

· 高电压技术 ·

金属颗粒对绝缘油流注发展特性的影响研究

李伯男¹, 李熙¹, 黄磊峰¹, 刘洋², 吴益明², 吴鹏²

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;
2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要: 变压器在制造、运行和维修等过程中,其内部绝缘油难免会引入金属颗粒,为探究金属颗粒对油纸绝缘性能的影响,文中搭建并调试了油纸绝缘雷电冲击放电试验平台等,开展了金属颗粒对绝缘油流注发展特性影响试验研究,研究了不同浓度金属颗粒对绝缘油流注起始电压与发展过程中形态的影响,并通过 COMSOL 仿真平台进行验证。结果表明,金属颗粒会促进油中流注的起始与发展过程,流注停止长度和发展速度与颗粒浓度呈正相关,而绝缘油流注起始电压与击穿电压与颗粒浓度呈负相关,金属颗粒的引入会使得流注形态更加发散。分析认为油中金属颗粒与流注的相互作用是降低流注起始电压,加速流注发展,进而降低绝缘油击穿电压的主要原因。

关键词: 雷电冲击;金属颗粒;绝缘油;流注

中图分类号:TM855

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)02-0123-06

0 引言

大型电力变压器在电力系统中占据了举足轻重的地位,一般变压器绝缘结构采用油纸绝缘方式,其内部的高电场强度和复杂的电场分布,对油纸绝缘性能提出了极高的要求。大型电力变压器在运行过程中会承受雷电冲击电压的作用,其油纸绝缘性能的好坏直接决定了变压器能否承受雷电冲击的影响^[1-3]。目前国内外相关学者主要开展了均匀电场下绝缘油冲击击穿特性的研究工作,对于非均匀电场下绝缘油冲击击穿特性的研究较少^[4-6]。

在变压器制造、运行和维修等过程中,其内部绝缘油难免会引入金属颗粒,而金属颗粒的存在将显著降低变压器油纸绝缘的性能^[7-9]。通过大量研究可知:绝缘油中存在固体颗粒,特别是金属颗粒时,会显著降低绝缘油的电气性能,影响其雷电冲击击穿电压^[10-13]。而绝缘纸作为大型电力变压器的主要固体绝缘材料,其绝缘强度尤其是油纸界面的绝缘性能直接影响了变压器的绝缘水平^[14-16]。但目前针对雷电冲击电压下金属颗粒对油纸绝缘性能影响规律的研究不足,缺乏金属颗粒对油纸绝缘流注发展特性的试验研究,无法有效地认识到金属颗粒对油纸绝缘雷电冲击击穿特性的影响机理。因此,有必要针对雷电冲击电压下金属颗粒对油纸绝缘放电特性的影响规律开展相应试验研究。

因此,文中通过提出一种含固定金属颗粒浓度

绝缘油的制备方法,并搭建调试油纸绝缘雷电冲击放电试验平台等,开展了金属颗粒对变压器绝缘油雷电冲击放电特性影响的研究工作,并通过 COMSOL 仿真平台进行验证。对于掌握雷电冲击电压下金属颗粒对绝缘油击穿过程的作用机理,指导大型电力变压器内部绝缘结构的设计及绝缘油中固体颗粒标准的制定具有重要的意义。

1 油纸绝缘雷电冲击放电试验

1.1 试验平台的搭建

油纸绝缘雷电冲击放电试验系统原理如图 1 所示,其中雷电冲击击穿特性测试部分由雷电冲击电压发生系统、冲击电压测量系统以及试验油箱 3 个部分组成。

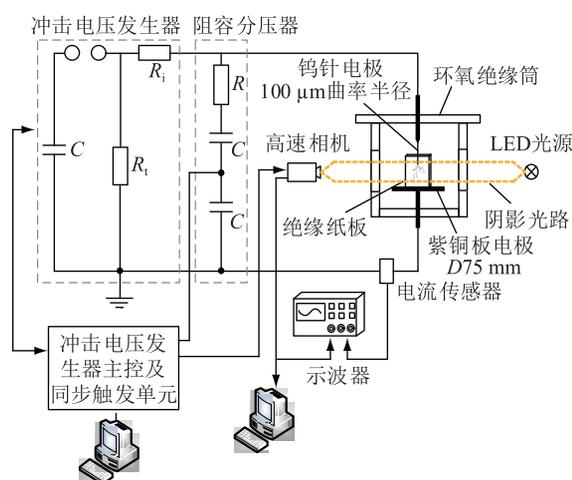


图 1 油纸绝缘雷电冲击放电试验系统

Fig.1 Test system of oil-paper insulation discharge under lightning impulse

收稿日期:2018-11-08;修回日期:2019-01-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51637004)

