

油纸绝缘气隙模型局部放电特性试验研究

徐春社^{1,2}, 孙振权^{2,3}, 赵学风², 李彦明²

(1. 江苏省电力公司, 南京 210024; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049;

3. 陕西省地方电力(集团)有限公司, 西安 710061)

摘要: 为了研究直流输电系统中换流变压器油纸绝缘的局部放电特性,设计构造了典型的油纸局部放电模型——气隙放电模型。针对同一模型分别施以交流电压、直流电压以及冲击衰减振荡电压,采用IEC 60270-2000推荐的脉冲电流法分别检测与分析该模型局部放电的不同特征参数。对比研究了在交流、直流及振荡冲击电压下油纸绝缘气隙放电模型的局部放电脉冲特征参量包括局部放电起始电压、熄灭电压、放电波形、放电水平、放电重复率等,对实现换流变压器的局部放电在线监测与绝缘状态综合评估有一定的指导意义。

关键词: 换流变压器;油纸绝缘;局部放电;绝缘评估;在线监测;衰减振荡电压

中图分类号: TM422

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2012)02-0034-08

Experimental Investigation of the Partial Discharge Feature
with the Air Gap Model in Oil-paper InsulationXU Chun-she^{1,2}, SUN Zhen-quan^{2,3}, ZHAO Xue-feng², LI Yan-ming²

(1. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Shaanxi Regional Electric Power Group Co., Ltd., Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to investigate the partial discharge (PD) characteristic of the oil-paper insulation of the converter transformer in HVDC power transmission systems, the typical defect model—air gap discharge model in oil-paper insulation is designed. For the same sample, PDs are measured and analyzed with electrical pulse current method in accordance to IEC 60270—2000 recommendation under AC, DC and the damped alternating current (DAC) voltages, respectively. Some characteristic parameters of the PD in air gap of oil-paper insulation including the partial discharge inception voltage (PDIV), the partial discharge extinction voltage (PDEV), PD pulse level, pulse current shape, and repetition rate of the partial discharge are investigated comparatively. All these will be helpful for the PD monitoring on-line and insulation evaluation of the converter transformer.

Key words: converter transformer; partial discharge; oil-paper insulation; insulation evaluation; monitoring on-line; DAC voltage

0 引言

随着直流输电技术及其元器件制造技术的发展,直流输电系统技术经济性更趋于合理^[1]。直流输电的换流站内的主要设备为换流变压器,而换流变压器阀侧绕组除承受交流电压、雷电冲击电压和操

作过电压外,还承受直流电压、直流与交流的混合电压和系统发生潮流反转时产生的极性反转电压的作用;网侧绕组承受交流电压、雷电冲击电压和操作过电压等^[2-4]。

换流变压器和普通电力变压器的内绝缘都采用变压器油和绝缘纸板的复合结构,但两者的绝缘纸板与变压器油的比例不同。当换流变压器承受正

收稿日期:2011-10-26; 修回日期:2011-11-02

基金项目:国家自然科学基金(50977075);国家重点基础研究发展计划(2011CB209404)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50977075), National Program on Key Basic Research Project of China (2011CB209404).

弦交流电压时,其电压在不同绝缘材料中的分布为电容性分布,即取决于不同材料的介电常数。在介电常数较低的变压器油中电压比较高,而在介电常数相对较高的纸板中交流电压较低;在直流电压作用下,绝缘中的电压呈阻性分布,与材料的电导率成反比,而材料的电导率受温度、湿度、电场强度及电压加载时间的影响,一般绝缘纸板的电导率与变压器油的电导率之比约为 $1:10 \sim 1:500$,变压器油中的电压远小于绝缘纸板中的电压,电压绝大部分由绝缘纸板承担;当换流变压器承受稳态直流电压作用时,其稳态直流电压分布取决于复合绝缘结构中不同材料的电阻率值。稳态直流场集中分布于电阻率较高的绝缘纸和纸板中,对于电阻率最低的变压器油来说,此时其稳态直流电压很低;在极性反转时,绝缘中的电场基本按容性分布。因此,对油纸绝缘电气强度的校核,既要考虑交流电压的作用,又要考虑直流电压的作用和极性反转时的情况,应增加绝缘中绝缘纸板的比例^[5]。普通变压器油纸绝缘的局部放电特性研究已经有很多文献^[6-16]。也有一些学者针对直流电压下油纸绝缘的局部放电特性进行了研究^[17-20]。笔者在此基础上,尝试对比不同类型电压作用在相同的油纸绝缘典型模型上的局部放电特征。

为了简化方法与装置,只对油纸绝缘的典型气隙放电模型分别在交流电压、直流电压、振荡冲击电压以及雷电冲击电压作用下的局部放电脉冲进行测量、分析、对比,试图找出不同电压下的油纸绝缘局部放电的特征,为进一步研究换流变压器的局部放电现象奠定基础。

