

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.07.019

故障模拟油纸绝缘套管油中溶解气体变化特性

刘琴, 罗晓庆, 谢雄杰, 刘泰蔚, 胡伟, 叶奇明

(中国电力科学研究院有限公司电网环境保护全国重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 少油类设备通过内部填充绝缘油进行内绝缘, 在发生放电或过热故障时, 会引起绝缘油劣化而产生 H_2 、烃类气体、CO、 CO_2 等溶解气体, 严重时会导致设备爆炸。文中模拟了油纸绝缘套管放电类(绝缘受潮、主绝缘设计、工艺缺陷)和过热类(载流结构件故障)典型故障, 并对故障套管油中溶解气体进行监测。研究表明4种绝缘故障下, 产气量由小到大依次为层间气泡、绝缘受潮、主绝缘设计缺陷和极板缺陷; 故障套管施加额定电压下, 会产生局部放电, 会持续产生 H_2 , 4种绝缘故障 H_2 的产气速率随加压时间呈现缓慢增长并逐渐趋于饱和的趋势; 4种绝缘故障下 C_2H_2 的产气速率随加压时间呈现先缓慢增长后快速增长的趋势, 快速增长出现的时间不同, 其中极板缺陷和主绝缘设计缺陷后期 C_2H_2 产气速率增长较快, 绝缘受潮和层间气泡后期 C_2H_2 产气速率增长较缓。载流结构件缺陷套管烃类气体产气量由少到多分别为 C_2H_6 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_2 , C_2H_2 体积分数较 H_2 多, 总烃产气量较绝缘放电大, H_2 的产气速率随加压时间呈现持续缓慢增长的趋势, 但载流结构件缺陷下 H_2 产气速率较绝缘缺陷慢, C_2H_2 产气速率较绝缘缺陷快。文中主要结论对于少油类设备产气下的故障分析具有重要的意义。

关键词: 故障模拟; 油纸绝缘; 套管; 溶解气体

Variation Characteristics of Dissolved Gas in Oil for Oil-paper Insulated Bushing Under Fault Simulation

LIU Qin, LUO Xiaoqing, XIE Xiongjie, LIU Taiwei, HU Wei, YE Qiming

(State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection of China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: For oil-less equipment, internal insulation is achieved by filling with insulating oil. In case of discharge or overheating faults, the insulating oil deteriorates, generating such dissolved gases as H_2 , hydrocarbons, CO and CO_2 . Under severe cases, this may cause equipment to explore. In this paper such typical faults of oil-paper insulation bushing as discharge type (insulation moisture, main insulation design and process defects) and overheating type (fault of current-carrying structure) are simulated, and the dissolved gas in the oil in the fault bushing is monitored. The study results show that, under four types of insulation faults, the gas production volume in ascending order is interlayer bubble, insulation moisture, design effect in the main insulation and electrode plate defect. In case of applying rated voltage on the fault bushing, partial discharge will generated and H_2 is continuously generated. For four types of insulation faults, the gas generation rate of H_2 shows a slow increase and gradually tends to saturation with the voltage application time. The gas generation rate of C_2H_2 under four types of insulation faults shows a trend of slow increase at first and then rapid increase with voltage application time. The occurrence time of fast increase is different, in which the later-stage C_2H_2 generation rate increases dhaply for electrode plate defects and main insulation design defects, but increases modestly for insulation moisture and interlayer bubble. The hydrocarbon gas generation volume of the fault bushing of the current-carrying structural parts from less to more is C_2H_6 , CH_4 , C_2H_4 and C_2H_2 , the volume fractino of C_2H_2 is more than that of H_2 The total hydrocarbon gas generation volume is larger than insulation discharge, the gas generation rate of H_2 shows a continuous and slow increase trend with the voltage appli-

收稿日期:2025-12-15; 修回日期:2026-02-11

基金项目:国家电网有限公司总部管理科技项目(5500-202140114A-0-0-00)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC(5500-202140114A-0-0-00).

ation time. However, under the defect of current-carrying structure, the H_2 gas generation rate is slower than the insulation defect, but the C_2H_2 gas generation rate is faster than insulation defect. The main conclusions of this paper are of great significance for fault analysis under gas generation in oil-less equipment.

Key words: fault simulation; oil-paper insulation; bushing; dissolved gas

0 引言

高压套管是连接变压器和外部线路的重要组件,目前使用较多的套管内部绝缘结构为油纸绝缘结构,具有制层多、铝箔多、场强集中等特点,且长期运行受电、热、机械应力、环境影响,易发生内部绝缘故障^[1-5]。内部的放电或过热故障会引起绝缘油状态参量发生显著变化,产生 H_2 、 C_2H_2 等重要特征气体。油中气体体积分数的变化可表征少油类设备运行故障或缺陷,对不同类型的故障套管进行油中产气体积分数及速率监测分析,掌握不同类型典型故障下套管产气规律,对油纸绝缘套管故障分析具有重要意义^[6-8]。

目前国内外针对真型故障套管开展的产气特性研究工作较少,研究工作主要集中在运行的套管故障分析及采用模拟试验工装进行套管运行故障模拟并分析产气特性^[9-15]。在运行的套管故障分析方面文[11]分析了溪浙工程金华站的某型 ± 800 kV 穿墙套管在夏季运行时内部发生闪络的原因。解剖分析指出套管内弹簧触指结构部件相对移动等原因产生细微金属颗粒,是故障发生的主要原因。文[12]通过油色谱试验和现场频域介电谱测试(FDS)对套管介损超标的原因进行分析,结合套管返厂解体结果确定此次介损异常的原因。在采用模拟试验工装进行套管运行故障模拟并分析产气特性研究方面文[14]模拟了多金属导管间隙放电、瓷绝缘子沿面放电、电容心体内X蜡、电容心子局部放电、载流连接件过热5种套管典型缺陷实体模型,进行了油纸绝缘套管5种典型缺陷下的起始放电和产气特征研究,分析总结了不同缺陷下的放电和产气规律,提出了不同缺陷的诊断判据。文[15]针对少油类设备存在的尖端放电、极板间放电、油纸间隙放电等典型缺陷开展了柱板、板板、球球电极不同间隙距离在工频电压下的不同放电时间产气量对比分析研究,获得了3种典型电极油中放电气体体积分数变化规律。

为了更好地对少油类设备运行状态进行监测,提高少油类设备运行可靠性,一些学者研发了套管氢气—压力—温度的传感器并已经实现了现场应用^[16-18],为更好地进行故障套管油状态的现场实时监测提供了手段。

真型套管的故障模拟可更准确地反映实际运行工况下的套管状态,其产气特性更接近套管实际运行情况下的套管产气特性。文中结合套管运行故障经验,建立了绝缘放电故障和载流结构件间隙放电故障的72.5 kV和126 kV油纸绝缘套管试品,搭建了故障套管试验平台,开展了72.5 kV和126 kV油纸绝缘故障套管长期带电试验,分析了不同故障类型下的套管产气特性。文中主要结论对实际套管故障分析具有重要的意义^[16-20]。

1 油纸绝缘套管典型故障模拟方案及套管试制

油纸绝缘套管典型故障主要包括放电类故障和过热类故障,其中放电类故障主要分为绝缘放电故障和载流结构件间隙放电故障^[21-22]。根据典型故障主要成因,利用72.5 kV和126 kV油纸绝缘套管试制典型故障套管样品。

