

DOI: 10.7652/xjtuxb201712018

极不均匀场中振荡型雷电冲击电压下 变压器油击穿特性研究

林春耀¹, 靳宇晖², 张哲铭², 李军浩², 周丹¹, 杨贤¹, 梁文进¹

(1. 广东电网有限公司电力科学研究院, 510000, 广州; 2. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对目前振荡型冲击电压和标准冲击电压的等效性研究尚不成熟的问题,采用 100、300、400 kHz 的正极性振荡型雷电冲击电压(OLI)和标准雷电冲击电压(SLI)进行对比,以间距为 5 mm 的针尖和球体作为电极,研究了极不均匀场中变压器油在振荡型雷电冲击电压下的击穿特性,记录了这 3 种频率的振荡型雷电冲击电压和标准雷电冲击电压的击穿波形,统计并分析了不同雷电冲击电压下的伏秒特性、起始击穿电压和最大击穿时延。结果表明:振荡型冲击电压下的变压器油击穿后会产生一定的振荡,需串接电阻抑制;标准雷电冲击电压的变压器油击穿点主要分布在波峰处,而振荡型雷电冲击电压的击穿点在每个振荡周期的峰值处都有分布;振荡型冲击电压的起始击穿电压随频率升高而上升,最大击穿时延随频率的升高而缩短,但比标准雷电冲击电压长。该研究为现场对变压器进行振荡型冲击耐压试验奠定了基础。

关键词: 击穿特性;振荡型冲击电压;变压器油;极不均匀场

中图分类号: TM835 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)12-0121-07

Breakdown Characteristics of Transformer Oil under Oscillating Lightning Impulse in a Highly Non-Uniform Electric Field

LIN Chunyao¹, JIN Yuhui², ZHANG Zheming², LI Junhao², ZHOU Dan¹,
YANG Xian¹, LIANG Wenjin¹

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000, China;
2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To reveal the equivalence between oscillating impulse voltage and standard impulse voltage (SIV) and the breakdown characteristics of transformer oil in a highly non-uniform electric field under oscillating lightning impulse, three positive oscillating lightning impulse(OLI) waveforms with oscillating frequency of 100, 300 and 400 kHz are adopted as the test waveforms to compare with the standard lightning impulse (SLI) and a 5 mm-distance point-ball structure serves as the electrode. Waveforms of these three kinds of OLI and SLI are recorded and the V-t characteristics, minimum breakdown voltage and breakdown maximum time lag in different lightning impulse are counted and analyzed. The results show that for a large oscillation of the breakdown waveforms under OIV, it is necessary to connect a resistance in series to restrain; the breakdown points distribute near the peak of wave under SLI while they distribute near the peaks in every period of oscillation under OLI; the minimum breakdown voltage under OIV increases

收稿日期: 2017-04-18。 作者简介: 林春耀(1965—),男,高级工程师;李军浩(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900804)。

网络出版时间: 2017-07-06 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170706.1830.004.html>

with the increasing frequency but the maximum breakdown time lag decreases with the increasing frequency and lasts longer than SLI.

Keywords: breakdown characteristics; oscillating impulse voltage (OIV); transformer oil; highly non-uniform electric field

电力变压器在电力系统中占据着至关重要的地位,其稳定性关系着电网的稳定运行。变压器在生产、运输、装配和运行过程中不可避免地会产生绝缘缺陷,这些绝缘缺陷会导致变压器整体绝缘性能的劣化,甚至使变压器发生绝缘故障,因此现场试验是确保变压器安全运行的重要环节。电力变压器在实际运行时会受到工频过电压和冲击过电压(操作冲击电压和雷电冲击电压)的威胁,随着电网电压等级的升高,对变压器耐压水平的要求也在显著上升,并且其绝缘水平主要由其耐受冲击电压的水平决定^[1]。所以,IEC 标准推荐在现场对变压器进行冲击耐压试验来检测其绝缘强度^[2-3]。