1 油纸绝缘典型气隙放电模型的制备

换流变压器绝缘的局部放电可以分为气隙、油隙、沿面、电晕等几种类型。其中气隙放电还可以分为油纸中气隙及油中气隙放电模型。笔者建立了典型的油纸绝缘内部气隙放电模型,该放电模型由 3 层绝缘纸板粘接而成。平面尺寸均为边长 100 mm 的正方形,上下两层绝缘纸板厚度为 1 mm,中间绝缘纸板厚度为 2 mm,且在中间层绝缘纸板的几何中心开有 $\phi 12$ mm 的圆孔。

模型制备过程如下:①按照设计尺寸剪裁绝缘纸板,同时将中间层纸板在台钻上钻制圆孔;②是用专用砂纸将纸板及孔洞的边缘打磨,去除纸板突出的毛刺等;③将处理好的纸板放入烘箱,连续烘干 72 h,充分除去绝缘纸板中的水分;④用绝缘纸板粘接专用胶粘剂,将绝缘纸板粘接在一起,注意粘接剂用量不要太多,以免影响孔洞效果。粘接好

后用重物压一段时间,以确保粘接可靠;⑤将粘接好的试品浸入已经干燥祛气处理过的变压器油中,浸泡 48~72 h 后方可使用。

2 油纸绝缘气隙放电模型局部放电测量试验装置及回路

2.1 试验装置

为进行油纸绝缘局部放电测量与研究,设计制作了相应的试验装置,该装置将壁厚 5 mm,内径为 $\phi 150$ mm 的有机玻璃管与 15 mm 厚,边长为 200 mm 的铝排用环氧树脂粘接在一起构成 1 个盛油的容器,平板电极采用黄铜材料制成,厚度为 10 mm,直径为 50 mm,下电极与铝排底座连接在一起,上电极与高压引线连接。变压器油的充油高度要确保在上电极以上一定距离。

2.2 试验回路

笔者采用罗氏线圈采集局部放电信号,电阻分压器测量源电压,用同轴电缆将 2 个信号送至示波器的不同通道,实现源信号与局部放电信号同屏显示、记录。局部放电测试回路图见图 1。图 1 中:示波器通道 CH1 为施加的源电压信号;CH2 为局部放电测量信号。

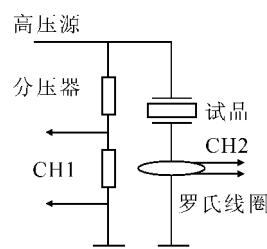


图 1 局部放电测量回路

Fig. 1 The measurement circuit of partial discharge

3 油纸绝缘气隙放电模型局部放电的测量与分析

笔者分别研究交流电压、直流电压及振荡冲击电压作用下典型油纸绝缘气隙放电模型局部放电脉冲的主要特征:①3 种电压作用下的局部放电脉冲发生的时刻不同,交流电压下通常发生在电压正或者负方向增长的时域;直流电压下一般是一系列随机的时序脉冲;振荡冲击电压下,较为复杂,一般发生在振荡冲击波形外包络线形成的冲击波形的上升沿。②从脉冲波形的陡度来看,交流电压下正负脉冲前沿较陡,基本一致;直流电压下局部放电正负脉冲陡度较缓,不固定;振荡冲击电压下的局部放电脉冲陡度变化范围较大,随机性更强。

3.1 交流电压下的油纸绝缘气隙放电模型的局部放电

参照图1的试验回路,其中分压器的分压比为2 000:1,罗氏线圈的灵敏度为1 mA/mV。按照传统的局部放电测量方法,升高电压直至局部放电信号出现,记录此时的电压与局放情况,即得到该模型在交流电压作用下的局部放电起始电压;继续升高电压,可以进行局部放电测量与记录;在几个不同电压下分别测量局部放电情况,然后降低电压,直至局部放电信号消失,此时的电压就是该模型在交流电压作用下的局部放电熄灭电压。实验结果表明,该油纸气隙模型交流电压下的起始放电电压为4 000 V,熄灭电压为3 500 V。交流电压作用下的局部放电脉冲信号见图2。