1)72.5 kV油纸绝缘套管试品。72.5 kV油纸绝缘套管试品型号为BRDW-72.5/630-3,具体结构尺寸见图1,技术参数详见表1。

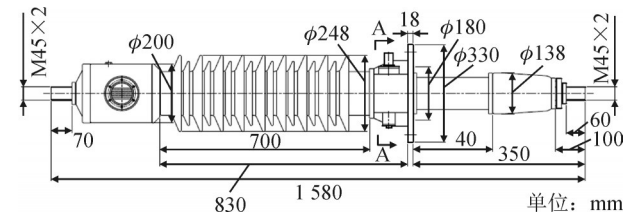


图1 72.5 kV油浸纸绝缘套管试品结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of 72.5 kV OIP bushing

表1 72.5 kV油浸纸绝缘套管试品关键技术参数

Table 1 Key technical parameters of 72.5 kV OIP bushing

序号	关键技术参数	技术指标
1	设备最高电压(U_m)/kV	72.5
2	额定电流(I_r)/A	630
3	1 min工频干耐受电压(AC)(rms)/kV	155
4	全波雷电耐受电压(BIL)(peak)/kV	325
5	$1.05U_m/\sqrt{3}$ 介质损耗因数($\tan\delta$)/%	≤ 0.5
6	U_m 下局部放电量(PD)/pC	≤ 10
7	最小公称爬电距离/mm	1 813
8	悬臂耐受负荷/N	1 000

2)126 kV油纸绝缘套管试品。126 kV油浸纸绝缘套管试品型号为BRDLW-126/630-4,具体结构尺寸及相关组部件尺寸见图2,技术参数见表2。

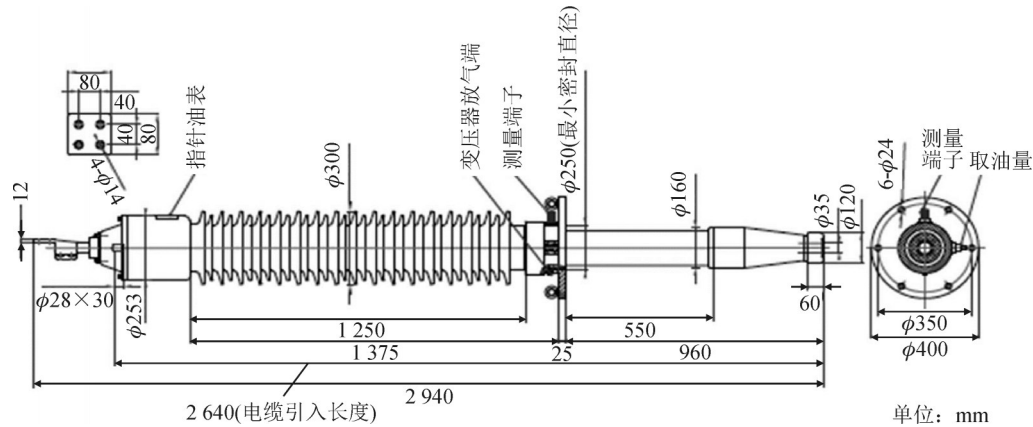


图2 126 kV油浸纸绝缘套管结构尺寸示意图

Fig. 2 Structural dimension diagram of 126 kV OIP bushing

表2 126 kV油浸纸绝缘套管技术参数

Table 2 Key technical parameters of 126 kV OIP bushing

序号	电气项目	参数
1	执行标准	GB/T 4109—2008
2	设备最高电压/kV	126
3	额定电流/A	630
4	1 min工频干耐受电压/kV	255
5	雷电冲击耐受电压/kV	550
6	介质损耗因素(tanδ)/%	< 0.4
7	局部放电水平(U _m 下)/pC	< 10
8	悬臂耐受负荷/N	3 150

1.1 典型绝缘放电故障模拟方案

套管绝缘类放电故障主要是指由套管主绝缘缺陷引起的内绝缘放电故障,绝缘放电故障根据故障原因可分为3大类,包括:绝缘受潮、主绝缘设计缺陷、工艺缺陷^[23-25]。

1)绝缘受潮故障。由于套管密封不良或由其他(电、热、力等)因素作用引起的密封受损,可能导致外部潮气或水进入套管内部,也可能使潮气或水进入变压器内部。特别是运行过程中,套管通常会产生负压,使得潮气或水分更易通过密封薄弱处进入套管或变压器内部,致使主绝缘受损,长期带电,绝缘薄弱环节发生局部放电,长期累积将导致绝缘击穿、组部件烧蚀等更为严重的故障。

2)主绝缘设计缺陷。作为油纸绝缘套管的核心主绝缘部件,电容心子的选材、结构、电气强度设计直接影响产品的性能及使用寿命。电容心子设计缺陷主要包括电容心子结构、绝缘裕度设计,其导致的故障现象主要为电场畸变、长期带电条件下的局部放电,逐步发展为持续放电,从而致使绝缘性能下降或关键组部件电腐蚀、电老化,长时间运行将导致贯穿性放电、绝缘击穿甚至爆炸。

3)工艺缺陷。工艺缺陷引发的故障主要指电容

心子生产工艺(包括电容心子的缠绕、浸渍、固化、车削等关键生产工艺)、套管装配工艺以及现场安装工艺等方面的工艺所存在的缺陷。工艺缺陷极易给套管带来诸多安全隐患,其故障模式通常是以细小缺陷或隐患存在,在长时间带电运行的条件下,或外部电、热、力等因素的侵入,使得缺陷逐步扩大,进而导致严重故障。比如当绝缘纸包扎不够紧实严密时,铝合金套不够光洁时,产生毛刺和微小裂纹,在运行中容易造成局部电场集中,存在尖端局部放电,导致内侧电容屏逐步击穿,随着被击穿的电容屏数的增加,最终形成贯穿性的放电通道,使得绝缘击穿,甚至更为严重的故障。

针对典型套管绝缘类放电故障,开展了72.5 kV和126 kV电压等级缺陷套管的设计及试制,主要缺陷类型见表3。

表3 设计并试制的典型绝缘类放电故障套管

Table 3 Typical insulation type discharge fault bushing designed and trial-produced

序号	套管缺陷类型	试品电压等级/kV	备注
1	绝缘受潮	72.5	注水,加热扩散
2	主绝缘设计缺陷	72.5	改变原有电容屏尺寸
3	工艺缺陷	72.5、126.0	极板预埋尖端
4		72.5、126.0	抽空不彻底

1.1.1 模拟绝缘受潮套管

该类试品模拟运行套管由于密封不好水分进入套管内部,导致套管主绝缘受潮后引起的套管运行故障^[26-29]。

1)试品:72.5 kV油纸绝缘套管。

2)模拟受潮方法:将套管水平放置后,使用注射器通过套管的取油口将水注入套管瓷套内,将套管竖直放置进高温试验箱内加热,加热温度模拟套管

伸入变压器/升高座的工作温度 80 ℃, 高温试验箱温度不宜过高, 排除套管热老化问题。在套管发热的情况下让水分在油流动过程中从套管内油域底部浸入套管电容心体内。注入套管中的水量根据套管的电压等级及套管内油量适当选取, 72.5 kV 套管的油域为 8 L, 电缆纸受潮情况下饱和吸水量在油域油量 1% 左右, 即 80 mL, 同时需要将注入的水浸入电缆纸中, 由于无法重复对真型套管内电缆纸进行测试, 开展了套管电缆纸的外部浸湿试验。套管电缆纸的外部浸湿试验参照 GB/T 7969—2002《电力电缆纸标准》和 GB/T 462—2008《纸、纸板和纸浆分析试样水分的测定》标准, 具体实施步骤如下: 选取 72.5 kV 用套管电缆纸, 放入可容纳套管电缆纸的容器, 将 60 mL 水完全浸湿套管电缆纸, 待水分完全浸入后, 观察电缆纸颜色变化并称量其重量, 后放入烘箱内烘干并称量其重量, 计算水分含量达 100%。60 mL 的水量可以较好地浸湿电缆纸, 使套管电缆纸水分含量达 100%, 故选用 60 mL 的水量。完成套管注水后放入烘箱内进行加热, 加热时, 持续监测套管的介损/FDS 频谱, 参数基本不变后即表明套管试样达到稳定受潮状态, 形成心体受潮的油浸纸绝缘套管试样。套管内部油纸绝缘的受潮程度可通过对油参量的微水含量进行测量, 通过 213 h 的加热后微水含量从 50 ppm (1 ppm=1×10⁻⁶) 升高至 600 ppm。