传统的双指数冲击电压发生器体积巨大,在现场不易搬运,难以在现场对变压器进行耐压试验,IEC60060-3 推荐使用振荡型冲击电压对变压器进行现场耐压试验。根据 IEC60060-3 标准,在产生标准冲击电压的电路中仅包含电阻和电容,在产生振荡型冲击电压的电路中则加入了电感,因此冲击电压的波形发生了振荡。在主电容充电电压相同的情况下,振荡型冲击电压电路产生的冲击电压峰值是双指数冲击电压电路产生电压峰值的 2 倍。因此,振荡型冲击电压产生效率高,更适合用于设备的现场耐压试验。IEC60060-3 标准中对振荡型冲击电压的定义是冲击电压迅速上升到峰值,然后在 1~400 kHz(1~15 kHz 范围属于操作冲击电压,16~400 kHz 属于雷电冲击电压,)之间进行阻尼振荡,衰减至零,其中有或无电压极性的改变,用包络线和振荡频率表述其特性。IEC60060-3 标准中列举的典型的振荡型雷电冲击电压如图 1 所示,其中 U_m 为冲击电压最大值。

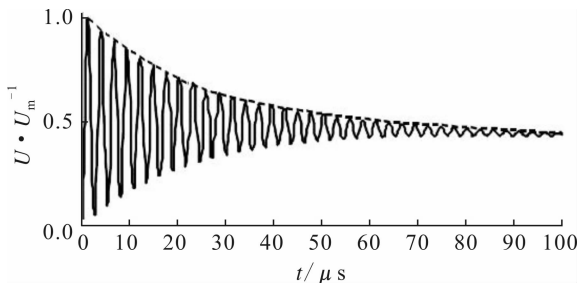


图 1 频率为 370 kHz 的振荡型雷电冲击电压波形

国内外的科研工作者已经对变压器油在工频过电压和双指数雷电冲击电压(尤其是 1.2/50 μ s 的标准雷电冲击电压)下的击穿特性做了大量详细的研究,而对变压器油在振荡型冲击电压下的击穿特性研究则相对较少,也不够成熟。有文献探讨了变压器绕组绝缘在标准冲击电压、非标准冲击电压和振荡型冲击电压下受到的电应力,并指出非标准冲击电压产生的电应力对绕组绝缘的威胁最大。文献[4-8]研究过油纸绝缘在振荡频率高达 10⁶ Hz 的冲击电压下的击穿特性,但并没有对 IEC60060-3 规定的 1~400 kHz 的振荡型冲击电压进行研究。

本文主要研究极不均匀场中的变压器油在不同振荡频率的极性振荡型冲击电压下的击穿特性,并将其与标准雷电冲击电压下的击穿特性进行对比,探讨两类不同冲击电压对变压器油击穿特性的影响。

1 试验平台的搭建

振荡型冲击发生器的示意图如图 2 所示。T 是充电变压器,电容 C_1 、 C_2 和高压硅堆 D_1 、 D_2 共同组成倍压电路,可以使主电容 C_2 上的电压达到充电变压器电压峰值的两倍。 C_3 是稳压电容,使冲击发生器输出的波形更稳定。G 是冲击发生器的触发球隙,当球隙击穿时,发生器将产生振荡型冲击电压并施加到被试样品上。球隙后串接电阻 R 是为了抑制击穿后产生的高频振荡。 L 是调波电感,改变 L 可以调节振荡型冲击电压的振荡频率,如果把 L 去掉,就可以产生非振荡的标准冲击电压波形。 R_f 是波头电阻,用于调节冲击电压的波前时间 T_f 。 R_t 是波尾电阻,用于调节冲击电压的波尾时间 T_t 。测量电压的分压器变比为 1 000:1。被试的变压器油样放在恒温箱中保温。试验样品如图 3 所示,电极为可以调节距离的针球电极,球电极选用磨光的精密