1.2 样品制备与处理

采用 Karamay 25 号环烷基矿物绝缘油作为试验油样,通过向绝缘油样中加入不同数量铜颗粒的方式获得不同颗粒含量的绝缘油。采用滤膜孔径为 $0.8\ \mu\text{m}$ 的砂芯过滤器对绝缘油进行过滤处理,使处理后的绝缘油满足 CIGRE 工作组提出的纯净绝缘油标准^[17],即每 100 mL 油样内粒径大于 $5\ \mu\text{m}$ 的杂质颗粒数量小于 300。

过滤后的绝缘油在 $90\ ^\circ\text{C}$ 真空下干燥除气 48 h,使油样的水分含量控制在 0.001 5% 以内,以减小油中水分对试验结果的影响。此外,测量了处理后纯净绝缘油样的杂质颗粒含量,确保其符合标准。

以粒径分布在 $1\sim 100\ \mu\text{m}$ 、中值粒径为 $25\ \mu\text{m}$ 的金属铜颗粒作为研究对象,根据文献^[17]建议的变压器油中颗粒度分级指标采用 3 种铜颗粒浓度,分别定义为低颗粒浓度、中颗粒浓度以及高颗粒浓度,控制每 100 mL 绝缘油中铜颗粒的数量分别接近 10 000, 100 000, 1 000 000。准备不同颗粒数量的铜颗粒,并将绝缘油过滤干燥。然后在特定体积的绝缘油中加入铜颗粒,调配出不同颗粒浓度的绝缘油样品。另外,为了确保铜颗粒可以均匀地混合在绝缘油中,须在室温下超声振荡绝缘油样 30 min。

1.3 绝缘油放电特性试验方法

含金属颗粒绝缘油放电特性试验中流注发展特性试验需在 $18\sim 20\ ^\circ\text{C}$ 的室温下进行,为减少外部因素对试验结果的影响应保证试验环境不变。

流注发展特性试验涉及上述配制的纯净绝缘油、低颗粒浓度绝缘油、中颗粒浓度绝缘油及高颗粒浓度绝缘油 4 种绝缘油样品,试验均在 50 mm 油隙距离下开展。在获取流注起始电压、流注停止长度及流注分支形态试验中,将高速阴影成像方法应用于绝缘油,施加低于击穿电压的雷电冲击电压以获取预击穿流注放电形态,避免绝缘油击穿时产生的强烈发光通道覆盖流注形态。在获取流注发展速度与加速电压试验过程中,对绝缘油施加接近或高于击穿电压的雷电冲击电压,通过计算油隙长度与击穿时间的比值获取流注速度,根据流注发展速度变化规律最终获得加速电压^[18]。

2 金属颗粒对流注发展影响

2.1 金属颗粒造成绝缘油流注起始电压降低

图 2 为 50 mm 油隙中含铜绝缘油流注的初始电压的威布尔分布。其中竖线表示该雷电冲击电压下含不同浓度颗粒绝缘油的流注起始累积概率。可以看出,外施正负极性雷电冲击电压幅值分别为

50 kV 与 40 kV 时,仅在含高颗粒浓度绝缘油中观测到了流注放电,其中高颗粒浓度绝缘油正负极性 50% 流注起始电压较纯净绝缘油分别降低 9.5% 和 12.4%。在极性方面,纯绝缘油的 50% 流注起始电压为 72.11 kV,约为负起始电压 (60.41 kV) 的 1.19 倍。含有高颗粒浓度绝缘油的正极的 50% 正流注起始电压约为负极性的 1.23 倍。