加热过程中, 连续测量套管频域介电谱, 套管水分自由扩散过程中绝缘介质损耗因数频谱的变化曲线见图 3, 模拟受潮故障套管水分自由扩散过程中绝缘电容量频谱的变化曲线见图 4。其中“0 h”为模拟受潮套管注水之前的频域介电谱测试结果, 即套管正常状态下频域介电谱曲线。

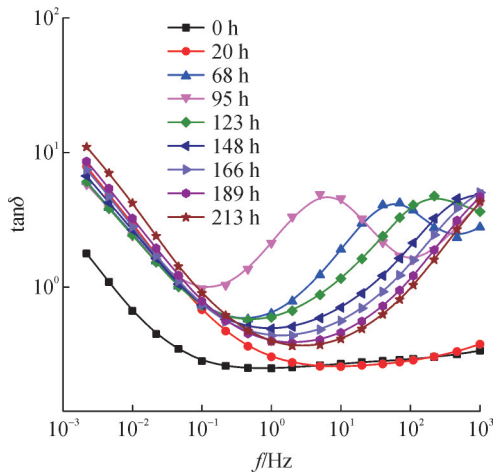


图3 套管试样介损频谱随加热时间的变化曲线

Fig. 3 The variation curve of the dissipation spectrum of the bushing specimen with heating time

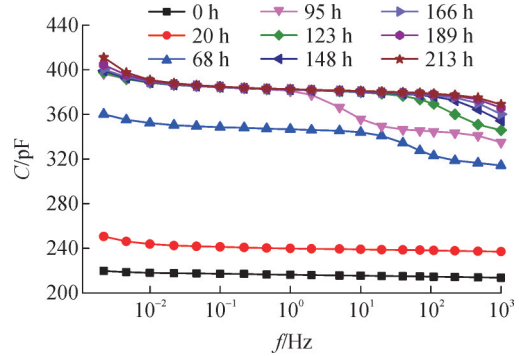


图4 套管试样电容量频谱随加热时间的变化曲线

Fig. 4 Variation curve of capacitance spectrum of bushing sample with heating time

由图3可以看出, 随着水分自由扩散时间的增加, 即持续恒温加热时间的增加, 首先在 20 h 时 1 mHz ~ 3 Hz 频段开始升高, 随后 68 ~ 95 h 时在 0.1 ~ 1 000 Hz 出现新的波峰值并增大, 随后谱线整体向高频平移, 并逐步趋于稳定。

由图4可以看出, 随着水分自由扩散时间的增加, 在 1 mHz ~ 1 kHz 频段内电容量曲线整体呈上升趋势, 但在 1 Hz ~ 1 kHz 频段存在上升“滞后”的现象, 随着加热时间的继续增加, “滞后”现象逐渐消失, 在 213 h 时曲线随时间的变化量较小, 因此可认为套管中水分均匀扩散到油纸绝缘中。

1.1.2 模拟主绝缘设计缺陷套管

该类试样模拟运行套管由于设计缺陷引起套管主绝缘电场畸变, 导致套管在长期运行时主绝缘发生局部放电击穿引起的套管运行故障^[30-31]。

1) 试样: 72.5 kV 油纸绝缘套管。

2) 模拟主绝缘设计缺陷方法: 将主绝缘中的某一层电容屏尺寸由正常尺寸作一定调整, 使该层的局放起始电场强度低于相同电压等级正常套管试品的局放起始场强, 让套管能在额定电压下出现比较明显的局放。

正常设计的 72.5 kV 油浸纸交流变压器套管主绝缘心体中共有 18 层铝箔极板, 极板间有一定的极差和厚度, 保证了分压均场的均匀性。为了形成模拟主绝缘设计缺陷, 将套管主绝缘中的第 15、16 层极板尺寸稍作调整, 使极板的极差减小, 从而使得套管的轴向电场分布发生畸变, 试验观测 72.5 kV 主绝缘设计缺陷套管在额定电压下有明显的局部放电声响。

1.1.3 模拟工艺缺陷套管

改类试样模拟运行套管由于工艺缺陷引起套管主绝缘电场畸变, 导致套管在长期运行时主绝缘发生局部放电击穿引起的套管运行故障^[32-33]。

1) 试品: 72.5 kV 和 126 kV 油纸绝缘套管。

2) 模拟缺陷方法: ①极板缺陷(模拟卷制工艺缺陷): 72.5 kV 套管在第 15 层极板边缘附着一根 0.1 mm 的细铜丝, 使该铜丝伸出极板端面 5 mm, 模拟极板毛刺工艺缺陷。在 126 kV 油纸绝缘套管电容心子卷制过程中, 在第 15 层极板铝箔边缘设置锯齿状尖端, 然后再继续卷制。②层间气泡(模拟注油工艺缺陷): 电容心子卷制装配完成后, 在真空浸油工序中, 执行大气加热 10 h、抽真空 2 h 后即停止抽真空程序, 抽真空 2 h 未能达到要求真空度, 会在层间产生气泡, 由于真型套管为瓷外套结构, 内部油域情况不易观测, 试验在透明容器内先开展本次缺陷模拟, 测量气泡大小、位置, 后进行真型套管的复刻。

透明容器油域大小为 10 L, 同 126 kV 套管, 抽真空 2 h 后即停止抽真空程序, 容器内残留有部分空气, 注油静止一段时间后在容器中部产生 3 个直径分别为 1、1.5、2 mm 的气泡, 气泡的大小和位置对真型工艺缺陷故障套管具有一定的参考。

1.2 典型载流结构件间隙放电故障模拟方案

目前油纸绝缘套管载流结构主要为双导管载流结构, 双导管载流结构主要是为了提高套管的散热效果, 分为载流管和卷制管, 其结构见图 5。卷制管作为零层导管, 其上绕制电容心子, 载流管则位于卷制管内侧, 两管之间留有的油隙有利于散热并增大了散热面积。在双导管结构之间分别设计有绝缘的径向限位装置, 使卷制管(零层导管)不载流, 可以有效减少载流发热对于电容心子绝缘性能的影响。双导电管结构虽然增加了产品结构的复杂性, 但能明显提高载流导体的散热效果, 同时也有利于将外导管作为零层导管时尺寸设计的灵活性, 方便套管整体电场分布的调整。

双导管载流结构在实际运行过程中, 需保证双管一端(通常在油侧)可靠接触连接, 使卷制管和载流管处于相同高电位, 另一端则需用绝缘件将双管隔开, 避免卷制管载流发热影响电容心子绝缘性能。若由于机械振动、装配失误等因素影响, 双导管油侧连接处出现接触不良或松脱现象, 导致载流管与卷制管之间出现间隙放电, 发生套管油中产气, 使得套管主绝缘性能下降或劣化。

主要模拟双导管载流结构套管由于现场机械应力或操作不当等因素引起的载流管和卷制管接触不良或松脱现象, 导致双管之间发生间隙放电而发热, 使得套管内部产气, 绝缘性能下降引起套管故障^[34-35]。

