

文章编号: 1001-4322(2005)02-0268-03

重频纳秒高压脉冲下变压器油击穿特性的实验研究*

王 珏¹, 邵 涛^{1,2}, 袁伟群¹, 严 萍¹, 张适昌¹, 孙广生¹

(1. 中国科学院 电工研究所 北京 100080 2. 中国科学院 研究生院 北京 100080)

摘 要: 介绍了重频纳秒高压脉冲下变压器油绝缘特性研究的现状和成果。进行了重频(1 Hz~1 kHz)纳秒高压脉冲下 25[#] 变压器油击穿特性的实验研究。实验发现相对于单次纳秒脉冲,重频脉冲下 25[#] 变压器油的击穿场强与频率相关,频率提高,击穿场强降低,但不是线性关系,在频率超过 100 Hz 时变压器油的击穿场强变化较小,在 10~100 Hz 时变压器油的击穿场强迅速下降。初步总结了重复频率、脉冲宽度和击穿场强的关系,对重频脉冲下变压器油的击穿机理进行了初步的探讨。

关键词: 纳秒脉冲; 重复频率; 变压器油; 击穿特性

中图分类号: TM855 **文献标识码:** A

高压纳秒脉冲下变压器油的击穿研究已经开展多年,取得了一定的成果^[1~4]。由于电源的限制,重频纳秒脉冲下变压器油击穿特性的研究很少。随着脉冲功率技术的发展,研究重频下材料绝缘特性的客观需求越来越迫切,相关的电源技术也逐渐成熟^[5]。

近年来,重频脉冲下绝缘问题的研究有所展开,美国空军研究实验室^[6]采用 130 ps 上升沿,300 ps 脉宽,最高输出电压 1 MV,频率 1~1 200 Hz 的脉冲发生器,进行了平板电极下(12.5 mm²)变压器油击穿特性的研究。击穿场强的定义为:最大不发生击穿的场强(不是 50% 击穿)。从结果中看出在 100~1 000 Hz 频率范围内油的击穿场强比单次脉冲作用下减小了一半左右,大约 5.5 MV/cm,而且击穿场强基本不变,当频率超过 1 000 Hz 时击穿场强开始进一步下降,不过由于更高频率的击穿没有数据,还无法判断其下降规律。国内中国工程物理研究院、西北核技术研究所等也进行了相关的实验,取得了相应的结果。但要形成有指导意义的结果,还需要作大量的实验研究工作。本文对脉冲宽度 30 ns、重频条件下(1~1 000 Hz)变压器油绝缘特性进行了初步的实验研究。

1 实验与讨论

1.1 实验条件和方法

实验线路图如图 1 所示。脉冲发生器^[7]的输出电压为 50~200 kV,脉冲宽度(半高宽)为 20(70 kV)~30 ns(180 kV),频率为 1~1 000 Hz 分档可调,电压幅值波动 ±3%,电压输出波形(包络线)如图 2 所示。电压测量采用电容分压器,分压比 4 780;电流测量采用分流器(0.206 Ω),典型击穿波形和重频时间测量波形如图 3、图 4 所示。波形采集用 Tek684A, Tek3054B 示波器,示波器采用单次触发模式(电流触发)。与单次脉冲放电不同,重频脉冲下的放电是在施加重频电压后的某个脉冲时击穿,因此需要测量重频耐受时间 t 。通过耐受时间可以推断间隙是在施加电压后的第几个脉冲下击穿的。重频耐受时间的记录由 TDS3054B 示波器完成。先设置 TDS3054B 一定的扫描时间,在启动触发脉冲发生器 SPG200 输出重频脉冲电压时,同步给 TDS3054B 扫描记录起始信号。当间隙击穿时,电流触发示波器 TDS684A 同步输出一个约 4V 的低电平,作为 TDS3054B 示波器的终止信号。

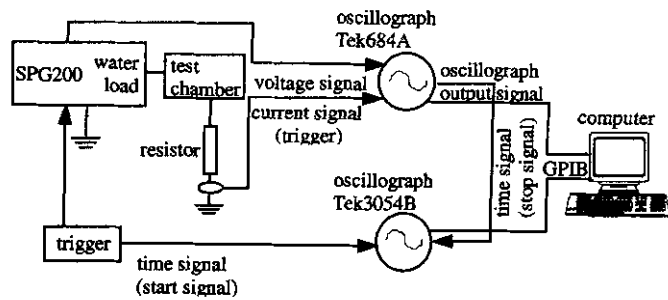


Fig. 1 Circuit of repetitive pulses breakdown experimental system

图 1 实验线路图

* 收稿日期 2004-06-30; 修订日期 2004-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目资助课题(50437020)

作者简介: 王珏(1972—), 助理研究员, 从事脉冲功率和高压绝缘方面研究, E-mail: wangjue@mail.iee.ac.cn.