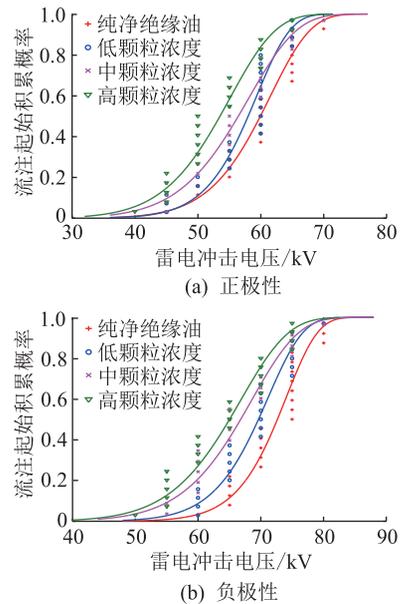


图 2 不同颗粒浓度绝缘油流注起始电压威布尔分布

Fig.2 Weibull distribution of streamer inception voltage of different contaminated insulating oil

2.2 金属颗粒造成流注分支形态和轴向形态变化

图 3 为不同电压下金属颗粒对绝缘油流注形态的影响。可知:对纯净绝缘油和含高颗粒浓度绝缘油施加负极性相近电压时,纯净绝缘油中流注形态与含高颗粒浓度绝缘油存在显著差异。从流注放电图像中可以明显看出含高颗粒浓度绝缘油流注面积显著增大,进一步测量流注形态可得表 1 中数据,金属颗粒会造成流注分形维数的增大,使得流注发散化更加明显,引起流注呈现树枝化发展。

当施加电压幅值接近 121 kV 时,纯净绝缘油中负极性流注仍呈现灌木形状,含高颗粒浓度绝缘油中负极性流注的形态则发生了显著的变化,而主流注放电通道出现树枝状,并且主流注放电通道的两侧产生了大量的旁支。

图 4 为 50 mm 油隙试验条件下,施加正负极性雷电冲击电压,绝缘油流注停止长度在含不同颗粒浓度情况下的对比图。由图 4 可知,当施加电压接近流注起始电压时,含不同颗粒浓度绝缘油正极性流注停止长度均约等于 10 mm,而负极性流注停止长度约等于 5 mm。当外施电压接近击穿电压时,4

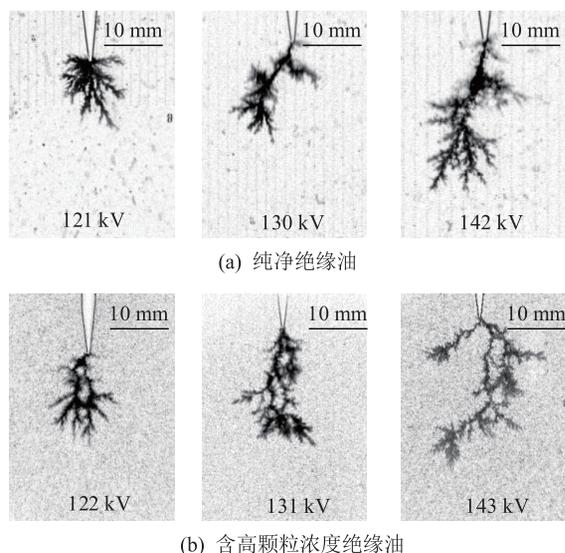


图3 不同电压下金属颗粒对绝缘油流注形态的影响

Fig.3 Effect of metal particles on insulating oil streamer under different voltages

表1 纯净绝缘油与含高颗粒浓度绝缘油流注特征对比

Table 1 Comparison of streamer feature between pure insulating oil and insulating oil contained with high particle concentration

颗粒浓度	极性	电压/kV	流注面积/mm ²	分形维数
纯净绝缘油	负	121	27.43	1.71
		130	35.92	1.68
		142	42.37	1.70
高颗粒浓度	负	122	30.45	1.72
		131	58.12	1.75
		143	78.59	1.76

种绝缘油样品中正负极性流注停止长度约等于 40 mm。在施加相近电压等级时,正负极性下含铜颗粒绝缘油的流注停止长度较纯净绝缘油更长,并且流注停止长度与颗粒浓度呈正相关。就极性的影响而言,正极性下包含不同颗粒浓度的绝缘油中的流注停止长度的近似线性增加,上升梯度接近于 1.18 ~ 1.4 kV/mm。负极性下含铜颗粒绝缘油中流注停止长度随施加电压的提高近似于指数增加,当施加电压接近 140 kV 时,高颗粒浓度绝缘油的停止长度接近纯净绝缘油的 1.5 倍。表明铜颗粒对负极性流注的促进作用较正极性更显著,由此推测相同油隙下铜颗粒对负极性击穿电压的影响更大。