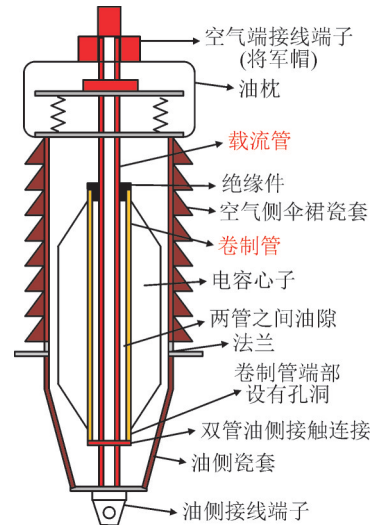


图 5 双导管载流结构套管示意图

Fig. 5 Schematic diagram of double-conduit current-carrying structure casing

1) 试品: 126 kV 油纸绝缘套管。

2) 模拟双导管间隙放电方法: 模拟方法见图 6, 在套管油侧载流管和卷制管接触处设置绝缘件, 将载流管与卷制管接触点断开, 其他结构安装根据实际设计进行安装。通过故障点设置, 模拟双管接触不良或松脱缺陷, 施加电压电流使得双管发生间隙放电。

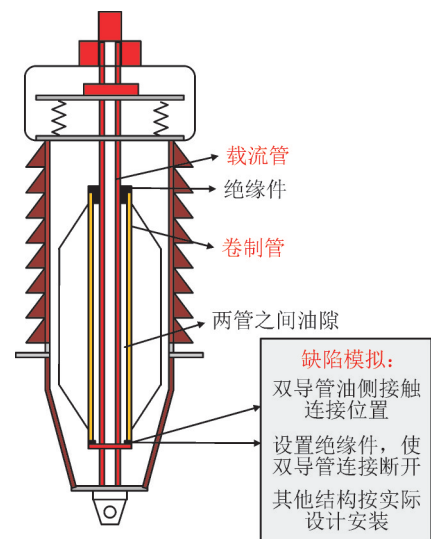


图 6 双导管载流结构间隙放电故障模拟示意图

Fig. 6 Simulation diagram of gap discharge fault of double-conduit current-carrying structure

2 典型故障下油纸绝缘套管油中溶解气体变化特性研究

2.1 绝缘放电故障

2.1.1 试验条件

绝缘放电模拟采用两种电压等级的套管开展。72.5 kV 套管放电试验采用 YDTW-200/200 变压

器施加额定电压42 kV,持续加压10天,套管及试验油箱油温从20 ℃逐渐上升,加压5天后套管油温稳定在80 ℃左右,油箱油温稳定在70 ℃左右。每天固定时间降压后从取油口取油,72.5 kV套管油域体积为8 L,考虑取油开展试验会导致油量减少的问题,实际注油时会预留部分余量,尽量注满,本次试验持续时间为10天,每次取油量为40 mL,共计400 mL,相对套管总油量,试验取油量不大,在故障点产气速率不变的情况下后续结果将会有所偏高,但偏差不大,目前在套管取油口安装接触式油状态在线监测装置可以很好地解决离线取油导致油量变少的弊端,但接触式油状态在线监测装置测量气体成分单一,无法对多气体成分进行深入分析。本次试验采用中分2000B油色谱测量仪器进行气体成分及体积分数测量^[36]。试验布置见图7。

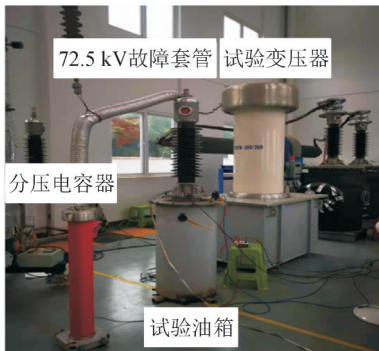


图7 72.5 kV套管放电试验布置

Fig. 7 72.5 kV bushing discharge test arrangement

126 kV套管安装在模拟试验油箱平台上,试验电源为500 kV工频电源,施加额定电压73 kV,持续加压10天,套管及试验油箱油温从25 ℃逐渐上升,加压5天后套管油温稳定在85 ℃左右,油箱油温稳定在75 ℃左右。每天固定时间降压后从取油口取油进行离线油色谱监测,126 kV套管油域体积为10 L。试验布置见图8。

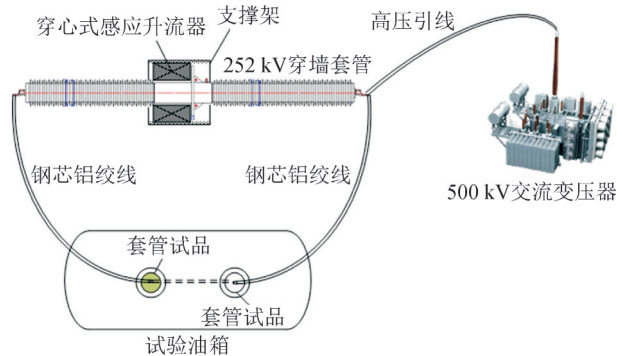


图8 126 kV套管放电试验布置

Fig. 8 126 kV bushing discharge test layout

2.1.2 产气类型

加压结束后获得绝缘放电缺陷故障下的两种

套管产气类型见表4。

表4 绝缘放电缺陷故障下的两种套管产气类型表

Table 4 Two types of casing gas production under insulation discharge defect fault

序号	套管缺陷类型	试品电压等级/kV	产气类型(体积分数从小到大排列)
1	绝缘受潮	72.5	C ₂ H ₆ 、CH ₄ 、C ₂ H ₄ 、H ₂ 、CO、C ₂ H ₂ 、CO ₂
2	主绝缘设计缺陷	72.5	C ₂ H ₆ 、CH ₄ 、C ₂ H ₄ 、H ₂ 、CO、C ₂ H ₂ 、CO ₂
3	极板缺陷	72.5	C ₂ H ₆ 、CH ₄ 、C ₂ H ₄ 、CO、H ₂ 、CO ₂ 、C ₂ H ₂
4	极板缺陷	126.0	C ₂ H ₆ 、CH ₄ 、C ₂ H ₄ 、CO、H ₂ 、CO ₂ 、C ₂ H ₂
5	层间气泡	72.5	C ₂ H ₆ 、CH ₄ 、H ₂ 、C ₂ H ₄ 、C ₂ H ₂ 、CO、CO ₂
6	层间气泡	126.0	C ₂ H ₆ 、CH ₄ 、C ₂ H ₄ 、H ₂ 、CO、C ₂ H ₂ 、CO ₂

72.5 kV不同绝缘故障缺陷下的产气特性见图9。

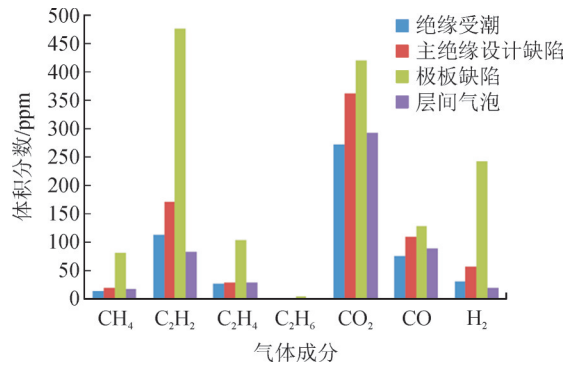


图9 72.5 kV套管绝缘故障产气特性

Fig. 9 Gas production characteristics of 72.5 kV bushing insulation fault

不同绝缘故障下的套管主要产气为C₂H₆、CH₄、C₂H₄、H₂、C₂H₂、CO、CO₂, 烃类气体产气量由少到多分别为C₂H₆、CH₄、C₂H₄、C₂H₂, 绝缘放电下H₂和C₂H₂体积分数较多,4种绝缘故障下,产气量由小到大依次为层间气泡、绝缘受潮、主绝缘设计缺陷、极板缺陷,极板缺陷由于在极板边缘设置尖端,出现了尖端放电,产气量较其他几种缺陷的产气量大。文[19]开展了不同缺陷下油纸套管的H₂产气特性研究,研究结果显示,尖端放电所产生的氢气体积分数有显著的增大,尖端缺陷破坏了原有绝缘结构,油纸绝缘内部出现严重劣化,仅加压18 h就达到500 ppm 预警值,同一时间的产气量较尾部积水、电容屏褶皱故障产气量大,与文中结论一致。加压结束后72.5 kV套管和126 kV套管相同绝缘故障产气量对比见图10。