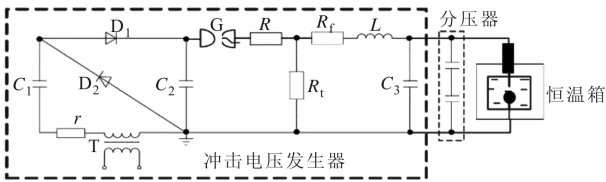


图 2 振荡型冲击电压发生器示意图

轴承钢珠,直径为 12.5 mm,在下端用一块磁铁将其固定。针电极为留声机的针,锥顶的曲率半径为 60~70 μm ,针球电极间的距离为 5 mm。

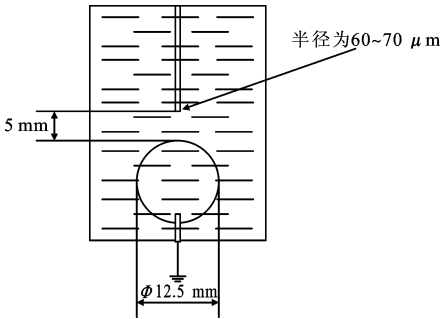


图 3 试验样品

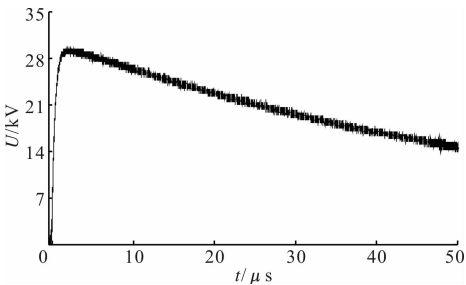
采用 DPO4054 示波器测量波形,采样率为 $2.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$,带宽为 500 MHz,输出波形如图 4 所示。图 4 中的波形参数如表 1 所示,产生这些波形的电路参数如表 2 所示。由图 4 和表 1 可知,所有电压波形均满足 IEC60060-3 标准的要求。在本文的表格中,标准代表标准雷电冲击电压,振荡(1)、振荡(2)、振荡(3)分别表示频率为 100、200、400 kHz 的振荡型雷电冲击电压。

表 1 冲击发生器输出波形参数

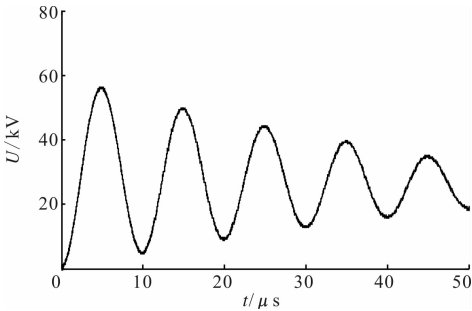
雷电冲击电压	$T_i/\mu\text{s}$	$T_f/\mu\text{s}$	f/kHz
标准	1.20	50.0	
振荡(1)	3.10	50.0	100
振荡(2)	1.50	50.0	300
振荡(3)	0.96	50.0	400

表 2 冲击发生器的电路参数

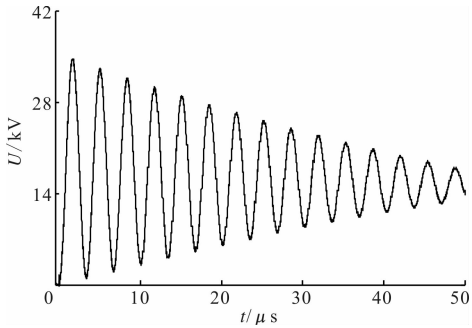
雷电冲击电压	L/mH	$R_f/\text{k}\Omega$	$R_i/\text{k}\Omega$
标准	0	2.020	9.78
振荡(1)	4	0.143	40.00
振荡(2)	327	0.143	40.00
振荡(3)	626	0.000	40.00



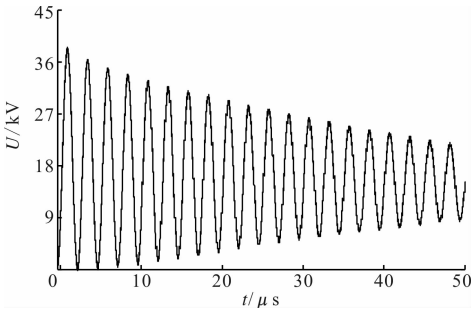
(a)标准雷电冲击电压



(b)100 kHz 振荡型雷电冲击电压



(c)300 kHz 振荡型雷电冲击电压



(d)400 kHz 振荡型雷电冲击电压

图 4 冲击发生器输出波形

试验所用变压器油的型号为 KI-25X,该型号的矿物油经常用于电力变压器的绝缘中。试验前,需要对被试油样进行过滤并放在真空烘箱(真空条件为-0.095 MPa,烘箱温度为 100 $^{\circ}\text{C}$)中干燥 24 h。试验时,用恒温箱使油样温度维持在 60 $^{\circ}\text{C}$ 。试验所用变压器油的基本参数^[9-14]如表 3 所示,表中水的质量分数是在 20 $^{\circ}\text{C}$ 时 1 kg 油样中所含水分的质量分数;介质损耗因数是 90 $^{\circ}\text{C}$ 时油样的介质损耗角正切值;油中糠醛的质量分数是指 20 $^{\circ}\text{C}$ 时油样中所含

