humidity environment[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 493-504.
- 吴 田(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为高电压与绝缘技术和带电作业 (E-mail : wutian_08@163.com).
- 陈宗菊(2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail: 2832556912@qq.com).