

交流电压下油纸绝缘放电发展过程中电-磁-声特征参量的变化规律

江长明¹, 黄 猛², 郝 震³, 李 雨³, 刘 健¹, 马鑫晟³

(1. 国家电网有限公司华北分部, 北京 100053; 2. 华北电力大学新能源电力系统全国重点实验室, 北京 102206; 3. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045)

摘 要: 沿面放电是变压器油纸绝缘结构最严重的放电故障类型之一。为了准确获取交流电压下油纸绝缘沿面放电发展过程中特征参量的变化规律, 搭建了沿面放电发展过程模拟试验平台并建立了 1 套能够满足对放电发展过程中电、磁、声这 3 种物理量同步在线监测需求的测量系统。在此基础上, 提取沿面放电发展过程中多物理参量的典型特征, 通过对特征参量全过程幅值变化规律的分析对放电过程进行阶段划分, 并给出相应的阶段特征及机理概述。试验结果表明, 通过分析多参量典型特征及变化规律可以将沿面放电发展过程划分为 4 个阶段: 微小能量放电阶段、低能量放电阶段、高能量放电阶段、临近击穿阶段, 阶段特征与电荷分布及绝缘材料耐受强度有关。相比常规单参量监测手段, 多参量同步检测方法为变压器沿面故障诊断和及时预警提供了更可靠准确的参考依据。

关键词: 变压器; 油纸绝缘; 沿面放电; 多参量信号; 变化规律; 阶段划分

Variation of Electrical-magnetic-acoustic Characteristic Parameters During the Development of Oil-pressboard Insulation Discharge Under AC Voltage

JIANG Changming¹, HUANG Meng², HAO Zhen³, LI Yu³, LIU Jian¹, MA Xinsheng³

(1. North China Branch of State Grid Corporation of China, Beijing 100053, China; 2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100045, China)

Abstract: Surface discharge is one of the most serious types of discharge faults in transformer oil-pressboard insulation structures. In order to accurately obtain the changes in characteristic parameters during the development process of oil-pressboard insulation surface discharge under AC voltage, a simulation experimental platform for the development process of surface discharge was built and a measurement system which can meet the synchronous online monitoring requirements of electrical, magnetic, and acoustic physical quantities during the discharge development process was established in this paper. On this basis, typical features of multiple physical parameters during the development of surface discharge were extracted; moreover, by analyzing the amplitude changes of characteristic parameters throughout the entire process, the discharge process was divided into stages, and corresponding stage characteristics and mechanism overview were provided. The experimental results indicate that, by means of analyzing the typical characteristics and variation patterns of multiple parameters, the development process of surface discharge can be divided into four stages, namely, micro energy discharge stage, low energy discharge stage, high energy discharge stage, and near breakdown stage, and the stage characteristics are related to charge distribution and insulation material resistance strength. Compared to conventional single parameter monitoring methods, a more reliable and accurate reference evidence for transformer surface discharge fault diagnosis and timely warning is provided by the multi-parameter synchronous detection method.

Key words: transformer; oil pressboard insulation; surface discharge; multi parameter signal; change law; stage division

0 引言

“十四五”规划对建设可靠安全的新型电力系统, 保障电力供应和能源安全提出了新的要求。变压器作为新型电力系统中不可替代的关键一环, 其

健康状态极大程度上影响整个电网的安全可靠运行^[1]。工程用变压器的内部绝缘结构主要以油纸复合绝缘为主^[2-4]。油纸绝缘沿面放电是指变压器内部由于水分侵蚀、杂质进入、绝缘材料老化、组件变形等原因造成复合绝缘材料性能下降, 局部电场畸

变,使放电沿着油纸界面发展,在长时间运行工况下,油纸复合绝缘逐渐劣化直至击穿,导致变压器箱体破裂甚至发生燃爆^[5-6]。近些年来,发生了多起由油纸绝缘沿面放电引发的变压器爆燃起火故障,严重影响电力可靠供应和新能源消纳,造成巨大经济损失及恶劣社会影响^[7-9]。因此,明确变压器油纸绝缘沿面放电发展过程的演变规律,实现对特征参量的可靠监测及故障严重程度的准确判断是变压器在线监测领域中亟待解决的关键问题。

目前,国内外研究学者对沿面放电发展过程的研究主要集中在不同试验条件对绝缘材料性能变化、击穿电压等影响上及通过单一特征参量对故障严重程度判断 2 个方面,对依据多参量变化规律进行阶段划分研究相对较少。研究人员分别研究了雷电冲击^[10]、温度^[11]、含水量^[12]、复合电场^[13]、绝缘老化程度^[14]、不同电极结构^[15]、绝缘材料^[16]等因素对沿面放电的影响。文献[17]根据其发展过程中的特高频信号的相位分布统计谱图,将沿面放电严重程度划分为初始、发展及危险 3 个等级。文献[18]采用局部放电测量方法,研究了整个局部放电过程中放电量、放电谱图、放电频率等变化情况,根据放电量划分出沿面放电发展的 4 个阶段。文献[19]通过分析沿面放电过程中的放电特征量、放电图谱以及扫描电镜微观特征,将沿面放电阶段划分为 3 个阶段。文献[20]采用脉冲电流法测量沿面放电模型的局部放电特性谱图,根据局部放电特征参数的变化趋势,将局部放电整个过程分为 5 个阶段。文献[21]通过研究放电发展过程中油中溶解气体的变化特性,依据油中溶解气体的产气速率,对沿面放电的发展趋势进行划分。文献[22]中 P. M. Mitchinson 等人采用脉冲电流法分析放电脉冲分布特征图谱,根据纸板上碳化痕迹的长度和范围沿面放电过程划分沿面放电发展的阶段。

综上所述,现有研究中对于沿面放电发展过程的阶段研究均是通过监测和分析单一参量的变化来判断绝缘状态和故障严重程度,但由于绝缘结构放电故障发展过程中会产生复杂的多物理场,单一参量的感知方法受空间位置、测量原理、测量灵敏度等因素影响,对于不同阶段的放电可能无法及时准确地响应,从而可能无法全面揭示故障发展过程的本质。