图 5 为通过流注发展速度测试得到的纯净绝缘油和高颗粒浓度绝缘油正负极性流注发展速度对照图,其中 V_{b-p} 与 V_{b-c} 分别为纯净绝缘油与含高颗粒浓度绝缘油的雷电冲击击穿电压。在高于击穿电压峰值的雷电冲击电压作用下,纯净绝缘油与含高颗粒浓度绝缘油流注速度发生了跳变,将跳变时的电压称为加速电压,分别定义为 V_{a-p} 与 V_{a-c} 。

正负极性雷电冲击电压的作用下,无论是纯净

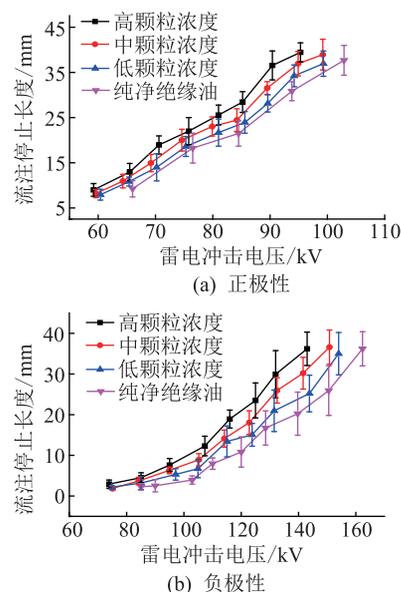


图4 绝缘油中正负极性流注停止长度变化规律

Fig.4 Streamer stop length under different polarity in contaminated insulating oil

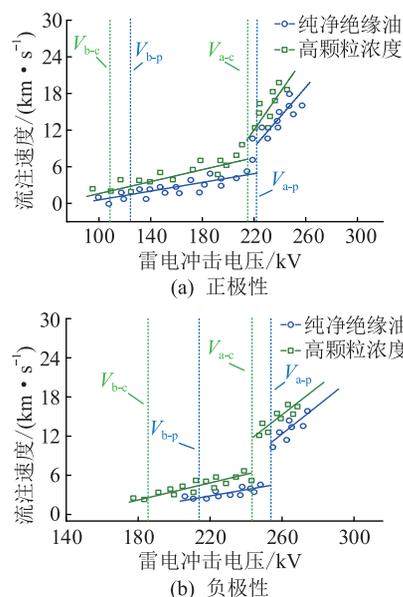


图5 正负极性下绝缘油流注发展速度规律

Fig.5 Speed of positive and negative streamer in insulating oil

绝缘油还是含高颗粒浓度绝缘油在施加电压低于加速电压时,其流注发展速度都是缓慢增大的。当施加的电压达到加速电压时,流注的速度将跳跃,并且增加的速率将突然增加 3~6 倍。铜颗粒增加了绝缘油的正负流注的发展速度,但在施加的电压范围内速度低于 20 km/s。正极性雷电冲击电压下绝缘油的加速电压与击穿电压之间的差距远大于负极性下,其中纯净绝缘油和含高颗粒浓度绝缘油的加速电压分别约为击穿电压的 1.8 倍与 2.1 倍,而负极性下仅分别约为 1.2 倍与 1.3 倍。

3 金属颗粒对流注发展影响机理分析

3.1 金属颗粒造成绝缘油流注起始电压降低机理

上述金属颗粒对绝缘油中流注起始与发展的影响试验表明:铜颗粒的掺入会使得绝缘油起始电压显著降低,流注分支更多,分形维数较高,流注停止长度更长,流注发展速度更快。这是由于流注发展过程中受到了扰动,比如流注通道的密度变化、杂质颗粒以及载流子波动等,导致流注形态的变化。为对试验结果以及金属颗粒与流注的相互作用进行分析探究,文中将通过 COMSOL 仿真平台模拟分析金属颗粒对针电极附近电场分布的影响规律。

假定铜颗粒为球形,直径为 $25\ \mu\text{m}$,铜颗粒放置在距离针间 d 的对称轴中心处,将具有最大值 $100\ \text{kV}$ 的正状态雷电冲击电压施加到针电极,并且将板电极设定为接地。 $100\ \text{kV}$ 雷电冲击电压下针电极的电场分布仿真结果如图 6 所示。