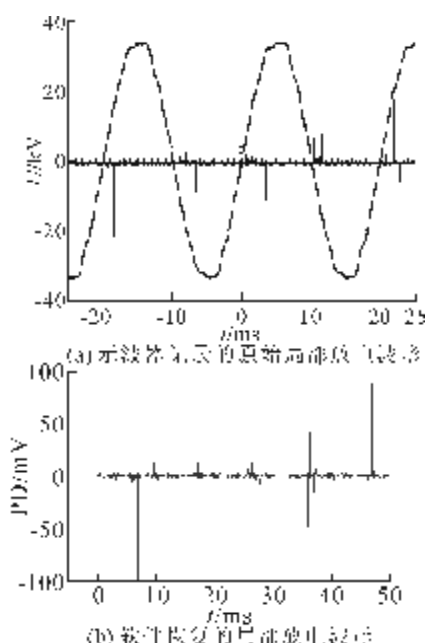


图2 交流电压作用下的局部放电脉冲信号

Fig. 2 PD pulses under AC voltages

图2(a)是采用示波器直接记录的外施电源波形及试品局部放电脉冲波形;图2(b)是通过示波器同时记录的局部放电脉冲。CSV格式的数据在ORIGIN软件中绘出的局部放电时域波形。从图2可以看出,交流工频电压作用下局部放电脉冲发生的相位在0~90°或180°~270°,即发生在电压正向增大或负向增大过程中。油纸绝缘气隙在交流电压作用下,局部放电的起始电压,局部放电脉冲产生的相位,以及随着电压峰值的升高,局部放电脉冲幅值最大值、频次都有所增加的现象。当交流电压峰值为8 000 V时,油纸气隙模型已经有明显的局部放电产生,最大的局部放电脉冲幅值为25 mV,局部放

电脉冲数量不是很多;在峰值为10 kV的交流电压作用下,局部放电的幅值,频次都有所增加,最大局部放电脉冲幅值达到50 mV;在12 kV交流电压的作用下,油纸绝缘气隙模型的局部放电频次随着电压的增加而增长,局部放电幅值变化不大,最大局部放电幅值近58 mV;在峰值为14 kV交流电压作用下,油纸绝缘气隙模型的局部放电的幅值与频次增加很多,最大局部放电幅值为110 mV。局部放电脉冲最大幅值与施加电压之间的关系见图3。

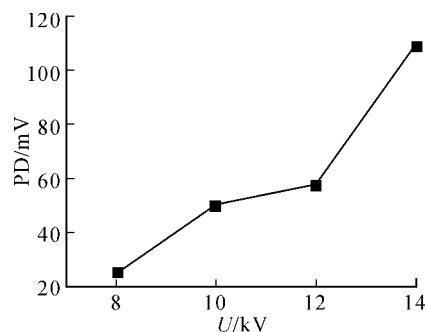


图3 局部放电脉冲最大幅值与施加电压之间的关系

Fig. 3 The relation of the max amplitude of PD and the applied voltage

图3表明,交流电压下试品的局部放电幅值的最大值随着外施电压幅值增加而增加。

为了分析单个局部放电脉冲的特征,随机截取了1组在不同电压下的局部放电单个脉冲,选取1个局部放电脉冲,利用数值分析软件分别对它们进行FFT幅频特性分析。交流电压下的局部放电脉冲单脉冲波形的包络线从示波器原始记录的波形来观察。

图4是1组典型的油纸绝缘气隙模型局部放电脉冲波形及其幅频特性分析,发现当交流电压峰值超过起始电压后,产生的局部放电脉冲的频率主要分布在十几MHz到几十MHz。从图4(b)可以看出,油纸绝缘气隙模型的局部放电脉冲存在20 MHz以内的低频分量,40 MHz左右的高频分量,与前述分析的结果是一致的。采用带通滤波得到的高频分量是对称振荡的,不具有局部放电脉冲的特征,可以认为是干扰成份;而低频分量波形与示波器记录的单个脉冲波形包络线是一致的,可以认为是局部放电信号。

交流电压下的油纸绝缘气隙模型局部放电的脉冲不论整个脉冲群还是高频或低频分量都存在振荡衰减的波形,至少存在一个与初始脉冲相反的振荡脉冲发生,然后缓慢衰减振荡。在施加不同幅值的交流电压时,局部放电的波形一致性很好,可以实现定性识别。交流电压下的油纸气隙模型的局