表 3 被试油样的基本参数

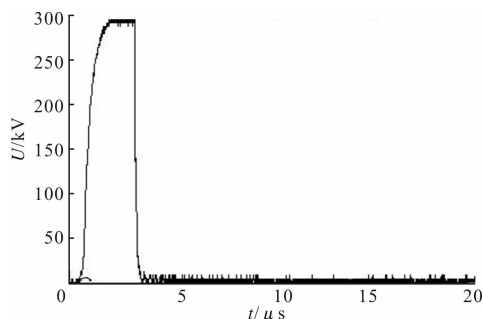
检测项目	检测结果	标准要求
水的质量分数	9.6×10^{-6}	$\leq 30 \times 10^{-6}$
介质损耗因数	0.000 67	≤ 0.05
糠醛质量分数	2×10^{-9}	$\leq 50 \times 10^{-9}$
酸值/mg	0.005 7	≤ 0.01

糠醛的质量分数;酸值是指大气压为 96.6 kPa、温度为 20 ℃、相对湿度为 36% 的条件下中和 1 g 油样中的酸所需的 KOH 的质量。

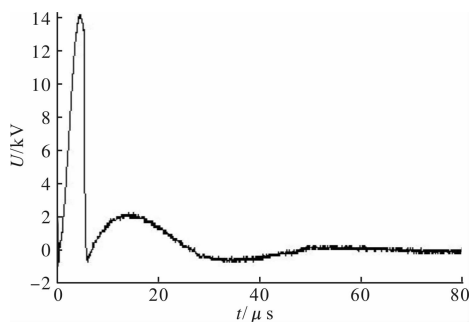
2 试验结果

2.1 击穿波形

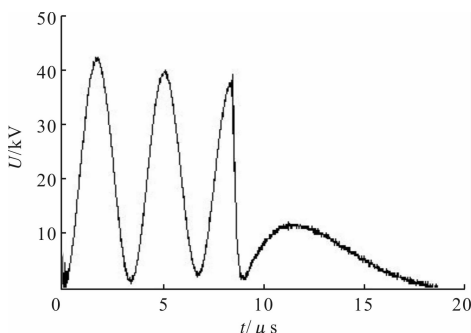
不同冲击电压下的击穿波形如图 5 所示。击穿总是发生在振荡雷电冲击电压周期性振荡的波峰处,且随着振荡频率的升高,击穿点所在的周波数逐渐增加。在振荡雷电冲击电压作用下,变压器油击穿使电压迅速衰减到 0 后还会出现一次振荡上升;在标准雷电冲击电压作用下击穿后,电压迅速衰减至 0 且不发生振荡。击穿后电压衰减的方式不同是由于图 2 所示回路中的调波电感 L 导致的。产生振荡型冲击电压的回路中存在调波电感 L ,所以发



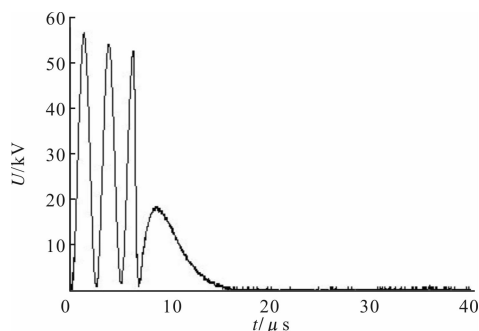
(a) 标准雷电冲击电压



(b) 100 kHz 振荡雷电冲击电压



(c) 300 kHz 振荡雷电冲击电压



(d) 400 kHz 振荡雷电冲击电压

图 5 不同冲击电压下的击穿波形

生击穿后电压波形在电感 L 作用下会产生一定的振荡,尽管通过串接电阻已经把振荡进行了一定的抑制,但击穿波形还会存在较大的振荡;而产生标准雷电冲击电压的回路中没有调波电感 L ,所以击穿后电压不发生振荡。