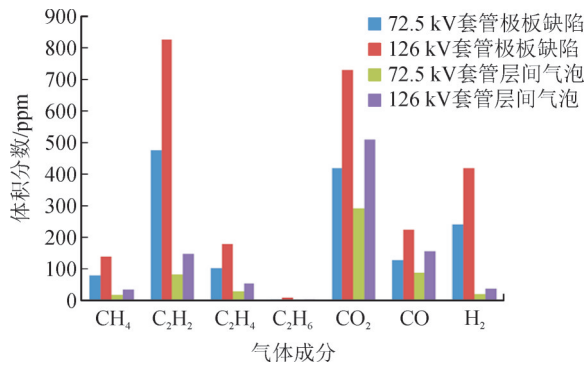


图10 72.5 kV套管和126 kV套管相同绝缘故障产气量对比
Fig. 10 Comparison of gas production of 72.5 kV bushing and 126 kV bushing with the same insulation fault

加压结束后两种绝缘故障下的126 kV套管放电产气量总体大于72.5 kV套管产气量,126 kV套管电压等级较72.5 kV高,总体产气量大。极板缺陷产气量总体大于层间气泡的产气量,极板缺陷由于设置了尖端放电,放电程度较层间气泡剧烈,产气量较层间气泡缺陷套管大。

2.1.3 产气速率

为开展不同绝缘故障类型下的套管产气速率研究,每天固定时间降压后从取油口取油开展离线油色谱监测,获得了不同电压等级套管、不同绝缘故障类型下的H₂和C₂H₂产气速率(ppm/d)变化见图11。

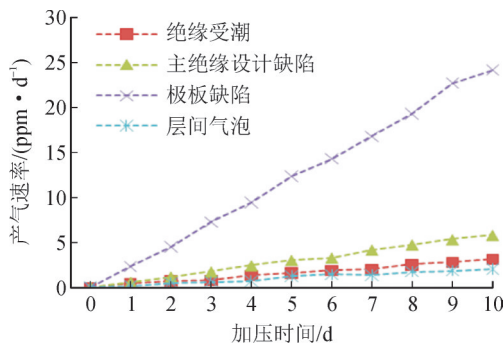


图11 72.5 kV套管不同绝缘故障H₂产气速率对比
Fig. 11 Comparison of H₂ gas production rate in different insulation faults of 72.5 kV bushing

由图11可知,对于72.5 kV套管,4种绝缘故障H₂的产气速率随加压时间呈现缓慢增长并逐渐趋于饱和的趋势,故障套管施加额定电压时,会产生局部放电,会持续产生H₂,H₂在油中体积分数增大后,油中溶解H₂的速率变缓并逐渐趋于饱和。4种绝缘故障下的产气速率由大到小依次为极板缺陷、主绝缘设计缺陷、绝缘受潮、层间气泡,故障套管H₂产气速率的大小排序同产气总量的排序,H₂体积分数在很大程度上可以表征产气总量,且H₂为易燃气体,是套管产气中需要监测的首要气体。两种电压等级的套管在极板缺陷和层间气泡放电下的H₂产气速率对比见图12。

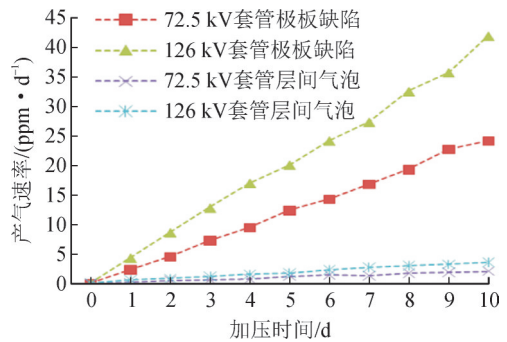


图12 两种电压等级的套管在极板缺陷和层间气泡放电下的H₂产气速率对比

Fig. 12 Comparison of H₂ gas production rate of two voltage classes of bushing under plate defect and interlayer bubble discharge

由图12可知,两种电压等级的套管在极板缺陷和层间气泡故障下H₂产气速率都呈现缓慢变大的趋势,相同绝缘故障类型下,126 kV套管H₂产气速率较72.5 kV产气速率大,随着电压等级的升高,相同故障类型下高电压等级的套管H₂产气速率大。极板缺陷H₂产气速率大于层间气泡产气速率,极板缺陷和层间气泡的H₂的产气速率变化特性同产气总量的变化特性。72.5 kV套管不同绝缘故障C₂H₂产气速率对比见图13。

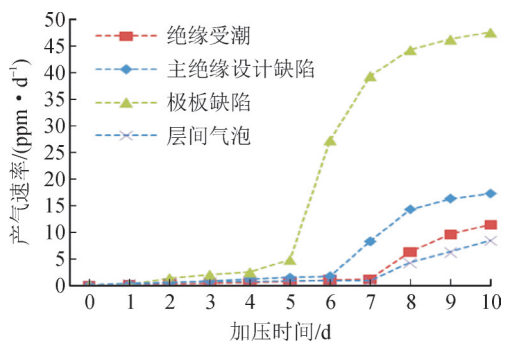


图13 72.5 kV套管不同绝缘故障C₂H₂产气速率对比
Fig. 13 Comparison of C₂H₂ gas production rate for different insulation faults of 72.5 kV bushing

由图13可知,对于72.5 kV套管,4种绝缘故障C₂H₂的产气速率不同于H₂产气速率变化规律,随加压时间呈现先缓慢增长后快速增长的趋势,该结果显示烃类气体大量产生的时间较H₂迟,但一旦产生C₂H₂则会出现快速增长,造成套管内部压力过大,是套管运行中需要监测的重要气体。C₂H₂快速增长出现的时间不同,增长的速率也存在差异,其中极板缺陷和主绝缘设计缺陷后期C₂H₂产气速率增长较快,绝缘受潮和层间气泡后期C₂H₂产气速率增长较缓,考虑缺陷设计的布置,极板缺陷和主绝缘设计缺陷产生的放电较绝缘受潮和层间气泡激烈,C₂H₂产气速率增长较快。

两种电压等级的套管在极板缺陷和层间气泡放电下的产气速率对比见图 14。

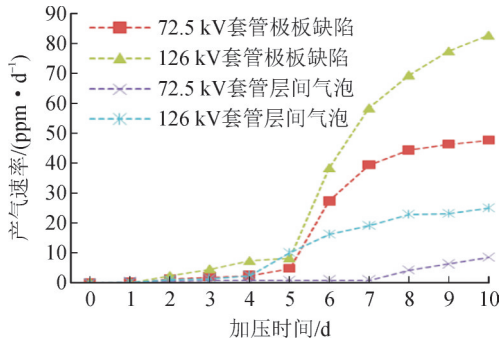


图 14 两种电压等级的套管在极板缺陷和层间气泡放电下的 C₂H₂ 产气速率对比

Fig. 14 Comparison of C₂H₂ gas production rate of two voltage classes of bushing under plate defect and interlayer bubble discharge