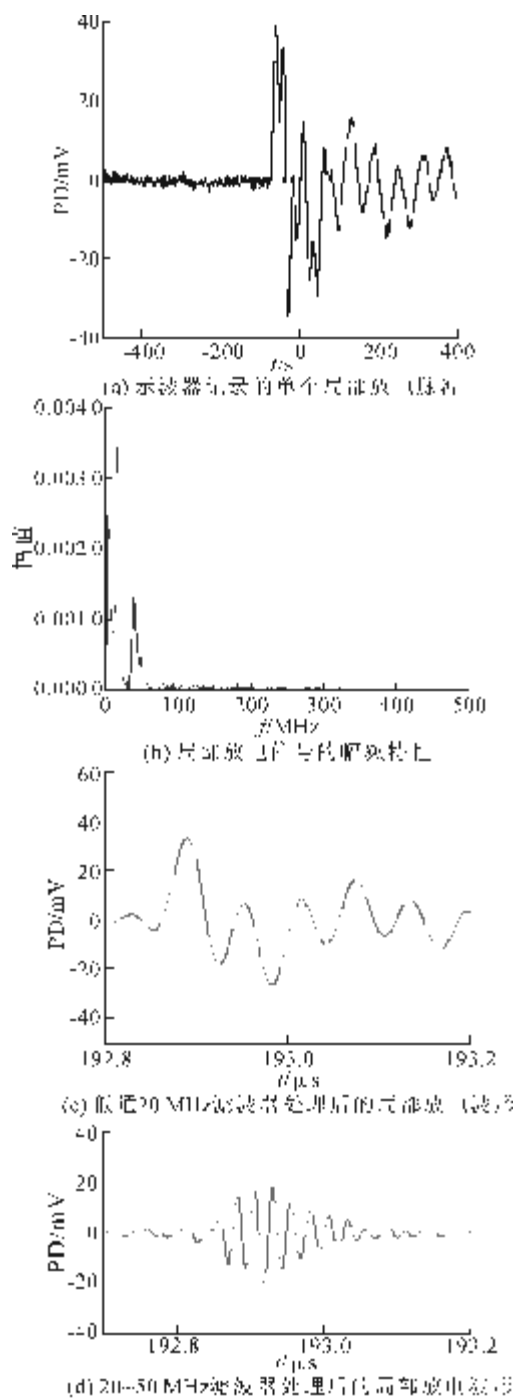


图 4 交流电压下典型单个局部放电脉冲分析

Fig. 4 The analysis of the single PD pulse under AC voltage

部放电脉冲既有正脉冲,又有负脉冲,是具有振荡特性的。局部放电脉冲的幅值具有一定的随机性,放电的频次随着施加电压的增加而增加。

3.2 直流电压下的油纸绝缘气隙放电模型的局部放电

利用负极性的整流变压器作为试验电源,依赖调压器产生幅值可调的直流电压。测量电压选用交直流两用分压器及匹配的指示仪表。分压器的变比

为 2 000:1。

直流电压作用下,油纸绝缘气隙的局部放电信号是一系列沿着时间轴的序列脉冲,2 个放电脉冲之间的时间间隔是随机的,且局部放电脉冲正、负都随机存在。示波器记录的直流电压下油纸绝缘气隙模型的局部放电信号见图 5。

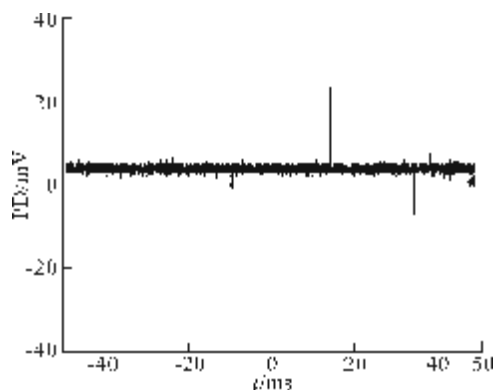


图 5 直流电压下局部放电脉冲信号

Fig. 5 PD pulses under DC voltage

下面是关于不同幅值直流电压作用下载取的单个局部放电脉冲特征测量与分析。调整不同的直流电压,测得的单个局部放电脉冲波形发现局部放电脉冲包络线具有单方向性,正极性脉冲的幅值远大于负极性脉冲幅值。局部放电信号覆盖的频域仍然为十几 MHz 到 50 MHz。-35 kV 直流电压时,最大局部放电脉冲幅值为 160 mV;-32 kV 直流电压时,最大局部放电脉冲幅值为 58 mV;-30 kV 直流电压时,最大局部放电脉冲幅值为 38 mV;-28 kV 直流电压时,最大局部放电脉冲幅值为 32 mV;-26 kV 直流电压时最大局部放电脉冲幅值为 20 mV。

任意截取 1 个油纸绝缘气隙模型直流电压下的局部放电波形进行信号滤波处理及其频谱分析。从图 6 中可以看出,局部放电脉冲更接近于单向脉冲,振荡成份较少,同样衰减迅速。该局部放电脉冲正脉冲成份要远大于负脉冲,即其包络线是单向正脉冲,频域范围也在十几 MHz 到 50 MHz。图 6(c)是对该局放信号采用 10~50 MHz 的带通滤波器进行滤波分析后得到的局部放电波形。

直流电压下的油纸绝缘气隙模型的局部放电脉冲,具有明显的单向性,振荡幅值较小且衰减很快,且两次局部放电发生的时间间隔较长,可以认为是 1 个单向的局部放电脉冲;其脉冲幅值有随外施电压幅值增加的趋势,见图 7,但分散性较大。放电的频次在施加电压超过放电起始电压后随施加电压的幅值提高而增加。

