

# 正负极性雷电冲击作用下棕榈油绝缘油的流注传播和击穿特性试验研究

杨丰帆, 余 强, 孙金莉, 罗 浪, 武晓蕊, 赵泽予

(国网湖北省电力有限公司检修公司, 湖北 武汉 430050)

**摘要:** 相比于矿物油, 天然酯绝缘油具有生物降解性高、无毒、耐火性强等优点, 具有替代电力变压器中矿物绝缘油的潜力。本研究建立了一套包括高速图像采集系统、试验电源以及电信号测量系统的绝缘油雷电冲击放电特性试验系统, 针对较为常见的棕榈油绝缘油和电力变压器中常用的矿物油, 进行正、负极性雷电冲击放电特性试验研究。对比分析正、负极性雷电冲击作用下两种油中的流注停止长度、发展速度、间隙击穿特性。结果表明: 在相同的外加电压水平和极性下, 相比于矿物油, 棕榈油绝缘油中的流注停止长度较长, 流注发展速度较快; 棕榈油绝缘油中的维生素 A 和维生素 E 含量对流注停止长度、速度和击穿电压没有影响; 正、负极性电压下流注发展特性和击穿特性的差异主要来源于绝缘油中空间电荷对流注发展过程的影响。

**关键词:** 雷电冲击; 极不均匀场; 天然酯绝缘油; 流注放电; 变压器

中图分类号: TM214 文献标志码: A 文章编号: 1009-9239(2022)01-0042-05

DOI: 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.01.007

## Streamer Propagation and Breakdown Characteristics of Palm Oil Insulating Oil Under Positive and Negative Lightning Impulse

YANG Fengfan, YU Qiang, SUN Jinli, LUO Lang, WU Xiaorui, ZHAO Zeyu

(State Grid Hubei Maintenance Company, Wuhan 430050, China)

**Abstract:** Compared with mineral insulating oil, natural ester insulating oil has the advantages of high biodegradability, non-toxicity, and strong fire resistance, which has the potential to replace mineral insulating oil in power transformer. A set of lightning impulse discharge characteristics test system including high-speed image acquisition system, test power supply, and electrical signal measurement system was established. The positive and negative lightning impulse discharge characteristics of palm insulating oil and mineral insulating oil were tested, and the stop length, development velocity, and gap breakdown characteristics of the streamer in two oils under positive and negative lightning impulse were compared and analyzed. The results show that under the same applied voltage and polarity, the streamer stop length in palm insulating oil is longer and the streamer development velocity is faster compared with the mineral insulating oil. The contents of vitamin A and vitamin E in palm insulating oil have no effect on the streamer stop length, development velocity, and breakdown voltage. The differences of streamer development characteristics and breakdown characteristics under positive and negative voltages mainly comes from the influence of space charge in insulating oil on the streamer development process.

**Key words:** lightning impulse; extremely uneven field; natural ester insulating oil; streamer discharge; transformer

收稿日期: 2021-03-26 修回日期: 2021-05-25

基金项目: 国网湖北省电力有限公司检修公司科技项目(B71520210001)

作者简介: 杨丰帆(1995-), 男(汉族), 湖北襄阳人, 助理工程师, 研究方向为高电压与绝缘技术。

## 0 引言

天然酯绝缘油是一种用于变压器液体绝缘介质的候选产品, 具有替代矿物油的潜力, 其中以棕榈油为原料的棕榈油脂肪酸酯绝缘油就是其中之一。天然酯绝缘油的性能已在实验室内得到了充

分的研究,并已成功应用于中型和大型电力变压器<sup>[1-2]</sup>,研究人员已经针对包括以棕榈油为原料在内的不同类型天然酯绝缘油进行了广泛研究<sup>[3-7]</sup>,其中以棕榈油为原料的研究大部分源自东南亚国家<sup>[8]</sup>,目前已经进行了有关棕榈油脂肪酸酯绝缘油电气特性、理化特性和老化性能的研究<sup>[8-9]</sup>。绝缘油的预击穿和击穿特性对于设计变压器绕组之间的间隙距离至关重要,但现有研究中只有少数涉及棕榈油脂肪酸酯绝缘油的雷电冲击击穿特性<sup>[9-12]</sup>,对于冲击电压作用下的放电起始、发展特性还缺乏深入认识。

