

油/纸绝缘沿面局部放电特性研究

李军浩, 司文荣, 姚秀, 梁基重, 罗勇芬, 李彦明

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 采用局部放电测量方法,研究了油/纸沿面从局部放电起始到贯穿闪络整个过程中局部放电量、放电谱图、放电频率及单个放电脉冲的变化情况.采用两种具有不同老化程度的油样研究了油样在沿面闪络过程中对局部放电测量结果的影响.研究表明,在初始电子产生阶段,放电量 and 放电频率均很小,放电集中在工频峰值处,随着电压的升高,放电量 and 放电频率随之升高,放电处于工频上升处.当临近沿面闪络时,放电量会迅速增大,放电脉冲呈现脉冲序列形式,会听到较大的放电声.油样的老化会降低局部放电起始电压,并导致沿面放电在流注发展阶段的放电量 and 放电频率增加.

关键词: 局部放电;沿面放电;流注;局部放电谱图;油纸绝缘

中图分类号: TM835.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)06-0108-05

Partial Discharge Characteristics over Oil/Paper Interface

LI Junhao, SI Wenrong, YAO Xiu, LIANG Jichong, LUO Yongfen, LI Yanming

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The discharge charges, discharge pattern, discharge frequency and current pulse are measured from partial discharge (PD) inception to flashover. Two oil specimens with different aging degree are used, and its influence on flashover process over oil/paper interface is investigated in this experiment. The results indicate that the PD charges and PD frequency are small in inception stage, and PD happens in the crest of power frequency. The PD charges and PD frequency increase with the applied voltage rising, and PD occurs in the ascent block of power frequency. The PD charges significantly increase when the discharge develops to critical flashover stage, and the current pulse bursts. The PD inception voltage decreases to some extent in aged oil specimen. The oil aging degree exerts a great influence on PD charges and PD frequency in streamer development stage.

Keywords: partial discharge; interface discharge; streamer; partial discharge pattern; oil/paper insulation

随着我国电力工业的发展和电压等级的不断提高,电力变压器的容量和等级也随之不断增大,而大容量超高压变压器的安全运行关系着整个电网的安全.油纸绝缘系统是大型电力变压器中常用的绝缘方法,近年来我国高压变压器的故障不少是由于油中固体绝缘(围屏、撑条、纸板等)的沿面放电所致,因此对油纸沿面放电的特性及其检测方法的研究有

着重要意义^[1-3].

国内外很多学者对油纸沿面放电的研究多集中在沿面闪络电压的分布、影响沿面闪络电压的因素等方面^[4-5],而对其闪络过程中的表现研究得不多.大型电力变压器中的沿面闪络多是由变压器油和绝缘纸板交界面上的流注不断发展而形成的,其外在表现是局部放电的产生^[6].因此,通过对局部放电的

检测可以实现对油纸沿面放电的早期检测,从而避免沿面闪络的形成。

本文使用阶升电压对变压器油和纸板表面的沿面放电特性进行了研究,测量并分析了从局部放电发生到沿面闪络贯穿形成整个过程中局部放电谱图、放电量、放电频率及放电脉冲的变化情况.使用不同老化程度的油样,研究了油样对于油纸沿面放电的影响.研究为使用局部放电测量进行油纸沿面放电的早期检测提供了试验基础。

1 测量系统及试品结构

系统的电源部分采用无局部放电交流试验变压器,其额定电压 $U_N = 100\text{ kV}$,额定功率 $S_N = 10\text{ kV} \cdot \text{A}$,100 kV 以下放电量小于 5 pC.采用基于 IEC60270 方法的 PDchecker 局部放电测量系统和示波器记录两种方法进行局部放电测量,PDchecker 局部放电测量系统可以记录放电基于相位分析的放电 (PRPD) 谱图、放电量等参数.采用 $50\text{ }\Omega$ 宽带测量阻抗和 TEK4054 示波器可进行放电脉冲波形的宽带测量^[7-8].TEK4054 示波器具有 500 MHz 带宽、2.5 GHz 采样率.试验系统的主要部分如图 1 所示。

