

不同油流速度下油纸绝缘的局部放电特性研究

栗 茂<sup>1</sup>, 李春茂<sup>1</sup>, 夏国强<sup>1,2</sup>, 吴晋媛<sup>1</sup>, 高 波<sup>1</sup>, 杨 雁<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756;  
2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211106)

**摘要:** 目前随着变压器容量的增大,大部分变压器采用增加流速的方式来加快散热,但是流速的增大对油纸绝缘局部放电也会造成一定影响。为此,本文搭建了油纸绝缘系统的局部放电实验平台,研究流速对油纸绝缘局部放电特性的影响机制。研究表明,通过对油流静止下的放电图谱和实验现象分析,将油纸绝缘局部放电的过程划分为5个阶段:起始、缓慢发展、过渡、快速发展和预击穿阶段,并发现从过渡阶段到快速发展阶段存在一个转折电压,标志局部放电发展到绝缘纸板内部。在此基础上开展了不同流速下的局部放电试验,发现油纸绝缘局部放电参数随油流速度呈先减小后增大的趋势,在放电初期,不同流速间对于放电的影响较小,随着放电发展阶段增加,流速间放电的差异逐渐明显。通过分析发现,电场强度和流速之间存在弱耦合关系,油纸绝缘局部放电水平的提升是电场强度和流速共同作用的结果,其结果导致放电后期的放电参数较前期更易受流速的影响。

**关键词:** 油流速度; 油纸绝缘; 油流带电; 转折电压; 外施电场

**DOI:** 10. 12067/ATEEE1807073      **文章编号:** 1003-3076(2019)07-0047-09      **中图分类号:** TM855

1 引言

变压器是电力系统中的关键设备之一,其运行的安全性关系着电力系统的安全和稳定,对于电能的传输有着极其重要的意义。变压器在运行过程中,由于运行年限的增加和自身在制造、运输、维护过程中造成的缺陷,往往会导致局部放电的发生,若忽略这种问题,局部放电会逐步发展为闪络和击穿,导致设备绝缘系统失效。目前变压器中主要的绝缘结构为油纸绝缘结构,因此研究油纸绝缘的局部放电具有重要的意义<sup>[1-3]</sup>。

变压器在不断的运行中,油纸绝缘在电、热、机械等作用下逐渐劣化,影响变压器的使用寿命。由于运行工况的不同,影响油纸绝缘放电的因素众多,国内外学者主要对水分、纸板老化、温度等方面做了大量的研究。文献[4,5]表明,绝缘纸板老化后会降低沿面放电的起始电压及闪络电压;文献[6]表明油纸绝缘的含水量越高,内部气体放电通道就越容易形成,进而使放电较易发展;文献[7]表明油温

的升高会降低沿面闪络电压,温度主要影响油纸绝缘老化的内在机理以及老化后绝缘材料的击穿特性。上述研究大部分忽略了油流影响,而近些年油流带电带来的变压器故障问题逐渐暴露出来,油流带电已经成为影响变压器安全运行的一个重要因素<sup>[8-10]</sup>。J. Gavi<sup>[11]</sup>和 A. J. Morin<sup>[12]</sup>分别提出流动的液体对油流带电的流动效应以及外施交流场对油流带电的电动效应,为研究油流带电奠定了一定的理论基础;哈尔滨理工大学的陈庆国等人研究了交流电压下的油纸绝缘油流带电特性,探讨了交流电压作用下冲流电流与油流带电影响因素之间的关系,结果表明,外施电压幅值、油流速度对油流带电具有重要影响<sup>[13,14]</sup>;唐炬教授团队通过搭建真实油道模型,研究了油流动状态下金属微粒和微气泡在电场力下的变形与放电特性<sup>[15]</sup>。可以发现,目前针对变压器油流的研究中,国内外主要开展油流带电理论以及影响因素的相关研究,部分学者的研究已经证明油流带电对于油纸绝缘的局部放电起到了十分明显的作用,但是仍缺乏对于放电发展过程影响

收稿日期: 2018-07-25  
作者简介: 栗 茂(1994-), 男, 重庆籍, 硕士研究生, 研究方向为高压电气设备在线监测与状态评估;  
李春茂(1963-), 男, 四川籍, 教授, 博士, 研究方向为高压电气设备在线监测与状态评估。

的更深一步研究。其中流速是改变油流带电的一个重要因素,因此研究流速对于油纸绝缘局部放电发展的影响十分有必要。

本文搭建了可调节油流速度的局部放电试验平台,对静止油流下的局部放电进行了新的阶段划分,在此基础上研究油流速度对绝缘系统的局部放电参数的影响,最后通过油流带电和局部放电相关内容对其机理进行分析。本文研究可为变压器的设计和运行维护提供一定的参考依据,提高变压器的使用寿命。

## 2 试验设计及试验装置

### 2.1 样品的制备

选择1mm厚的牛皮绝缘纸板和25#克拉玛依绝缘油组成试验所需油纸绝缘试样<sup>[16]</sup>。绝缘油在试验前放置在90℃真空环境下进行脱气,使其满足标准GB7600-2014。