由图 14 可知,在相同时间点下,电压等级高的 C₂H₂ 产气速率大,极板缺陷的 C₂H₂ 产气速率较层间气泡故障产气速率大,该产气速率的对比特性同 H₂。

2.2 载流结构件间隙放电

套管载流结构件缺陷模拟主要针对 126 kV 套管开展。

2.2.1 试验条件

试验平台及试验方法同 126 kV 绝缘故障套管,试验平台为 500 kV 模拟试验油箱平台。由于套管存在双导管载流结构套管载流管和卷制管接触不良,试验中施加额定电压下接头处产生放电,存在放电的电晕声,每次测量套管油中气体体积分数时同时从套管上方注油口进行油温测量^[37-39]。

2.2.2 产气类型

126 kV 载流结构件缺陷套管在加压结束后产气类型同绝缘故障套管,主要产气成分从小到大依次为 C₂H₆、CH₄、C₂H₄、CO、H₂、CO₂、C₂H₂。126 kV 载流结构件缺陷套管产气特性见图 15。

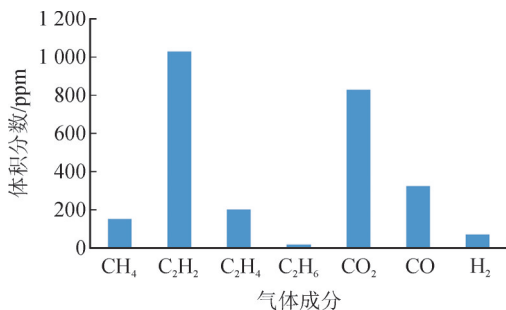


图 15 126 kV 载流结构件缺陷套管产气特性

Fig. 15 Gas production characteristics of defective casing of 126 kV current-carrying structure

126 kV 载流结构件缺陷套管烃类气体产气量由少到多分别为 C₂H₆、CH₄、C₂H₄、C₂H₂、C₂H₂ 体积分

数较 H₂ 多,总烃产气量较绝缘缺陷产气量大。载流结构件缺陷套管的主要缺陷为双管连接不良发生间隙放电,由于靠近高压导杆,其放电程度更加剧烈,产气量较绝缘缺陷放电量大。

2.2.3 产气速率

载流结构件缺陷主要模拟过热类故障,试验中由于载流结构件间隙放电会持续产热,试验中 126 kV 载流结构件缺陷套管内部油温变化见图 16。

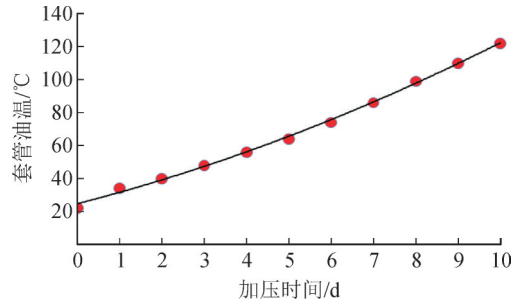


图 16 126 kV 载流结构件缺陷套管内部油温变化

Fig. 16 Change of oil temperature inside the defective bushing of 126 kV current-carrying structural parts

图 16 的套管油温测量结果显示随着加压时间变化,126 kV 载流结构件缺陷套管油温由于间隙放电导致油温升高,前期油温增长较缓,后逐渐增长快速,加压 10 天后油温达 122 °C。

126 kV 载流结构件缺陷套管的 H₂ 和 C₂H₂ 产气速率(ppm/d)变化见图 17、18。

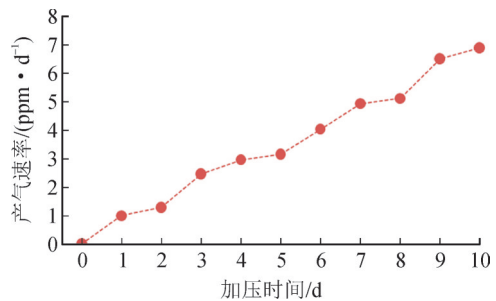


图 17 126 kV 载流结构件缺陷套管 H₂ 产气速率

Fig. 17 H₂ gas production rate of defective bushing of 126 kV current-carrying structure

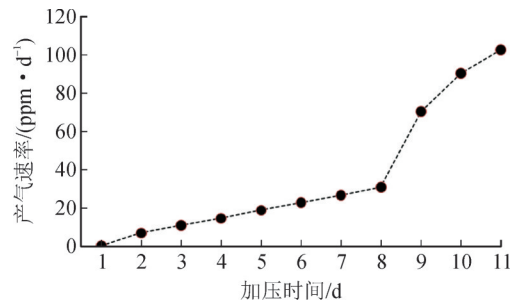


图 18 126 kV 载流结构件缺陷套管 C₂H₂ 产气速率

Fig. 18 C₂H₂ Gas production rate of defective bushing of 126 kV current-carrying structure

由图 17 可知,126 kV 载流结构件缺陷套管的主

要缺陷为双管连接不良发生间隙放电,由于靠近高压导杆,放电持续时间长, H_2 呈现缓慢持续增长,未见饱和趋势。载流结构件缺陷套管 H_2 的产气速率随加压时间呈现持续缓慢增长的趋势,但载流结构件缺陷 H_2 产气速率较绝缘缺陷中极板缺陷慢,而较绝缘缺陷中层间气泡缺陷快,极板缺陷模拟为在极板铝箔边缘设置锯齿状尖端,存在剧烈的尖端放电, H_2 产气速率快,而载流结构件缺陷主要模拟双导管载流结构套管由于现场机械应力或操作不当等因素引起的载流管和卷制管接触不良或松脱现象,导致双管之间发生间隙放电而发热,为过热类故障, H_2 产气速率较慢,但相比层间气泡这种较圆滑的间隙放电 H_2 产气速率又较快。

图18的结果显示126 kV载流结构件缺陷套管 C_2H_2 的产气速率随加压时间呈现先缓慢增长后较快增长的趋势,载流结构件缺陷 C_2H_2 产气速率较绝缘缺陷快, C_2H_2 的缺陷产气速率对比特性结果与 H_2 不同。

3 结论

1)不同绝缘故障下的套管主要产气为 C_2H_6 、 CH_4 、 C_2H_4 、 H_2 、 C_2H_2 、 CO 、 CO_2 ,烃类气体产气量由少到多分别为 C_2H_6 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_2 ,绝缘放电下 H_2 、 C_2H_2 体积分数较多,4种绝缘故障下,产气量由小到大依次为层间气泡、绝缘受潮、主绝缘设计缺陷和极板缺陷。

2)对于72.5 kV套管,4种绝缘故障 H_2 的产气速率随加压时间呈现缓慢增长并逐渐趋于饱和的趋势,故障套管施加额定电压下,会产生局部放电,会持续产生 H_2 ,4种绝缘故障下的产气速率由大到小依次为极板缺陷、主绝缘设计缺陷、绝缘受潮、层间气泡。两种电压等级的套管在极板缺陷和层间气泡故障下 H_2 产气速率都呈现缓慢变大的趋势,相同绝缘故障类型下,126 kV套管 H_2 产气速率较72.5 kV产气速率大,极板缺陷 H_2 产气速率大于层间气泡产气速率。

3)对于72.5 kV套管,4种绝缘故障 C_2H_2 的产气速率不同于 H_2 产气速率变化规律,随加压时间呈现先缓慢增长后快速增长的趋势,快速增长出现的时间不同,其中极板缺陷和主绝缘设计缺陷后期 C_2H_2 产气速率增长较快,绝缘受潮和层间气泡后期 C_2H_2 产气速率增长较缓。对于不同电压等级的相同绝缘故障的套管,其 C_2H_2 产气速率快速增长的出现的的时间相同,在相同时间点下,电压等级高的 C_2H_2 产气速率大,极板缺陷的 C_2H_2 产气速率较层间气泡故障产气速率大。