试品结构如图 2 所示,该模型具有较强的法向电场分量.采用厚度为 1 mm 的新魏特曼纸板和两种不同老化程度的变压器油进行试验.油样 1 采用新的 25# 变压器油,油样 2 是从一台接近寿命终点的 220/110 kV、120 MV·A 电力变压器取样获得.纸板在使用前均经过干燥及充分浸油处理.变压器油样参数如表 1 所示。

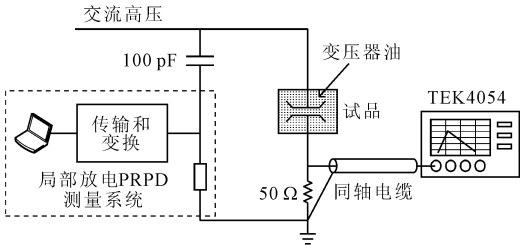


图 1 局部放电测量系统
表 1 油样电气及化学参数

试品	交流击穿电压 /kV	$\tan\delta$	酸值	微水量/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	糠醛/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
油样 1	42	0.002 5	0.018	21.4	0.00
油样 2	30	0.018 4	0.039	32.8	0.25

注:此处交流击穿电压为电极距离 2.5 mm 时的油样击穿电压;介损值测量温度为 90 ℃;酸值指 1 g 试样所需 KOH 的 mg 值。

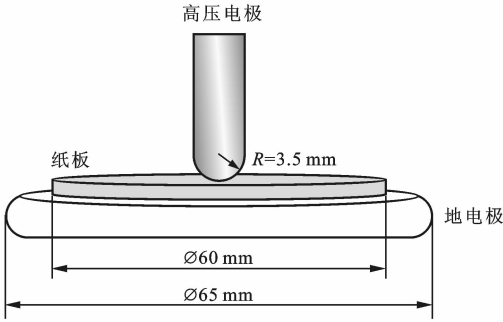


图 2 试品结构

从表 1 可以看出,老化油样中微水及糠醛等杂质含量增高,体击穿电压明显下降。

2 试验结果

2.1 油样 1 试验结果

为了研究随着电压的升高试品从发生局部放电到沿面闪络之间的变化过程,采用阶升电压对试品进行了试验.试验步骤是,缓慢升到局部放电起始电压之后以 10 min 为一个试验间隔,以 500 V 为步长进行逐级升压,从局部放电起始电压开始计时,测量所得的最大放电量结果如图 3 所示。

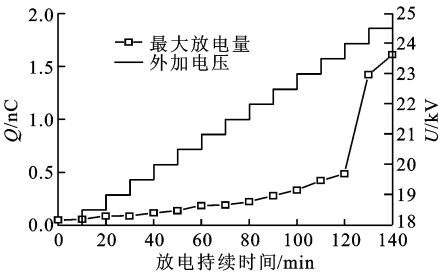


图 3 油样 1 中的最大放电量

从图 3 可以看出,随着电压的升高,最大放电量随之缓慢升高,但当电压升高到 23 kV 时,放电量突然增大,可以听到尖锐的间歇性击穿放电声,继续施加电压,则发生沿面闪络.阶升过程中的放电重复率(半工频周期的放电个数)如图 4 所示。

从图 4 可以看出,随着电压的升高,放电重复率

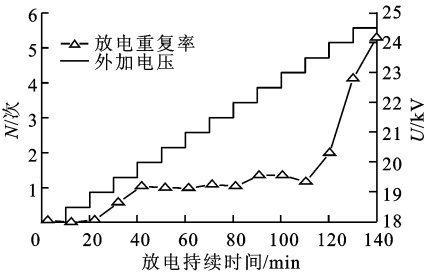


图 4 油样 1 中的放电重复率

经历了3个阶段,外加电压为18~19 kV时的低重复率阶段,19~23 kV时的中等重复率阶段和之后的高重复率阶段.不同外加电压下的PRPD谱图如图5所示.