为模拟绝缘纸板在变压器中的真实工作环境,绝缘纸板按如下步骤进行预处理:首先将厚度为1mm的绝缘纸板裁剪为直径100mm的圆形试样,对试样边缘进行打磨,消除边缘毛刺对测试结果的影响;纸板前期处理执行标准参照GB/T10580-2003,将绝缘纸板在90℃/50Pa的真空状态下干燥48h;然后真空注入处理过的变压器油,使绝缘纸板在40℃/50Pa的真空环境下浸油48h,得到的绝缘纸试样即可用于试验。

### 2.2 试验平台及试验模型

本文搭建的试验平台由高压控制单元、局部放电检测单元和测量单元三个部分组成,如图1所示。其中高压控制单元电源部分采用无局部放电变压器,消除电源对试样测试结果的干扰,其额定电压 $U_N=100\text{kV}$ ,额定功率 $S_N=10\text{kV}\cdot\text{A}$ ,背景干扰小于5pC。局部放电检测单元使用欧米科朗MPD600局放仪,具有较高灵敏度,能准确捕捉到放电过程中的放电信号,满足试验要求。

测量单元主要由循环泵、流量计、油箱、电极模型组成,如图2所示。通过循环泵使油在整个测量单元内循环流动,选用超声波流量计对管壁中的流量进行测量,通过换算得到此区间内的流速。

目前国内部分学者<sup>[17-20]</sup>在模拟局部放电时采用柱-板模型为试验电极,取得了不错的试验效果,因此本文延用以往经验,以柱-板模型为试验电极来模拟油流条件下的变压器中局部放电情况。

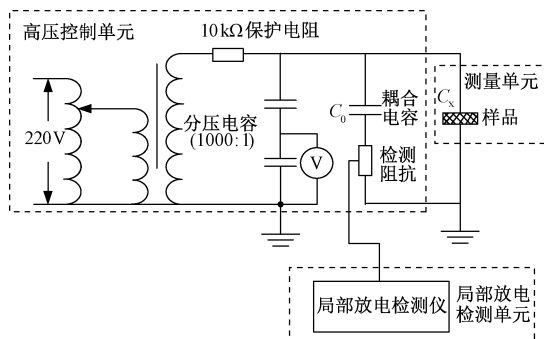


图1 放电检测单元

Fig. 1 Discharge detection unit

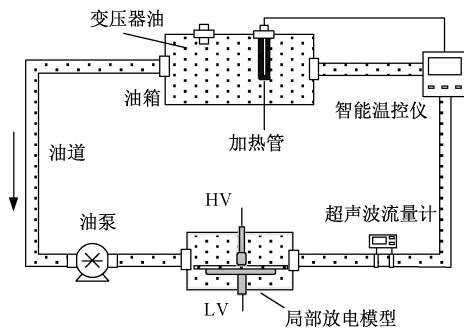


图2 测量单元

Fig. 2 Measurement unit

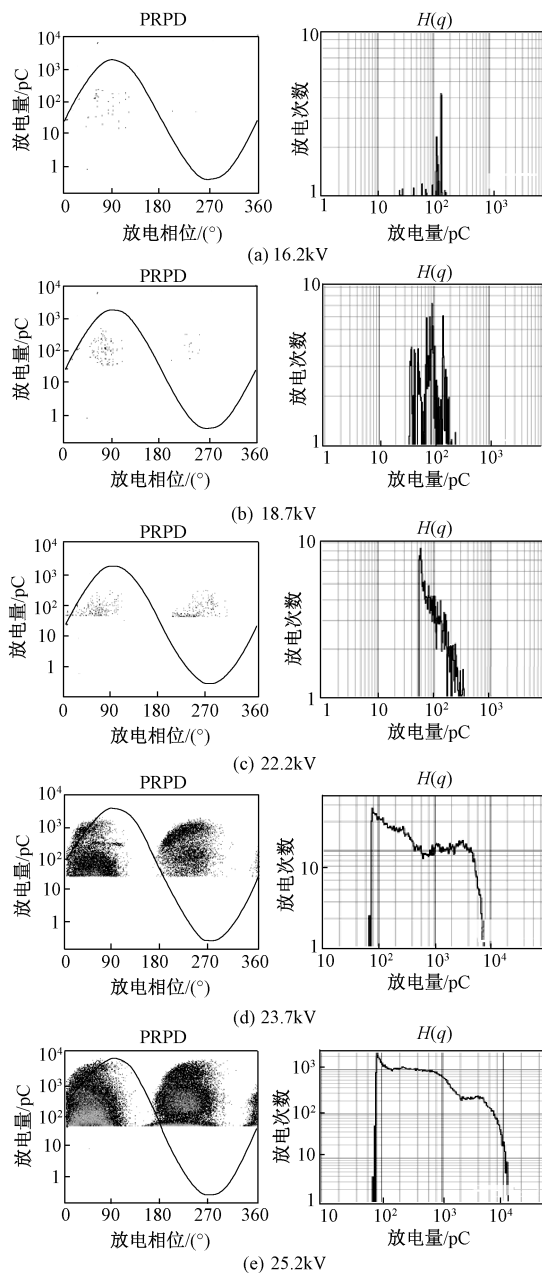
### 2.3 试验方法

温度为40℃,在每一个预设流速下进行局部放电试验。变压器采用逐步升压的方式,升压速度为0.5kV/s(有效值),每个电压下持续5min,直至试样被击穿。变压器中的油道油流速度一般在1m/s以内,但为了更突显流速影响以及为设计更高等级的变压器油道提供参考,本文扩大流速区间,选取0~1.6m/s范围内的流速进行试验。为消除试验的偶然性,选取经相同试验条件处理后的试样,每个流速下进行3组测试,取其平均值作为测量结果。