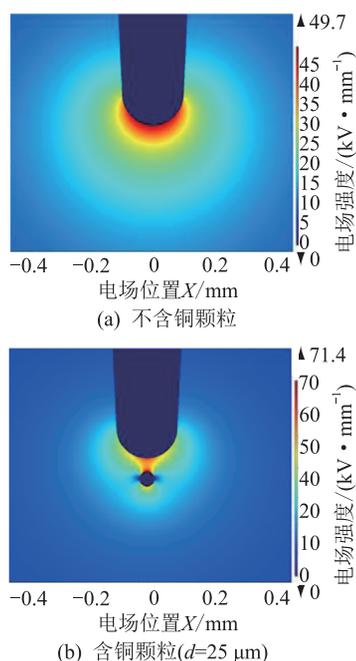


图 6 雷电冲击电压下针电极附近电场分布

Fig.6 Distribution of electric field near the needle electrode under the lightning impulse voltage

由图可知,针电极前方的铜颗粒会对电极附近的电场造成极大的影响。在电极的两侧,铜颗粒在电场的作用下其表面会感应出电荷,而这种电荷又会生成一个附加的电场,附加电场与绝缘油中的原始电场相关联,这些电场一起引起铜颗粒周围的电场的显著变形,即电极两侧的颗粒周围的电场显著增加。当铜颗粒距离针尖 $25\ \mu\text{m}$ 时,铜颗粒附近的最大电场达到了 $71.4\ \text{kV}/\text{mm}$,而当金属颗粒不存在

时针尖附近的最大电场仅仅为 $49.7\ \text{kV}/\text{mm}$ 。因此,当针尖附近存在铜颗粒时会大大提高针电极附近的电场,可能会更容易引导针电极放电,降低了流注的起始电压^[14]。

随着油中颗粒浓度的不断增加,颗粒间的平均距离会随之逐渐减小。因此仿真模拟了金属颗粒距针尖距离分别为 $12.5\ \mu\text{m}$ 及 $6.25\ \mu\text{m}$ 情况下的电场分布,如图 7 所示。由仿真结果分析可知,针电极间的最大电场会随着颗粒距针尖距离的减小而增大。表明随着油中颗粒浓度的增加,靠近尖端附近的电场会由于金属颗粒导致畸变程度的增加,大大增加了放电的可能性,进一步降低了流注的起始电压,因此导致绝缘油的流注起始电压会随着颗粒浓度的增大而降低。

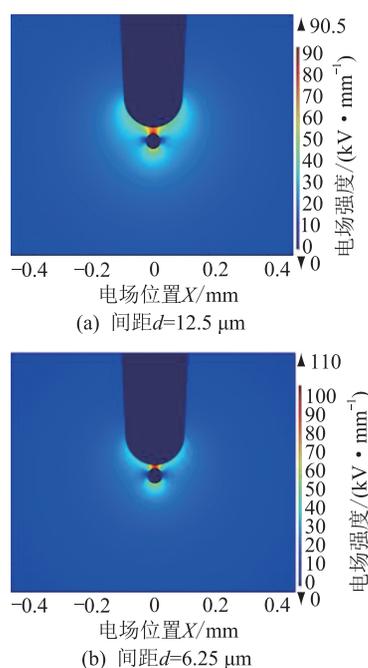


图 7 不同间隙距离针电极附近电场分布

Fig.7 Distribution of electric field near the needle electrode with different gap distances

3.2 金属颗粒造成流注分支形态和轴向形态变化机理

在含金属颗粒绝缘油中流注通道发展过程中,金属颗粒可以被认为是静止不动的,每个金属颗粒都可能会影响流注通道的发展。因此根据现有的流注理论进行分析,认为含金属颗粒绝缘油放电过程中金属颗粒与流注之间一般存在 3 个阶段的相互作用,如图 8 所示。

第一阶段,当流注前端碰到金属颗粒时,流注前端的电场显著提高了金属颗粒附近的电场强度,不仅提高了金属颗粒周围自由电子的温度并且促进了绝缘油中的电离过程,还促进了金属颗粒表面