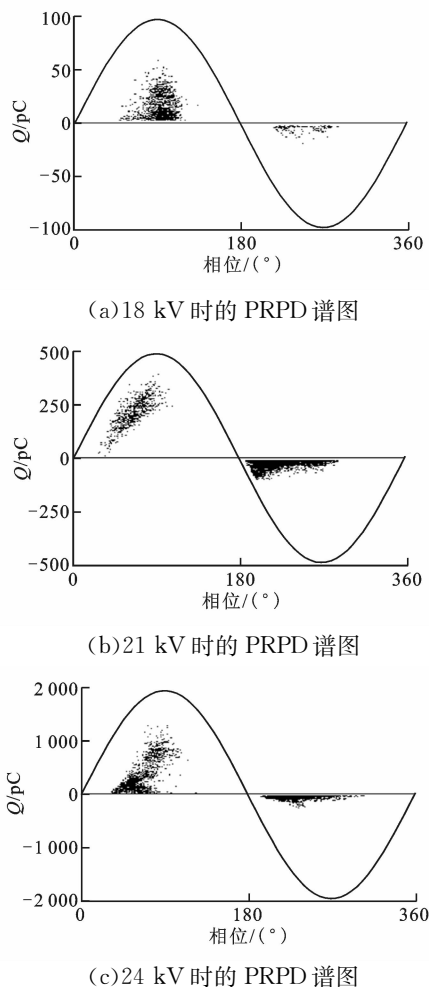


图5 不同外加电压下的PRPD谱图

从图5可以看出,放电具有很明显的极性效应,即工频正半周的放电量总是比负半周要大,且一直贯穿整个试验过程.在局部放电起始阶段,放电集中在工频峰值处,随着电压的增加,放电集中在工频的上升阶段.不同外加电压下示波器采集到的放电波形如图6所示.

从图6可以看出:在低幅值的第1阶段,放电脉冲脉宽较窄,脉冲上升时间(10%~90%)约为7 ns,下降时间(90%~10%)同样约为7 ns;在第2阶段,放电脉冲脉宽增大,其脉冲上升时间约为10 ns,下降时间约为130 ns;在第3阶段,脉冲是大幅值的脉冲序列形式,通过对脉冲序列中的单个脉冲进行参数提取及计算可以得到,其单个脉冲的上升时间约为4 ns,下降时间也同样约为4 ns.

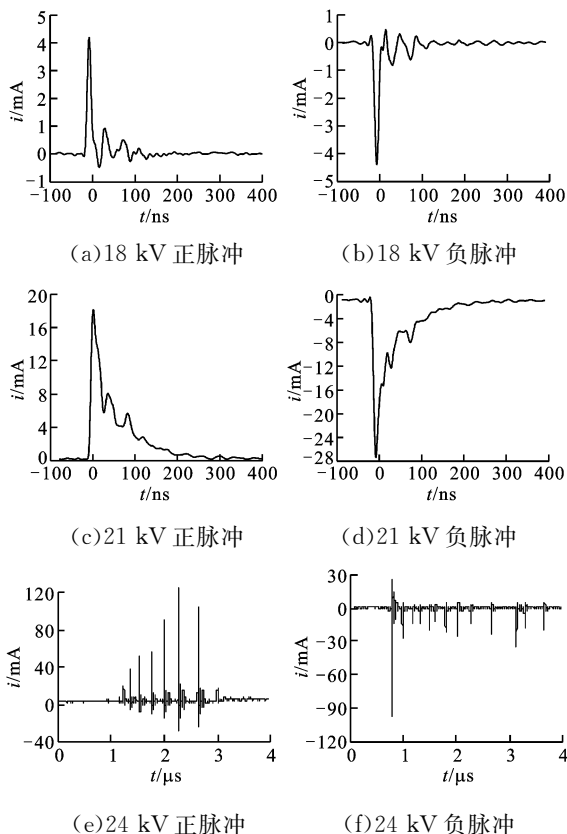
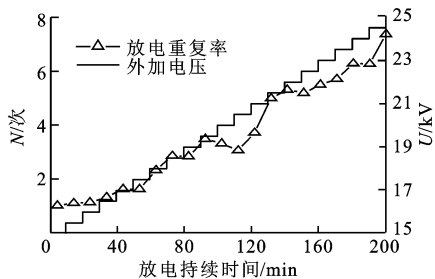
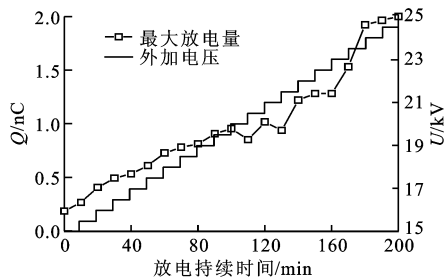