2.2 起始击穿电压

标准雷电压冲击电压的起始击穿电压为 70 kV,不同冲击电压下的起始击穿电压如图 6 所示。从中可知:一方面,起始击穿电压随振荡频率的升高而逐渐上升;另一方面,起始击穿电压受振荡频率的影响随频率的升高而减小。

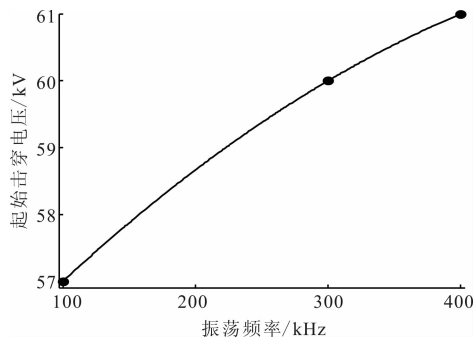
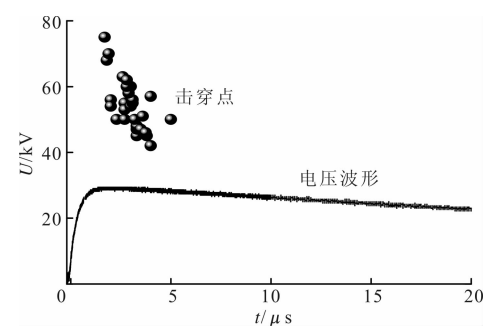


图 6 不同频率振荡雷电冲击电压下的起始击穿电压

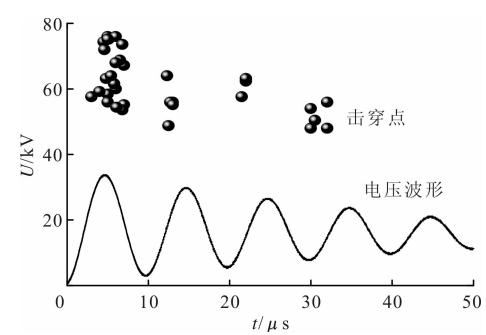
2.3 伏秒特性

不同冲击电压下的击穿点分布如图 7 所示。标准雷电冲击电压和振荡雷电冲击电压的击穿点分布有明显区别,标准雷电冲击电压仅在波峰和波峰后 5 μs 内有击穿点分布,振荡雷电冲击电压的击穿点在头几个振荡周波都有分布。振荡雷电冲击电压频率不超过 300 kHz 时,击穿点仅分布在每个振荡周波的波峰处,波谷处无击穿点分布,振荡雷电冲击电压频率超过 300 kHz 时,波谷处也会出现击穿点。

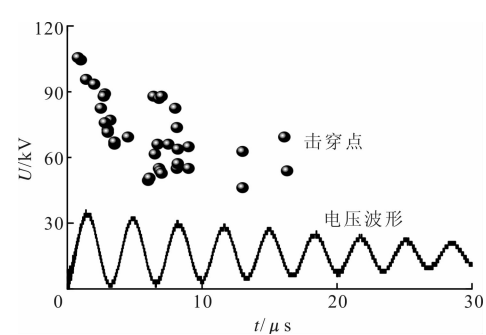
不同冲击电压下的最大击穿时延 $t_{\max}$ 如表 4 所示。振荡雷电冲击电压的最大击穿时延比标准雷电冲击电压的长,且随振荡频率的升高而缩短。