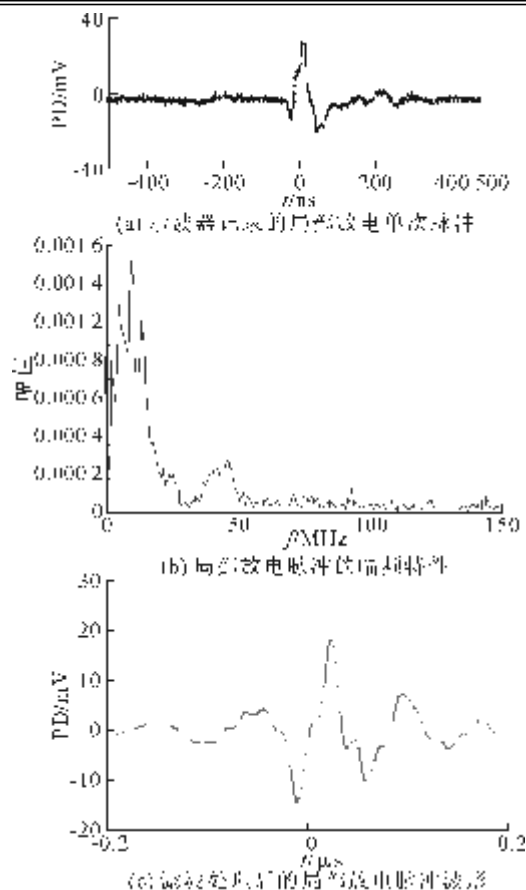


图6 直流电压下典型单个局部放电脉冲分析

Fig. 6 The analysis of the single PD pulse under oscillating impulse voltage

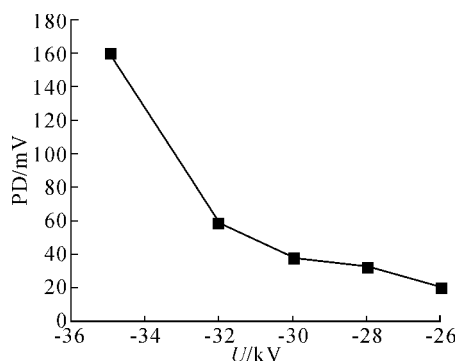


图7 直流电压下局放脉冲幅值与施加电压幅值的关系

Fig. 7 The relation of the amplitudes of PD and the applied voltage under dc voltage

3.3 振荡冲击电压下的油纸绝缘气隙模型的局部放电

电压源采用自行设计的冲击振荡发生器提供。该发生器可以产生幅值及振荡频率可调的振荡波。测量源电压采用1000:1的冲击电容分压器。由于振荡发生器的波形初始原点存在自激振荡现象,第一、二个波峰产生的局部放电脉冲被淹没在由源引起的振荡信号之中。而局部放电脉冲的最大幅值往往发生在这个时刻,该试验无法直观得到最大脉冲

幅值,只能依靠数据分析。下面是不同幅值振荡冲击电压下的油纸绝缘气隙模型局部放电的研究与分析,见图8。

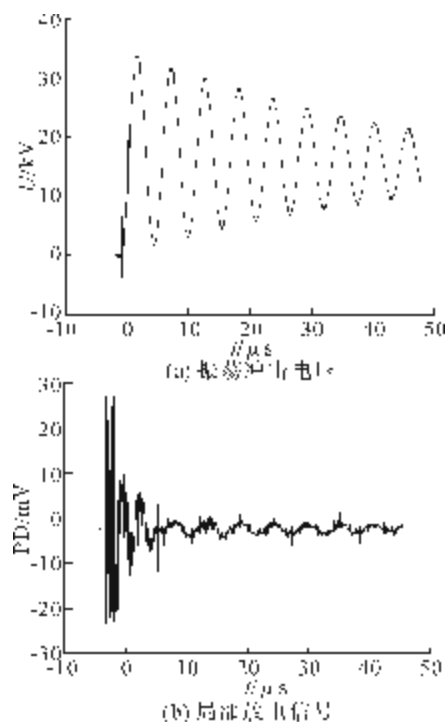


图8 在幅值22 kV振荡电压下的局部放电信号

Fig. 8 PD pulses under oscillating impulse voltage with amplitude 22 kV

从图8可以看出,油纸绝缘气隙模型在振荡冲击电压下的局部放电脉冲与交流电压下的局部放电发生的相位类似,即总发生在源电压正向增加或负向增加的时域。诸多局部放电脉冲中任意截取1个单脉冲进行频谱分析发现,振荡冲击电压下的油纸绝缘气隙模型的局部放电脉冲具有振荡特性,且基本呈对称的脉冲波形,不同的是会叠加一个相对低频的具有相当大幅值电容电流,示波器无法读出其准确幅值。主要是在高频电压的作用下,试品的电容效应引起的。局部放电脉冲频率集中在20 MHz左右,冲击振荡电压下的单个局部放电脉冲的分析见图9。

调整振荡电压发生器的参数,产生振荡频率不变,幅值分别为25、28、30、32、34 kV测量油纸绝缘模型局部放电脉冲,发现局部放电脉冲除主脉冲外有很多振荡成份。频率范围仍在20~30 MHz。振荡冲击电压下的油纸绝缘气隙放电模型的局部放电脉冲,在不同电压幅值下,其频率变化不大,脉冲有正有负,但波形基本一致,都具有振荡衰减的性质,只是衰减较快。冲击电压下局部放电脉冲的幅值跟外施电压的关系不明确,因为分散性太大的缘故,

