

温湿度对开关柜局部放电物理信号影响研究

蔡乐辉¹, 曾潮旭¹, 杨森¹, 杨淳岚², 杨龙山¹, 陈天翔¹

(1. 成都理工大学, 成都 610059; 2. 四川大学电气工程学院, 成都 610065)

摘要: 局部放电是开关柜发生绝缘故障的主要原因和前期阶段, 准确有效地对局部放电产生的特征信号进行监测和分析是保障设备安全运行的关键。针对广泛运用的超声波和地电波检测法在实际检测过程中忽略的环境温湿度因素, 文中设计制作了 4 种典型绝缘缺陷模型, 在不同温湿度条件下测量局部放电信号并进行汇总分析, 研究了环境温湿度对不同类型局部放电起始和熄灭电压以及超声波与地电波信号的影响特征。结果表明, 温度升高针板缺陷超声波信号和悬浮缺陷地电波信号增强, 40~60 °C 时针板缺陷熄灭电压与沿面、悬浮和气隙缺陷起始熄灭电压下降明显。相对湿度升高将导致沿面缺陷超声波信号和气隙放电地电波信号增强, 相对湿度 60%~100% 时沿面缺陷起始电压和悬浮缺陷起始熄灭电压下降明显。

关键词: 开关柜; 局部放电; 温湿度; 超声波检测法; 暂态对地电压法

Research on the Influence of Temperature and Humidity on the Physical Signal of Partial Discharge of Switchgear

CAI Lehui¹, ZENG Chaoxu¹, YANG Sen¹, YANG Chunlan², YANG Longshan¹, CHEN Tianxiang¹

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Partial discharge is the main reason and early stage of insulation failure in the switchgear, and accurate and effective monitoring and analysis of the characteristic signals generated by partial discharge is the key to ensure the safe operation of the equipment. In view of the environmental temperature and humidity factors that are ignored in the detection process by the widely used ultrasonic and geoelectric wave detection methods, four typical insulation defect models are designed and fabricated, and the partial discharge signals are measured and summarized under different temperature and humidity conditions, and the influence characteristics of ambient temperature and humidity on the starting and extinguishing voltages of different types of partial discharge and ultrasonic and geoelectric signals are studied. The results show that the ultrasonic signal of the needle plate defect and the ground radio signal of the suspension defect are enhanced when the temperature increases, and the extinguishing voltage of the needle plate defect and the initial extinguishing voltage of the surface, suspension and air gap defects decrease significantly when the temperature is 40-60 °C. The increase of relative humidity will lead to the enhancement of ultrasonic signals and air-gap discharge ground signals of surface defects, and the initial voltage of surface defects and the initial extinguishing voltage of suspension defects will decrease significantly when the relative humidity is 60%-100%.

Key words: switchgear; partial discharge; temperature and humidity; acoustic emission; transient earth voltages

0 引言

开关柜工作时处于封闭状态, 极不均匀强电场、高温、高湿度、机械应力等都可能引起局部放电产生, 其工作的安全性和可靠性将直接影响整个电力系统供电可持续性^[1-5]。故障缺陷统计分析发现, 开关柜故障原因主要集中于开关柜内绝缘老化、柜内高湿度、高海拔气体流速低或开关触头接触电阻大导致发热等方面^[6-14]。可见高温和高湿度是引起局部放电的常见因素, 且在实际试验过程中发现在其他条件一致而温湿度不同的情况下, 局部放电信号存在差异, 而现有规程或相关标准并没有体现温湿度对故障诊断的影响。文中针对温湿度对开关柜局部放电故障诊断信号的影响进行探究分析, 以期未来开关柜故障检测精确度的提升提供参考。

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点支持项目(U19A2080); 四川省科技计划(2023NSFSC0830); 四川省电力公司科技项目(521903230001)。

Project Supported by National Natural Science Regional Innovation and Development Joint Fund(U19A2080), Sichuan Provincial Science and Technology Plan(2023NSFSC0830), Sichuan Electric Power Company Technology Project(521903230001).

检测开关柜设备局部放电主要有超声波法、暂态对地电压法、脉冲电流法、超高频法等^[15-18]，其中超声波法和暂态对地电压法是目前应用较为广泛的两种检测方法。超声波检测法抗电磁干扰作用较强，使用范围广，但其衰减特性对绝缘子内部故障如气隙放电检测不明显。暂态对地检测法灵敏度高，但检测频率较低，易被噪声干扰导致难以判别开关柜内绝缘缺陷类别。故在实际中常将超声波检测法和暂态对地电压法配合使用对开关柜故障进行检测，以提高判别结果精确度。目前关于温湿度对开关柜局部放电的研究普遍集中于放电幅值和放电次数两方面，缺少温湿度对超声波和地电波信号影响的研究，且研究内容聚集于单一温湿度条件或绝缘缺陷的影响，缺少温湿度对不同绝缘缺陷影响机理的深入探究和对比分析^[19-25]。

文[26]提出了暂态对地电压(TEV)和超高频(UHF)局部放电检测与定位方法的综合应用，但是没有注意对环境温湿度的控制，忽略了温湿度对超高频和地电波信号的影响；文[27]提出了基于多波段光谱辐射强度信息的放电发展阶段划分方法和临界击穿判据，但并未对其他 4 类常见故障以及环境温湿度对该判据的影响进行探讨分析；文[28]提出了基于有限元分析软件(COMSOL)建立的开关柜局部放电的仿真模型，并对开关柜内部放电和外部干扰的脉冲特性进行仿真分析，实现了内外部放电脉冲的区分，但缺少温湿度变化对于放电脉冲的影响探究；文[29]提出了受潮对开关柜母线套管绝缘性能的影响，通过局部放电量、绝缘电阻等参量来反映套管受潮程度，但未对开关柜受温度影响导致局部放电展开分析。

文中主要研究温湿度对开关柜内 4 种典型缺陷局部放电产生的超声波信号、地电波信号与起始电压、熄灭电压和击穿电压的影响，并通过采集分析局部放电时泄漏电流、电压波形和超声波、地电波波形来探究温湿度对四种故障影响的区别，为开关柜运行环境温湿度选择及准确判断局部放电提供参考。

1 试验平台搭建

1.1 典型缺陷模型制作

搭建的开关柜常见的 4 种绝缘缺陷物理模型见图 1。柜内金属支架尖端处局部放电故障用针板缺陷模型进行模拟，模型以圆锥角 30°直径 2 mm 的铜质针尖与均匀铜盘模拟真实开关柜金属支架尖端产生局部放电的情况。为确保在单相电压 5.77 kV 下能发生局部放电而又不至于放电难以产生和较易击穿，经试验确定针尖和铜盘间距为 6 mm。