因此,本文以不均匀场下典型油纸绝缘放电模型为基础,搭建了沿面放电发展过程模拟试验平台。

为了更好地模拟变压器的实际运行工况,在试验回路中引入 1:4 分压电容使得油纸绝缘结构在高电位下放电,从而放电能量远高于传统实验室模型的值。同时建立了包含常规脉冲电流、特高频、高频电流、声感知手段的测量系统。试验采用逐步升压法开展变压器沿面放电故障演变过程研究,记录并分析多参量信号随时间变化的典型特征,建立测量幅值与故障发展时间的关系,获得多参量信号全过程变化规律,进而对放电发展过程进行阶段划分,并从电荷分布及绝缘材料耐受强度方面对放电微观过程进行阐述。试验结果可为变压器沿面放电故障提供诊断依据,并为未来多参量联合检测方法的大规模工程应用提供了技术参考。

1 试验平台与试验方法

1.1 试验样品制备

变压器在正式投入运行前均会进行严格的出厂测试,内部几乎不存在尖刺导致的极不均匀电场,大部分是高压与低压、高压对地之间的稍不均匀电场^[23]。根据现场统计数据,内部沿面爬电现象主要发生在绝缘垫块和围屏位置,并且该位置的纵向电场强度高于径向电场。因此,本试验中采用了符合 IEC 60243 标准^[24]要求的柱板电极放电模型作为试验模型。柱电极直径为 25 mm,平板电极直径为 60 mm,材料均为黄铜,纸板直径与下电极相同,厚度为 1 mm,充分裁剪并打磨,避免毛刺存在从而会影响试验结果,具体示意图如图 1 所示。变压器油选用 KI25 号,先用 0.2 μm 的微孔滤纸过滤 3 次排除油中杂质,然后在真空干燥箱内经 85 $^{\circ}\text{C}$ 处理 48 h 进行脱水脱气处理,实测油中含水质量分数为 $2\times 10^{-6}\sim 4\times 10^{-6}$,符合国标要求。绝缘纸板预先用鼓风干燥箱 105 $^{\circ}\text{C}$ 干燥 48 h,后在真空干燥箱内 105 $^{\circ}\text{C}$ 真空浸油 48 h,实测纸板含水质量分数在 0.4% 左右。油和纸板含水量均符合国家标准,保证了测量结果的准确性。

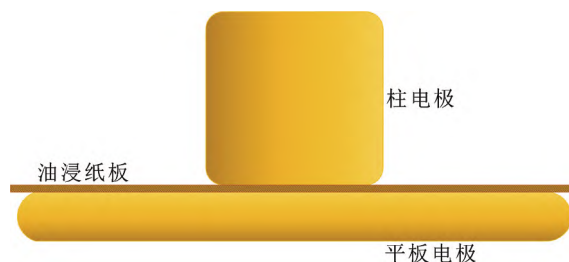


图 1 沿面放电模型

Fig.1 Surface discharge model

1.2 试验回路与信号采集系统

1.2.1 试验回路

本试验回路由交流电源、保护电阻、电容分压器、1:4 分压电容、试验腔体、缺陷模型及信号采集单元组成, 线路整体连接示意图如图 2 所示。交流电源采用工频单相试验变压器, 型号规格为 YDCTW-1800/1200, 该变压器的额定输出电压范围为 0~200 kV, 最大输出电流为 0.1 A, 最大试验容量为 1800 kVA, 200 kV 满电压输出时局放 <5 pC。为了限制被试设备击穿时的短路电流, 保护变压器等设备, 需要选择适当的保护电阻。通常情况下, 保护电阻与外施电压之间的比例关系在 $0.1\sim0.5\ \Omega/\text{V}$ 之间。然而, 为了避免回路的正常工作产生较大的压降和功耗, 电阻不应太大。因此, 在本试验回路中串联了 1 个 $110\ \text{k}\Omega$ 的保护电阻。测试回路中, 1:1000 的电容分压器并联在回路中进行常规脉冲电流的测量。

结合实际变压器沿面故障下多参量信号传播及衰减特性, 以环氧树脂为材料, 设计并研制了试验腔体。缺陷模型中柱电极和平板电极分别连接 1:4 分压电容上端和中端, 使纸板耐受电压与外施电压比为 1:5。通过对实际变压器和缺陷模型的多次仿真, 得到实际变压器中两电极间的缺陷部分电容以及缺陷串联部分介质电容的总电容为 $3.45\ \text{pF}$, 模型之间的电容为 $15.93\ \text{pF}$ 。因此根据电容串并联及仿真的计算结果, 当缺陷模型通过绝缘支撑距离底部接地导体 $700\ \text{mm}$ 时, 板电极对地电容为 $4.4\ \text{pF}$, 补偿了试验模型电极距离与大型变压器实际结构差距导致的电容, 从而避免电容不一致导致沿面放电的发展过程不同。试验腔体尺寸示意图及实物图如图 3 和图 4 所示。信号传输导线均进行了外层电磁屏蔽处理, 并同步接入数字信号采集系统。回路中所有高压导线均穿套铝箔管, 避免空气中电压过高产生电晕放电从而影响试验结果。

1.2.2 信号采集系统

本文多参量信号采集系统包括常规脉冲电流传感器、高频电流传感器(TA)、特高频传感器、声传感器 4 种感知手段。

常规脉冲电流传感器采用 HCPD-9104Z 局放综合分析仪, 测量带宽为 $30\sim400\ \text{kHz}$, 测量误差 $<5\%$, 测量范围为 $0.1\sim1000\ \text{nC}$, 检测阻抗盒与电容分压器芯子部分相连, 每次试验前均按照标准进行同步相位与测量幅值校准测试。测量装置接地与回路整体