间隙击穿前的放电现象也称为流注放电,通常与液体中的气泡和树状放电通道的形成有关<sup>[13-14]</sup>。在外电场作用下,绝缘油中存在的微小气泡会导致电场强度较大,有利于流注的产生和发展,在此过程中流注的长度将随着施加电压的增加而增加,当流注放电通道桥接高低电位电极时,可能导致击穿现象的发生<sup>[15]</sup>。绝缘油中影响流注发展的因素主要有电场强度、绝缘液体的分解、电极布置等<sup>[15-16]</sup>,除此之外研究还发现极不均匀电场下绝缘油的化学成分也会影响其雷电击穿性能<sup>[13,16]</sup>。天然酯绝缘油主要由脂肪酸甘油三酸酯组成,其化学组成与矿物油的化学组成有很大不同<sup>[15-16]</sup>,与基于碳氢化合物的矿物油相比,天然酯绝缘油中存在的负电性氧分子会降低绝缘油的击穿电压<sup>[10,13]</sup>,同时两种绝缘油在化学组成方面的差异还会造成击穿前流注的发展等过程上的差别。除了绝缘油本身的特性以外,雷电冲击电压的极性也会影响绝缘油中流注的传播和击穿性能。现有研究认为绝缘油中的正极性击穿机理主要来自于绝缘油分子的电离,负极性击穿机理则来自于注入的电子与流体分子之间的相互作用<sup>[15]</sup>。但目前有关天然酯绝缘油和矿物油中冲击放电的基础数据还较为缺乏,相关理论还有待进一步深入研究。

为此本研究搭建一套绝缘油冲击放电特性试验平台,研究极不均匀电场下,正、负极性雷电冲击电压作用时棕榈油脂肪酸酯(palm oil fatty acid ester, PFAE)绝缘油的流注发展和击穿特性,同时与矿物油的相关特性进行对比分析,研究结果为天然酯绝缘油的放电特性和理论研究提供基础数据。

## 1 试验

### 1.1 试验试品

以两种PFAE绝缘油为研究对象,以矿物油为基准。表1为PFAE的脂肪酸和维生素E、维生素A含量,通过气相色谱(GC)分析确定PFAE绝缘油的

脂肪酸组成。由表1可见,两种PFAE绝缘油都主要包含饱和脂肪酸(C16:棕榈酸)和单不饱和脂肪酸(C18:油酸)。其中PFAE绝缘油A(PFAE-A)的维生素E含量更高,PFAE绝缘油B(PFAE-B)的维生素A含量更高。

表1 棕榈油的脂肪酸和维生素含量

Tab.1 Fatty acids and vitamin contents of PFAE

项目	质量分数/%		
	PFAE-A	PFAE-B	
饱和脂肪酸	C12:月桂酸	0.1	0.3
	C14:肉豆蔻酸	0.9	0.9
	C16:棕榈酸	39.3	39.0
	C18:硬脂酸	4.2	4.2
单不饱和脂肪酸	C18:油酸	41.1	43.0
多不饱和脂肪酸	C18:亚油酸	12.2	10.4
	C18:亚麻酸	0.3	0.2
其他脂肪酸/%	0.1	0.1	
维生素E/%	1.8	0.7	
维生素A/%	—	1.2	

### 1.2 试验平台

图1为本研究搭建的雷电冲击试验平台示意图。通过2级电容分压器测量施加的1.2/50 μs标准雷电冲击波。冲击电压发生器可产生的最大雷电冲击电压为280 kV,最大输出能量为980 kJ。试品绝缘油和电极放置于一个体积为10 L的立方试验箱中,试验中使用针-板电极布置。其中铜针尖曲率半径为(50±5) μm,接地电极直径为200 mm,边缘圆角半径为3 mm,针-平面电极之间的间隙距离为50 mm。

采用1台图像深度为14位、分辨率为800×600的COMS Phantom 7.3型高速相机基于阴影法拍摄

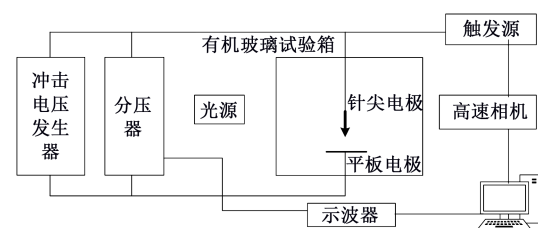


图1 试验平台示意图

Fig.1 Schematic diagram of test platform

流注图像, 每张图像的曝光时间为  $2 \mu\text{s}$ , 帧数为 90 000 fps。试验中采用的电压增量为  $10 \text{ kV}$ , 根据 IEC 60897-1987 中的建议选定雷电冲击初始电压, 正极性冲击和负极性冲击的初始电压分别为  $70 \text{ kV}$  和  $120 \text{ kV}$ 。绝缘油间隙击穿后, 等待油隙恢复  $3 \sim 5 \text{ min}$  再进行重复试验。每个试品总共记录 10 次雷电放电电压, 发生 10 次击穿后更换针状电极和试品。此外每次击穿后还应监测针尖半径, 并在观察到针尖半径发生较大变化后将其重新磨尖至  $(50 \pm 5) \mu\text{m}$ 。通过试验得到正极性和负极性条件下所有试品的平均流注停止长度、雷电冲击电压和发展速度。