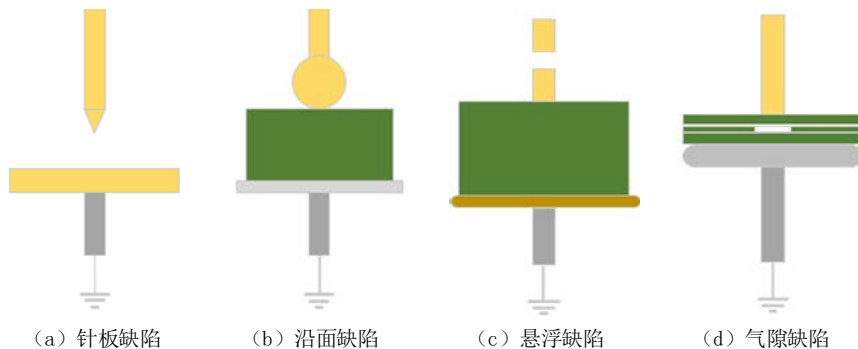


图 1 开关柜典型绝缘缺陷物理模型

Fig. 1 Physical model of typical insulation of switchgear

电缆、套管、绝缘子表面受潮引起局部放电故障用沿面缺陷模型进行模拟，模型以直径 80 mm 厚度 30 mm 的环氧树脂模拟真实情况下的柜内绝缘子受潮。

柜内脱落或松散的螺丝钉用悬浮缺陷模型进行模拟，模型以直径 12 mm 相距 3 mm 的两实心铜柱模拟真实情况下的螺丝钉松动或脱落。

固体绝缘内部老化等导致绝缘内部产生气泡用气隙缺陷模型进行模拟，模型内直径 5 mm 厚度 1 mm 的气泡模拟真实情况下绝缘内部缺陷。4 类典型缺陷物理模型和实物模型分别见图 1、2。

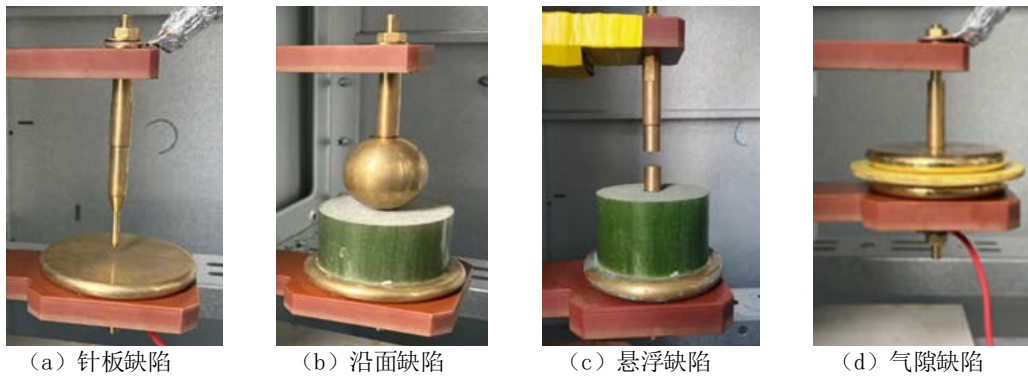


图 2 开关柜典型绝缘缺陷实物模型

Fig. 2 Typical insulation of switchgear is a physical model

1.2 12 kV 开关柜局部放电试验温湿度可控平台

为模拟真实开关柜环境下的局部放电和实际故障检测条件，在一台真实的 12 kV 开关柜内模拟故障并进行故障放电信号采集。

试验平台包括变压器、电容器、升压器、12 kV 开关柜、超声波传感器(中心频率 40 kHz)、地电波传感器、电气信号采集仪(采样频率 1.25 MS/s)、温湿度计、温湿度控制装置、图像采集装置。

通过升压器控制变压器施加 12 kV 开关柜实际工作单相电压 5.77 kV，移动终端实时查看温湿度计示数并调节温湿度控制装置到试验测量点，将超声波传感器探头对准距离缺陷模型最近的开关柜柜门缝隙处，将地电波传感器贴于靠近缺陷模型的柜门上，通过电气信号采集仪采集不同类型局部放电时的超声波信号和地电波信号，试验平台见图 3。

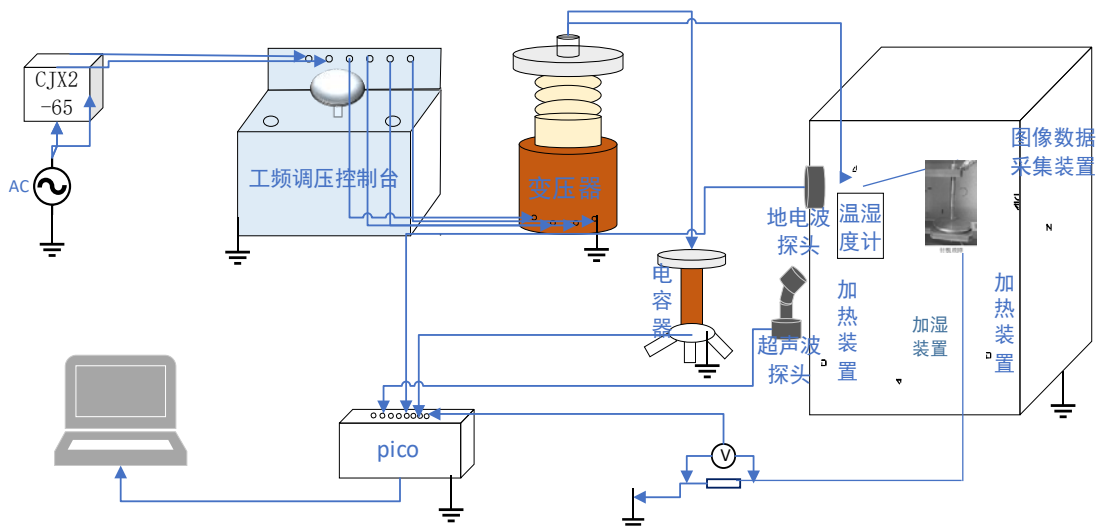


图3 12 kV 开关柜局部放电试验温湿度可控平台

Fig. 3 12 kV switchgear partial discharge test, temperature and humidity controllable platform

1.3 局部放电信号测量方案

试验温度差为 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及试验湿度差为 5% 时局部放电电压及其产生的超声波峰值和地电波信号幅值无明显差异，不会对试验结果产生显著影响。试验过程中有移动终端实时监测柜内温湿度计示数，可以较好地控制试验进行时的温湿度大小，将实际温湿度和测量点温湿度之间的差值分别控制在 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 2% 以内，确保测量点试验数据的准确性。在 12 kV 高压开关柜局部放电试验温湿度可控平台基础上，保持环境相对湿度为 $(50\pm 5)\%$ ，控制环境温度分别稳定在 (20 ± 1) 、 (30 ± 1) 、 (40 ± 1) 、 (50 ± 1) 、 (60 ± 1) 、 (70 ± 1) $^{\circ}\text{C}$ 时进行测量试验并记录数据。保持环境温度为 (25 ± 2) $^{\circ}\text{C}$ ，在环境湿度分别稳定在 $(50\pm 2)\%$ 、 $(60\pm 2)\%$ 、 $(70\pm 2)\%$ 、 $(80\pm 2)\%$ 、 $(90\pm 2)\%$ 、 $(100\pm 2)\%$ 时进行测量试验并记录试验数据。每个温湿度梯度做 3 组试验，取平均值记为该梯度试验结果。