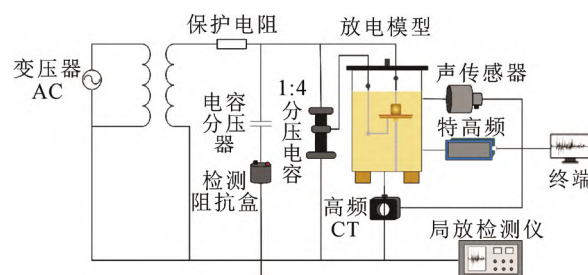


图 2 试验回路

Fig.2 Testing circuit

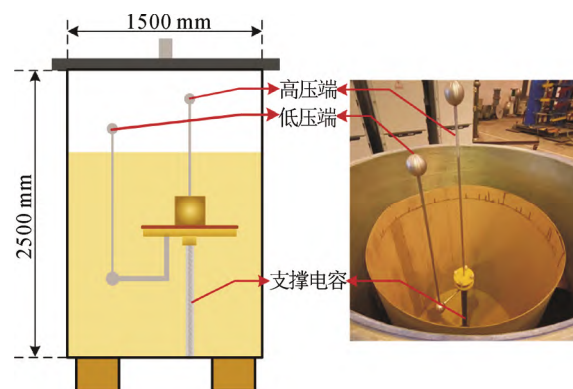


图 3 试验腔体

Fig.3 Testing cavity

地线分离, 减少噪声干扰。

高频 TA 采用自研传感器, 测量带宽为 $0.1\sim45\ \text{MHz}$, 检测范围为 $1\sim15\ 000\ \text{pC}$, 灵敏度 $\leq 1\ \text{pC}$, 感知方法采用线圈电磁感应原理, 装置穿套在腔体引出的地线上, 通过信号传输线与数字信号采集系统相连, 为了更明显地观察幅值, 在系统中将采集到的电压幅值放大 10 倍。

特高频传感器采用螺旋天线式自研传感器, 灵敏度为 $0.5\ \text{V/m}$ (对应 $-80\ \text{dB}$), 检测动态范围为 $70\ \text{dB}$, 后接信号放大器, 放大增益为 $40\ \text{dB}$, 测量带宽为 $0.3\sim1.5\ \text{GHz}$, 考虑采集系统采样频率限制及后续数据处理问题, 探头后端连接检波装置, 只记录和分析信号幅值及放电相位信息。

声信号测量选用变压器在线监测常用的外置压电式声传感器, 灵敏度为 $75\ \text{dB}$, 测量频带范围为 $20\sim200\ \text{kHz}$, 兼顾超声和可闻声频段, 后端连接信号放大器, 信号增益为 $40\ \text{dB}$ 。为了避免接触界面空气进入影响测量灵敏度, 通过耦合剂及外端加固方式将声传感装置安装在试验腔体外壳上。

2 试验方法及试验结果

2.1 试验方法

目前常用模拟沿面放电发展过程的加压方式

为恒压法和阶梯升压法, 阶梯升压法可以实现油纸复合绝缘材料性能的加速劣化, 与恒压法相比, 可以在更短的时间内进行多组重复测量, 大大提高了试验效率。因此, 本文选取阶梯升压法作为加压方式, 每加压 $0.05U_m$ 后($U_m=200\text{ kV}$), 在该电压下保持 2 min , 以常规脉冲电流法测量的视在放电量为基准参考并判断是否开始发生放电, 若未发生, 则继续加压 $0.1U_m$ 并保持; 若发生放电, 则改变加压间隔时间(10 min)和加压幅度($0.025 U_m$)进行加压; 加压过程中若缺陷发生击穿或者电压已经达到 U_m , 试验结束, 整体流程图如图 4 所示。

2.2 放电发展过程中各参量的典型特征

以现场在线监测常用的局放监测仪测量得到的视在放电电荷量大小为参考, 将放电发展过程分为放电初期($10\sim100\text{ pC}$)、放电中期($100\sim2000\text{ pC}$)、放电末期($2000\sim10\,000\text{ pC}$)及击穿前($10\,000\text{ pC}$ 以上)这 4 个时间段。表 1 列出了 4 个时间段下(具体阶段划分依据及方法将在 2.3 节介绍)脉冲电流、高频、特高频、声信号共 4 种典型参量的放电图谱。

在放电初期, 放电间隔时间较长, 随着电压升高, 放电量缓慢增大。多参量放电幅值主要集中在 90° 和 270° 上升沿附近, 此时整体放电幅值较小, 脉冲重复频率较低。放电信号在正负半周均有出现, 此时无明显相位分布特征。在这一时期, 特高频传感器测量的放电幅值与环境噪声的差值比高频 TA 和声传感器幅值差值变化明显, 高频 TA 测量的放电次数明显大于其余 3 类传感器, 与高频 TA 和特高频相比, 声传感器测量得到的放电次数较少, 这与放电信号的频带及感知原理有关, 这也导致时域方面不容易捕捉到放电信号。4 种传感器均能有效感知放电信号, 且在相位方面具有较好的一致性, 说明局部放电初期产生的多参量物理信号频带较宽。在现场故障诊断中当常用的局放监测仪受到较大干扰或者失效时, 可能存在误判或者漏判, 此时可以结合特高频幅值变化及高频 TA 放电次数综合判断, 提高放电早期故障感知的可靠性。

在放电中期, 随着电压升高和耐压时间增加, 放电稳定发展, 放电量和脉冲重复频率增长速度较稳定, 此时放电量已超过 100 pC , 4 种传感器放电相位逐渐拓宽, 多参量放电图谱均呈现 $45\sim135^\circ$ 和 $225\sim315^\circ$ 的类似于“兔耳朵状”相位分布特征。在这一时期, 特高频和高频 TA 测量得到的脉冲次数明显增多, 信号幅值也明显升高, 与视在放电电量测