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 静止油流下的阶段划分

试验测得油流静止下放电发展过程的PRPD(Phase Resolved Partial Discharge)图谱和 $H(q)$ 图谱,如图3所示。其中PRPD图谱显示不同放电相位上出现的放电脉冲,而 $H(q)$ 图谱显示在整个放电过程中不同放电量出现的放电次数。根据局部放电的参数和试验现象,发现可以将局部放电过程分为更为细致的五个阶段:起始阶段、缓慢发展阶段、过渡阶段、快速发展阶段和预击穿阶段。

图3 放电过程的PRPD谱图和 $H(q)$ 图谱Fig. 3 PRPD and  $H(q)$  spectra of discharge process

在起始阶段, $H(q)$ 图谱中放电频次较高的地方主要集中在100pC附近,起始阶段放电次数少且幅值较小,PRPD图谱除第一象限外较空白,放电主要集中在 $30^\circ \sim 110^\circ$ 之间,放电具有不对称性。这时外施电压较低,对绝缘破坏微弱,变压器油和纸板的绝缘性能十分良好,放电所需的局部场强较高。此阶段并没有气泡产生,放电主要发生在柱电极附近的绝缘油中,以油中杂质放电、场致电离为主。

随着外施电压的增大,放电进入缓慢发展阶段。缓慢发展阶段的放电图谱逐渐呈现“ $\Delta$ ”型,且第三

象限内开始出现放电,放电逐渐向 $0^\circ \sim 90^\circ$ 和 $180^\circ \sim 270^\circ$ 扩展。 $H(q)$ 图谱中可看出不同放电量的放电次数较起始阶段整体增大,最大放电量逐渐增大到200~300pC之间。随着外施电压增大,纸板上吸附了一定的电荷,不仅畸化了电极附近的电场,并提供放电所需的一定电荷,这使放电水平增大。在柱电极边缘一圈,电场强度较高,首先发生放电,主要表现为绝缘纸板表面纤维素的烧灼,纸板表面出现黑色碳痕。

到了过渡阶段,PRPD图谱中放电相位扩展为 $0^\circ \sim 120^\circ$ 和 $180^\circ \sim 320^\circ$ ,并且放电出现了一定的对称性。 $H(q)$ 图谱中可以看出,随着放电的发展,较高幅值放电次数逐渐增加, $H(q)$ 图像逐渐向右移动,平均放电水平逐渐增大,最大放电量上升到300~400pC之间。当放电发展到该阶段时,放电逐步从纸板表面发展到纸板内部,导致纸板内部的纤维素被烧灼,有一定的气体产物出现。在此阶段内,绝缘介质内部的电场分布与其介电常数成反比关系,绝缘油的介电常数是气泡介电常数的两倍以上,而气泡的耐电场强度却比绝缘油低很多,因此气泡较绝缘油更容易发生放电。其放电粒子的强氧化性导致纤维素断裂,使绝缘纸板内部容纳更多的气泡,放电在绝缘纸板内部迅速发展。放电通道一旦形成,放电很快进入快速发展阶段,因此过渡阶段持续的时间很短,标志着放电从纸板表面转向绝缘纸内部。

快速发展阶段与过渡阶段放电的PRPD图谱相比变化十分明显,在 $0^\circ \sim 150^\circ$ 和 $180^\circ \sim 330^\circ$ 的相位内出现了放电,放电具有对称性。此阶段的放电量和放电重复率呈指数增加,从 $H(q)$ 图可看出,最大放电量上升到纳库,高幅值放电重复率整体增加,平均放电水平较上一阶段呈指数增加。放电在此阶段时,绝缘纸板绝缘薄弱的位置溢出大量气泡,并伴随着放电声音。快速发展阶段的放电对于绝缘的破坏很强,可能造成不可逆的绝缘损伤。

当快速发展阶段持续一段时间后,该阶段的最大放电量达到10nC左右,放电相位从第一、三象限逐步向第二、四象限延伸,最终占满整个相位,本文称为预击穿阶段,如图3(d)所示。绝缘纸内部放电通道的纤维素不断被分解,产生的气体和产物会排到绝缘油中。试验中可以看到大量的气泡,以及绝缘油变浑浊的现象。

在临近击穿时,通道内可供放电分解的纤维素减少,因此在放电击穿前的很短时间内,各放电参数



没有明显增长。试验中可以观察到在该阶段中持续产生的大量气泡在临近击穿之前减少,当电压升至 26kV 时,绝缘纸板随之发生贯穿性击穿,在击穿的一瞬间产生大量气泡,彻底丧失绝缘性能。