采用均匀升压法进行升压，示波器波形出现明显且重复的局部放电信号时，记此时电压为起始电压。示波器波形无明显且重复的局部放电信号时，记此时电压为熄灭电压。击穿时绝缘介质变为良导体，电流与电压波形相同，且此时放电剧烈，波形幅值和密度明显增大，记此时电压记为击穿电压。

2 温度变化下局部放电信号结果及分析

2.1 不同温度下 4 种典型缺陷故障信号测量结果及分析

不同温度下 4 种典型缺陷故障信号测量结果见图 4。原因分析如下：

1) 对于针板缺陷，其起始电压和熄灭电压均随温度升高先降低，后升高，再降低，击穿电压有较大分散性。温度升高，空气密度降低，电子平均自由程增大，碰撞电离概率增大，放电电压降低；温度继续升高，空气分子热运动加剧阻碍电子崩形成，放电电压升高；温度进一步升高，空气中中性气体原子获得足够能量产生自由电子，且此温度下电子平均自由程进一步增大，碰撞电离概率增大，放电电压降低。针板缺陷的电场分布极不均匀，带电粒子所受电场力大小和方向不断变化，电子崩发展路径不断变化，导致击穿电压具有明显分散性和

不稳定性。

2)对于沿面缺陷,其试验过程中未被击穿,其起始电压和熄灭电压均随温度升高先降低后升高。温度升高,分子热运动加剧,运动到强垂直电场范围内分子增多,电子平均自由程增大,碰撞电离概率增大,放电电压降低。温度进一步升高,分子热运动剧烈程度增大,强垂直电场附近电子无效碰撞概率增大,放电电压升高。

3)对于悬浮缺陷,其试验过程中未被击穿,其起始电压和熄灭电压均随温度升高先升高后降低。悬浮缺陷模型两铜柱间为3 mm空气绝缘,在试验电压下无法击穿。温度升高两铜柱间空气分子热运动加剧,阻碍电子崩形成,放电电压升高;温度继续升高,中性气体原子获得足够能量产生自由电子,且电子平均自由程增大,碰撞电离概率增大,放电电压降低。

4)对于气隙缺陷,其试验过程中未被击穿,起始电压和熄灭电压随温度升高先升高后降低。气泡两侧均为绝缘良好的环氧树脂,在试验电压下无法击穿。温度升高气泡中空气分子热运动加剧阻碍电子崩的形成,放电电压升高;温度继续升高,空气分子密度降低,电子平均自由程增大,碰撞电离概率增大,放电电压降低。

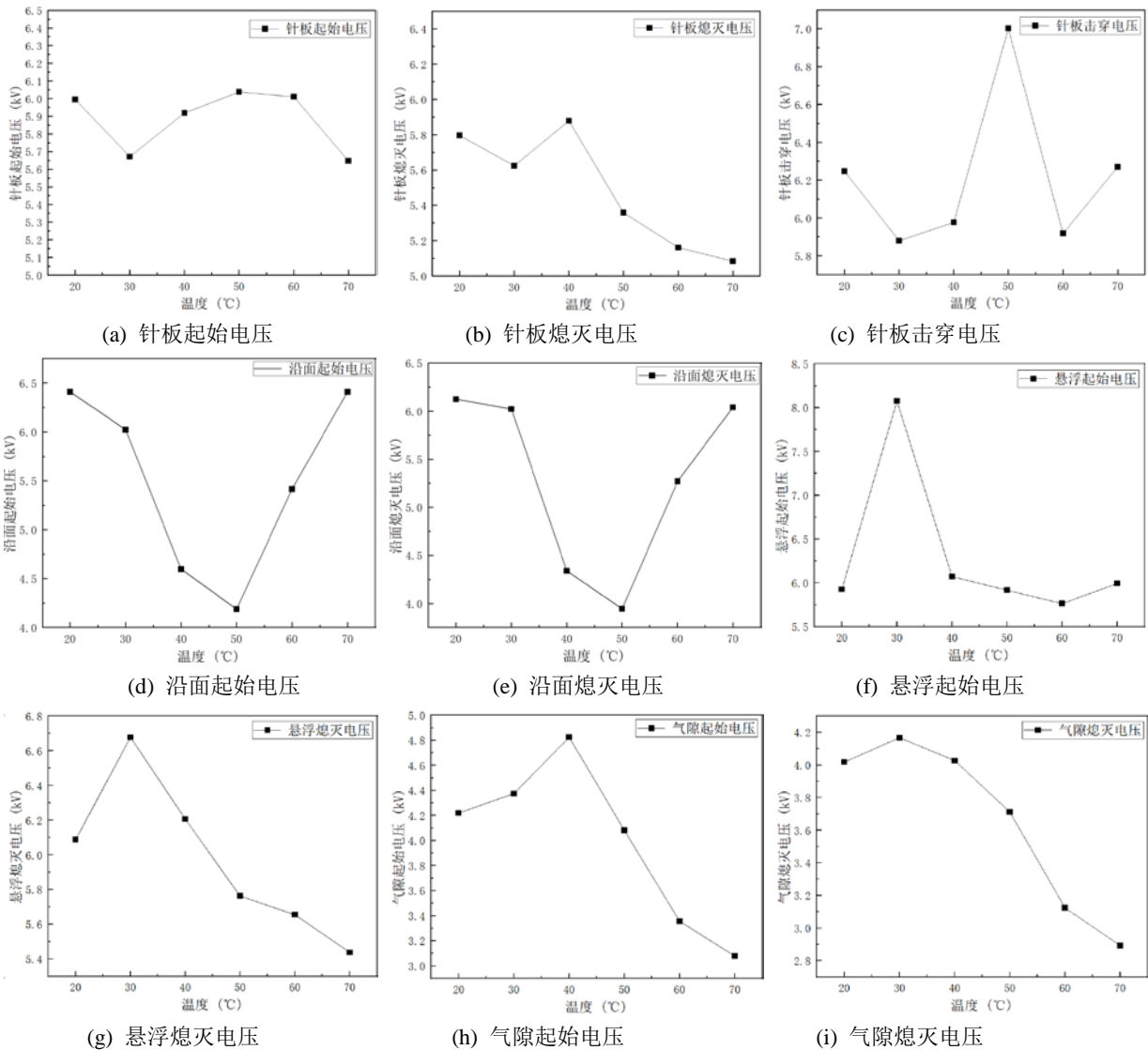


图4 温度对4种典型故障局部放电影响

Fig. 4 Influence of temperature on partial discharge of four typical faults

2.2 温度变化对不同故障特征电压的影响

各缺陷类型随温度变化试验数据见图 5、6。由图 5 可知，对起始电压而言，温度低于 40 °C 时，温度对沿面和悬浮缺陷影响最大，对针板和气隙缺陷影响较小；温度高于 40 °C 时，温度对沿面和气隙故障影响最大，对针板和悬浮缺陷影响较小。对熄灭电压来说，温度变化对沿面放电的影响最为明显，对其他 3 类故障的影响较小。