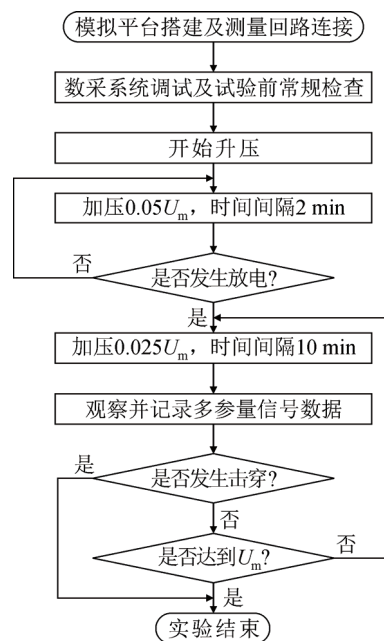


图 4 试验流程

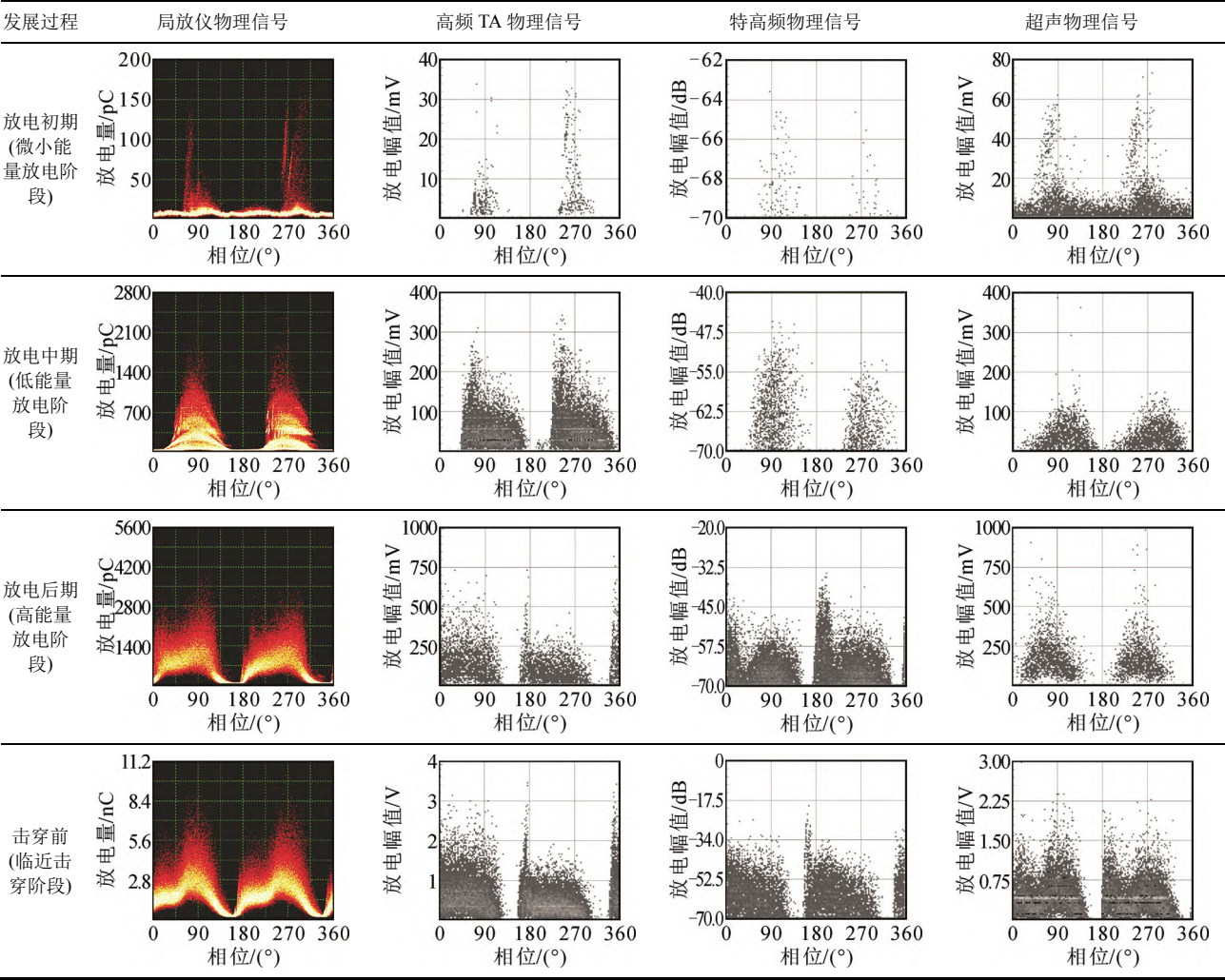
Fig.4 Testing process

量结果一致, 声传感器捕捉的放电信号依然较少, 正负半周差异性较上一阶段减弱, 放电幅值和次数呈对称分布, 其中高频 TA 测量得到的脉冲重复频率变化最明显, 峰值对应的相位逐渐从 90° 和 270° 左移为 45° 和 225° , 其余 3 种传感器峰值对应的相位未出现明显变化。在现场故障诊断中可以依据 4 种参量信号放电图谱的共同特征判断放电时期, 提高放电中期故障感知的准确性。

在放电后期, 此时间段的视在放电电量幅值和脉冲重复频率增长速度较上一阶段变化明显, 放电相位拓宽幅度更大, 与声信号不同, 脉冲电流、高频和特高频信号放电图谱整体均出现明显左移。放电相位主要分布在 $0\sim135^\circ$ 、 $180^\circ\sim315^\circ$ 以及 360° 附近。在该阶段中, 特高频测量到高幅值放电的时间间隔开始变长, 信号幅值集中在较低范围内, 但最大值持续增长。高频 TA 测量得到的放电时域信号较为密集, 各个信号的幅值略有差异, 但峰值已远远高于上一阶段。与脉冲电流信号测量结果的不同之处在于, 高频 TA 测得的信号在下降沿的分布较少。在该阶段中, 声信号的时域幅值明显增大, 呈现出多脉冲叠加的形式。随着外施电压等级和耐压时间逐渐增加, 视在放电电量幅值和脉冲重复频率较上一阶段出现激增, 3 种传感器测量的信号幅值同样呈现这种发展趋势, 幅值趋势存在明显增长拐点。4 种传感器放电图谱均呈现 $0\sim360^\circ$ 全相位分布, 随着

表 1 沿面放电下多参量信号的发展过程

Table 1 Parametric characteristics of the various stages of discharge along the surface