图6 不同外加电压下的放电脉冲波形

2.2 油样2试验结果

油样2为老化的油样,采取和油样1相同的试验步骤,其最大放电量 and 放电重复率如图7、图8所示.

从图7和图8可以看出,相比油样1,老化的油样中局部放电起始电压从18 kV降低到了15 kV,



且在整个过程中最大放电量 and 放电重复率没有出现突然升高的阶段,而是随着外加电压的升高而逐渐增大。

油样2中不同时间段的PRPD谱图及单个波形同油样1中基本相同,都是在开始阶段放电发生在工频峰值处,单个波形的上升和下降时间均约为7 ns。随着电压的升高,放电开始发生在工频的上升阶段,单个脉冲波形的脉冲下降时间变宽,在临近闪络的23 kV时,出现脉冲序列现象,25 kV时可以听见间歇的放电声,继续升高电压,发生贯穿性沿面闪络。

3 讨 论

沿面闪络过程主要包括初始电子发射、流注沿介质表面的发展及介质表面形成贯穿性导电通道的阶段^[9]。根据本文试验中测量到的物理量变化过程及试验中的观察,可以将油纸沿面闪络的整个过程细分为如下4个阶段。

(1)初始电子产生阶段。该阶段是由电极、液体和固体三结合点处的初始电子发射引发的。在电极与纸板间存在电场集中,当达到电极的场致发射场强时,将会引发电极表面的场致电子发射,导致初始电子的产生。从图5a可以看出,初始放电发生在工频峰值处,即这个阶段是发生在外加场强最大值处,其单个放电波形如图6a所示,放电量很小,在数十到数百pC之间。

由于老化的油样中杂质含量增大,导致电极、液体和固体三结合点区域电场更加畸变,场强进一步得到增强,因此其初始局部放电电压相比新油样要低,从新油样中的18 kV降低到了老化后油样中的15 kV,且由于电场畸变加剧,导致了放电重复率也有所增加。

(2)流注发展阶段。随着电压的升高,初始电子在固-液交界面进一步发展,形成流注。流注沿纸板表面发展阶段的局部PRPD谱图如图5b所示。从图3、图4及图6、图7可以看出,油样老化程度对流注发展阶段的局部放电量 and 放电频率有很大影响。新油样中存在临界电压值,在低于临界电压时,放电量 and 放电频率处于缓慢增加阶段,当超过临界电压时,放电量会突然增大,迅速进入到间歇击穿阶段。对于老化的油样,则没有明显的临界电压值,放电量 and 放电频率均随电压的升高而增大。

固-液交界面流注的形成机理目前还不十分清楚,但一个普遍的认识是流注形成于固-液交界面的

气体通道中,流注沿着固-液交界面的气体通道传播和发展^[10]。之前的研究已经表明,油中杂质会对油中微小气泡的形成和发展产生影响,杂质会使气泡壁和液体之间的电荷交换速率增大,导致气泡放电频率增加^[11]。根据本文的研究可以看出,杂质含量的增加会导致在流注发展阶段局部放电的放电量、放电频率迅速增加。

流注的发展长度和放电量具有正比关系,从PRPD谱图可以看出,放电量在外加电压的正半周相比负半周要大很多,即流注在正半周的发展长度比在负半周要长,导致了放电具有明显的极性效应。

