

酯类绝缘油在直流电压下的击穿特性研究

李继攀, 王智杰, 刘宏领, 郭 瑞, 孙素亮, 张红敏, 王 强

(国网山东省电力公司菏泽供电公司, 山东 菏泽 274000)

摘 要: 本文对比研究了酯类绝缘油及矿物绝缘油在中小间隙下极不均匀场中的正负极性直流击穿电压, 并与雷电击穿电压进行对比分析。结果表明: 酯类绝缘油的直流击穿电压低于矿物绝缘油, 负极性直流击穿电压在小间隙下低于雷电击穿电压, 但在中间隙下高于雷电击穿电压。

关键词: 植物油; 天然酯; 直流击穿特性; 酯类绝缘油; 换流变压器

中图分类号: TM214 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-9239(2022)07-0093-06

DOI: 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.07.014

Breakdown Characteristics of Ester Insulating Oils Under DC Voltage

LI Jipan, WANG Zhijie, LIU Hongling, GUO Rui, SUN Suliang, ZHANG Hongmin, WANG Qiang
(Heze Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Heze 274000, China)

Abstract: In this paper, the positive and negative DC breakdown voltage of ester insulating oils and mineral insulating oil in extremely uneven field under small and medium gap were studied, and then compared with their lightning breakdown voltage. The results show that the DC breakdown voltage of ester liquids is lower than that of mineral insulating oil. The negative DC breakdown voltage is lower than the lightning breakdown voltage under small gaps, but it is higher than the lightning breakdown voltage under medium gaps.

Key words: vegetable oil; natural ester; DC breakdown characteristics; ester insulating oil; converter transformer

0 引言

近年来, 由于高压直流(HVDC)输电线路在远距离或海底大容量输电方面的优势, 其应用受到越来越多的关注。换流变压器作为高压直流电网的最重要设备之一, 其中的绝缘介质承受着交流及直流电压分量^[1]。酯类绝缘油因其优良的环保特性及极高的抗燃能力近年来在常规高压电力变压器中获得了较多的应用, 但由于对其直流介电特性缺乏了解, 目前难以在换流变压器中取得应用。

在过去的几十年中, 酯类绝缘油与矿物油在交流电压和脉冲电压下的击穿特性已得到了广泛的研究^[2-5]。在准均匀电场如球形电极或平板电极条件下, 酯类绝缘油在交流电压^[3-4]和脉冲电压^[5]下的

击穿电压与矿物油相当。而在大电极间隙及极不均匀电场条件中, 如针板电极或针球电极, 酯类绝缘油在脉冲电压下的击穿电压比矿物油低得多^[6-9]。

而关于酯类绝缘油直流击穿特性的研究较少, XIANG J等^[10]研究了正、负直流电压下合成酯绝缘油中压力对流注起始电压的影响, 发现压力的增加会导致流注起始电压的增长。通过使用点-平面电极研究正、负极性直流电压下矿物油和合成酯绝缘油中的流注发展和击穿现象, 发现两种绝缘油中的正流注均以第二型出现, 即使在施加的电压水平即将达到击穿电压时, 在负极性电压下也没有明显的流注发展(停止长度小于间隙距离的10%), 两种绝缘油中的负流注均处于初级阶段^[11]。QIN C X等^[12]研究了有无气泡条件下KI25X变压器油的直流击穿电压, 结果表明在气泡的影响下, 柱-板电极的击穿电压下降较大, 锥-板电极的击穿电压下降较小。同时发现杂质的存在对极不均匀电场中直流击穿电压的影响较小。

收稿日期: 2021-07-21 修回日期: 2021-09-07

基金项目: 国网山东省电力公司科技项目(2020A-96)

作者简介: 李继攀(1985-), 男(汉族), 山东菏泽人, 高级工程师, 主要从事变电检修技术的研究工作,

在极不均匀电场下,关于天然酯绝缘油及合成酯绝缘油与矿物绝缘油直流击穿特性的系统性对比研究尚未见报道,限制了酯类绝缘油在换流变压器中的应用及发展。本文针对两种结构不同的酯类绝缘油,对比研究其直流击穿特性,获得酯类绝缘油与矿物绝缘油直流击穿特性的差异性,为酯类绝缘油在换流变压器中的应用提供数据基础及实验依据。