耐压时间的继续增加，特高频、高频、声信号幅值已接近满量程输出。

在击穿前，视在放电电荷量已超过 10 nC，持续的高能放电使纸板发生体击穿。

2.3 特征参量全过程变化规律及阶段划分

图 5 展示了交流电压下油纸绝缘放电发展过程中常规脉冲电流法测得的放电量最大值及放电脉冲重复频率随时间发展的演变趋势。由图 5 结果可知，在 0~15 min 时间段内几乎无放电；15~33 min 时间段内放电量最大值和脉冲重复频率缓慢增加，但增长趋势不明显；在 33~51 min 时间段内放电量最大值较上一时间段增长明显，脉冲重复频率呈现先增大后减小的趋势，这可能是因为油纸界面电离会形成很多气泡，气泡二次放电然后破裂使得放电脉冲重复频率先增加后逐渐减小；在 51~60 min 的时间段内，放电量最大值和放电脉冲重复频率先持续增

加，增长速度大于上一阶段，后突然激增，直至最后纸板击穿，说明沿面放电发展过程随着电压升高和耐压时间增加，放电量最大值和脉冲重复频率会出现明显阶跃现象。

图 6 展示了交流电压下油纸绝缘放电发展过程中高频 TA、特高频、声信号测得的信号幅值随时间发展的演变趋势。在整个放电发展过程中，3 种信号幅值的演变趋势与放电量最大值及脉冲重复频率大致相同，均呈现缓慢增加-增长速度加快-激增的现象。其中特高频信号在放电初期和中期幅值增长速度要大于高频信号及声信号，高频信号在放电后期幅值增长速度要高于特高频信号及声信号，说明对于油纸绝缘结构沿面放电发展过程而言，特高频传感器在放电中期可以更快地反映故障的发展速度，高频 TA 可以在放电末期更准确地反映故障的严重程度。

试验对油纸绝缘沿面放电发展过程 4 种传感器放电图谱及时域波形进行了采集,随着放电的逐渐发展,脉冲重复频率逐渐增大,在放电末期及击穿前放电图谱的相位已接近全相位分布,此时无法为故障预警提供有效准确的判断依据。结合变电站现场运维经验,因此采用最直接的多参量信号幅值作为表征放电的特征参量。取 4 种传感器初始值为基准值,取数据点(1, 2, 3, ..., n)4 种参量幅值作为表征放电的实际值;通过式(1)可得不同数据点多参量幅值融合归一化结果 M_n ,结果如图 7 所示。依据 M_n 存在缓慢增加、快速增加、出现拐点、激增的变化趋势,将变压器沿面放电的发展过程分为微小能量放电阶段、低能量放电阶段、高能量放电阶段、临近击穿阶段。传统单参量阶段划分方法依赖于单一信息测量的可靠性,在放电发展过程中受放电位置、传播路径、信号频带等原因影响,单一测量手段在放电某个阶段可能无法明显表征,本文提出的多参量信号幅值融合判断方法丰富了表征放电发展过程的参量信息,提升了阶段划分的可靠性和合理性。

$$M_i = \frac{a_i}{a_1} + \frac{b_i}{b_1} + \frac{c_i}{c_1} + \frac{q_i}{q_1} \quad (1)$$

式中: q_1 为视在放电电荷量初始值; q_i 为数据点 i 的视在放电电荷量($i=1, 2, 3, \dots, n$); a_1 、 b_1 、 c_1 分别为特高频信号、声信号、高频信号初始幅值; a_i 、 b_i 、 c_i 分别为数据点 i 的 3 种参量幅值(1, 2, 3, ..., n)。

本文以 2007 年某 500 kV 变电站 3 号主变发生故障导致绝缘击穿的套管末屏高频 TA 在线监测结果,及研究团队在 500 kV 真型变压器上开展的沿面放电逐级升压法试验的高频 TA 结果,对本文提出的阶段划分进行有效性验证(受篇幅限制,500 kV 真型变压器参数、缺陷布置方式等内容本文中不详细展开)。图 8 为某 500 kV 变电站 3 号主变发生故障导致绝缘击穿的在线监测结果,图 9 为研究团队在 500 kV 真型变压器开展的沿面放电故障实测结果。两者的发展过程均为前期缓慢稳定增长,后在某一时刻信号幅值出现拐点,然后幅值激增直至绝缘击穿,故障发展过程与本文基于等效模型获得的演变规律一致,说明了本文提出的故障发展过程及阶段划分的有效性和准确性。与多参量监测方法相比,依据单参量监测结果中信号幅值斜率变化,只能将故障发展过程划分为平稳增长阶段和激增阶段,对于故障早期发展过程的感知检出能力不足;信息单一,存在干扰及失效问题,导致数据置信度