## 2 结果与分析

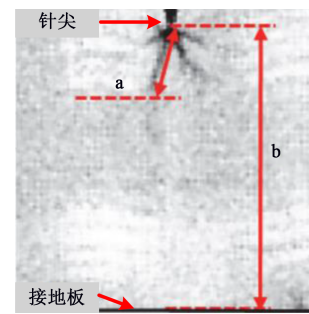
### 2.1 流注停止长度

施加冲击电压后, 流注将从针尖起始并向着接地板方向传播, 如果间隙没有击穿, 流注将在距针尖一定距离处停止。流注的传播过程由高速相机进行记录, 每帧之间的时间间隔设置为  $11 \mu\text{s}$ 。图 2 为流注停止长度和传播时间的定义方法, 施加冲击电压后, 如果没有发生击穿, 流注从开始产生、传播, 接着在离针尖一定距离处停止, 最后逐渐消失, 将从针尖电极到流注最远尖端的距离定义为流注停止长度, 该长度对应的时间即为流注传播时间。

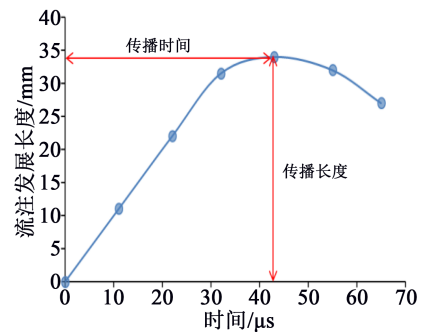
图 3(a)~(b) 分别为施加不同的正、负极性雷电冲击电压时流注的平均停止长度, 图中每个点代表 10 次测量的平均值。从图 3(a)~(b) 可以看出, PFAE 绝缘油和矿物油的流注停止长度都几乎随电压升高而线性增加。其中两种 PFAE 绝缘油的正、负流注停止长度之间的最大差异小于 16%。在相同的电压水平下, 正极性雷电冲击的流注停止长度都大于负极性雷电冲击。正极性和负极性雷电冲击作用下, PFAE-A 的流注增长强度分别为  $0.19 \text{ mm/kV}$  和  $0.18 \text{ mm/kV}$ 。PFAE-B 在两种极性的冲击电压作用下具有相同的流注增长强度  $0.16 \text{ mm/kV}$ 。在正极性和负极性雷电冲击电压下, 矿物油的流注增长强度分别为  $0.16 \text{ mm/kV}$  和  $0.12 \text{ mm/kV}$ , 略低于 PFAE 绝缘油。

### 2.2 流注发展速度

采用式(1)计算流注发展长度  $l$ , 其中  $a$  是流注停止长度,  $b$  是从针尖到平面电极测量的图像间隙距离。通过式(2)计算击穿前的流注发展速度  $v_a$ , 其中  $t_a$  是流注发展时间。通过式(3)计算击穿后的平均流注速度  $v_b$ , 其中  $d$  是间隙距离,  $t_b$  是击穿时间。