1 实验

1.1 试样的选取

选取中国石油润滑油公司生产的KI25X变压器矿物油作为对比研究的基准,天然酯绝缘油选取广东卓原新材料公司生产的RAPO菜籽基天然酯绝缘油,合成酯绝缘油选取英国M&I公司生产的Midel 7131合成酯绝缘油(成分为季四戊醇酯)。3种绝缘油的典型参数如表1所示。

表1 绝缘油的典型参数

Tab.1 Typical parameters of insulating oils

参数	合成酯	天然酯	矿物油
密度(20℃)/(g/cm ³)	0.97	0.92	0.88
运动黏度(40℃)/(mm ² /s)	28	36	8.1
比热容(20℃)/(kJ/(kg·K))	1.88	1.85	1.86
热导率(20℃)/(W/(m·K))	0.144	0.177	0.126
水含量/(mg/kg)	20	15	5
介质损耗因数(90℃)	0.03	0.02	0.01
相对介电常数	3.2	3.2	2.2

1.2 实验流程

绝缘油中的杂质和水含量对其直流击穿具有重要影响,因而首先对绝缘油进行过滤及脱水脱气处理,以保证实验数据的可靠性。

绝缘油脱水处理平台如图1所示,主要由JB-5型恒温磁力搅拌器、真空抽滤瓶、真空泵、氮气袋和3个真空阀门组成,可抽气至真空抽滤瓶内压强为60 Pa左右。在对绝缘油进行脱水脱气处理时,先进行两次抽气和充氮气,使整个系统内充满氮气,然后使绝缘油在气压小于60 Pa和温度60℃下处理半天,待绝缘油冷却至室温后,方可打开出油阀进行取油。处理后合成酯Midel7131的水含量为40~50 mg/kg,天然酯RAPO的水含量为20~30 mg/kg,矿物油的水含量小于10 mg/kg。

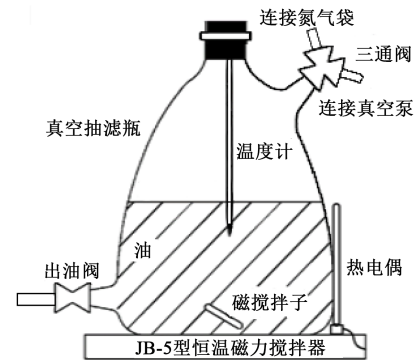


图1 绝缘油预处理平台示意图

Fig.1 Pretreatment platform of insulating oils

实验电极系统如图2所示,主要结构包括螺杆、高压端、支架、接地端等。外壳由透明的聚碳酸酯(PC)材料制成,PC材料具有优良的绝缘性能和耐电弧性能。油容器的主体结构呈方形,壁厚为20 mm,上盖厚度为20 mm,底部厚度为30 mm,内部长方体的尺寸为160 mm×160 mm×167 mm,可完全容纳试验电极。针-板电极的板电极是半径为30 mm、厚度为20 mm、外环半径为10 mm的黄铜材质铜板,在板电极底面圆心处引出直径为5 mm、长度为50 mm的铜棒穿透下极板与外部地线相连接。上级杆为黄铜材质的圆柱,穿过上极板的圆心位置,可以使针电极垂直于板电极的圆心。针电极材质为钨钨,直径为1.5 mm,长度为28 mm,钨钨电极在所有的钨合金材料中具有耐电流高、烧损率最小的特点,针尖锥度为30°,并且将曲率半径打磨在40~60 μm。

实验高压源采用ZGF-500/5型智能直流高压发生器,其最高输出电压为500 kV,最大电流为5 mA,纹波系数≤0.35%,电压调节精度和稳定度≤0.5%。试验参考NB/T 10450—2020《绝缘液体直流电场击穿电压测定法》进行测定,采用连续升压法,升压速率设为2 kV/s。试验过程中的电压电流趋势图如图3所示。

每种油样在1、2.5、5、15、25 mm间隙条件下进行20次击穿,并对击穿结果进行威布尔分布分析。

2 结果与分析

实验中,20次击穿结果的一致性较好,实验前后的针电极烧蚀情况如图4所示。实验前针电极曲率半径为50.4 μm,如图4(a)所示,实验后针电极曲率半径为65 μm,如图4(b)所示,实验中针尖曲率半径变化在30%以内,实验条件相对稳定。击穿电压测试结果的最大相对标准偏差为5.1%,符合NB/T