4)126 kV载流结构件缺陷套管烃类气体产气量由少到多分别为 C_2H_6 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_2 , C_2H_2 体积分数较 H_2 多,总烃产气量较绝缘放电大。载流结构件缺陷套管 H_2 的产气速率随加压时间呈现持续缓慢增长的趋势,但载流结构件缺陷 H_2 产气速率较绝缘缺陷慢。126 kV载流结构件缺陷套管 C_2H_2 的产气速率随加压时间呈现先缓慢增长后较快增长的趋势,载流结构件缺陷 C_2H_2 产气速率较绝缘缺陷快。

参考文献:

- [1] 段成,李丰,杨嘉炜,等.一起110 kV变压器高压套管故障原因分析[J]. 变压器,2024,61(8):58-61.
Duan Cheng, Li Feng, Yang Jiawei, et al. Cause analysis of failure of high-voltage bushing of 110 kV transformer[J]. Transformer, 2024, 61(8):58-61.
- [2] 高树国,相晨萌,王丽丽,等.基于振动超声复合信号的变压器套管及升高座故障监测方法[J]. 电瓷避雷器,2024(1):177-186.
Gao Shuguo, Xiang Chenmeng, Wang Lili, et al. The monitoring method of transformer bushing and riser by using vibration and ultrasonic composite signal sensor[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(1):177-186.
- [3] 杜伯学,朱闻博,李进,等.换流变压器阀侧套管油纸绝缘研究现状[J]. 电工技术学报,2019,34(6):1300-1309.
Du Boxue, Zhu Wenbo, Li Jin, et al. Research status of oil-paper insulation for valve side bushing of converter transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6):1300-1309.
- [4] 王欣,施勇,邹德旭,等.550 kV油浸纸套管缺陷仿真分析[J]. 电瓷避雷器,2025(1):118-126.
Wang Xin, Shi Yong, Zou Dexu, et al. Simulation analysis of defects in 550 kV oil transformer bushing[J]. Insulators and Surge Arresters, 2025(1):118-126.
- [5] 杨定乾,袁曼曼,杜嘉宝.基于油液压力感知的油浸纸绝缘套管缺陷辨识方法研究[J]. 变压器,2025,62(9):1-10.
Yang Dingqian, Yuan Manman, Du Jiabao. Research on defect identification method of oil-impregnated paper insulation bushing based on oil pressure sensing[J]. Transformer, 2025, 62(9):1-10.
- [6] 何金良,孙岗,袁之康,等.含有非线性电场均化层的高压套管电场分布特性[J]. 高电压技术,2023,49(1):179-187.
He Jinliang, Sun Gang, Yuan Zhikang, et al. Electric field distribution characteristics of high-voltage bushing with nonlinear electric field grading layer[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1):179-187.
- [7] 孙宇晗,卢智成,刘振林,等.1100 kV特高压套管地震模拟振动台试验[J]. 高电压技术,2017,43(12):4139-4144.
Sun Yuhan, Lu Zhicheng, Liu Zhenlin, et al. Earthquake simulation shaking table test for 1100 kV UHV bushing[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12):4139-4144.
- [8] 李志超,李卫国,夏喻,等.基于模糊综合评判的变压器套管绝缘状态评估[J]. 中国电力,2018,51(4):22-26.
Li Zhichao, Li Weiguo, Xia Yu, et al. Insulation condition

- assessment of transformer bushing based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Electric Power*, 2018, 51(4):22-26.
- [9] 黄明亮, 兰生. 140 °C与常温条件下油纸绝缘沿面放电产气特性[J]. *绝缘材料*, 2018, 51(6):47-53.
Huang Mingliang, Lan Sheng. Gas generation characteristics of surface discharge of oil-paper insulation under 140 °C and room temperature[J]. *Insulating Materials*, 2018, 51(6):47-53.
- [10] 胡小博, 李坤, 陈荣, 等. 天然酯绝缘油在油纸界面放电故障条件下的分解产气特性研究[J]. *绝缘材料*, 2019, 52(11):70-74.
Hu Xiaobo, Li Kun, Chen Rong, et al. Gas generation characteristics of natural ester under discharge fault at oil-pressboard interface[J]. *Insulating Materials*, 2019, 52(11):70-74.
- [11] 刘杉, 宋胜利, 卢理成, 等. ±800 kV特高压直流穿墙套管故障分析及设计改进[J]. *高电压技术*, 2019, 45(9):2928-2935.
Liu Sha, Song Shengli, Lu Licheng, et al. Failure analysis and design improvement of ±800 kV HUVDC wall bushings[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(9):2928-2935.
- [12] 张晨晨, 丁国成, 陈庆涛, 等. 基于频域介电谱的一起110 kV变压器套管故障分析[J]. *变压器*, 2019, 56(5):77-80.
Zhang Chenchen, Ding Guocheng, Chen Qingtao, et al. Fault analysis of 110 kV transformer bushing based on FDS[J]. *Transformer*, 2019, 56(5):77-80.
- [13] 胡伟, 许佐明, 尹朋博, 等. 闭式重力热管与换流变阀侧套管一体化技术[J]. *高电压技术*, 2019, 45(7):2314-2321.
Hu Wei, Xu Zuoming, Yin Pengbo, et al. Integrated technology of gravity heat pipe and valve side bushing of converter transformer[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(7):2314-2321.
- [14] 张毅涛. 油纸绝缘套管典型缺陷放电及产气规律研究[D]. 北京:华北电力大学, 2021.
Zhang Yitao. Study on discharge and gas generation characteristics of typical defects in oil-impregnated paper bushing[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [15] 刘琴, 谢雄杰, 胡伟, 等. 油绝缘典型电极放电产气特性对比分析[J]. *中国电力*, 2021, 54(12):186-194.
Liu Qin, Xie Xiongjie, Hu Wei, et al. Comparative analysis on discharge gas production characteristics of typical electrodes with oil insulation[J]. *Electric Power*, 2021, 54(12):186-194.
- [16] 张璐, 王文森, 韩彦华, 等. 基于多维参量复合感知的变压器套管智能监测[J]. *高电压技术*, 2022, 48(8):2934-2944.
Zhang Lu, Wang Wensen, Han Yanhua, et al. Intelligent monitoring of transformer bushing based on multi-parameter compound sensing[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(8):2934-2944.
- [17] 张璐, 孙蕾, 韩彦华, 等. 不同缺陷下油纸绝缘套管中氢气生成特性研究[J]. *电网与清洁能源*, 2021, 37(7):44-50.
Zhang Lu, Sun Lei, Han Yanhua, et al. Hydrogen generation characteristics of the oil paper insulated bushing with different inside defects[J]. *Power System and Clean Energy*, 2021, 37(7):44-50.
- [18] 穆海宝, 赵浩翔, 张大宁, 等. 变压器油纸绝缘套管多参量智能感知技术研究[J]. *高电压技术*, 2020, 46(6):1903-1912.
Mu Haibao, Zhao Haoxiang, Zhang Daning, et al. Study on multi-parameter intelligent sensing technology for transformer oil-paper bushing[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(6):1903-1912.
- [19] 苑清, 齐波, 张书琦, 等. 交直流复合电压下油纸绝缘典型缺陷产气特性[J]. *电网技术*, 2018, 42(9):3093-3100.
Yuan Qing, Qi Bo, Zhang Shuqi, et al. Gas generating characteristics of oil-paper defect models under composite AC-DC voltage[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(9):3093-3100.
- [20] 郭昱均, 季启政, 何锋, 等. 平板型电极微腔放电的特性[J]. *高电压技术*, 2019, 45(3):820-825.
Guo Yujun, Ji Qizheng, He Feng, et al. Discharge characteristic in micro-channel of plate electrodes[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(3):820-825.
- [21] 陈鑫, 郝建, 冯大伟, 等. 三元混合式绝缘油和矿物油的雷电冲击击穿及产气特性对比分析研究[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(4):906-918.
Chen Xin, Hao Jian, Feng Dawei, et al. Comparative study on lightning impulse breakdown and gas production characteristics of three-element mixed insulation oil and mineral oil[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(4):906-918.
- [22] 王纯洁, 王黎明, 梅红伟, 等. 三电极结构流注放电试验平台[J]. *高电压技术*, 2019, 45(1):103-108.
Wang Chunjie, Wang Liming, Mei Hongwei, et al. Streamer discharge test platform with three-electrode structure[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(1):103-108.
- [23] 白鹭, 李冠良, 杨成鹏, 等. 试验方法及电极布置形式对变压器油局部放电起始电压的影响[J]. *绝缘材料*, 2021, 54(5):85-91.
Bai Lu, Li Guanliang, Yang Chengpeng, et al. Influence of test methods and electrode arrangement on partial discharge initiation voltage of transformer oil[J]. *Insulating Materials*, 2021, 54(5):85-91.
- [24] 孙巍, 朱学成, 刘健, 等. 高寒区域配电变压器套管故障分析及治理措施[J]. *电瓷避雷器*, 2021(2):95-99.
Sun Wei, Zhu Xuecheng, Liu Jian, et al. Fault analysis and response measurement for bushing of distribution transformer in alpine region[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2021(2):95-99.
- [25] 张丙旭. 一起干式复合绝缘套管结构问题引起的变压器产气故障[J]. *变压器*, 2019, 56(2):9-11.
Zhang Bingxu. Transformer gas production fault caused by structure problem of dry-type composite insulating bushing[J]. *Transformer*, 2019, 56(2):9-11.
- [26] 邓疆利, 赵文君, 施逸, 等. 基于电磁热多场耦合的变压器用10 kV套管发热数值仿真分析与应用[J]. *变压器*, 2025, 62(9):42-46.
Deng Jiangli, Zhao Wenjun, Shi Yi, et al. Numerical simulation analysis and application of electromagnetic thermal coupling of 10 kV transformer sleeve[J]. *Transformer*, 2025, 62(9):42-46.
- [27] 张润, 邱志斌, 童志鹏, 等. 基于红外图像目标检测与偏斜矫正的变压器套管发热缺陷检测方法[J]. *南方电网技术*, 2024, 18(9):59-68.
Zhang Run, Qiu Zhibin, Tong Zhipeng, et al. Detection method of transformer bushing thermal defect based on infrared image target detection and skew correction[J]. *Southern Power System Technology*, 2024, 18(9):59-68.
- [28] 戴佳民, 齐波, 李成榕, 等. 油浸纸套管尾部受潮故障模拟及