实验腔为标准油杯 ,间隙距离为 0.3 ~ 1.5 mm ;实验用一般过滤 25# 变压器油 ,直流击穿场强 16.5 kV/mm ;实验环境温度为 18 ~ 23 ℃ ;大气相对湿度 35% ~ 55%。

实验方法 :分别施加单次脉冲(时间间隔大于 5s)大于 10 次 ,1 Hz 脉冲 100 s ,10 Hz 脉冲 100 s ,100 Hz 脉冲 40 (3 次) ,500 Hz 脉冲 20 (3 次) ,1 000 Hz 脉冲 20 (3 次)。如果不发生击穿则认为不击穿 ,如果发生一次击穿则在相同条件下追加至少 3 次相同实验 ,统计击穿概率。

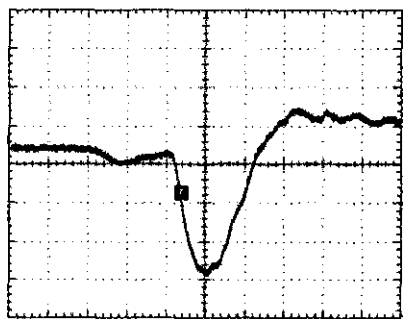


Fig. 2 Voltage output waveforms (envelope)

图 2 电压输出波形

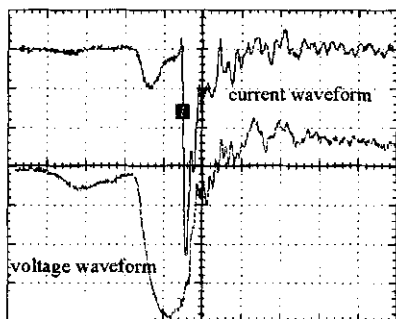


Fig. 3 Breakdown voltage and current waveforms

图 3 典型击穿电压电流波形

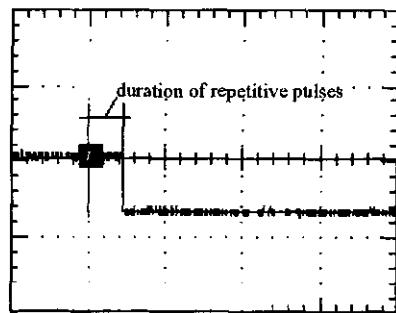


Fig. 4 Measurement of repetitive pulse duration

图 4 重频时间测量

1.2 实验结果

由于脉冲发生器电压准确调节比较困难 ,50% 击穿场强很难测得 ,所以我们没有采用 50% 击穿法来确定击穿电压 ,主要通过调节间隙来取得最小击穿电压(即最大不击穿电压)和击穿电压(即 100% 击穿电压)数据有一定分散性。图 5 表示变压器油的击穿情况。图中显示了间隙在 0.6 ~ 1.5 mm 的实验结果。可以看出脉冲频率从 10 Hz 升高到 100 Hz 的过程时 ,变压器油的击穿强度开始显著下降 ,电场的积累效应明显 ,频率继续增加 ,变压器油击穿场强的降低速度变慢。测量发现 ,变压器油从施加一定频率脉冲到击穿所需的时间分散性较大 ,需要进一步大量的实验工作进行统计。图中在安全区域内 ,不会发生击穿 ,在不稳定区域内击穿有可能发生 ,不过准确的击穿概率分布曲线还未能取得 ,需要进一步的实验、科学的统计分析及更加准确的对各参量进行定义。在击穿区域内 ,变压器油一定发生击穿。当间隙距离在 0.3 ~ 0.5 mm 时 ,变压器油的击穿场强相对提高 ,在 100 Hz 时 ,0.3 mm 间隙击穿的最小电场强度为 287 kV/mm ,提高将近 50%。

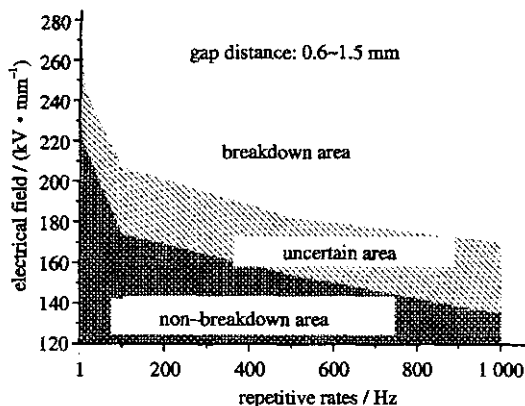


Fig. 5 Breakdown data for transformer oil under repetitive pulses
图 5 变压器油重频下击穿特性

2 分析和总结

液体击穿是一个复杂的过程 ,到目前为止还无法全面了解其击穿机理^[3,8]。纯净的变压器油主要由环烷烃和少量芳香烃、烷烃构成 ,属于弱极性电介质。施加电场后 ,主要发生电子位移极化 ,它的击穿场强极高 ,直流下可以达到 400 kV/mm(标准条件下)^[9] ,而工程中使用的变压器油含有大量杂质 ,包括水分、各种气体、有机酸、纤维等 ,其击穿强度下降 19/20 ,标准规定工程变压器油在标准条件下击穿电压不小于 40 kV(2.5 mm 间隙)。杂质是工程变压器油绝缘强度下降的根本原因 ,实验中我们用一般过滤的 25# 变压器油。