(3)间歇击穿阶段。随着电压的升高,流注的发展距离越来越长,当流注达到地电极时,放电进入间隙击穿阶段。此时,放电量达到nC级别,可以听到明显的放电声,其放电谱图如图5c所示,单个放电波形呈现脉冲序列形式,如图6c所示。油样的老化程度对出现间歇性击穿的临界电压值没有影响,两种油样中均是在23 kV时出现间歇击穿现象。

(4)沿面闪络阶段。当电压升高到25 kV时,放电声越来越明显,也越来越密集,当继续升高电压时,发生沿面闪络。此时,容器中变压器油变黑,产生大量气泡,发生闪络的瞬间可以听到很大的放电声,闪络过后纸板上留下明显的树枝状碳化痕迹。

4 结 论

阶升电压下油纸沿面局部放电的测量结果表明:在油纸沿面闪络过程中,随着外加电压的升高,首先是局部放电起始电压下液体、固体和电极三者结合处的电场集中引起电极场致发射产生初始电子,此时局部放电谱图表现为放电集中在工频电压峰值处,单个波形具有约7 ns的上升和下降时间;随后是油纸沿面的流注发展阶段,此时局部放电谱图表现为放电发生在工频电压升高处,放电脉冲具有很长的下降时间;当固-液交界面的流注随电压升高进一步发展时,会先发生间歇性击穿,此时可以听见尖锐的放电声,放电脉冲呈现脉冲序列形式,继续升高电压,发生贯穿性沿面闪络。

试验结果表明,油样的老化会降低油纸沿面局部放电的起始电压并会对流注的发展产生影响。相比新油样在流注发展阶段放电量 and 放电频率的缓慢升高,老化的油样在流注发生阶段的放电量 and 放电频率随外加电压的升高而迅速升高。

参考文献:

- [1] WADA J, NAKAJIMA A, MIYAHARA H, et al. Surface breakdown characteristics of silicone oil for electric power apparatus [J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(4):830-837.
- [2] YANG Jiaxiang, CHI Xiaochun, DING Lijian, et al. Creeping discharge performance of oil-paper insulation with streaming electrification [J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 1997, 4(6): 780-784.
- [3] HANAOKA R, KOHRIN T, MIYAGAWA T, et al. Creepage discharge characteristics over solid-liquid interfaces with grounded side electrode [J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(2): 308-315.
- [4] OKUBO H, OKAMURA K, IKEDA M, et al. Creepage flashover characteristics of oil/paper interfaces and their scale effects [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1987, 2(1): 126-132.
- [5] YAMADA H, SATO T, COOKE C M. Measurement of time to flashover along dielectric surfaces in transformer oil using electro-optic coupling method [J]. IEEE Trans on Electrical Insulation, 1988, 23(4):757-764.
- [6] BAEK S, JOUNG J, KIM H, et al. Experimental research on the surface discharge characteristics for HTS cable termination [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(3): 2351-2355.
- [7] 司文荣,李军浩,李彦明,等. 直流下油中局部放电脉冲波形测量与特性分析[J]. 西安交通大学学报, 2008,42(4):481-485.
- SI Wenrong, LI Junhao, LI Yanming, et al. Measurement and analysis for pulse current shapes of partial discharge in oil under DC voltage[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008,42(4):481-485.
- [8] 王晓蓉,胡龙龙,严璋,等. 油纸绝缘中局部放电的超宽频特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2001,35(10): 1098-1100.
- WANG Xiaorong, HU Longlong, YAN Zhang, et al. Study on partial discharge impregnated paper/press board using the ultra wide band technique[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001,35(10):1098-1100.
- [9] 李光杰. 纳秒脉冲下变压器油中绝缘介质沿面闪络特性的实验研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2006.
- [10] ATTEN P, SAKER A. Streamer propagation over a liquid/solid interface [J]. IEEE Trans on Electrical Insulation, 1993, 28(2):230-242.
- [11] WATSON P K, QURESHI M I, CHADBAND W G. The growth of pre-breakdown cavities in silicone fluids and the frequency of the accompanying discharge pulses [J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 5(3):344-350.

(编辑 杜秀杰)