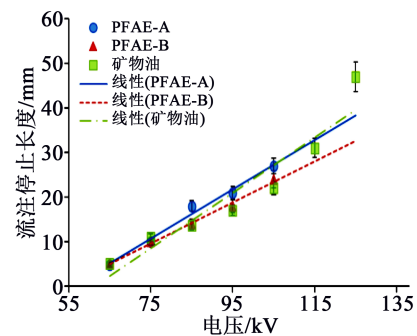
(a)流注停止长度



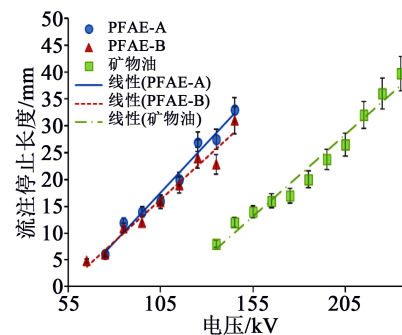
(b)传播时间

图2 流注停止长度和传播时间定义示意图

Fig.2 Schematic diagram of streamer stop length and propagation



(a)正极性



(b)负极性

图3 雷电冲击电压下流注停止长度

Fig.3 Stop length of streamer under lighting impulse voltage

$$l = (a/b) \times 50 \quad (1)$$

$$v_a = l/t_a \quad (2)$$

$$v_b = d/t_b \quad (3)$$

图4(a)和4(b)分别为施加不同的正、负极性雷电冲击电压时的流注发展速度,最高流注发展速度见表2。由图4(a)~(b)可见,所有试品的流注发展速度都随电压的升高而增大。由图4(a)可以看出,电压为95 kV时可以观察到PFAE-A和PFAE-B的正流注发展速度显著增大,在电压为115 kV时可以观察到矿物油的正流注发展速度显著增大;由表2可知,PFAE-A、PFAE-B和矿物油的最高正流注发展速度分别为3.5、3.6、2.0 km/s。

由4(b)可以看出,所有试品的负流注发展速度均小于正流注,所有试品的负流注发展速度均低于2.0 km/s,与正流注类似,PFAE-A、PFAE-B的流注发展速度均大于矿物油。

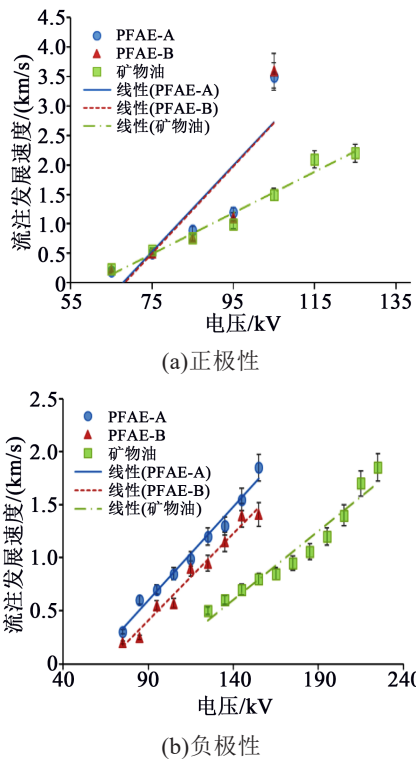


图4 雷电冲击电压下流注发展速度  
Fig.4 Streamer development rate under lighting impulse voltage

### 2.3 击穿电压

所有试品的击穿时间和击穿电压( $V_b$ )如表2所示。由表2可以看到,矿物油在正、负极性雷电冲击电压下的击穿电压均高于两种PFAE绝缘油,而PFAE-A和PFAE-B在两种极性雷电冲击电压下的

击穿电压无显著差异。所有试品在负极性雷电冲击电压下的击穿时间都比在正极性雷电冲击电压下要长;所有试品在负极性雷电冲击电压下的击穿电压都比在正极性雷电冲击电压下要高。同时两种PFAE绝缘油的流注发展速度均大于矿物油。

表2 所有试品的击穿电压、击穿时间和最高流注发展速度  
Tab.2 Breakdown voltage, breakdown time, and streamer propagation speed of all test samples

试品	正极性			负极性		
	$V_b$ /kV	$t_b$ /μs	$v_a$ /(km/s)	$V_b$ /kV	$t_b$ /μs	$v_a$ /(km/s)
PFAE-A	94.7	14.4	3.5	144.2	27.5	1.8
PFAE-B	96.7	14.0	3.6	145.0	38.1	1.3
矿物油	115.5	24.6	2.0	231.4	43.7	1.1

### 2.4 试验结果讨论

现有研究表明棕榈油的化学结构基于甘油骨架,该骨架由3个脂肪酸基团组成,而脂肪酸基团由饱和、不饱和脂肪酸组成。棕榈油在油酸和亚油酸侧链中几乎有50%的C=C双键,共轭双键的存在会降低电离势,导致两种PFAE绝缘油的流注发展速度比矿物油的快,同时雷电冲击击穿电压更低。试验结果表明所有试品在负极性雷电冲击电压下的击穿电压均高于在正极性雷电冲击电压下的击穿电压,这与之前在天然酯绝缘油的相关研究中获得的结论一致<sup>[1-3,5]</sup>。这是由于正极性和负极性电压作用下击穿机制有所不同。在正极性电压下,电子来源于临界电离电势下从流体中释放出来的电子,而不是由针尖电极注入的电子。这些电子将朝着正极加速并与流体分子碰撞,引起进一步的电离并释放更多的电子,最终形成电子雪崩,导致流注向接地电极传播。此时分子电离所需的能量(电离电势)将影响流注的发展速度和长度。具有共轭双键的流体分子电离电势低于饱和分子,两种PFAE绝缘油中低电离电势分子的存在可以更容易地形成稳定的离子,从而增大流注的发展速度。在负极性电压下,高迁移率的电子在高电场作用下由针尖注入绝缘油中,形成流注放电。这些电子通过电源快速的能量注入而加速运动,与流体分子之间相互作用产生空间电荷,其中电子运动速度较快首先进入电极,在油中留下正空间电荷。由于空间电荷的存在,电子需要获得更多的能量以通过流体,从而导致负极性电压下的击穿电压更高。