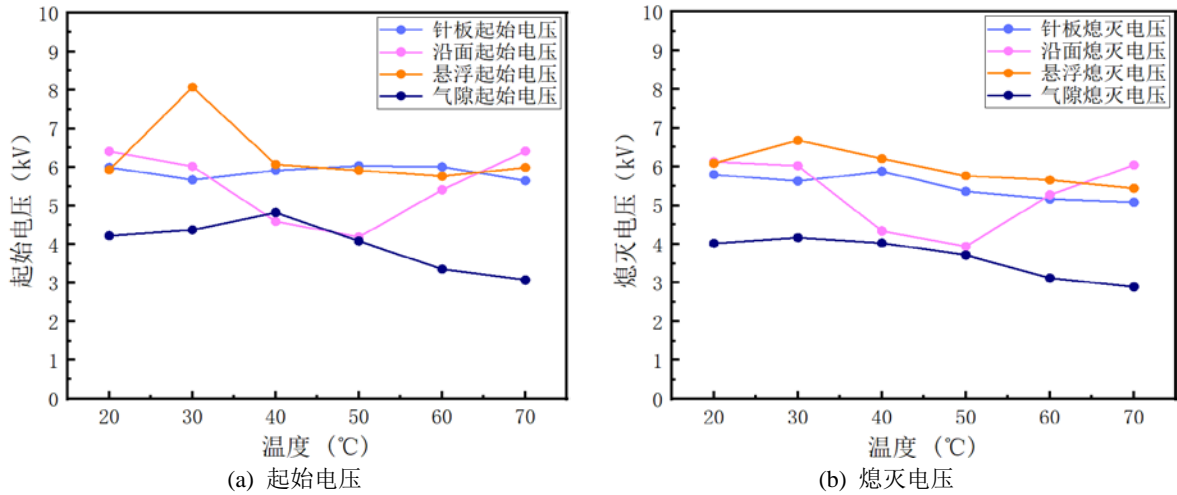


图 5 温度变化对不同故障特征电压的影响比较

Fig. 5 Comparison of the effects of temperature changes on the characteristic voltages of different faults

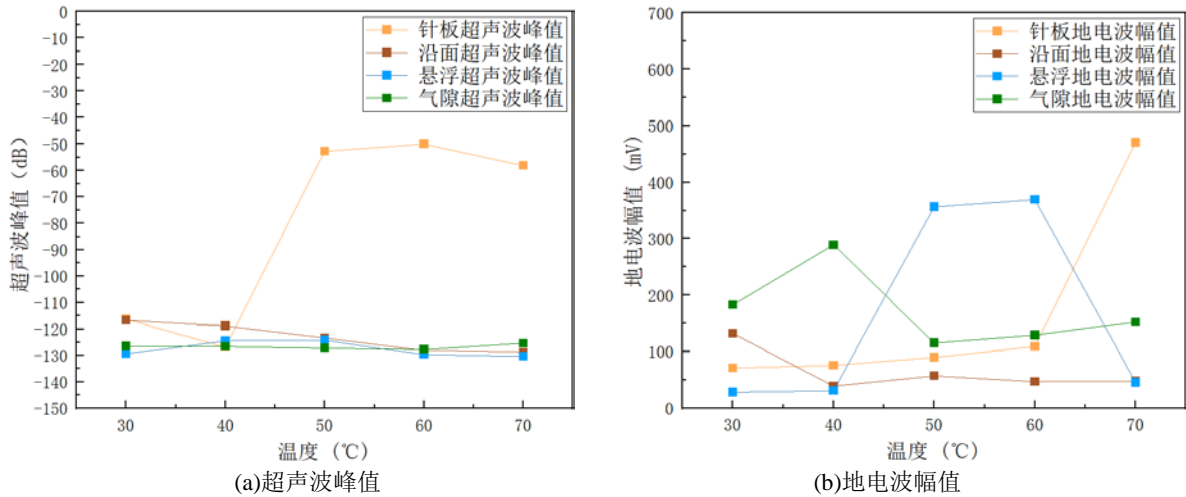


图 6 温度变化对不同故障产生的物理信号影响

Fig. 6 The influence of temperature changes on the physical signals generated by different faults

原因分析如下：

1) 对于针板缺陷，温度变化所产生的空气分子密度降低和热运动加剧仍然只是影响电子运动轨迹和能量的次要因素，对于电子运动影响占主导作用的仍是分布不均的电场，故温度变化对其放电电压影响相对较小。

2) 对于沿面缺陷，其放电主要存在于固体和空气之间的强垂直场强附近，温度的变化会影响空气分子在强垂直场强范围内的数量和密度，进而影响放电过程，故其放电电压随温度变化较为明显。

3)对于悬浮缺陷,由于缺陷模型两铜柱之间电场分布较均匀,且该缺陷放电形式主要为空气电离,温度变化将改变空气密度以及空气分子热运动剧烈程度,进而影响放电发展过程中电子崩的形成,导致其受环境温度影响较为明显。

4)对于气隙缺陷,气泡处于3层环氧树脂之间难以与外界空气接触,内外温差不大时,外部环境对其内部气体温度影响较小。当外部空气温度继续升高,内外温差增大,环境温度对气隙缺陷的影响才变得更为明显。

2.3 温度变化对不同故障物理信号的影响

温度变化对不同故障物理信号的影响见图6。由图6(a)所示,温度对超声波峰值影响表现为对针板缺陷影响最大,表现为随着温度升高其超声波峰值呈现明显上升趋势。对沿面缺陷、悬浮缺陷、气隙缺陷影响较小,表现为随着温度升高,此3类缺陷的超声波峰值变化幅度明显小于针板缺陷。

原因分析如下:

1)针板缺陷放电最为剧烈,产生的声波信号频率较高,而声波频率越高在传播过程中受到的阻力越小,因此针板缺陷超声波幅值基数较大,且温度升高将增大空气分子振动频率,进一步地减小传播阻力,故温度变化对其影响较为明显。

2)沿面、悬浮、气隙缺陷放电产生的声波频率较低,传播阻力大,超声波峰值较小。对沿面和悬浮缺陷影响主要是温度变化影响其放电电压变化造成的。对于气隙缺陷,由于其在绝缘内部,放电产生的超声波不易传出,故温度变化对其超声波峰值影响很微弱。

由图6(b)所示,对地电波幅值而言,温度对针板缺陷、悬浮缺陷和气隙缺陷影响最大,对沿面缺陷影响较小。

原因分析如下:

1)对于针板缺陷,温度升高导致其放电电压逐渐降低,且针板缺陷电场分布极不均匀,在外施电压大小相同同时放电程度也更为剧烈,所释放的能量也更大,产生的地电波信号也随之更强烈,故有温度升高其地电波幅值逐渐增大。