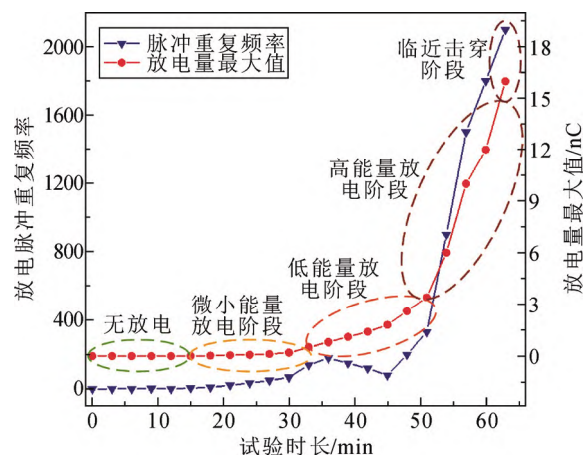


图 5 脉冲电流信号随时间的变化趋势

Fig.5 Trend of pulse current signal with time

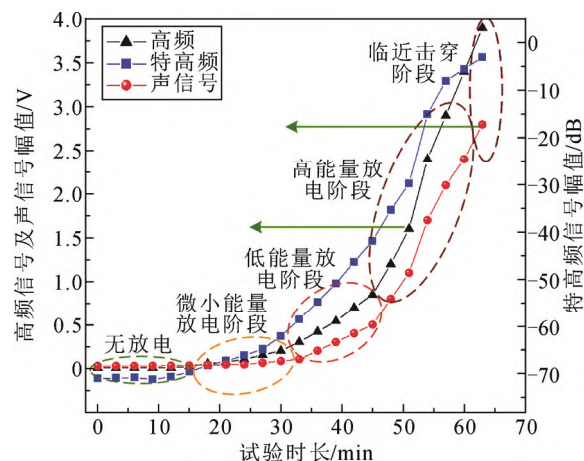


图 6 高频、特高频、声信号幅值随时间的变化趋势

Fig.6 Trend of HF, UHF, acoustic signal amplitude with time

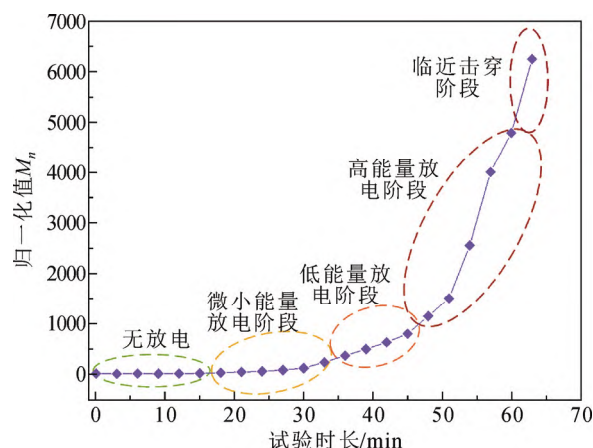


图 7 归一化值 M_n 随时间变化趋势

Fig.7 Trend of normalized value M_n with time

不足,现场运维人员无法根据单一参量监测在发生高能放电故障前将变压器及时停运。

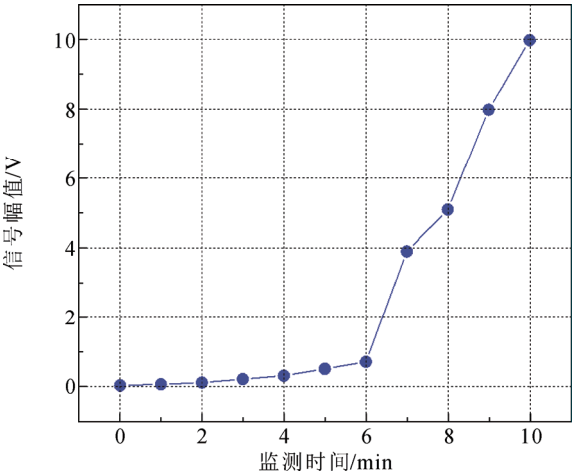


图 8 某 500 kV 变电站 3 号主变监测结果

Fig.8 Monitoring results of No. 3 main transformer in a 500 kV substation

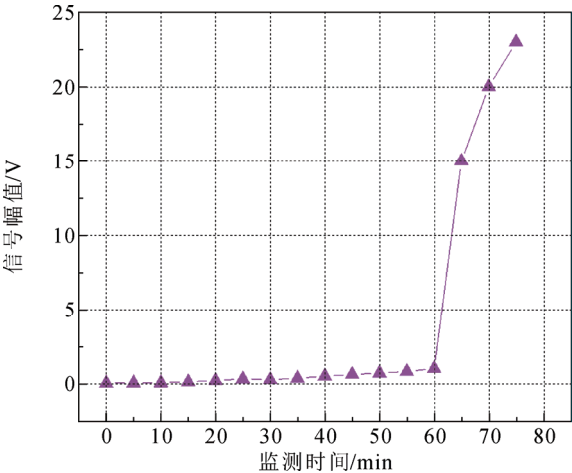


图 9 500 kV 真型变压器实测结果

Fig.9 Actual measurement results of 500 kV true type transformer

3 分析与讨论

本文设计的等效试验模型在各个时间段的视在放电量幅值均大于传统实验室小放电模型^[25], 放电发展过程更贴合变压器实际运行工况, 两者视在放电量幅值对比如表 2 所示。油纸绝缘的发展过程与缺陷附近周围的电场具有强关联性, 因此其发展阶段可以从微观油纸界面电荷分布及宏观油纸绝缘性能变化两个方面进行阐述。

在微小能量放电阶段, 电荷积聚量较少, 电场分布主要由外施电压和试样结构决定。纸板的垂直方向和纸板表面的水平方向都存在电场分量。然而, 由于纸板和变压器油的耐电强度较高, 放电比较弱, 并且放电程度随着外施电压的增加略有增大。此阶

表 2 2 种模型放电量幅值对比

Table 2 Comparison of the discharge amplitude of the two models

放电发展过程	等效模型放电电荷量/pC	传统模型放电电荷量/pC
微小能量放电阶段	10~100	5~20
低能量放电阶段	100~2000	20~500
高能量放电阶段	2000~10 000	500~2000
临近击穿阶段	>10 000	>2000

段, 放电量幅值、脉冲重复频率保持在较低的水平, 特高频幅值较其余感知手段变化明显, 说明微小能量放电主要以超高频带的电磁波形式呈现。高频 TA 测的放电重复频率明显高于其余 3 种传感器, 说明油纸界面积聚的空间电荷通过地电位不断转移消散。声信号受测量频带影响, 捕捉的放电次数较少, 幅值变化也不明显。在线监测中可以通过特高频幅值变化及高频 TA 放电次数综合判断放电处于微小能量阶段。

在低能量放电阶段, 电极附近会积聚大量负电荷, 这会一定程度削弱纸板内部和纸板表面由外施电压产生的电场强度, 并且此时纸板和变压器油的耐电强度仍然较高。但随着外施电压和耐压时间增加, 相比于第 1 个阶段, 放电程度有所增大, 但放电增长速度相对较稳定^[26]。此阶段, 由于电荷不断积累, 放电量幅值稳定增大且放电相位分布逐渐拓宽, 特高频、高频 TA、声信号幅值稳定升高, 4 种传感器放电图谱均呈现 45°~135°和 225°~315°的类似于“兔耳朵状”相位分布特征, 此时可以通过多参量信号放电图谱典型分布判断放电处于低能量放电阶段。