两种 PFAE 绝缘油的维生素 A 和维生素 E 的含量各不相同,由试验结果可知,两种 PFAE 绝缘油的流注停止长度、发展速度、击穿电压没有明显差异,表明维生素 A 和维生素 E 的含量对绝缘油的上述特性没有明显影响。

### 3 结论

(1)相同幅值和极性的雷电冲击电压下,PFAE 绝缘油的流注停止长度和发展速度要大于矿物油。

(2)两种 PFAE 绝缘油在雷电冲击电压下的击穿电压均比矿物油低。

(3)PFAE-A 和 PFAE-B 中的维生素 A 和维生素 E 含量对流注停止长度、发展速度和击穿电压没有明显影响。正、负极性雷电冲击电压下流注发展特性和击穿特性的差异主要来源于绝缘油中空间电荷对流注发展过程的影响。

### 参考文献:

- [1] ABDELWAHAB S, DESSOUKY S S, SHABAN M, et al. Insulation performance enhancement of aged current transformers using nanofluids[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*,2020,126:106613.
- [2] GHONEIM S, DESSOUKY S S, TAHA I, et al. A new approach of tap changer maintenance incorporating nanoparticle insulating oil[J]. *Electrical Engineering*,2020,102(4):1-14.
- [3] LYUTIKOVA M N, NEKHOROSHEV S V, KUKLINA V M, et al. Identification of impurities of unknown composition in insulating oil by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS)[J]. *Power Technology and Engineering*,2020,54(4):594-599.
- [4] 齐昌藩,路秀丽.植物油变压器在国外工程中的应用及前景分析[J]. *西北水电*,2020(S1):91-93.
- [5] IBMTA B, SSD C, RNRG D, et al. Enhanced partial discharge location determination for transformer insulating oils considering allocations and uncertainties of acoustic measurements[J]. *Alexandria Engineering Journal*,2020,59(6):4759-4769.
- [6] 邓小鹏,李松江,胡婷,等.变压器用天然酯绝缘油的研究进展[J]. *绝缘材料*,2019,52(11):25-30.
- [7] 潘振,朱孟兆,叶文郁,等.天然酯绝缘油中水分对糠醛扩散作用影响的分子动力学模拟[J]. *绝缘材料*,2019,52(11):55-62.
- [8] 兰贝蒂,李华强,张晨,等.棕榈油脂肪酸酯绝缘油变压器的特性分析[J]. *绝缘材料*,2020,53(6):90-94.
- [9] KATIM N, ISHAK M T, AMIN N, et al. Lightning breakdown voltage evaluation of palm oil and coconut oil as transformer oil under quasi-uniform field conditions[J]. *Energies*, 2018, 11(10): 1-15.
- [10] 童伟,徐良铸,王莹,等.天然酯绝缘油纸绝缘及其变压器的研究进展与老化机理分析[J]. *绝缘材料*,2019,52(2):1-6,14.
- [11] 崔鲁.热老化天然酯绝缘油纸绝缘放电特性及其对绝缘劣化影响研究[D].重庆:重庆大学,2018.
- [12] 陈修萍.天然酯绝缘油纸绝缘雷电冲击放电特性研究[D].重庆:重庆大学,2018.
- [13] 崔鲁,陈伟根,张知先,等.天然酯绝缘油浸绝缘纸的热稳定性及其对气隙放电发展的影响[J]. *中国电机工程学报*,2018,38(4):1248-1254,1302.
- [14] 崔鲁,陈伟根,杜劲超,等.天然酯绝缘油-纸绝缘气隙放电形态及发展特征[J]. *电工技术学报*,2018,33(3):618-626.
- [15] 林翔.天然酯绝缘油长油隙雷电冲击放电特性研究[D].重庆:重庆大学,2017.
- [16] 钟宇翔.纳米粒子对天然酯绝缘油的改性研究[D].北京:华北电力大学,2014.