2)对于沿面缺陷,在温度变化过程中其放电较微弱,放电幅值并不大,导致其产生的电磁波信号非常微小,无法采集到明显有效的地电波信号,故温度变化对其放电产生地电波幅值影响较小。

3)对于悬浮缺陷,温度升高两铜柱空气间隙中空气分子热运动逐渐加剧,且其放电电压降低,导致其放电产生的地电波幅值逐渐增大,当分子热运动加剧到一定程度后将阻碍放电产生的地电波传播,故其地电波幅值先增大后减小。

4)对于气隙放电,温度变化影响内部气泡放电电压,导致其放电剧烈程度变化,且地电波可以经由固体、气体传播,气泡在绝缘内部放电并不会对地电波信号的传播产生影响,故地电波幅值变化与其放电电压随温度

变化具有一致性。

3 湿度变化下局部放电信号结果及分析

3.1 不同湿度下 4 种典型缺陷故障信号测量结果及分析

不同湿度下 4 种典型绝缘故障信号测量结果见图 7。

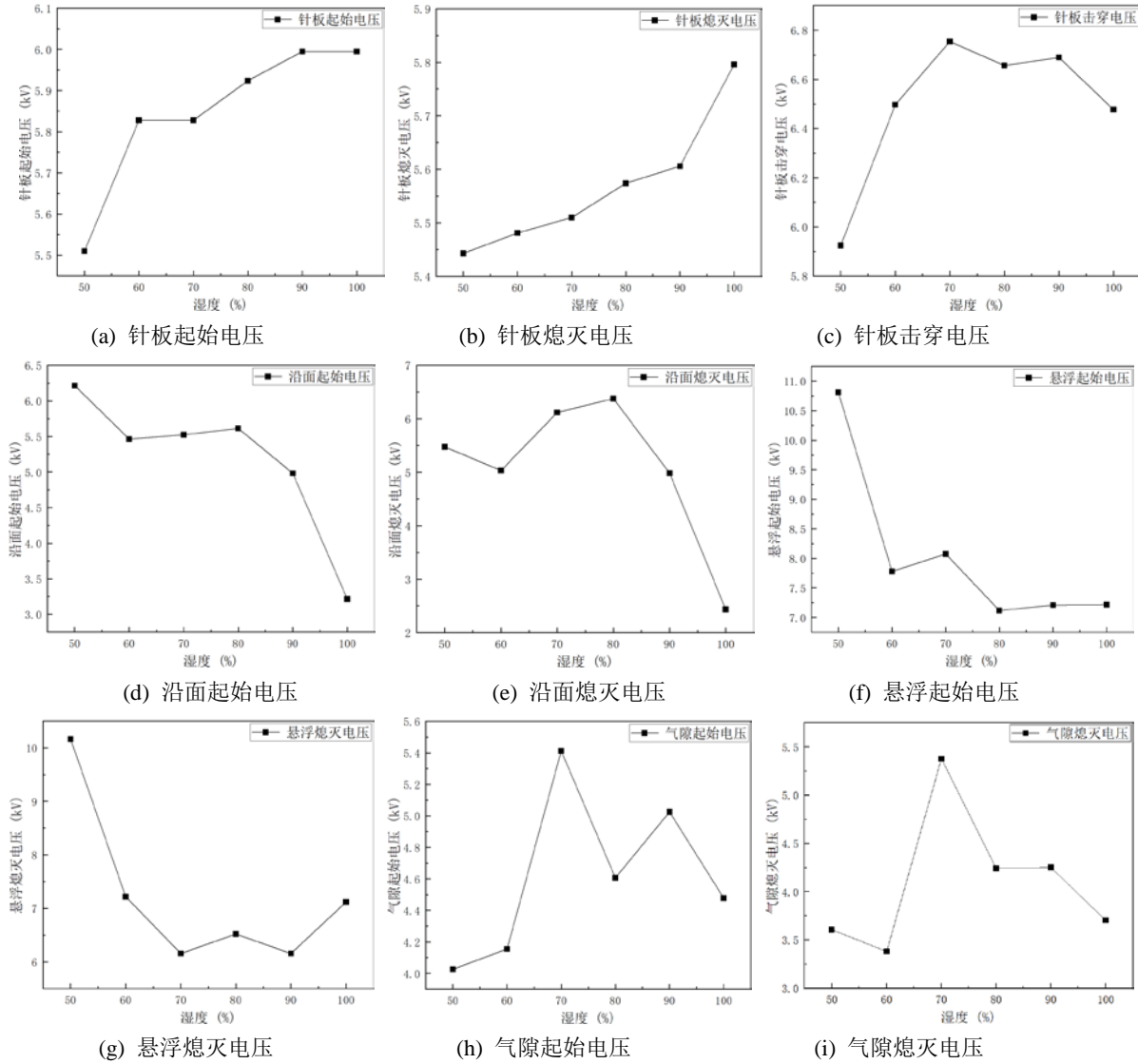


图 7 湿度对 4 种典型故障局部放电影响

Fig. 7 Influence of humidity on partial discharge of four typical faults

由图 7 可知，随着湿度不断增大，针板缺陷局部放电起始和熄灭电压逐渐升高，击穿电压表现出不稳定性，但总体趋势为增大。沿面缺陷随着湿度不断增大局部放电起始和熄灭电压先降低后提高再降低。悬浮缺陷随湿度的增大局部放电起始和熄灭电压均逐渐降低。气隙缺陷随湿度的不断增大局部放电起始和熄灭电压两者都表现出先提高后降低的特征规律。

原因分析如下：

1)对于针板缺陷，湿度的增大使得空气中水分子数增多，自由电子被水分子捕获导致其数量减少，抑制了

电子崩的形成和发展，故有湿度增大放电电压升高。

2)对于沿面缺陷，湿度增大使得缺陷表面存在水分子，部分区域形成水膜，各部分水膜之间存在电位差，易发生电离，降低了放电电压。当湿度继续升高，水膜逐渐覆盖缺陷表面，水膜变为等电位，相当于增大了缺陷铜球的半径，使得电场分布更为均匀，且此时空气中存在较多水分子吸附自由电子，阻碍了电子崩的形成和发展，升高了缺陷放电电压。当湿度进一步增大，铜球表面逐渐发生凝露现象，导致缺陷各个部位凝露形成的小水滴之间存在电位差，促进了放电发生，使得放电电压随之降低。

3)对于悬浮缺陷，湿度增大时上下两铜柱表面也会逐渐形成许多个小水膜，各小水膜之间存在电位差促进了放电，使得放电电压降低。当湿度继续升高，水膜完全覆盖两铜柱相当于增大了铜柱表面面积，起到均匀电场的作用，使得放电电压升高。由于悬浮缺陷铜柱较小，吸附水分子数量较少，不容易发生凝露，故最后并未出现类似沿面缺陷一样在相对湿度进一步增大后放电电压降低的现象。