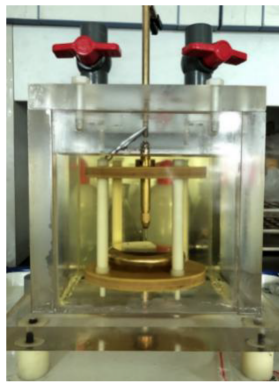
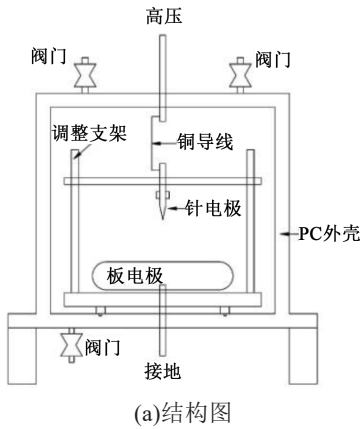


图2 试验油容器结构图和实物图

Fig.2 Structural and physical drawing of test oil container

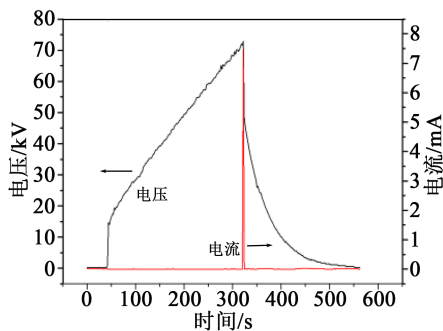


图3 实验电压电流图

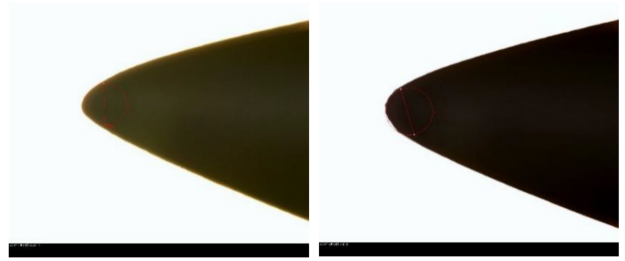
Fig.3 Experimental voltage and current diagram

10450—2020 的要求。

对直流放电得到的击穿电压结果采用双参数威布尔分布进行分析,尺度参数 α 表示绝缘油在直流电压作用下击穿概率为63.2%时的击穿电压,形状参数 β 表示直流击穿电压数据的分散性,其值越大分散性越小。

2.1 直流正极性击穿

在正极性直流电压下进行绝缘油的击穿试验,每个电极间隙下进行20次有效击穿试验,击穿电压



(a)试验前 (b)试验后

图4 试验前后针尖显微图

Fig.4 Micrograph of needle electrode tip before and after test

的相对标准偏差小于11%。图5为酯类绝缘油与矿物绝缘油在1、2.5、5、15、25 mm 电极间隙距离下的正极性直流击穿电压95%置信区间双参数威布尔分布概率图,其尺度参数即为63.2%击穿概率下的击穿电压。

3种绝缘油63.2%击穿概率下的正极性直流击穿电压如图6所示。由图6可见,矿物绝缘油的正极性击穿电压高于两种酯类绝缘油。在小间隙下,击穿电压总体从大到小依次为矿物油、天然酯、合成酯,但结果并不稳定。随着电极间隙的增加,合成酯的击穿电压低于天然酯绝缘油。

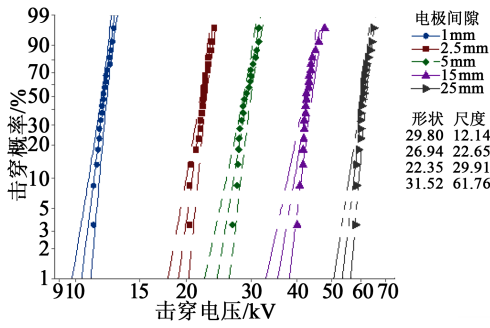
2.2 直流负极性击穿

负极性直流电压下,每个电极间隙下同样进行20次有效击穿试验,击穿电压的标准偏差小于8%。图7为酯类绝缘油与矿物绝缘油在1、2.5、5、15、25 mm 电极间隙距离下的负极性直流击穿电压95%置信区间双参数威布尔分布概率图。对比图5和图7可见,3种绝缘油负极性击穿电压的形状参数总体大于正极性击穿电压的形状参数,即负极性击穿电压较正极性击穿电压更为稳定,数据分散性更小。3种绝缘油63.2%击穿概率下的负极性直流击穿电压如图8所示。由图8可见,在所有间隙下,矿物绝缘油的击穿电压高于酯类绝缘油,合成酯和天然酯的负极性击穿电压相近,没有明显差异性。负极性的击穿电压整体高于正极性的击穿电压。