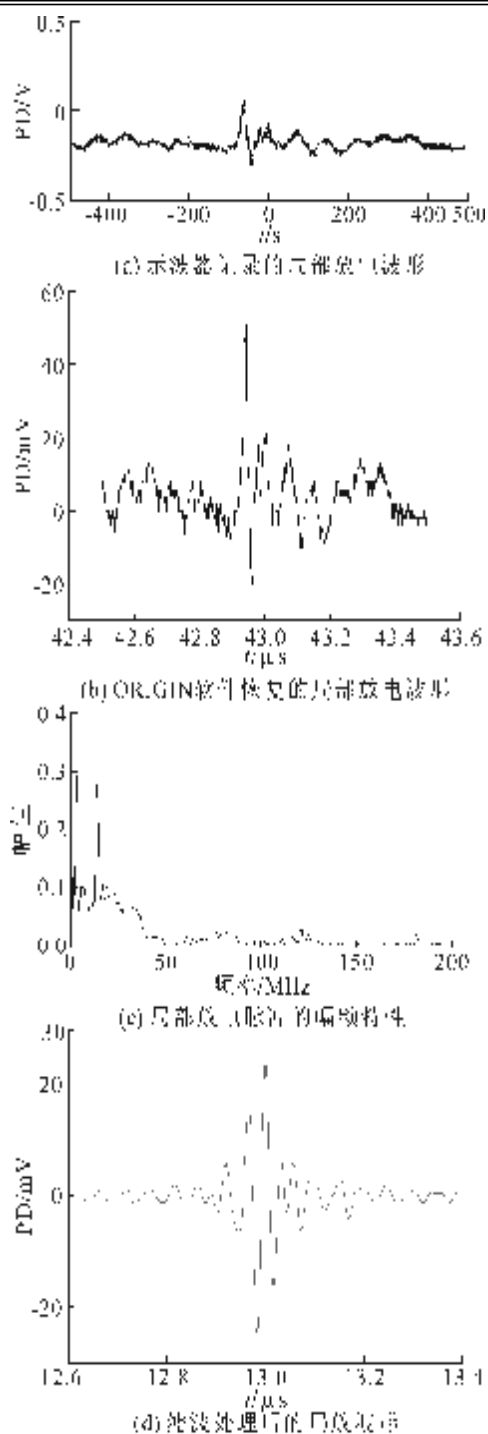


图9 冲击振荡电压下的单个局部放电脉冲的分析

Fig. 9 The analysis of the single PD pulse under oscillating impulse voltage

详见图10。关于冲击振荡电压下局部放电的表征参数需要进一步重新定义。下一步的工作是用统计学的方法去研究振荡冲击电压下的局放特征。

4 结论

笔者定性地对比研究了油纸绝缘气隙模型在交流、直流、振荡冲击电压下的局部放电现象。主要以罗氏线圈作为局部放电信号采样装置。测量用示

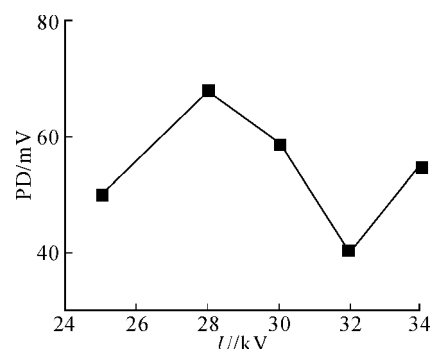


图10 振荡冲击电压下局部放电脉冲最大幅值与施加电压幅值之间的关系

Fig. 10 The relation of max amplitude of PD and the applied voltage under oscillating impulse voltage

波器不同通道记录了各种电压下的局部放电信号及施加电压的信号波形,并且进一步利用ORIGIN数值分析软件进行了局部放电信号的频谱分析、滤波分析等。局部放电的典型参数即特征参量如局部放电起始电压、熄灭电压、放电水平、放电重复率等在不同类型电压下定义是不同的。具体的定义见文[16]。对直流电压作用下的局部放电起始电压按照在1 min内出现两次及以上脉冲时的外施电压,而熄灭电压对直流电压下的局部放电意义不大,只是参考。因有时即使外施直流电压降到零值,可能局放仍然存在;对于振荡冲击电压文中借鉴交流电压的相位识别模式,电压幅值取自第1个振荡波形上升部分与后续振荡峰值点连成的包络线构成的冲击波形的幅值。局部放电起始电压按照该电压幅值下发生放电的概率是50%的电压,熄灭电压也是类似的。放电水平即局部放电脉冲幅值要从试品的电容电流中提取,因此时的电容电流幅值很大,往往会淹没在实际局部放电脉冲的测量准确度,甚至完全淹没在电容电流之中。放电重复率可以参考每次冲击电压作用下的脉冲次数。