4)对于气隙缺陷，外界湿度升高对内部气泡影响不大，主要是湿度升高在环氧树脂表面逐渐形成水膜，其绝缘性能降低，使得环氧树脂等效电容分压减小，环氧树脂层中气泡分得的电压减小，导致放电不易产生，放电电压升高。当湿度进一步升高，水膜逐渐覆盖外层环氧树脂，高压端通过水膜直接与气泡所在环氧树脂层连接，升高了气泡两端电压，导致放电容易产生，降低了放电电压。

3.2 湿度变化对不同故障特征电压的影响

为清晰比较湿度变化对4种绝缘缺陷故障模型局部放电时产生的物理信号影响，将各缺陷类型所测得的湿度变化试验数据进行整合分析，湿度变化对不同故障特征电压影响比较见图8。对起始电压而言，湿度变化对沿面和悬浮缺陷影响最为明显，对针板和气隙缺陷影响最小。对熄灭电压而言，湿度变化对各缺陷的影响程度大小与其对起始电压的影响具有相同的趋势与高度一致性。

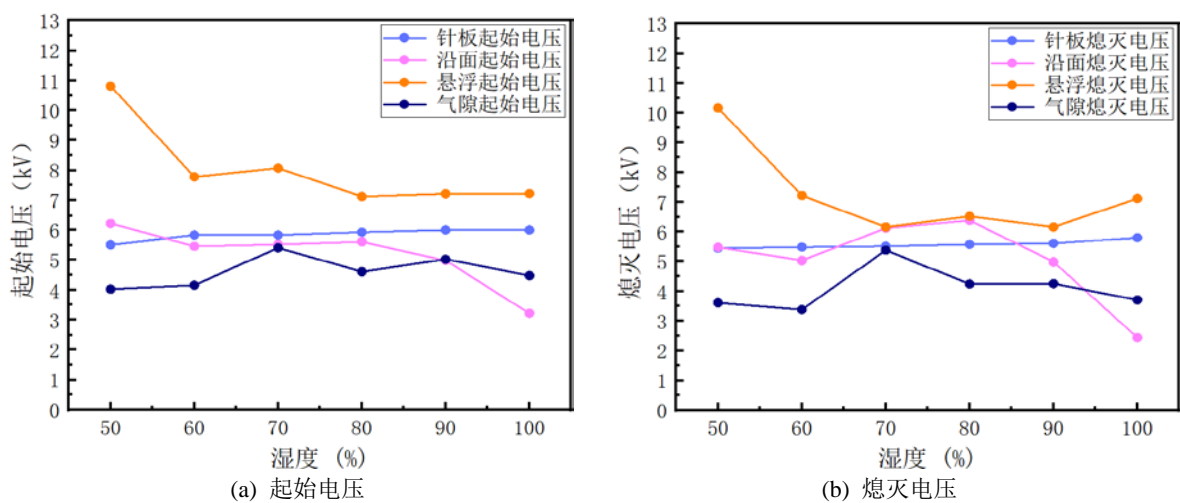


图8 湿度变化对不同故障特征电压影响比较

Fig. 8 Comparison of the influence of humidity change on the voltage of different fault characteristics

原因分析如下：

1)对于针板缺陷,空气中水分子吸附电子后,通过减少自由电子来影响放电电压,但由于水分子为弱电负性,湿度增大水分子增多并不会让被捕获的电子明显增加,对放电起主导作用的仍是缺陷模型本身的极不均匀电场,故湿度增大其变化相较其他缺陷模型并不明显。

2)对于沿面缺陷,由于湿度增大使得沿面缺陷表面逐渐形成水膜和凝露,导致发生液体电离,降低了电离难度,故湿度变化对沿面缺陷影响较为明显。

3)对于悬浮缺陷,由于缺陷模型高压与低压端之间隔着空气绝缘和环氧树脂绝缘,绝缘强度较高,故放电电压也较高。且由于铜柱面积较小,难以形成凝露现象,故在形成水膜明显降低放电电压之后,放电电压随湿度变化的趋势并不明显。

4)对于气隙缺陷,由于气隙故障存在于绝缘内部,对内部气泡的影响主要表现为绝缘外部形成水膜造成绝缘分压大小变化,但绝缘缺陷以外等效阻值很小,故湿度对气隙缺陷分压影响的变化幅度不大。

3.3 湿度变化对不同故障物理信号的影响

湿度变化对不同缺陷放电产生的物理信号影响见图9。由图9(a)所示,在试验湿度范围内,湿度对沿面故障、悬浮故障和气隙故障局部放电产生的超声波峰值影响最为明显,而对针板故障放电影响较小。表现为随湿度增大沿面缺陷超声波峰值明显增大,悬浮缺陷超声波峰值逐渐增大后消减,气隙缺陷超声波峰值明显增大后迅速减小,针板缺陷超声波峰值波动趋于平稳。

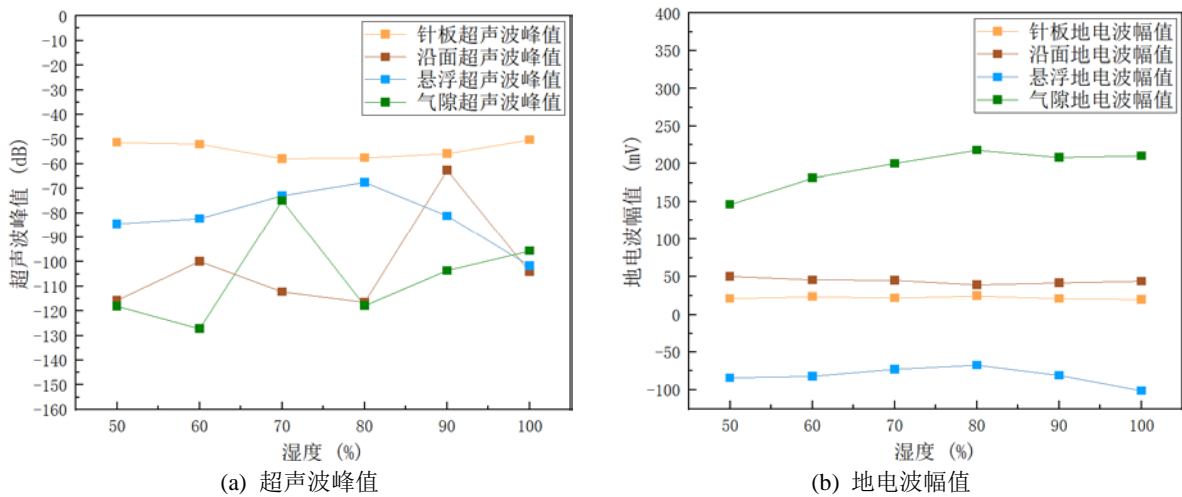


图9 湿度变化对不同故障产生的物理信号影响

Fig. 9 The influence of humidity changes on the physical signals generated by different faults

原因分析如下:

1)对于针板缺陷,湿度对其放电电压影响并不明显,故其放电剧烈程度受影响也较小,空气中水分子直径很小,不会明显改变波长为厘米级的超声波传播穿透性,故湿度变化对其超声波影响较小。