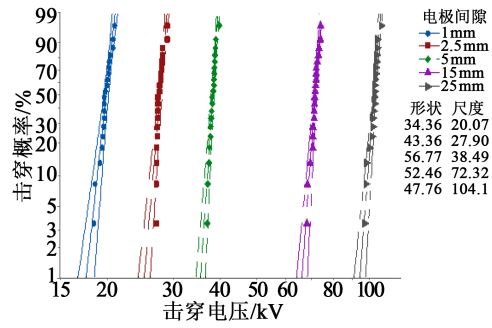
2.3 直流与雷电击穿的对比

与直流电压相似,雷电击穿电压也是单极性,区别在于雷电击穿电压的升压时间(或称波前时间)要远小于直流电压,但峰值电压的保持时间较短。

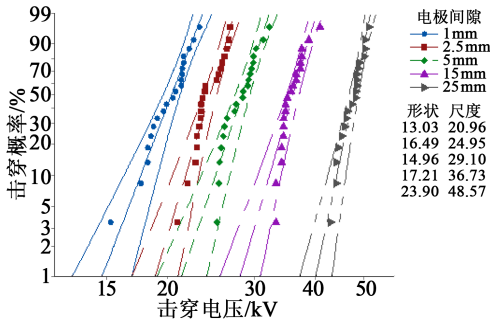
正极性直流击穿电压与相同电极系统测试的雷电击穿电压对比如图9所示。负极性直流击穿电



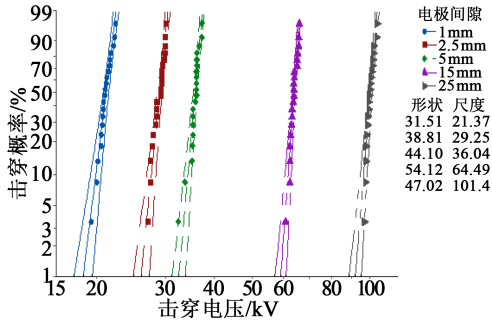
(a)天然酯



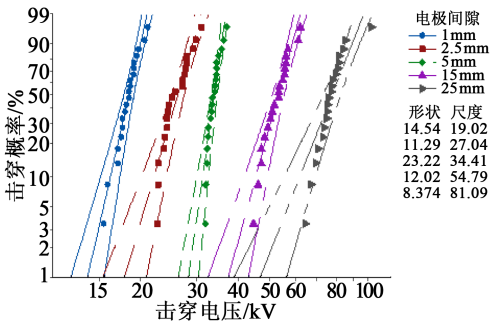
(a)天然酯



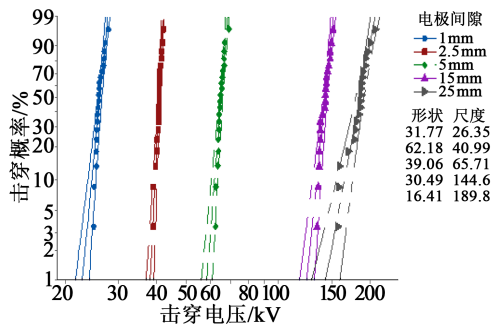
(b)合成酯



(b)合成酯



(c)矿物油



(c)矿物油

图5 3种绝缘油正极性直流击穿电压威布尔分布图
Fig.5 Weibull distribution of positive polarity DC breakdown voltage for three insulating oils

图7 3种绝缘油负极性直流击穿电压威布尔分布图
Fig.7 Weibull distribution of negative polarity DC breakdown voltage for three insulating oils