- 早期特征[J]. 电工技术学报, 2018, 33(11): 2613-2619.
- Dai Quanmin, Qi Bo, Li Chengrong, et al. Fault simulation and early characteristics of tail moisture in oil-immigrated paper bushing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(11): 2613-2619.
- [29] 陈晋鹏, 杨昊, 张璐, 等. 环境温度变化对含局部过热缺陷的油纸套管温升特性影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2024(3): 131-139.
- Chen Jinpeng, Yang Hao, Zhang Lu, et al. Impact of ambient temperature changes on temperature rise characteristics of oil paper bushings with local overheating defects[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(3): 131-139.
- [30] 杜清全, 蔡钢, 黄晓峰, 等. 极性反转下特高压换流变阀侧套管电场分析[J]. 电瓷避雷器, 2013(3): 14-19.
- Du Qingquan, Cai Gang, Huang Xiaofeng, et al. Electric field distribution of bushing on the HVDC converter transformer's valve side during polarity reversal test[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(3): 14-19.
- [31] 王进, 袁曼曼, 石存金, 等. 极端热环境下套管硅油纸绝缘特性与击穿特性对比研究[J]. 变压器, 2025, 62(7): 51-60.
- Wang Jin, Yuan Manman, Shi Cunjin, et al. Comparative study on physicochemical and breakdown characteristics of silicone oil-paper insulation under extreme thermal environment[J]. Transformer, 2025, 62(7): 51-60.
- [32] 汤浩, 李金忠, 张贺军, 等. 特高压直流换流变压器阀侧套管高环温强电流下轴径向的温度分布规律[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5494-5503.
- Tang Hao, Li Jinzhong, Zhang Hejun, et al. Axial and radial temperature distribution of the valve side bushing in UHVDC converter transformer under high ambient temperature and large current[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5494-5503.
- [33] 孙希盈, 张宏滨, 申鹏飞, 等. 一起220 kV变压器高压套管漏油事故分析[J]. 变压器, 2025, 62(8): 64-68.
- Sun Xiying, Zhang Hongbin, Shen Pengfei, et al. Analysis of 220 kV transformer high-voltage bushing oil leak accident[J]. Transformer, 2025, 62(8): 64-68.
- [34] 李国友, 施勇, 邹德旭, 等. 换流变压器网侧套管典型电连接结构振动失效特性试验及分析[J]. 电瓷避雷器, 2025(1): 133-142.
- Li Guoyou, Shi Yong, Zou Dexu, et al. Vibration failure characteristics test of typical electric connection structure of converter transformer grid-side bushing[J]. Insulators and Surge Arresters, 2025(1): 133-142.
- [35] 严敏超, 陈明浩, 王稼轩, 等. 两起变压器套管将军帽发热处理与分析[J]. 变压器, 2025, 62(4): 65-70.
- Yan Minchao, Chen Minghao, Wang Jiakuan, et al. Treatment and analysis of two cases of general cap of transformer bushing[J]. Transformer, 2025, 62(4): 65-70.
- [36] 张晋寅, 田汇冬, 吴泽华, 等. 基于三维电磁-热-流耦合方法的换流变阀侧干式套管插接结构过热性故障研究[J]. 电瓷避雷器, 2019(5): 200-206.
- Zhang Jinyin, Tian Huidong, Wu Zehua, et al. Research on plug connector overheat fault of converter transformer RIP bushings based on 3D coupled electromagnetic-thermal-fluid method[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(5): 200-206.
- [37] 邓军, 吴泽华, 周士贻, 等. 换流变阀侧套管温度分布的计算及其影响因素分析[J]. 电瓷避雷器, 2018(5): 164-168.
- Deng Jun, Wu Zehua, Zhou Shiyi, et al. Calculation of temperature distribution on converter transformer RIP bushings and analysis on factors of influence[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(5): 164-168.
- [38] 谷应科, 黄龙, 杨旭琼, 等. 一起220 kV变压器高压侧套管乙炔含量超标原因分析[J]. 变压器, 2024, 61(1): 66-69.
- Gu Yingke, Huang Long, Yang Xuqiong, et al. Cause analysis of acetylene content exceeding standard in high voltage side bushing of 220 kV transformer[J]. Transformer, 2024, 61(1): 66-69.
- [39] 刘云鹏, 董王英, 许自强, 等. 基于卷积神经网络的变压器套管故障红外图像识别方法[J]. 高压电器, 2021, 57(10): 134-140.
- Liu Yunpeng, Dong Wangying, Xu Ziqiang, et al. Infrared image recognition method on fault of transformer bushing based on convolutional neural networks[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(10): 134-140.
- 刘琴(1985—), 女, 硕士, 教授级高工, 主要从事高压套管技术、气体绝缘电气设备气状态监测技术、输电线路防污闪技术、电晕损失研究等(通信作者)(E-mail: liuqin2@epri.sgcc.com.cn)。
- 罗晓庆(1988—), 男, 硕士, 教授级高工, 主要从事套管关键技术和空气间隙特性研究(E-mail: luoxiaoqing@epri.sgcc.com.cn)。
- 谢雄杰(1983—), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事套管关键技术和输电工程设备电晕特性研究(E-mail: xiexiongjie@epri.sgcc.com.cn)。