在高能量放电阶段, 持续的放电使放电能量逐渐累积, 引起绝缘纸板组成成分纤维素和变压器油的主要成分烷烃、烯烃、环烷烃、芳香烃的化学链断裂, 导致绝缘纸板和变压器油的耐电强度降低^[27]。这个阶段, 这些由于断裂产生的游离化学基团重新自由组合生成大量烃类气体, 加剧了放电的发展, 放电程度会逐渐加剧, 发展速度会变得更快。特别是在变压器内部电场不均匀位置, 会发生更剧烈的放电现象, 纸板表面及内部不断被高能量带电粒子轰击, 出现炭化痕迹。在这一阶段, 放电量最大值、脉冲重复频率、3 种声电参量信号幅值会出现明显分界点, 高频 TA 幅值增长速率最快, 已经达到了初始值的 100 倍左右, 放电声音逐渐增大, 声信号

幅值达到了初始值 50 倍左右,随着放电逐渐向纸板内部发展及大量气泡的不断产生,阻碍了电磁波的传播,因此特高频放电幅值增长程度在此阶段末尾逐渐变得平缓。在现场运维中,此时观察到放电量、脉冲重复频率、高频 TA 及声信号出现明显阶跃现象,应由变压器防御保护装置及时保护跳闸,或由现场人员及时将变压器停运,防止更严重的事故发生。

在临近击穿阶段,随着放电严重程度的加剧,当超过油纸复合绝缘结构的耐电强度时,绝缘纸板内部会产生大量气体,进而形成放电通道。电极附近油纸界面积聚的大量电荷会沿着放电通道快速泄放,导致放电量急剧增大,最终会在绝缘最薄弱点发生击穿,击穿痕迹实物图如图 10 所示。图 11 展示了上述讨论的放电各阶段的发展过程。

4 结论

1) 放电中期特高频信号较其他参量对故障感知速度更快,放电末期高频信号对故障的严重程度感知更明显,说明多参量信号联合检测方法较传统

单一参量监测方法更可靠准确。

2) 通过对沿面放电发展过程下放电电量最大值、脉冲重复频率及 3 种典型声电参量信号幅值变化规律的提取与分析,将沿面放电发展过程划分为微小能量放电阶段、低能量放电阶段、高能量放电阶段及临近击穿阶段。

3) 在高能量放电阶段,放电电量最大值、脉冲重复频率及 3 种典型声电参量信号幅值均会出现明显的增长分界点,当视在放电电量幅值为初始值的 1000 倍左右,高频信号幅值为初始值 100 倍左右、声信号幅值为初始值的 50 倍左右时,将变压器及时停运,能有效避免严重事故的发生。

参考文献 References

- [1] 齐波,冀茂,郑玉平,等. 电力物联网技术在输变电设备状态评估中的应用现状与发展展望[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3012-3031.
QI Bo, JI Mao, ZHENG Yuping, et al. Application status and development prospect of power internet of things technology in condition assessment of power transmission and transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3012-3031.
- [2] WADA J, NAKAJIMA A, MIYAHARA H, et al. Surface breakdown characteristics of silicone oil for electric power apparatus[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(4): 830-837.
- [3] SHROFF D H, STANNETT A W. A review of paper aging in power transformers[J]. IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution), 1985, 132(6): 312-319.
- [4] 李赛,黄猛,苏妍箫,等. 绝缘纸板介电与击穿性能匹配目标下的制备参数优化方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(3): 1015-1025.
LI Sai, HUANG Meng, SU Yanxiao, et al. Optimization of preparation parameters for cooperative objective of dielectric and breakdown properties of insulating paperboard[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1015-1025.
- [5] 黄猛,李怡然,吴延宇,等. 计及界面电荷和极性效应的油纸复合绝缘非线性电路等效模型[J]. 电工技术学报, 2024, 39(11): 3422-3432.
HUANG Meng, LI Yiran, WU Yanyu, et al. Equivalent model of non-linear circuit with oil paper composite insulation considering interface charge and polarity effects[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(11): 3422-3432.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 电力变压器 第 3 部分: 绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙: GB/T 1094.3—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Power transformers-part 3: insulation levels, dielectric tests and external clearances in air: GB/T 1094.3—2003[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2004.
- [7] 廖瑞金,严家明,杨丽君,等. 局部放电对油浸绝缘纸表面损伤特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 129-137.
LIAO Ruijin, YAN Jiaming, YANG Lijun, et al. Characteristics of partial discharge-caused surface damage for oil-impregnated insulation paper[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 129-137.
- [8] 黄猛,葛扬,单秉亮,等. TiO₂ 纳米粒子几何形貌对冲击电压下变压器油中流注发展速度的影响[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 3986-3993.
HUANG Meng, GE Yang, SHAN Bingliang, et al. Influence of TiO₂