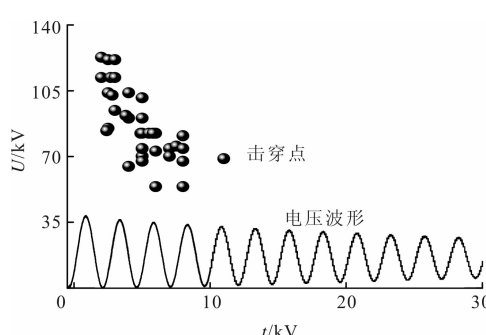
(a)标准雷电冲击电压



(b)100 kHz 振荡雷电冲击电压



(c)300 kHz 振荡雷电冲击电压



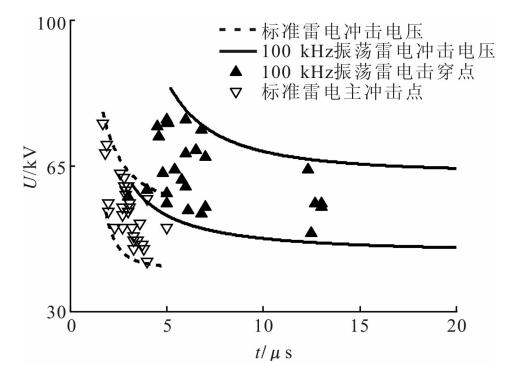
(d)400 kHz 振荡雷电冲击电压

图 7 不同冲击电压下的击穿点分布

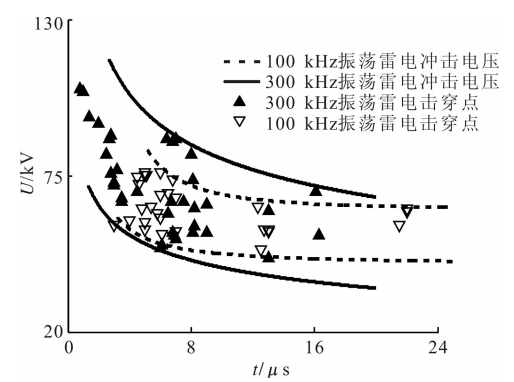
不同冲击电压下的伏秒特性如图 8 所示。由图中可以看出:标准雷电冲击电压下的伏秒特性整体上低于 100 kHz 振荡雷电冲击电压下的伏秒特性;随着频率的增加,振荡雷电冲击电压的击穿电压有所上升,伏秒特性曲线随着频率上升而整体上移。

表 4 不同冲击电压下的最大击穿时延

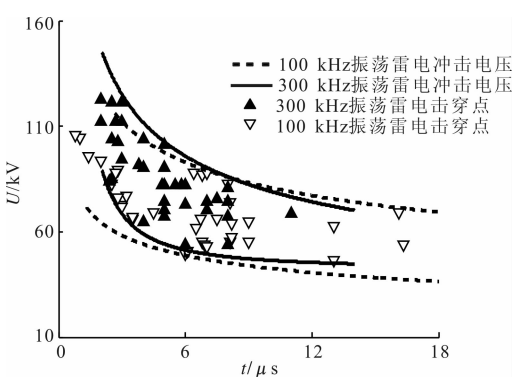
雷电冲击电压	$t_{\max}/\mu\text{s}$
标准	5
振荡(1)	12
振荡(2)	17
振荡(3)	33



(a)标准雷电与 100 kHz 振荡雷电冲击电压



(b)100 kHz 与 300 kHz 振荡雷电冲击电压



(c)300 kHz 与 400 kHz 振荡雷电冲击电压

图 8 不同冲击电压下的伏秒特性曲线

3 结果分析与讨论

极不均匀场中液体电介质在冲击电压下的击穿是一个复杂的物理过程。文献[15]指出,冲击电压的幅值和作用时间对击穿过程有很大的影响。在尖

球电极上施加足够大的正极性冲击电压时,针尖电极附近的油分子在强电场作用下发生电离,在针尖附近形成起始的流注,从零时刻到流注起始所经历的时间称为统计时延 t_{inc} 。电离产生的电子被针尖电极(阳极)吸收,体积和质量较大的正离子不易移动,分布在针尖电极周围,加强了流注前方的电场,使流注前方进一步发生电离,直至击穿。此外,在电离区域附近的油中会出现微小的气泡,这些气泡中发生的电离会产生更多的带电粒子,并使流注周围的电场进一步畸变,加速流注的发展。从流注起始到击穿所经历的时间称为形成时延 t_{pro} 。总的击穿时延 t_b 是统计时延 t_{inc} 和形成时延 t_{pro} 的总和^[16-19]。