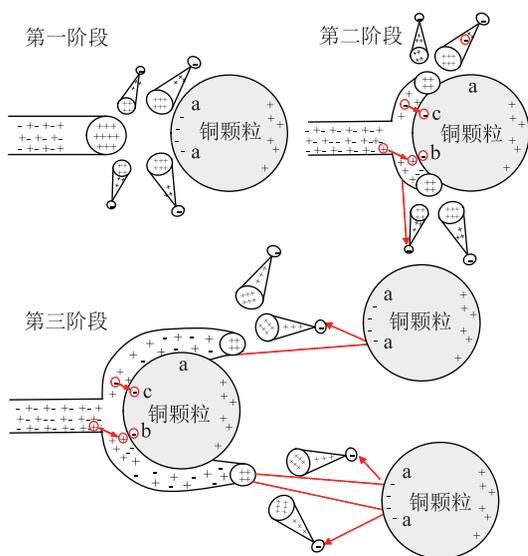


图8 流注发展过程中金属颗粒与流注的相互作用示意

Fig.8 Schematic diagram of interaction between metal particles and streamer in process of streamer development

的场致发射过程,进而大大提高了流注前端的自由电子的密度,促进了电子崩的不断产生,流注的发展速度因此得到了提升。第二阶段,流注发展到金属颗粒表面时,金属颗粒表面上会发生金属颗粒与流注之间的相互作用。虽然流注通道中的正离子与负离子有一部分会被金属颗粒俘获,但是由于金属颗粒表面的场致发射与光致发射仍然为流注的发展提供了大量自由电子,流注并没有被削弱。第三阶段,当流注通道离开上一个金属颗粒,朝着下一个或多个金属颗粒发展过程中,金属颗粒表面的场致发射会继续提高流注前端自由电子的密度,进而促进了流注的发展,这一阶段金属颗粒与流注的相互作用与第一阶段类似,但流注前段的电子崩可能会被金属颗粒分成2个分支,使得流注呈现树枝状发展。

因此,在流注起始阶段,油中存在的金属颗粒会引导针电极放电,降低流注的起始电压,导致绝缘油击穿电压的降低。在流注发展阶段,一方面会促使绝缘油中流注迅速向前发展,加快流注的发展速度,增大流注的停止长度,进一步降低了绝缘油的击穿电压;另一方面金属颗粒促进了流注呈树枝状发展,导致流注主通道两侧产生更多的旁支。

4 结论

文中通过开展预击穿电压下绝缘油中流注发展特性试验,对比分析了不同颗粒浓度绝缘油中流注停止长度、流注发展速度与流注分支形态等流注发展特征。实验中通过阴影成像试验平台获取油

中流注起始、发展与传播过程;通过对绝缘油施加不断提高的雷电冲击电压以获取流注速度,根据流注发展速度变化规律确定含不同颗粒浓度绝缘油的加速电压,最后通过 COMSOL 仿真等方法进行试验研究分析,得到结论如下:

(1) 绝缘油流注起始电压会受到金属颗粒浓度的影响,并且金属颗粒浓度越高起始电压越低;

(2) 在相近雷电冲击电压幅值下,含铜颗粒绝缘油流注停止长度、分形维数、流柱面积大于纯净绝缘油,且与颗粒浓度呈正相关。铜颗粒会加速绝缘油中流注的发展速度,降低绝缘油的加速电压,提高绝缘油的击穿速度。

参考文献:

- [1] RAPP K J, MCSHANE C P, VANDERMAAR J, et al. Long gap breakdown of natural ester fluid[C]// International Conference on High Voltage Engineering and Application, 2010: 104-107.
- [2] RAPP K J, CORKRAN J, MCSHANE C P, et al. Lightning impulse testing of natural ester fluid gaps and insulation interfaces [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2009, 16(6): 1595-1603.
- [3] TOP T V, LESAIN T A. Streamer initiation in mineral oil. Part II: influence of a metallic protrusion on a flat electrode [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2002, 9(1): 92-96.
- [4] LESAIN T O, TOP T V. Streamer initiation in mineral oil. Part I: electrode surface effect under impulse voltage [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2002, 9(1): 84-91.
- [5] USHAKOV V Y. Impulse breakdown of liquids [M]. Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [6] KURITA H, HASEGAWA T, KIMURA K. Dielectric breakdown characteristics of clean oil [C] // Conference Record of the 1992 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 1992: 433-436.
- [7] 李清. 变压器油中机械杂质的危害、来源及消除措施[J]. 河南电力, 1998 (4): 25-26.
LI Qing. Harm, sources and elimination measures of mechanical impurities in transformer oil [J]. Henan Electric Power, 1998 (4): 25-26.
- [8] 卞立华, 曹磊, 金怡. 固体颗粒杂质对变压器油绝缘性能的影响[J]. 上海电力, 2010 (3): 248-249.
BIAN Lihua, CAO Lei, JIN Yi. Effect of solid particle impurities on insulation performance of transformer oil [J]. Shanghai Electric Power, 2010 (3): 248-249.
- [9] 李清, 杨东凯. 主器油中机械杂质颗粒分布情况试验研究 [J]. 华中电力, 1999, 12(1): 27-29.
LI Qing, YANG Dongkai. Experimental study on distribution of mechanical impurity particles in main oil [J]. Huazhong Electric Power, 1999, 12(1): 27-29.