基于上述的试验、分析与讨论,初步得出以下结论:

1)从模型局部放电的起始电压来看,交流电压下的幅值最低,且相对稳定,振荡冲击电压次之,直流电压较高,局部放电熄灭电压、交流和振荡冲击电压下与起始电压相近,直流电压下的局部放熄灭电压较起始电压低得多,有时甚至电压为零了,局放仍然存在,其机理不同,因此只是个参考量。

2)从放电水平来看,交流、直流电压下的物理尺度较小的油纸绝缘气隙模型的局部放电信号幅值最大值、放电频次随施加电压的幅值的增加而增加;冲击振荡电压下的局部放电信号的幅值、频次

即放电重复率,分散性较大,随机性极强。

3)油纸绝缘气隙模型在交流、直流电压下的局部放电脉冲的频率范围在文中的试验条件下基本稳定在 30~40 MHz 的范围;冲击振荡电压的局部放电脉冲频率会稍低一些,在 10~30 MHz 范围,且不稳定。

4)从局部放电脉冲的基本波形看,交流电压下的油纸绝缘气隙模型的局部放电脉冲波形是振荡衰减的,衰减较慢;直流电压下的局部放电脉冲波形是非振荡的单峰脉冲,即使有轻微振荡,衰减也很快,其包络线是非振荡的;冲击振荡电压下的局部放电脉冲的波形是单次振荡的。

笔者对交流、直流电压下的油纸绝缘气隙模型的局部放电的基本特征有了初步的认识,对于冲击振荡电压的局部放电脉冲的特征在现有的检测、分析与识别的条件下认识还不是十分清晰。基于此,下一步准备设计 1 套数据采集及处理系统,以便于处理,分析大量的试验数据,做到更加准确地认识交流、直流、振荡冲击乃至雷电冲击电压下油纸绝缘气隙模型的局部放电特征,进一步研究几种电压叠加作用时的局部放电现象,为监测与检测直流输电系统中换流变的油纸绝缘的局部放电奠定基础。

参考文献:

- [1] 王德忠.高压直流输电技术综述[J]. 上海电器技术,2004(2):3-9.
WANG De-zhong. Review of HVDC technology[J]. Shanghai Electric Appliance Technology, 2004(2):3-9.
- [2] 高敏华,冷 勇.换流变压器中的两个直流分量[J]. 变压器,2002,39(6):15-19.
GAO Min-hua, LENG Yong. Two DC components in converter transformer[J]. Transformer, 2002, 39(6):15-19.
- [3] 孙优良,王清璞,李文平,等.±800 kV 直流输电工程用换流变压器的研发[J]. 电力设备,2006,7(11):17-20.
SUN You-liang, WANG Qing-pu, LI Wen-ping, et al. R & D of converter transformers for ±800 kV HVDC engineering [J]. Power Equipment, 2006, 7(11):17-20.
- [4] 李文平,陈志伟,宋秀生,等. ±800 kV 直流输电工程用换流变压器主绝缘结构的研究[J]. 电力设备,2007,8(3):5-7.
LI Wen-ping, CHEN Zhi-wei, SONG Xiu-sheng, et al. Investigation of converter transformer main insulation for ±800 kV HVDC engineering[J]. Power Equipment, 2007, 8(3):5-7.
- [5] 韩晓东,翟亚东.高压直流输电用换流变压器[J]. 高压电器,2002,38(6):5-6.
HAN Xiao-dong, ZHAI Ya-dong. Converter transformer for HVDC[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(6):5-6.
- [6] 杨 眉,李 剑,杨丽君,等.变压器典型油纸绝缘局部放电特性[J]. 重庆大学学报,2007,2(30):46-49.
YANG Mei, LI Jian, YANG Li-jun, et al. Characteristic of typical partial discharge in oil-paper insulation based on transformer[J]. Journal of Chongqing University, 2007, 2(30):46-49.
- [7] 王国利,郝艳捧,贾志东,等.电力变压器典型局放模型放电脉冲的特性研究[J]. 高电压技术,2001,27(2):5-8.
WANG Guo-li, HAO Yan-peng, JIA Zhi-dong, et al. Investigation with partial discharge pulse of typical model in power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(2):5-8.
- [8] CHEN Xiao-lin, CAVALLINI A, MONTANARI G C. Improving high voltage transformer reliability through recognition of PD in paper/oil systems [C]//2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application. China: [s.n.], 2008:9-13.
- [9] 倪学锋,谢 诚. 极对壳绝缘局部放电试验对电容器绝缘老化的评定作用[J]. 电力电容器,2005,26(1):35-38.
NI Xue-feng, XIE Cheng. Predication of the insulation ageing for power capacitor according to the pole-to-case insulation partial discharge test[J]. Power Capacitor, 2005, 26(1):35-38.
- [10] 吕伟杰,黄雪峰,张 严.有机复合介质储能电容器直流局部放电检测系统的研究[J]. 电力电容器,2007,28(5):51-54.
LÜ Wei-jie, HUANG Xue-feng, ZHANG Yan. Study on HVDC partial discharge detecting system of organic dielectric storage capacitors[J]. Power Capacitor, 2007, 28(5):51-54.
- [11] 陈温良,董 燕,贾 华. 对金属化膜电容器局部放电和自愈放电性能的初步研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2008,29(1):31-36.
CHEN Wen-liang, DONG Yan, JIA Hua. Preliminary research on partial discharge and self-healing characteristics of metallized film capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2008, 29(1):31-36.
- [12] 夏建中,李洪臣. 对电力电容器局部放电的理解与对策[J]. 电力电容器与无功补偿,2009,30(2):7-9.
XIA Jian-zhong, LI Hong-chen. Research and countermeasure on partial discharge of power capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2009, 30(2):7-9.
- [13] 高文胜,王 猛,谈克雄,等.油纸绝缘中局部放电的典型波形及其频谱特性[J]. 中国电机工程学报,2002,22(22):1-5.
GAO Wen-sheng, WANG Meng, TAN Ke-xiong, et al. Typical waveform and frequency spectrum characteristic of partial discharge in oil-paper insulation[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2002, 22(22):1-5.