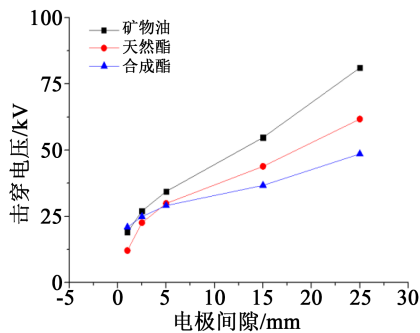


图6 3种绝缘油的正极性直流击穿电压
Fig.6 Positive DC breakdown voltages of three insulating oils

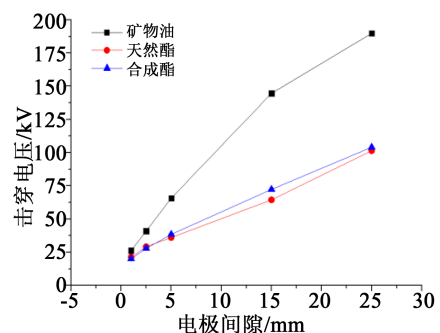
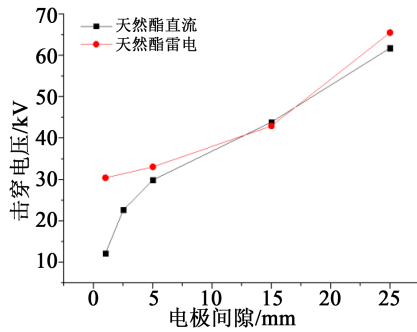


图8 3种绝缘油的负极性击穿电压
Fig.8 Negative DC breakdown voltages of three insulating oils

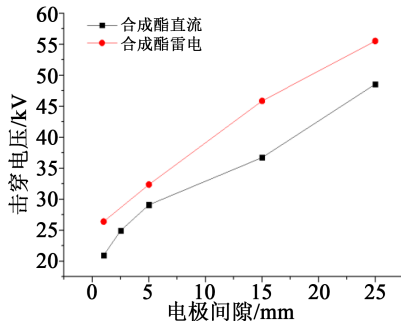
压与雷电击穿电压对比如图10所示^[8]。

绝缘油的击穿主要由其预击穿现象即“流注”

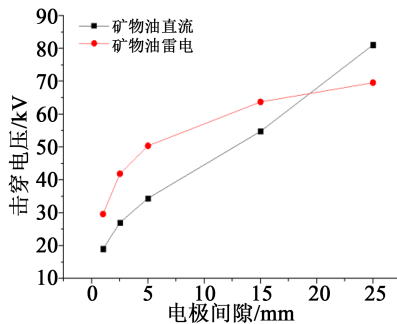
决定,酯类绝缘油的流注起始电压与矿物绝缘油接近,说明流注起始电压不是造成酯类绝缘油击穿电



(a)天然酯



(b)合成酯



(c)矿物油

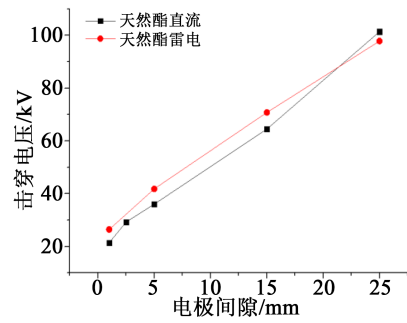
图9 3种绝缘油正极性直流及雷电击穿电压对比

Fig.9 Comparison of positive polarity DC and lightning breakdown voltage of three insulating oils

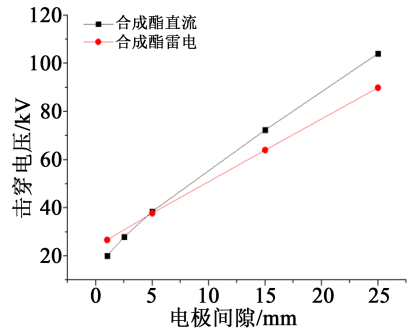
压较低的原因。在脉冲电压下,酯类绝缘油中流注的停止长度较长,加速电压较低,电压高于加速电压时流注速度较快,造成酯类绝缘油的脉冲击穿电压一般低于矿物绝缘油。

由图9可见,3种绝缘油在小间隙下,其正极性直流击穿电压总体低于雷电击穿电压,当间隙增大时,矿物绝缘油的直流击穿电压高于其雷电击穿电压,而两种酯类绝缘油的直流击穿电压低于其雷电击穿电压。

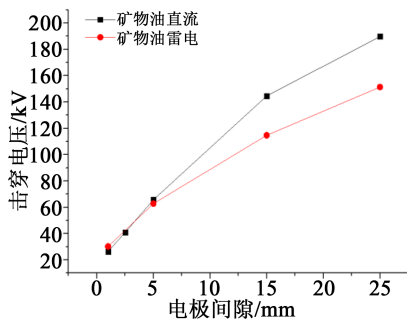
由图10可见,对于3种绝缘油,其负极性直流击穿电压在小间隙下均低于雷电击穿电压,但当间隙距离增加后,负极性直流击穿电压逐渐高于雷电击穿电压。