3.2 不同流速下的放电特征参数

3.2.1 平均放电量的变化规律

在不同流速下进行局部放电试验,选取 0m/s、0.4m/s、0.8m/s、1.2m/s、1.6m/s 等流速进行分析。图 4 为不同油流速度下放电过程中平均放电量随加压时间的变化曲线。基于 3.1 节放电阶段的划分,本节划分出平均放电量的放电发展阶段大致范围。从图 4 中可以看出,平均放电量随着流速增加呈现出先减小后增大的趋势,且随放电时间增加不同流速曲线总体走势一致。在起始阶段,起始放电电压(Partial Discharge Inception Voltage, PDIV)随着流速的增加同样呈现先增加后减小的趋势,如表 1 所示。其中 0.8m/s 为分界速度,流速小于 0.8m/s 时起始放电电压随着流速的增大呈增大趋势,当达到 0.8m/s,PDIV 开始随着流速增大而降低。在缓慢发展阶段,不同流速下平均放电量均缓慢增长,但该阶段持续时间受流速变化影响明显,0.8m/s 下缓慢发展阶段最长,1.6m/s 下缓慢发展阶段最短。这两个阶段平均放电量的变化趋势并不明显,但随着外施电压的持续上升,放电量的变化趋势逐渐增大。在过渡阶段与快速发展阶段间有一个明显的转折点,本文将该点所对应的放电电压称为转折电压。转折电压体现了局部放电发展到绝缘纸板内部,标志着放电进入迅速发展过程,从宏观上转折电压后放电开始涌现大量气泡并伴随着尖锐的放电声。

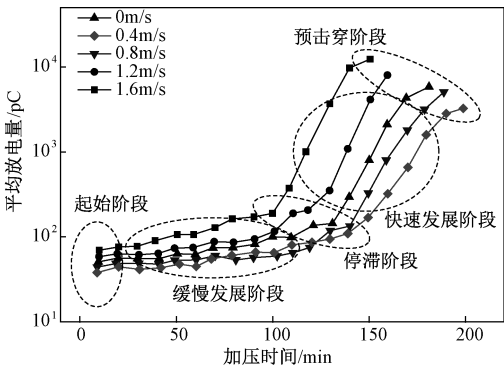


图 4 不同流速下平均放电量随时间变化图  
Fig. 4 Average discharge capacity over time at different flow rates

本文提取转折电压作为表征放电发展到纸板内部的特征参量,如表 1 所示。从表 1 中可以看出转

折电压与 PDIV 呈现的规律一致,同样随油流速度的增加呈现先升高后降低的趋势。这说明油流运动不仅对纸板表面放电具有影响,对纸板内部放电同样具有一定影响。油流带电等因素改变电场分布和电荷运动,导致放电过程中整个试样局部电场都发生了畸变。当放电进入快速发展阶段后,平均放电量呈指数增大,不同流速对于平均放电量的改变也在增大。由此可见,流速对于平均放电量的影响随着放电过程的发展而逐渐增强。

表 1 不同流速下的起始电压和转折电压

油流速度/(m/s)	at different flow rates				
	0	0.4	0.8	1.2	1.6
PDIV/kV	16.2	16.6	16.4	16	15.6
转折电压/kV	22.2	23.6	22.9	21.5	20.6

3.2.2 最大放电量的变化规律

图 5 为不同油流速度下放电过程中最大放电量随外施电压时间的变化曲线。从图 5 中可以看出,随着外施电压时间的增加,不同流速下最大放电量曲线的总体规律一致,均呈现上升趋势。而随着油流速度的增加,最大放电量呈现出先减小后增大的趋势。在起始放电阶段,流速对于最大放电量的改变较小,不同流速的最大放电量维持在 200pC 附近。随着电压的升高,油流速度为 1.6m/s 的最大放电量增加相较于其他流速快,在放电 80min 达到 1000pC,在放电持续 90min 后进入快速发展阶段。最大放电量的变化曲线中也出现明显的转折点,且随着流速的变化转折电压也呈现先增大后减小的趋势,与平均放电量的变化趋势类似。

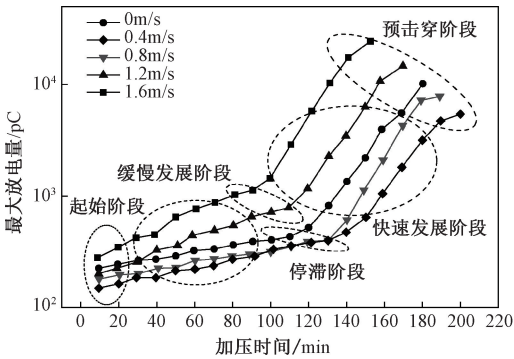


图 5 不同流速下最大放电量随时间变化图  
Fig. 5 Maximum discharge capacity over time at different flow rates

当达到快速发展阶段时,最大放电量达到纳库级别,不同流速下最大放电量的变化也明显增大。

在放电预击穿阶段,不同流速下最大放电量为:10174pC、5423pC、7819pC、14669pC 和 24360pC,流速对最大放电量的影响随着放电发展过程增加明显加强。在放电后期,最大放电量呈现指数增加,且放电发展程度越深,流速对最大放电量产生的影响就越大。