- [10] 卞立华, 曹磊, 商忠韬. 固体颗粒对变压器油绝缘性能的影响[J]. 电世界, 2012 (2): 52-53.
BIAN Lihua, CAO Lei, SHANG Zhongtao. Effect of solid particles on insulation performance of transformer oil[J]. Electrical World, 2012 (2): 52-53.
- [11] 付守海, 王淑娟. 变压器油中导电颗粒运动轨迹的计算[J]. 现代电力, 1999 (2): 30-37.
FU Shouhai, WANG Shujuan. Calculation of the trajectory of conductive particles in transformer oil[J]. Modern Electric Power, 1999 (2): 30-37.
- [12] 廖瑞金, 顾佳, 郝建, 等. 铜对不同组合变压器油纸绝缘系统热老化特性的影响[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 817-822.
LIAO Ruijin, GU Jia, HAO Jian, et al. Effect of copper on thermal aging characteristics of different combination transformer oil-paper insulation system [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 817-822.
- [13] KRINS M, BORSI H, GOCKENBACH E. Impact of carbon particles on the electrical strength of different solid/liquid interfaces in a non-uniform field[C]//Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2002: 363-368.
- [14] 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.
- [15] BEROUAL A, ZAHN M, BADENT A, et al. Propagation and structure of streamers in liquid dielectrics[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1998, 14(2): 6-17.
- [16] LUNDGAARD L, LINHJELL D, BERG G, et al. Propagation of positive and negative streamers in oil with and without press-board interfaces[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2002, 5(3): 388-395.
- [17] 陆云才. 一种确定含有特定颗粒含量的金属颗粒的质量的方法[P]. 中国专利: 201610154342.8, 2016-03-17.
LU Yuncai. Method for determining the quality of metal particles containing a specific particle content [P]. China Patent: 201610154342.8, 2016-03-17.
- [18] 林翔. 植物绝缘油长油隙雷电冲击放电特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
LIN Xiang. Study on lightning impulse discharge characteristics of long oil gap of plant insulating oil [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.

作者简介:



李伯男

李伯男(1995),男,硕士在读,研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail: 240098272@qq.com);

李熙(1992),男,硕士,研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail: ab478602519@163.com);

黄磊峰(1991),男,硕士在读,研究方向为高电压与绝缘技术。

Influence of metal particles on the development characteristics of insulating oil

LI Bonan¹, LI Xi¹, HUANG Leifeng¹, LIU Yang², WU Yiming², WU Peng²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment and System Security (Chongqing University), Chongqing 400044, China; 2. Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: In the process of manufacture, operation and maintenance of transformer, metal particles will inevitably be introduced into its internal insulation oil. In order to explore the influence of metal particles on the insulation performance of oil-paper, this paper builds a test platform for debugging lightning impulse discharge of oil-paper insulation, and carries out experimental research on the influence of metal particles on the development characteristics of oil-paper insulation. In this paper, the difference of initial voltage and development process of streamer with different concentrations of metal particles is studied and verified by COMSOL simulation platform. The results show that metal particles can promote the beginning and development of the streamer. The length and speed of stop and development of streamer are positively correlated with particle concentration, while the starting voltage and breakdown voltage of insulating oil streamer are negatively correlated with particle concentration. The analysis shows that the interaction between metal particles in oil and streamer is the main reason to reduce the starting voltage of streamer, accelerate the development of streamer, and then reduce the breakdown voltage of insulating oil.

Keywords: lightning impulse; metal particles; insulating oil; streamer

(编辑 方晶)