2)对于沿面缺陷,湿度变化导致水膜逐渐形成,降低了电离难度,放电更为剧烈导致超声波峰值逐渐增大。湿度进一步增大形成凝露,导致高压端和低电压端之间绝缘降低,使得放电电压降低。

3)对于悬浮缺陷,湿度导致水膜逐渐形成并发生液体电离,增大了电离程度,导致超声波峰值逐渐增大,当水膜逐渐包裹铜柱后,各水膜之间电位差减小为零,导致电离减弱,超声波峰值也逐渐减小。

4)对于气隙缺陷,湿度增大导致其电离效果增强,降低了放电电压,故在相同大小外施电压下,随着湿度增大其超声波峰值也逐渐增大。

由图 9(b)所示,湿度变化对针板缺陷、沿面缺陷、悬浮缺陷局部放电产生的地电波幅值影响不大,但气隙缺陷放电地电波幅值明显大于针板缺陷、沿面缺陷、悬浮缺陷放电时产生的地电波幅值。表现为随湿度增大针板缺陷、沿面缺陷、悬浮缺陷地电波幅值均趋于平稳,而气隙缺陷地电波幅值呈现出明显的上升趋势。

原因分析如下:

1)对于针板缺陷,湿度变化主要改变空气中水分子数量但并不占主导作用,电场分布极不均匀才是改变电子运动轨迹和放电发展的主要因素,故当湿度变化时其放电剧烈程度变化不大,地电波信号幅值波动较小,呈现平稳趋势。

2)对于沿面缺陷,放电主要集中于强垂直场强附近且所加电压不足以使得缺陷发生击穿现象,其放电仍为微弱放电,可以改变的基数较小,故湿度变化对其地电波信号幅值变化影响较小。

3)对于悬浮缺陷,其放电电压随湿度变化呈现出逐渐减小的趋势,放电所释放出的地电波信号为电磁波,其信号强弱也随放电时所产生的电场和磁场变化而波动,但其为微弱放电,故湿度变化产生影响较小。

4)对于气隙缺陷,其内部为厚度 1 mm 气泡,较其他缺陷更容易产生放电,其放电电压随湿度升高而降低,外施电压相同时放电更为剧烈且电磁波能在固体中传播,故产生的地电波幅值也随湿度升高而增大。

4 结论

文中以 12 kV 开关柜局部放电物理信号为主要研究对象,应用超声波检测法和暂态对地电压法,对比分析 4 种典型绝缘缺陷在不同环境温湿度下超声波信号峰值、地电波信号幅值以及起始电压、熄灭电压的变化特征,所得主要结论如下:

1)温度升高将分别导致针板缺陷超声波信号和悬浮缺陷地电波信号增强,对沿面和气隙放电影响不明显,在温差较大地区测量沿面和气隙缺陷放电信号采用超声波或地电波检测法更准确。温度在 40~60 °C 范围内针板缺陷熄灭电压与沿面、悬浮和气隙缺陷起始和熄灭电压下降明显,调整开关柜工作环境温度在该范围外利于降低故障率,保障人身及设备安全。

2)湿度升高将分别导致沿面缺陷超声波信号和气隙放电地电波信号增强,而对针板和悬浮缺陷影响不明显,在湿度变化较大地区测量针板和悬浮缺陷放电信号采用超声波或地电波检测法误差更小。相对湿度在 60%~100% 范围内沿面缺陷起始电压和悬浮缺陷起始和熄灭电压下降明显,调整柜内环境湿度在该范围外有助于减少故障发生,提高供电可靠性。

参考文献:

- [1] 徐兆丹. 10 kV 开关柜局部放电检测技术分析[J]. 电工技术, 2020(24): 102-104.
XU Zhaodan. Analysis of partial discharge detection technology for 10 kV Switch cabinet[J]. Electric Engineering, 2020(24): 102-104.
- [2] 吴田, 杨东, 黎鹏, 等. 中压开关柜内部电弧压力升计算——模型简化方法研究[J]. 高压电器, 2020, 56(3): 39-45.
WU Tian, YANG Dong, LI Peng, et al. Study on the model simplification method for the calculation of arc pressure rise in MV switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3): 39-45.
- [3] 韦湛兰, 李鹏. 基于宽频带电流传感器的开关柜局部放电检测方法研究[J]. 传感技术学报, 2024, 37(3): 545-550.
WEI Zhanlan, LI Peng. Research on switchgear local discharge detection methods based on the broadband current sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2024, 37(3): 545-550.
- [4] 谢勇, 张煜程, 吴晟昊, 等. 使用添加剂提高开关柜用环氧材料憎水耐电痕特性的研究[J]. 高压电器, 2024, 60(2): 223-228.
XIE Yong, ZHANG Yucheng, WU Shenghao, et al. Study on use of additives to improve hydrophobicity and tracking resistance of epoxy material for switchgear cabinet[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(2): 223-228.
- [5] 李文栋, 张宇程, 王超, 等. 12 kV 开关柜介电梯度支撑绝缘子优化设计与制造应用[J]. 高压电器, 2023, 59(9): 113-123.
LI Wendong, ZHANG Yucheng, WANG Chao, et al. Design, fabrication and application of dielectrically graded support insulator for 12 kV switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(9): 113-123.
- [6] 武兴坛, 周鹏, 刘少鹏, 等. 基于温升试验的中压开关柜温升控制探讨[J]. 高压电器, 2020, 56(10): 93-97.
WU Xingtang, ZHOU Peng, LIU Shaopeng, et al. Discussion on temperature rise control of medium-voltage switchgear based on temperature rise test[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10): 93-97.
- [7] 周恬, 徐云飞. 供电企业 10 kV 开关柜精益化检修浅析[J]. 机电信息, 2024(9): 74-77.
ZHOU Tian, XU Yunfei. Analysis of lean maintenance of 10 kV switchgear in power supply enterprises[J]. Mechanical and Electrical Information, 2024(9): 74-77.
- [8] 任美杰, 谢启源, 宋思齐. 高压开关柜阻燃绝缘件在役老化诱发着火事故的综合分析[J]. 火灾科学, 2022, 31(2): 120-128.
REN Meijie, XIE Qiyuan, SONG Siqi. Analysis of fire accidents induced by in-service aging of flame-retardant insulation items in high-voltage switchgear[J]. Fire Safety Science, 2022, 31(2): 120-128.
- [9] 梁谦, 李旭, 刘香江, 等. 固体开关柜绝缘老化与状态检测分析研究综述[J]. 高压电器, 2023, 59(6): 13-24.
LIANG Qian, LI Xu, LIU Xiangjiang, et al. Review on research of insulation aging and condition detection for solid insulated switchgear cabinet[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(6): 13-24.
- [10] 黄劭哲, 陈丽安. 断路器手车触头过热性故障机理分析及防止措施[J]. 高压电器, 2019, 55(1): 237-242.
HUANG Mengzhe, CHEN Li'an. Overheating fault mechanism analysis on circuit breaker handcart contact with measure to prevent[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1): 237-242.
- [11] 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.
- [12] 苏慧芳, 赵晓敏, 楚玉婷, 等. 10 kV 高压开关柜凝露数值模拟及影响因素分析[J/OL]. 高压电器: 1-9[2024-12-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1127.tm.20230322.1618.002.html>.
SU Huifang, ZHAO Xiaomin, CHU Yuting, et al. Numerical simulation of condensation in 10 kV high voltage switchgear and analysis of influencing factors[J/OL]. High Voltage Apparatus: 1-9[2024-12-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1127.tm.20230322.1618.002.html>.
- [13] 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 Apparatus, 2023, 49(2): 493-504.
- [14] 王浩, 白张, 吴劲松, 等. 高海拔地区中压充气式开关柜温升特性研究[J/OL]. 电测与仪表: 1-8[2024-12-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1127.tm.20230322.1618.002.html>.

//kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20240511.1205.013.html.

WANG Hao, BAI Zhang, WU Jinsong, et al. Research on temperature rise characteristics of medium voltage gas-filled switchgear in high altitude areas[J/OL]. *Electrical Measurement & Instrumentation* : 1-8[2024-12-13].http : //kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20240511.1205.013.html.

- [15]李旭, 史恒超, 卢鹏, 等. 特高压 GIS 复合套管局部放电的检测和消除[J]. *高压电器*, 2021, 57(6): 210-215.
LI Xu, SHI Hengchao, LU Peng, et al. Detection and elimination on partial discharges in composite bushing for UHV GIS[J]. *High Voltage Apparatus*, 2021, 57(6): 210-215.
- [16]谢荣斌, 杨超, 申强, 等. TEV 与 HFCT 法测量开关柜局部放电的特性对比[J]. *中国电力*, 2022, 55(3): 37-47.
XIE Rongbin, YANG Chao, SHEN Qiang, et al. Comparative study on the switchgear partial discharge characteristics based on transient earth voltage and pulse current detection methods[J]. *Electric Power*, 2022, 55(3): 37-47.
- [17]何维晟, 吴照国, 邓帮飞, 等. 高压电缆缓冲层烧蚀缺陷超声检测技术仿真研究[J]. *高压电器*, 2022, 58(11): 230-237.
HE Weisheng, WU Zhaoguo, DENG Bangfei, et al. Simulation research on ultrasonic detection technology of buffer layer ablation defects in high voltage cables[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(11): 230-237.
- [18]孙源, 宋颜峰, 王昊天, 等. 开关柜局部放电超声-TEV 融合检测技术[J]. *高电压技术*, 2023, 49(12): 5052-5060.
SUN Yuan, SONG Yanfeng, WANG Haotian, et al. Ultrasonic-TEV combined detection technology of partial discharge in switchgear[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(12): 5052-5060.
- [19]李志辉, 解曾祺, 任瀚文, 等. 高频电应力下温度对复合绝缘界面局部放电特性的影响机制[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(22): 8965-8976.
LI Zhihui, XIE Zengqi, REN Hanwen, et al. Influence mechanism of temperature on partial discharge characteristics of composite insulation interface under high frequency electrical stress[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(22): 8965-8976.
- [20]尚星宇, 庞磊, 卜钦浩, 等. 温度对方波电压下环氧树脂局部放电及击穿特性的影响[J]. *高电压技术*, 2023, 49(8): 3286-3295.
SHANG Xingyu, PANG Lei, BU Qin hao, et al. Effect of temperature on partial discharge and breakdown characteristics of epoxy resin under square wave voltage[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(8): 3286-3295.
- [21]王雅妮, 张帅, 任品顺, 等. 不同温度下 XLPE-SIR 异质绝缘的交/直流电树枝及局部放电特性[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(18): 7334-7344.
WANG Yani, ZHANG Shuai, REN Pinshun, et al. AC/DC electrical tree and partial discharge characteristics of XLPE-SIR heterogeneous insulation at different temperatures[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(18): 7334-7344.
- [22]马鑫, 张怀垠, 吴继岩, 等. 温度对交联聚乙烯电缆尖刺缺陷局部放电特性的影响[J]. *高压电器*, 2021, 57(5): 151-156.
MA Xin, ZHANG Huaiyin, WU Jiyan, et al. Effect of temperature on partial discharge characteristics of needle defects in cross-linked polyethylene cable[J]. *High Voltage Apparatus*, 2021, 57(5): 151-156.
- [23]彭苏蔓, 祝曦, 吴建东, 等. 温度和电场对 XLPE 与纳米 MgO/XLPE 电树枝生长过程中局部放电特性的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(12): 4033-4042.
PENG Suman, ZHU Xi, WU Jiandong, et al. Effect of temperature and electric field on partial discharge characteristics in XLPE and Nano-MgO/XLPE during electrical tree growth[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(12): 4033-4042.
- [24]李志坚, 李旭, 杜晓雨, 等. 湿度对不同电场类型下电缆缓冲层局部放电特性的影响[J]. *绝缘材料*, 2021, 54(7): 102-109.
LI Zhijian, LI Xu, DU Xiaoyu, et al. Effect of relative humidity on partial discharge characteristics of cable buffer layer under different electric field forms[J]. *Insulating Materials*, 2021, 54(7): 102-109.
- [25]李冠良, 白鹭, 晋涛, 等. 不同湿度环境下空冷发电机定子线棒端部表面放电特性[J]. *绝缘材料*, 2019, 52(9): 53-57.
LI Guanliang, BAI Lu, JIN Tao, et al. Surface discharge characteristics of stator bar end for air-cooled generator under different humidity conditions[J]. *Insulating Materials*, 2019, 52(9): 53-57.
- [26]罗思敏, 田妍, 郑服利, 等. 开关柜局部放电检测技术应用[J]. *高压电器*, 2020, 56(4): 204-208.
LUO Simin, TIAN Yan, ZHENG Fuli, et al. Application of partial discharge detection technology in switchgear[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(4): 204-208.
- [27]任明, 王玥, 关浩斌, 等. 沿面放电光脉冲发展特征与临界击穿判据研究[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(10): 4123-4133.
REN Ming, WANG Yue, GUAN Haobin, et al. Development characteristics and critical breakdown criterion of surface discharge

light pulse[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(10): 4123-4133.

[28]李世峰, 张茂永, 李道川, 等. 高压开关柜局部放电传输及外部干扰特性研究[J]. 高压电器, 2019, 55(8): 86-95.

LI Shifeng, ZHANG Maoyong, LI Daochuan, et al. Research on partial discharge transmission and external interference characteristics of high voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 86-95.

[29]张 威, 文雅钦, 吴传奇, 等. 40.5 kV 开关柜母线套管受潮后绝缘性能试验研究[J]. 高压电器, 2024, 60(5): 214-219.

ZHANG Wei, WEN Yaqin, WU Chuanqi, et al. Study on insulation performance test of bus bushing of 40.5 kV switchgear cabinet after moisture[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(5): 214-219.

蔡乐辉(2002—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高电压与绝缘技术(E-mai: 1524202985@qq.com)。