### 3.2.3 放电重复率的变化规律

放电重复率表征一段时间内放电的频次,可以反映发生连续放电的时间间隔和放电的密集程度。图 6 为不同油流速度下放电过程中放电重复率随加压时间的变化曲线。可以看出,在不同流速下,随着外施电压时间的逐步增加,放电重复率总体呈上升趋势。在放电发展前期,放电重复率增长幅度不大,除油流速度为 1.6m/s 明显增大,其他流速下重复率变化不明显。这是由于起始阶段,油纸绝缘系统绝缘性能良好,所需放电的局部场强较高,而此时外施电压较低,柱电极附近纸板表面电荷堆积很少,无法持续发生放电,因此起始放电电压基本不随流速的改变而改变。而随着放电的发展,放电产生的气泡等产物很快被油流带走,对于下一次放电具有促进作用,因此高流速放电重复率高于低流速放电重复率。

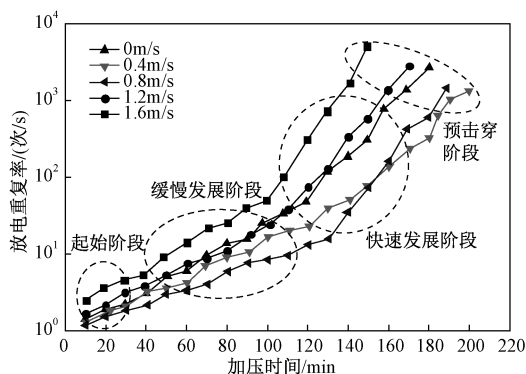


图 6 不同流速下放电重复率随时间变化图

Fig. 6 Discharge repetition rate changes with time at different flow rates

随着加压时间的增加,流速对于放电重复率的影响明显增强,放电重复率较起始阶段提高了一个数量级,并随流速呈现先减小后增大的规律。同放电量变化趋势一致,放电重复率在放电发展过程中也存在转折点,结合 3.2.1 节和 3.2.2 节分析可知,平均放电量、放电重复率、最大放电量的转折点基本一致,这是由于转折电压标志着放电发展进入纸板内部,放电进入更为剧烈的过程,因此转折电压后的

各种放电参数均呈现指数增长。在放电快速发展和预击穿阶段,随着电压的增加,放电重复率较之前阶段呈指数增加,迅速增大到缓慢发展阶段的两个数量级。不同流速下的放电重复率分别为 2709 次/s、1562 次/s、1389 次/s、3088 次/s 和 5059 次/s,放电后期流速对于放电重复率的影响明显强于放电前期。

综合上述放电参数的分析,最大放电量、平均放电量 and 放电重复率等放电参数都随油流速度呈先减小后增大的趋势,且放电后期的变化趋势明显大于放电前期的变化趋势。

### 3.3 不同油流状态下机理分析

#### 3.3.1 流速的影响机理

图 7 为未施加电压时的油纸界面电荷图,由于两种材料对电子束缚能力的差异,将会在绝缘纸和绝缘油界面处发生电子转移,在油纸绝缘中形成双电层。其中油流的流动作用将一部分双电层内的正离子(+q)剥离界面,形成冲流电流。而正离子的剥离导致界面处负离子(-q)过剩,这些负离子由于失去库仑力束缚而向内扩散形成扩散电流,界面处相应位置会再次起电形成新的正负离子对,将油流带走的绝缘油中正电荷和绝缘纸扩散负电荷进行补充。上述过程不断重复,最终达到平衡。此时在绝缘油中形成稳定的冲流电流,并在绝缘纸板内形成同等的扩散电流。扩散电流中带电粒子对纸板进行撞击,纸板内部出现破坏,导致电场畸变,容易产生局部放电。而冲流电流一方面影响扩散电流,另一方面导致模型内部电场畸变,促进局部放电发生。

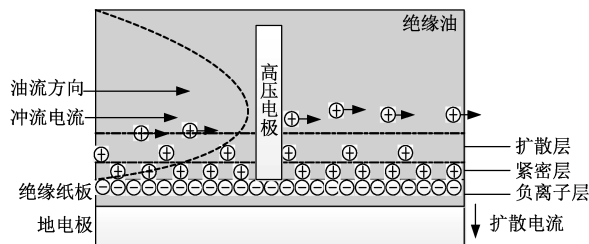


图 7 油流作用下油纸界面电荷分离

Fig. 7 Oil-paper interface charge separation under oil flow

冲流电流的大小和绝缘油的流动状态密切相关。绝缘油的流动状态主要有三种:层流、湍流以及层流向湍流的过渡状态。由于过渡状态油流更为复杂,因此产生油流带电量更大。当油流处于湍流时,冲流电流与流速成 2 次方比例关系;油流处于层流

向湍流的过渡时,冲流电流与流速成 2~5 次方的比例关系<sup>[21,22]</sup>。本文试验的流速设置为 0 ~ 1.6m/s,表 2 为不同绝缘油的速度区间。由表 2 可知,油流状态处于层流向湍流的过渡状态。

表 2 绝缘油的临界平均流速

Tab. 2 Critical average flow rate of insulating oil			
油流状态	层流	过渡状态	湍流
平均流速/(m/s)	<1. 03	1. 03~2. 06	>2. 06