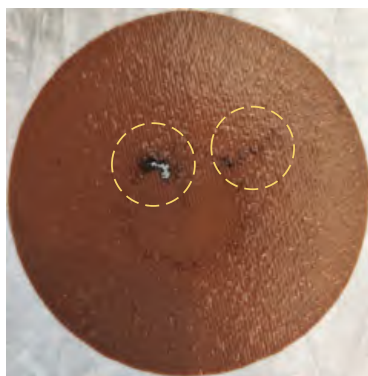


图 10 纸板击穿痕迹示意图

Fig.10 Diagram of pressboard breakdown trace

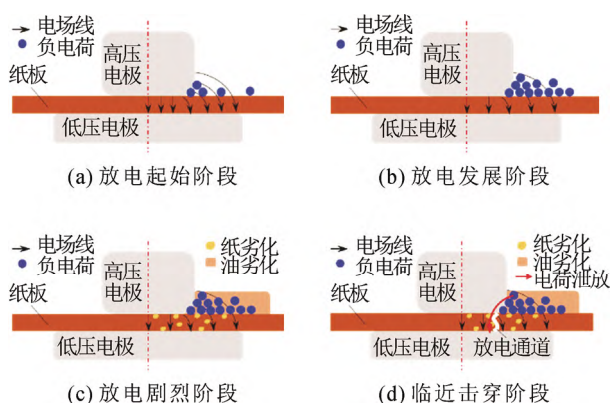


图 11 放电发展过程各阶段示意图

Fig.11 Diagram of the stages of the discharge development process

- nanoparticle's geometry on propagation velocity of streamers in transformer oil under impulse voltage[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3986-3993.
- [9] WECHSLER K, RICCITIELLO M. Electric breakdown of a parallel solid and liquid dielectric system[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, 1961, 80(3): 365-368.
- [10] YAMAMOTO H, UOZAKI S, HANAOKA R, et al. Creeping discharges in transformer oil under lightning impulse voltages over 100 kV peak value[C]//2008 IEEE International Conference on Dielectric Liquids. Chasseneuil, France: IEEE, 2008: 1-4.
- [11] 王 辉, 李成榕, 贺惠民, 等. 温度对油纸绝缘沿面放电发展过程的影响[J]. 高电压技术, 2010, 36(4): 884-890.
WANG Hui, LI Chengrong, HE Huimin, et al. Influence of temperature on developing processes of surface discharges in oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(4): 884-890.
- [12] 王维政, 闵连荣, 曹 斌. 变压器油中绝缘纸板沿面放电试验研究[J]. 变压器, 1993(2): 21-25.
WANG Weizheng, MIN Lianrong, CAO Bin. Experimental study on the surface discharge of oil-paper insulation in transformers[J]. Transformers, 1993(2): 21-25.
- [13] 宋翰林, 黄 猛, 姚园鑫, 等. 直流电压下油纸复合绝缘电场分布对击穿特性的影响[J]. 高电压技术, 2024, 39(11): 3422-3432.
SONG Hanlin, HUANG Meng, YAO Yuanxin, et al. Influence of electric field distribution on breakdown characteristics of oil-paper composite insulation under DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2024, 39(11): 3422-3432.
- [14] 李 元, 张冠军, 梁 钰, 等. 不同热老化程度下油纸绝缘沿面放电发展特性[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 923-930.
LI Yuan, ZHANG Guanjun, LIANG Yu, et al. Evolutionary characteristics of surface discharge within oil-paper insulation under different thermally aged conditions[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 923-930.
- [15] 沙彦超, 周远翔, 孙清华, 等. 直流电压分量对交直流叠加电压下油纸绝缘沿面闪络的影响[J]. 高电压技术, 2013, 39(6): 1337-1343.
SHA Yanchao, ZHOU Yuanxiang, SUN Qinghua, et al. Influence of DC voltage on creepage flashover of oil-paper insulation under composite AC and DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1337-1343.
- [16] 徐征宇, 汪 可, 孙建涛, 等. 直流电压下油纸绝缘局部放电发展过程的潜伏期特征[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 614-619.
XU Zhengyu, WANG Ke, SUN Jiantao, et al. Research on characteristics during latent period of partial discharge developing process under direct voltage of oil-paper insulation[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 614-619.
- [17] 王 伟, 薛 阳, 程养春, 等. 变压器油纸绝缘沿面放电程度的诊断[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1713-1718.
WANG Wei, XUE Yang, CHENG Yangchun, et al. Diagnosis of severity degree for power transformer oil-pressboard insulation surface discharge[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1713-1718.
- [18] 李军浩, 司文荣, 姚 秀, 等. 油/纸绝缘沿面局部放电特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(6): 108-112.
LI Junhao, SI Wenrong, YAO Xiu, et al. Partial discharge characteristics over oil/paper interface[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(6): 108-112.
- [19] 李 刚, 汪 可, 张书琦, 等. 变压器油纸绝缘沿面放电缺陷发展特征及阶段识别方法[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3451-3458.
LI Gang, WANG Ke, ZHANG Shuqi, et al. Evolution characteristics and stage recognition method of surface discharge defects of oil-paper insulation in transformer[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3451-3458.
- [20] 于 瑞, 高 波, 胡广才, 等. 油纸绝缘针板沿面放电模型白斑发展过程及放电特性[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 240-249.
- YU Rui, GAO Bo, HU Guangcai, et al. Development of white mark on pressboard surface and change of discharge characteristic parameters in needle-plane model[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 240-249.
- [21] 陈伟根, 杨剑锋, 凌 云, 等. 变压器油纸绝缘沿面放电特性及其产气规律[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(1): 94-99.
CHEN Weigen, YANG Jianfeng, LING Yun, et al. Surface discharge characteristics and gas generation law in oil-paper insulation of transformer[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(1): 94-99.
- [22] MITCHINSON P M, LEWIN P L, CHEN G, et al. A new approach to the study of surface discharge on the oil-pressboard interface[C]//2008 IEEE International Conference on Dielectric Liquids. Chasseneuil, France: IEEE, 2008: 1-4.
- [23] 薛 阳. 油纸绝缘沿面放电的发展过程及其严重程度的表征[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
XUE Yang. The development of partial discharges along oil-pressboard interface and their severity indicators[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2011.
- [24] Electrical strength of insulating materials-test methods: IEC 60243—1: 1998[S]. 1998.
- [25] 赵义焜, 张国强, 韩 冬, 等. 高频变压器用匝间绝缘材料沿面放电特性的实验研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(16): 3464-3471.
ZHAO Yikun, ZHANG Guoqiang, HAN Dong, et al. Study on surface discharge characteristics of inter-turn insulation materials in high-frequency transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(16): 3464-3471.
- [26] 刘 阳, 董 明, 邢亚东, 等. 油纸绝缘沿面放电多物理信号发展规律及阶段特征[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1611-1621.
LIU Yang, DONG Ming, XING Yadong, et al. Development law and stage characteristics of multi-physical signals of surface discharge in oil-paper insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1611-1621.
- [27] 周远翔, 姜鑫鑫, 陈维江, 等. 交直流复合电压下变压器油中电弧放电及产气特性[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1584-1589.
ZHOU Yuanxiang, JIANG Xinxin, CHEN Weijiang, et al. Arcing discharge and gas generation characteristics of transformer oil under combined AC and DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1584-1589.



JIANG Changming
Professor



HUANG Meng
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

江长明

1971—, 男, 教授级高工

主要从事电力系统运行与分析、电力系统自动化、
输变电技术、源网荷储调度控制的研究工作

E-mail: typ12312@163.com

黄 猛(通信作者)

1988—, 男, 博士, 副教授

主要从事电气设备绝缘在线监测与故障诊断、变
压器油纸绝缘、新型介电材料的研制与应用研究
工作

E-mail: huang_m2011@163.com

收稿日期 2023-08-09 修回日期 2024-04-09 编辑 曾文君