水分是影响变压器油的重要因素。水分子属于强极性介质 ,电场作用下它有强烈的热转向极化 ,热转向极化的建立和恢复的时间较长(10⁻⁵ ~ 10⁻² s) ,所以当施加纳秒级脉冲时 ,极化的速度无法跟上电场的变化 ,它的热转向极化对击穿没有贡献 ,所以单次纳秒脉冲下变压器油的绝缘特性远高于一般的慢过程 ,实验表明单次脉冲作用下变压器油击穿场强略高于 1 Hz 重频脉冲作用下变压器油的击穿场强。当施加重复频率的脉冲后 ,由于电场的持续作用 ,水分子的热转向极化会产生积累效应 ,从而影响其绝缘特性。在不断施加的脉冲场作用下 ,变压器油中的水分会逐渐出现宏观电矩。形象地说 ,它会沿电场方向伸长而形成导电锁链 ,这将急剧降低

变压器油的击穿场强。当然水分在变压器油中的不同存在形式对变压器油绝缘强度的影响也是不同的。变压器油中其它的极性杂质也会发生相同的现象, 这些都会影响变压器油的绝缘性能, 所以在重频作用下变压器油的击穿强度会下降。根据资料分析和实验结果发现, 变压器油击穿强度显著下降的频率应该在 10 ~ 100 Hz 之间, 而在 1 kHz 左右时可能也有一个明显的下降^[2], 这些绝缘强度变化的转折点应该和油中不同杂质的极化时间相对应, 我们将在这方面进行更加具体和深入的研究。

致 谢 感谢西北核技术研究所 6 室提供实验场地和设备。感谢苏建仓博士、俞建国等人在实验过程中给予的帮助和支持。

参考文献 :

- [1] Mankowski J J. High voltage subnanosecond dielectric breakdown[D]. Texas USA : Texas Tech University , 1997.
- [2] 王珏, 严萍, 张适昌, 等. 纳秒级高压脉冲下绝缘击穿特性的研究[J]. 高电压技术, 2004, **30**(6) : 42—44. (Wang J, Yan P, Zhang S C, et al. High voltage nanosecond breakdown in dielectric. *High Voltage Engineering*, 2004, **30**(6) : 42—44)
- [3] Martin T H, Guenther A H, Kristiansen M. J. C. Martin on pulsed power[M]. New York, USA : Plenum Press , 1996.
- [4] Agee F J, Scholfield D W, Copeland R P, et al. A review of catastrophic electromagnetic breakdown for short pulse widths[A]. SPIE's 1996 International Symposium on Optical Science, Engineering and Instrumentation[C]. Denver, CO, 1996.
- [5] Schamiloglu E, Schoenbach K H. Basic research on pulsed power for narrowband high power microwave sources[A]. SPIE-Intense Microwave Pulses IX[C]. Orlando, 2002. 2—3.
- [6] Lehr J M, Agee F J, Copeland R, et al. Measurement of the electric breakdown strength of transformer oil in the sub-nanosecond regime [J]. *IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1998, **5**(6) : 857—861.
- [7] Su J C, Liu G Z, Ding Y Z, et al. Nanosecond sos-based pulsed generator SPG200[A]. Proceedings of the Third International Symposium on Pulsed Power and Plasma Applications[C]. Sichuan : Mianyang, 2002. 258—261.
- [8] 陈季丹, 刘子玉. 电介质物理学[M]. 北京 : 机械工业出版社, 1982. (Chen J D, Liu Z Y. Dielectric physics. Beijing : China Machine Press , 1982)
- [9] 谢恒堃. 电气绝缘结构设计原理(下) [M]. 北京 : 机械工业出版社, 1993. (Xie H K. Principle of electrical insulation structure design. Beijing : China Machine Press , 1993)

Study on transformer oil breakdown under repetitive nanosecond pulses

WANG Jue¹, SHAO Tao^{1,2}, YUAN Wei-qun¹, YAN Ping¹, ZHANG Shi-chang¹, SUN Guang-sheng¹

(1 Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences Beijing 100080, China ;

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences Beijing 100080, China)

Abstract : In this paper, the results of repetitive nanosecond breakdown in transformer oil are introduced. The breakdown characteristics of 25# transformer oil under repetitive nanosecond pulses ranged from 1 Hz to 1 000 Hz and the gap distances range from 0.3 ~ 1.5 mm have been investigated. The breakdown waveforms of voltage, current and breakdown time have been measured. The results indicate that ns level high voltage pulse breakdown field is much higher than breakdown in DC and AC. The breakdown field value decreases with the repetitive rate increases. From 10 Hz to 100 Hz, the breakdown field falls quickly. When repetitive rates exceed 100 Hz, the field value fall down speed is slow. The experimental results show that the lowering of the breakdown electric field under repetitive pulses conditions is likely due to the " accumulation effect ".

Key words : Nanosecond pulse ; Repetitive rates ; Transformer oil ; Breakdown