当击穿发生在波前时,统计时延 t_{inc} 在击穿时延 t_b 中起主导作用,它随着电压幅值的升高而降低。当波前时间随振荡频率的增加而缩短时,统计时延缩短,则击穿电压升高,所以起始击穿电压随频率的增加而升高。

当击穿发生在波尾时,如图9所示,振荡雷电冲击电压的幅值会随着振荡周期性地上升和下降,导致尖球电极之间的电场也会周期性地增大和减小。变压器油中的击穿为场致击穿,在流注发展过程中,流注通道不是超导形态的,所以随着流注的发展,会在流注通道内形成一个电压降 ΔU ,导致流注头部场强削弱。如果此时场强低于电离临界场强,则流注发展停滞,认为此时只发生了一次局部放电。在振荡冲击电压下降沿,由于作用电压下降,再加上流注通道内的“压降”,击穿就更难形成。所以,振荡雷电冲击电压的击穿点主要分布在周期性振荡的峰值处。标准雷电冲击电压的幅值不存在因波谷造成的周期性衰减,流注在标准雷电冲击电压的作用下发展较快,所以标准雷电冲击电压的最大击穿时延比

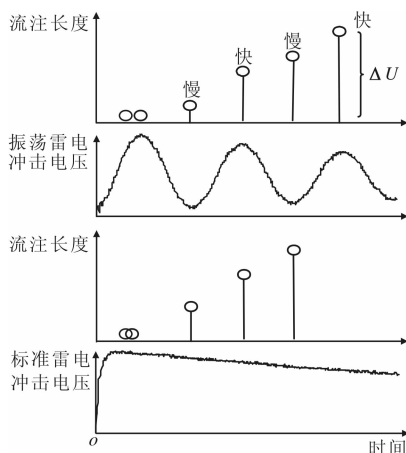


图9 流注发展示意图

振荡雷电冲击电压短。这与表4所示的结果吻合。

当振荡雷电冲击电压的振荡频率升高时,每个波谷的持续时间缩短,对流注的抑制作用减小,所以流注发展得比振荡频率低时要快。此外振荡频率越高,击穿电压的幅值越高,冲击电压幅值较高时,流注可以“桥接”电极间隙,导致击穿,从而缩短了击穿时延。由于上述两个原因,振荡雷电冲击电压的频率越高,最大击穿时延越短,这与表4所示的结果吻合。

4 结 论

本文采用100、300、400 kHz的正极性振荡雷电冲击电压和标准雷电冲击电压进行对比,以间距为5 mm的针尖和球体作为电极,研究了极不均匀场中变压器油在振荡型雷电冲击电压下的击穿特性,得出了以下结论。

(1)与标准雷电冲击电压相比,由于振荡型冲击电压产生回路中存在调波电感 L ,其电压波形在击穿后会发生振荡,在触发球隙后串接电阻可以抑制该振荡。

(2)标准雷电冲击电压仅在波峰和波峰后 $5 \mu s$ 内有击穿点分布,振荡雷电冲击电压的击穿点主要分布在周期性振荡的峰值处。

(3)振荡雷电冲击电压的最大击穿时延随频率的升高而缩短。标准雷电冲击电压的最大击穿时延小于振荡雷电冲击电压。振荡雷电冲击电压的起始击穿电压随频率升高而上升。

现场对变压器进行振荡雷电冲击耐压试验时,主要关注击穿电压的幅值,为了保证等效性,所以应尽量采用起始击穿电压与标准雷电冲击电压接近的振荡雷电冲击电压进行试验。

本文研究时所加电压均为正极性电压,负极性电压下的击穿特性还有待后续研究。

参考文献:

- [1] 严璋,朱德恒. 高电压绝缘技术 [M]. 2版. 北京:中国电力出版社,2007:206-230.
- [2] 能源部电力科学研究院. 绝缘液体雷电冲击击穿测定方法:DL418-91 [S]. 北京:中国国家标准化管理委员会,2007.
- [3] IEC. High voltage test techniques: part 3 Definitions and requirements for on-site tests: IEC60060-3 Ed. 1.0 [S]. Geneva, Swiss: IEC, 2005.
- [4] LIANG J, ZHANG L, LI J, et al. Study on oscillating switching impulse voltage generation for power