当绝缘油从静止到流动时,由于油流速度较低,变压器油的流动状态为层流,油流对于油纸界面的剪应力较小,油流带电程度较低,对放电造成的影响很小。但是由于绝缘油流动,柱电极附近绝缘纸表面的电荷无法堆积,在油流曳引力作用下被带走,并且由于绝缘油的流动,导致放电流注的形成受到了阻碍。因此,低流速下放电量和重复率等数据较静止下减小。随着油流速度提升到 0.8m/s,绝缘油仍处于层流阶段,流速对于冲流电流的影响呈线性,改变的幅度不大。但由于油流速度的增加使油流曳引力作用进一步加强,绝缘纸板表面电荷仍无法积聚,油流对于放电流注的影响也在增大。通过试验数据可知,流速为 0.8m/s 下的放电参数仍小于静止油流下的放电参数,但是相比 0.4m/s 和静止下的放电数据,下降的幅度在减少。本文认为造成低流速下放电参数减小的原因是由油流引起的放电阻碍作用在此流速区间仍大于放电增强作用,而随流速的增大,两者间的差距正逐渐减小。当油流速度达到 1.2m/s 时,超过临界平均流速 1.03m/s,油流为层流向湍流的过渡状态,此时随流速的增加,油流带电量呈 2~5 次方的比例增长,油流带电量较 0.8m/s 下明显增大。从试验数据可以得到,流速为 1.2m/s 下的放电参数整体较 0.8m/s 下增大,并且高于静止下的放电参数,这说明在此流速下油流造成的增强作用已经大于其造成的阻碍作用。当流速达到异常流速 1.6m/s 时,仍处于层流向湍流的过渡状态,但相比其他流速下,此流速下的油流带电量增大幅度更大。这是因为虽然在较高流速下,油流对于放电的阻碍作用也在进一步增强,但是由于油流带电量的高速增长,油流所造成的增强作用已经远大于阻碍作用,因此在流速为 1.6m/s 下的油纸绝缘放电参数较其他流速下增大明显。另外,电场强度对局部放电的影响也不容忽视<sup>[23-25]</sup>。由于油流带电造成与电极接触油纸界面处油侧的场强产生了严重畸变,因此,高流速下的冲流电流所引起的局部电场

畸变也是引起放电增强的原因之一。

3.3.2 电场的影响机理

当在样品两端外施电场后,绝缘油中扩散离子会受到电场力的作用。由于界面处分子间的束缚作用较强,电场主要影响远离界面离子的运动,正负离子的分离速率仍由绝缘油的剪切力所决定。当外施电压较低时,绝缘纸板内的负离子在电压的负半周期向外扩散,而由于低电压下扩散距离有限,在正半周期离子又在电场力的作用下回到油纸界面处。如此反复迁移,油流带电量 and 未施加电场下无明显变化。而当外施高电压时,在负半周绝缘纸板内负离子的扩散距离足够,可以扩散到地电极,为了补充被油流带走的正离子和扩散离开界面的负离子,这些位置随后再次产生新的正负离子,达到动态平衡,因此在油纸界面处会重新起电,在油流的剪切力作用下继续分离。因此,外施电场强度的上升增大了正负离子的扩散作用。在外施高电场下,纸板中负离子的扩散电流和电场的关系为:

$$I_d(t) = \frac{q}{\delta^-} b_i^- E_p(t)$$

(1)

式中, $I_d(t)$  为扩散电流; $b_i^-$  为负离子的扩散速率; $E_p(t)$  为外施交流电场场强; $q$  为负离子数量; $\delta^-$  为负离子层厚度。

外施电压的幅值  $U$  与场强  $E_p(t)$  的关系为:

$$E_p(t) = \frac{\varepsilon_{oil} U \sin \omega t}{2(\varepsilon_{oil} L + \varepsilon_p a)}$$

(2)

式中, $\varepsilon_{oil}$  为绝缘油相对介电常数; $\varepsilon_p$  为绝缘纸相对介电常数; $L$  为绝缘纸厚度; $a$  为油隙宽度; $\omega$  为角频率。

联立式(1)、式(2)可得:

$$I_d(t) = \frac{q b_i^- \varepsilon_{oil} U \sin \omega t}{2 \delta^- (\varepsilon_{oil} L + \varepsilon_p a)}$$

(3)

从式(3)中可以看出,在外施加高电场的情况下,扩散电流和外施电场的幅值  $U$  呈线性关系,而扩散电流等于冲流电流,因此冲流电流随着外施电压的增加逐渐增大。但由于油纸局部放电过程中影响因素间相互促进,冲流电流随外施电压实际呈现一种指数增长的关系。本文中,在外施电场增大到 16~20kV 区间后,油纸绝缘放电参数在不同油流下造成的影响迅速增大,本文认为该区间流速对放电参数影响的增大与外施电压达到油流带电的突变值有关,即油流带电随外施电压的突变是引起后期放电增强的原因之一。



### 3.3.3 流速和电场耦合影响机理

三维拟合放电平均水平随着流速和外施电压的变化规律,如图 8 所示,其中平均放电量的单位为 pC。从图 8 可以看出,当外施电压时长较短时,平均放电量随油流速度变化不明显。当外施电压持续时间达到 50min 以后,即放电电压达到 18kV 左右时,油流速度对于放电量的影响开始逐渐明显;持续时间达到 100min 以后,随着油流速度的变化,平均放电量出现指数型变化。即在外施高电场下,放电量与电场的幅值呈现出指数型的增长关系。油流对油纸绝缘局部放电参数的影响在放电前期变化不明显,但随着放电过程的发展,影响逐渐明显。结合外施电压对油流带电的分析可知,低电压下冲流电流与未施加电压下的冲流电流基本相同,当电压幅值达到一定值后,如式(3)所示,冲流电流与电压呈线性的关系。即随着电压的增大,油流速度引起的油流带电量逐渐增大,而较高的油流带电量又会引起局部电场的畸变,从而进一步加强油流带电效应,二者的关联导致试验中放电后期的放电数据较前期受油流状态影响更为明显。