- (22):1-5.
- [14] 林国梁, 蔡金锭, 李天友. 变压器绝缘介质恢复电压的测量和研究[J]. 电力设备, 2007, 10(8):37-40.
LIN Guo-liang, CAI Jin-ding, LI Tian-you. Measurement and investigation of recovery voltage in transformer insulation[J]. Power Equipment, 2007, 10(8):37-40.
- [15] 王晓蓉, 胡龙龙, 张冠军, 等. 油纸绝缘 transformers 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 Xiao-rong, HU Long-long, ZHANG Guan-jun, et al. Investigation with UWB characteristics of partial discharge in oil-paper insulation[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(10):1098-1100.
- [16] 王云杉, 周远翔, 李光范, 等. 油纸绝缘介质的空间电荷积聚与消散特性[J]. 高电压技术, 2008, 34(5):873-877.
WANG Yun-shan, ZHOU Yuan-xiang, LI Guang-fan, et al. Characteristics of accumulation and dissipation of space charge in oil-paper dielectric[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5):873-877.
- [17] 于钦学, 印昌容. 油纸绝缘直流局部放电的研究[J]. 变压器, 1998, 35(5):17-20.
YU Qin-xue, YIN Chang-rong. Investigation of partial discharge in oil-paper under DC voltage[J]. Transformer, 1998, 35(5):17-20.
- [18] 司文荣, 李军浩, 袁 鹏, 等. 直流电压下油纸绝缘中局部放电的超高频特性[J]. 高电压技术, 2008, 34(7):1336-1341.
SI Wen-rong, LI Jun-hao, YUAN Peng, et al. Ultra-high frequency characteristics of partial discharge in oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(7):1336-1341.
- [19] 司文荣, 李军浩, 袁 鹏, 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):481-486.
SI Wen-rong, LI Jun-hao, YUAN Peng, et al. Measurement and analysis of partial discharge pulses waveform in oil under DC voltage[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(4):481-486.
- [20] 邱昌容, 王乃庆. 电工设备局部放电及其测试技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
QIU Chang-rong, WANG Nai-qing. Partial discharge of the electrical equipment and detection technique[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1994.

徐春社(1967—), 男, 博士生, 研究方向为电力工程监理。

孙振权(1966—), 男, 博士生, 研究方向为高电压测量技术及电力设备在线监测。

(上接第 33 页)

- [16] 李立萍. 无源定位技术的研究与应用[D]. 成都: 电子科技大学, 1999.
LI Li-ping. Passive location technique and application[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 1999.
- [17] 王 成, 李少洪, 黄 槐. 测向交叉定位系统的多目标测量数据关联[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(9):104-107.
WANG Cheng, LI Shao-hong, HUANG Huai. Multi-target measurement data association for passive location systems based on direction of arrival[J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 24(9):104-107.
- [18] 何 友, 王国宏, 修建娟, 等. 双多基地雷达的组合估计及定位精度分析[J]. 电子学报, 2000, 28(3):17-20.
HE You, WANG Guo-hong, XIU Jian-juan, et al. Combinational estimation and location accuracy analysis in bistatic/multistatic radars[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(3):17-20.
- [19] 谢 庆. 基于空间谱估计的变压器局放超声阵列定位方法研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2010.
XIE Qing. Research on partial discharge ultrasonic array location method in transformer based on spatial spectrum estimation[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2010.
- [20] 李燕青. 超声波法检测电力变压器局部放电的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2004.
LI Yan-qing. The research of PD detection method on Ultrasonic[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2004.

张丽君(1985—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高电压与绝缘技术。

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!