(a)天然酯



(b)合成酯



(c)矿物油

图10 3种绝缘油负极性直流及雷电击穿电压对比

Fig.10 Comparison of negative polarity DC and lightning breakdown voltage of three insulating oils

在10 mm的间隙下,正极性直流流注平均速度为1.5~2 km/s^[11],这个速度属于2型流注,与正极性雷电电压下的流注类型相同。说明正极性直流击穿与正极性雷电击穿电压在流注发展过程中没有太大的差异性,尽管正极性直流流注可能更多的受到空间电荷的影响,但本研究的实验条件下未观察到规律性差异。

而在10 mm间隙下,负极性直流流注平均速度仅为0.1~0.3 km/s^[11],这个速度属于负极性1型流注,或者说初级流注,速度慢于负极性雷电流注,说明负极性直流电压相对于雷电电压会减缓流注的发展速度,也间接证明了负极性直流电压会建立更强的空间电荷,从而限制流注的发展。在小电极间

隙条件下,直流击穿电压较低,由于其连续升压时间较大间隙下短,且电压较大间隙下低,因此,空间电荷的建立较弱,对击穿的影响较小。此外,尽管直流电压下流注的传输速度较脉冲电压下更慢,但由于电压施加时间远超雷电电压,流注更易发展贯穿电极形成导电通道,从而使得小间隙下负极性直流击穿电压低于雷电击穿电压。而当电极间隙增大时,负极性直流击穿电压的升压时间较长,施加电压更高,空间电荷建立的时间更久,空间电荷由此获得了更大的增强,从而更大程度地遏制了流注的发展,造成大间隙下负极性直流击穿电压高于雷电击穿电压。

3 结论

通过对比研究酯类绝缘油及矿物绝缘油在中小间隙下的直流击穿现象,得到以下结论:

(1)正极性条件下,当间隙为2.5~25 mm时,矿物油的击穿电压最高,天然酯的击穿电压次之,合成酯的击穿电压最小。

(2)负极性条件下,当间隙为1~25 mm时,矿物油的击穿电压大于酯类绝缘油,天然酯与合成酯的击穿电压较为接近。

(3)负极性直流击穿电压在小间隙下低于负极性雷电击穿电压,随着间隙的增大,负极性直流击穿电压逐渐高于负极性雷电击穿电压。

参考文献:

- [1] 张晓涵. 油纸绝缘复合电压下气隙模型局部放电发展过程研究[D]. 北京:华北电力大学,2015.
- [2] 周远翔,寇晓适,杨颖,等. 纳米改性变压器油制备与绝缘特性研

- 究现状[J]. 绝缘材料,2016,49(11):26-35.
- [3] MARTIN D, WANG Z. Statistical analysis of the AC breakdown voltages of ester based transformer oils[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2008,15(4):1044-1050.
- [4] WANG X Z. Study of dielectric behavior of ester transformer liquids under AC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2012,19(6):1916-1925.
- [5] ROZGA P, STANEK M. Characteristics of streamers developing at inception voltage in small gaps of natural ester, synthetic ester and mineral oil under lightning impulse[J]. Science Measurement & Technology,IEF,2016,10(1):50-57.
- [6] ROZGA P. Streamer propagation in small gaps of synthetic ester and mineral oil under lightning impulse[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2015,22(5):2754-2762.
- [7] LIU Q, WANG Z D. Streamer characteristic and breakdown in synthetic and natural ester transformer liquids under standard lightning impulse voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2011,18(1):285-294.
- [8] LI H, XIA L, CAI S, et al. Influence of molecule structure on lightning impulse breakdown of ester liquids[J]. Energies,2021,14(4):1061.
- [9] 陈修萍. 植物油纸绝缘雷电冲击放电特性研究[D]. 重庆:重庆大学,2018.
- [10] XIANG J, LIU Q, WANG Z D. Inception and breakdown voltages of insulating liquids under DC stress[C]//2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. Chengdu, China: IEEE,2016:1-4.
- [11] XIANG J, LIU Q, WANG Z D. Streamer characteristic and breakdown in a mineral oil and a synthetic ester liquid under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2018,25(5):1636-1643.
- [12] QIN C X, HE Y, SHI B, et al. Experimental study on breakdown characteristics of transformer oil influenced by bubbles[J]. Energies,2018,11(3):634-636.