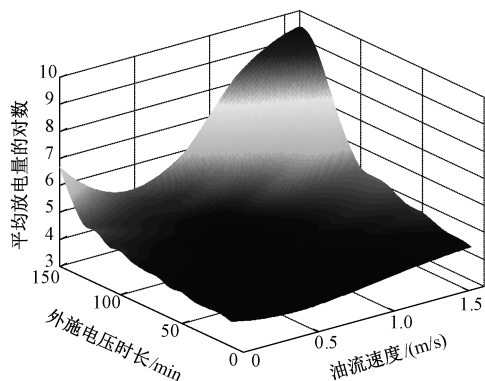


图 8 放电影响因素的三维拟合曲面

Fig. 8 Three-dimensional fitting surface of discharge influencing factors

## 4 结论

本文结合实际变压器安全运行的需求,考虑油流对变压器绝缘结构的影响,开展了不同流速下的油纸绝缘系统局部放电实验。通过对试验结果分析得到以下结论:

(1)将油纸绝缘局部放电过程分为 5 个阶段,分别为起始、缓慢发展、过渡、快速发展和预击穿阶段。其中从过渡阶段到快速发展阶段存在一个转折电压,标志局部放电发展到绝缘纸板内部。

(2)油纸绝缘局部放电参数随油流速度呈先减小后增大的趋势。在放电初期,流速对于放电的影响较小,随着放电过程的发展,流速间放电的差异逐渐明显。

(3)电场强度和流速存在弱耦合作用,局部放电水平的提升是电场强度和流速共同作用的结果,其导致放电后期的放电参数与前期比较受流速影响更大。

### 参考文献 (References):

- [1] 池明赫 (Chi Minghe). 运行条件对复合电场下油纸绝缘击穿特性的影响 (Effect of operating conditions on dielectric breakdown characteristics of oil-paper under composite electric field) [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学 (Harbin: Harbin University of Science and Technology), 2015.
- [2] Wechsler K, Riccitiello M. Electric breakdown of a parallel solid and liquid dielectric system [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1961, 80 (3): 365-368.
- [3] 周远翔, 李光范, 黄猛 (Zhou Yuanxiang, Li Guangfan, Huang Meng). 交直流复合电场中直流电压分量对油纸绝缘沿面放电过程的影响 (The influence of DC voltage component on the surface discharge process of oil-paper insulation in AC DC composite electric field) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2015, 41 (9): 3082-3090.
- [4] Dai J, Wang Z D, Jarman P. Creepage discharge on insulation barriers in aged power transformers [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2010, 17 (4): 1327-1335.
- [5] Dai J, Wang Z D, Jarman P. Moisture and aging effect on the creepage discharge characteristics at the oil/transformer-board interface under divergent field [A]. 2008 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena [C]. 2008. 662-665.
- [6] 王伟 (Wang Wei). 老化与水分对油纸绝缘沿面爬电的影响 (Effects of aging and moisture on the surface climbing of oil-paper insulation) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2012.
- [7] 王辉, 李成榕, 贺惠民 (Wang Hui, Li Chengrong, He Huimin). 温度对油纸绝缘沿面放电发展过程的影响 (Influence of temperature on the development process of surface discharge of oil-paper insulation) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2010, 36 (4): 884-890.