- transformer onsite test [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2223-2230.
- [5] 王喆, 张乔根, 王同磊. 非标准雷电冲击电压下油纸绝缘击穿特性 [J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2931-2937.
- WANG Zhe, ZHANG Qiaogen, WANG Tonglei. Non standard lightning impulse breakdown voltage of oil paper insulation [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2931-2937.
- [6] 李元, 穆海宝, 邓军波. 正极性纳秒脉冲电压下变压器油中流注放电仿真研究 [J]. 物理学报, 2013, 62(12): 334-344.
- LI Yuan, MU Haibao, DENG Junbo. The positive streamer discharge simulation of transformer oil under the voltage of nanosecond pulse [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(12): 334-344.
- [7] 赵学风. 冲击电压下 SF₆ 气体绝缘典型缺陷的局部放电特性及其应用研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2011: 15-16.
- [8] 周远翔, 孙清华, 李光范. 空间电荷对油纸绝缘击穿和沿面闪络的影响 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(2): 27-33.
- ZHOU Yuanxiang, SUN Qinghua, LI Guangfan. The space charge effect of insulation breakdown and surface flashover of oil paper [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2011, 26(2): 27-33.
- [9] LIU R, JAKSTS A. Breakdown processes in transformer insulation under LI voltages [C]// 2005 IEEE International Conference on Dielectric Liquids. Piscataway, NJ. USA: IEEE, 2005: 75-78.
- [10] OKAE S, KOUTOU M, KAWASHIMA T, et al. Dielectric characteristics of oil-filled transformer insulation models under nonstandard lightning impulse voltages [C]// Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999: 345-348.
- [11] OKABE S. Voltage-time and voltage-number characteristics of insulation elements with oil-filled transformers in EHV and UHV classes [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2006, 13(2): 436-444.
- [12] POMPILI M, MAZZETTI C, BARTNIKAS R. Phase relationship of PD pulses in dielectric liquids under ac conditions [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2000, 7(1): 113-117.
- [13] MENDES J C, REIS A S G, NOGAWA E C. Advanced application of a natural ester vegetable oil in a HV power transformer [C]// 42nd International Conference on Large High Voltage Electric Systems 2008. Paris: France: CIGRE, 2008: 1-6.
- [14] 石油化工科学研究院. 变压器油: GB 2536—90 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1990.
- [15] LIU Rongsheng, JAKSTS A. Breakdown processes in transformer insulation under LI voltages [C]// 2005 IEEE International Conference on Dielectric Liquids. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 75-78.
- [16] MCCLUSKEY F M J, DENAT A, LESAIN O. Breakdown and prebreakdown phenomena in liquids under positive impulse voltages [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 1994, 1(3): 377-382.
- [17] TORSHIN Y V. Initiation and propagation of the negative leader in transformer oil under impulse voltage [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2009, 16(6): 1536-1542.
- [18] BHUYAN K, CHATTERJEE S. Study of effects of standard and non-standard impulse waves on power transformer [C]// Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 1-4.
- [19] ROZGA P. Influence of paper insulation on the pre-breakdown phenomena in mineral oil under lightning impulse [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2011, 18(3): 720-727.

[本刊相关文献链接]

- 赵煦, 刘晓航, 孟永鹏, 等. 采用小波包树能量矩阵奇异值分解的局部放电模式识别. 2017, 51(8): 116-121. [doi: 10.7652/xjtuxb201708019]
- 崔彦捷, 彭平, 曹沛, 等. 针板电极下局部放电对油浸绝缘纸板表面的影响. 2017, 51(4): 37-44. [doi: 10.7652/xjtuxb201704006]
- 邵先军, 何文林, 刘石, 等. 电力设备局部放电特高频电磁波数值计算技术研究. 2016, 50(12): 24-31. [doi: 10.7652/xjtuxb201612005]
- 赵煦, 孟永鹏, 成永红, 等. 变压器绕组对局部放电电磁波传播特性的影响. 2015, 49(4): 6-11. [doi: 10.7652/xjtuxb201504002]
- 卢为, 成永红, 王增彬, 等. 环氧及其复合材料在变压器油中的快脉冲闪络特性. 2010, 44(10): 83-87. [doi: 10.7652/xjtuxb201010016]

(编辑 杜秀杰)