- [8] 陈小龙 (Chen Xiaolong). 复合电场下换流变压器典型绝缘结构油流带电试验研究 (Study on the oil-current charged test of typical insulation structure of converter transformer under composite electric field) [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学 (Harbin: Harbin University of Science and Technology), 2013.
- [9] Li S, Gao B, Wu G. Influences of oil flow speed and temperature on partial discharge properties in transformer oil [A]. 2016 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC) [C]. 2016. 1-4.
- [10] 刘知远 (Liu Zhiyuan). 流动状态下绝缘油中气泡放电特性及影响因素研究 (Study on bubble discharge characteristics and influencing factors of insulating oil under flowing condition) [D]. 重庆: 重庆大学 (Chongqing: Chongqing University), 2016.
- [11] Gavis J, Koszman I. Development of charge in low conductivity liquids flowing past surfaces: A theory of the phenomenon in tubes [J]. Journal of Colloid Science, 1961, 16 (4): 375-391.
- [12] Morin A J, Zahn M, Melcher J R. Fluid electrification measurements of transformer pressboard/oil insulation in a Couette charger [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1991, 26 (5): 870-901.
- [13] 陈庆国, 高源, 池明赫 (Chen Qingguo, Gao Yuan, Chi Minghe). 直流电场下典型油纸绝缘结构油流带电特性 (Study on oil flow characteristics of typical oil-paper insulation structures under DC electric field) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2014, 40 (4): 995-1001.
- [14] 陈庆国, 林林, 高源 (Chen Qingguo, Lin Lin, Gao Yuan). 换流变压器中典型平板油纸绝缘结构的油流带电特性 (Characteristics of oil flow in a typical flat oil-paper insulation structure in converter transformer) [J]. 电机与控制学报 (Electric Machines & Control), 2015, 19 (2): 14-19.
- [15] 张明君 (Zhang Mingjun). 流速对绝缘油中金属微粒放电的影响机制 (Effect of flow rate on discharge of metal particles in insulating oil) [D]. 重庆: 重庆大学 (Chongqing: Chongqing University), 2016.
- [16] 李军浩, 司文荣, 姚秀 (Li Junhao, Si Wenrong, Yao Xiu). 油/纸绝缘沿面局部放电特性研究 (Partial discharge characteristics of oil/paper insulation surface) [J]. 西安交通大学学报 (Journal of Xi'an Jiaotong University), 2009, 43 (6): 108-112.
- [17] 薛阳 (Xue Yang). 油纸绝缘沿面放电的发展过程及其严重程度的表征 (Characterization of development and severity of creeping discharge of oil-paper insulation) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2011.
- [18] 金福宝, 周远翔, 黄建文 (Jin Fubao, Zhou Yuanxiang, Huang Jianwen). 温度对交直流复合电场下油纸绝缘沿面放电特性的影响 (Effects of temperature on the surface discharge characteristics of oil-paper insulation under AC-DC hybrid electric field) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2017, 43 (3): 931-939.
- [19] 谢军 (Xie Jun). 变压器油纸绝缘局部放电劣化规律及诊断方法 (Partial discharge deterioration law and diagnostic method of transformer oil-paper insulation) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2016.
- [20] 李清泉, 李斯盟, 司雯 (Li Qingquan, Li Simeng, Si Wen). 基于局部放电的电力变压器油纸绝缘状态评估关键问题分析 (Analysis of key problems in oil-paper insulation state assessment of power transformers based on partial discharge) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2017, 43 (8): 2558-2565.
- [21] 涂愈明 (Tu Yuming). 超高压变压器油流静电带电的计算模型及实验研究 (Calculation model and experimental study of electrostatic charging of ultra-high voltage transformer oil flow) [D]. 北京: 清华大学 (Beijing: Tsinghua University), 1998.
- [22] 陈庆国, 董振鹏, 林林 (Chen Qingguo, Dong Zhenpeng, Lin Lin). 温度对交直流叠加电场下油纸绝缘油流带电的影响 (Influence of temperature on the charging of oil-paper insulated oil flow under AC and DC superimposed electric field) [J]. 电机与控制学报 (Electric Machines & Control), 2018, 22 (5): 35-41.
- [23] 周远翔, 周仲柳, 沙彦超, 等 (Zhou Yuanxiang, Zhou Zhongliu, Sha Yanchao, et al.). 交直流复合电压下油纸绝缘典型缺陷局部放电发展阶段评估 (Assessment of stages of partial discharge process of typical oil-paper insulation defect under combined AC-DC voltage) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (6): 50-57.
- [24] 李康, 郭润睿, Hassan Javed, 等 (Li Kang, Guo Runrui, Hassan Javed, et al.). 空气局部放电衍生物气体生成规律的研究 (Study of air by-products formation characteristics under corona discharge) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (8): 1-7.
- [25] 周远翔, 黄欣, 黄猛, 等 (Zhou Yuanxiang, Huang Xin, Huang Meng, et al.). 温度对油纸绝缘空间电荷消散特性的影响 (Influences of temperature on space charge dissipation in oil-paper insulation) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (8): 1-7.



ing and Energy), 2018, 37 (7): 1-8.

## Study on partial discharge characteristics of oil-paper insulation under different oil flow rates

SU Mao<sup>1</sup>, LI Chun-mao<sup>1</sup>, XIA Guo-qiang<sup>1,2</sup>, WU Jin-yuan<sup>1</sup>,  
GAO Bo<sup>1</sup>, YANG Yan<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. Nanjing Nanrui Jibao Electric Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

**Abstract:** At present with the increase of transformer capacity, most transformers speed up heat dissipation by increasing the oil flow rate, but which will also have a certain impact on partial discharge of oil-paper insulation. To study the influence mechanism of flow rate on partial discharge characteristics of oil-paper insulation, a partial discharge experimental platform is set up. The results show that the process of partial discharge of oil-paper insulation can be divided into five stages: initial phase, slow development, transition, rapid development, and pre-breakdown stage through the analysis of discharge patterns and experimental phenomena of static oil flow. From the stagnation stage to the rapid development stage, there is a turning voltage, which indicates that the partial discharge develops into the interior of the insulation board. On this basis, partial discharge tests at different flow rates are carried out, and it is found that the partial discharge parameters of oil-paper insulation first decrease and then go up with the increasing oil flow rate. In the early stage of discharge, the influence of different flow rates on the discharge is slight. With the progress of the discharge development stage, the difference between the flow rates is gradually obvious. By analyzing, there is a weak coupling between the electric field intensity and flow rate, which is the reason of the increase of the partial discharge level. Besides, the discharge parameters at the later stage are more affected by the flow rate than the previous period.

**Key words:** oil flow rate; oil-paper insulation; oil flow charged; turning voltage; applied electric field