

直流下油中局部放电脉冲波形测量与特性分析

司文荣, 李军浩, 袁鹏, 黄海波, 李彦明
(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 在简述直流下局部放电模型及其检测方法之后, 设计了直流下局部放电试验以及具有超宽频率响应的脉冲波形测量系统. 为了验证测试电路具有足够的频率响应范围, 利用方波源产生的陡下降沿对测量电阻进行了校验, 同时对直流下空气中电晕放电波形进行了测量, 结果均表明该系统满足试验要求. 在上述工作基础之上, 构造了6种油纸绝缘模型以模拟换流变压器的典型缺陷, 并利用该测量系统获取了缺陷模型在直流下的大量放电脉冲波形. 试验结果表明, 直流下变压器油中放电稳定, 放电脉冲不存在振荡分量和过冲, 放电规律与阐述的直流下局部放电模型一致, 不同放电波形的特征参数均有差别. 这些特性为直流下局部放电类型识别提供了试验依据.

关键词: 直流; 局部放电; 超宽带测量; 脉冲波形

中图分类号: TM835.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)04-0481-06

Measurement and Analysis for Pulse Current Shapes of Partial Discharge in Oil under DC Voltage

SI Wenrong, LI Junhao, YUAN Peng, HUANG Haibo, LI Yanming
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A test system with wide frequency response was designed to measure pulse current shape of partial discharge (PD) based on the PD model and ultra-wideband detection method under direct current voltage. The measuring impedance was tested by square wave with very steep trailing edge and the corona in air under DC voltage was detected, which confirms the validity of the whole system. According to the defect analysis in oil-paper insulation of converter transformer, six corresponding PD defect models were constructed to gain the PD pulse current shapes. The results show that the PD pulse current shapes of the defects in oil under DC voltage get non-oscillatory without overshoot and the characteristic parameters of the pulse current shapes differ from each other for different defect models, which coincides with the discharge model under DC voltage mentioned above.

Keywords: direct current; partial discharge; ultra-wideband detection; pulse current shape

随着直流输电电压等级的不断增高, 直流输电系统中的输电线路和电工设备的电晕放电、局部放电、绝缘老化等问题开始受到关注. 其中, 使用油纸绝缘的关键设备(如换流变压器)的绝缘状态好坏直接影响直流输电的可靠程度. 电工设备中油纸绝缘结构的某些薄弱环节的局部放电随着直流输电电压等级的升高变得严重^[1], 对设备有一定的破坏作用, 会导致设备出现故障. 因此, 研究油纸绝缘的直流局

部放电具有非常重要的意义.

直流局部放电的研究是从20世纪50年代开始的, 国外在这方面研究较多, 在我国则较少. 国外学者主要研究了施加电压的幅值、时间及其脉动系数对放电重复率的影响^[2-3], 以及长时间条件下的放电脉冲序列分析^[4-5]. 国内学者则研究了直流放电下油纸绝缘老化问题^[1]、脉冲电容器^[6]和地铁电缆^[7]的直流局部放电脉冲序列检测与分析等, 直流下的局

部放电脉冲波形测量与分析目前还没有文献报导。

本文组建了直流下局部放电试验和测试系统,对设计的6种模拟换流变压器油纸绝缘的缺陷模型进行了直流下局部放电脉冲波形测量,并对测量过程中出现的脉冲波形进行了分析。这为进一步研究直流下局部放电特性提供了实验依据。

1 直流下局部放电模型

在交流电压作用下,绝缘中的电场呈容性分布,与材料的介电常数成反比。在稳态直流电压下,绝缘中电场成阻性分布,与材料的电导率成反比。据此,可以使用分析绝缘内部缺陷放电的abc三电容等效电路来分析直流局部放电^[5]。

假设电阻是线性的(实际工况并不一定),在施加纯直流电压时,缺陷上的电压分布(本文中局部放电模型分析以及测量均在直流稳态下)

$$V_c = \frac{R_c}{R_b + R_c} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] V \quad (1)$$

式中: V 为试品上的电压; τ 是时间常数。

在绝缘的缺陷两端,当电压到达 u ,且放电初始电子积累到一定量时,则发生放电,新的一次放电周期开始。两次放电时间间隔 Δt 等于恢复时间 t_r 加上放电初始化电子的等待时间 t_L 。

$$\Delta t = t_r + t_L = -\tau \ln(1 - u/V_s) + t_L \quad (2)$$

式中: u 是缺陷处的击穿电压; V_s 是缺陷不被击穿时其两端最终达到的电压。由于 $(1 - u/V_s)$ 很小,根据泰勒展开,式(2)可以简化为

$$\Delta t = \tau(u/V_s) + t_L \quad (3)$$

因为放电初始化电子的产生是一个累积过程,放电的触发电压是变化的,从而导致了放电时间间隔和放电幅值的变化,不同缺陷结构本身的各种因素使得放电脉冲的单个波形具有各自的波形特征参数。一般情况下,脉冲上升沿时间比下降沿小得多,即上升沿较陡而下降沿较缓。由 V_c 恢复到 V_s ,完整的单个脉冲持续时间是较长的,取决于缺陷模型系统的放电时间常数 τ 。

2 试验与测量系统

直流下局部放电检测与交流下检测原理相同^[5],都可以使用 IEC60270 推荐的脉冲电流法测量直流下的局部放电脉冲波形。本文使用超宽带检测方法测量直流下局部放电脉冲波形。

2.1 试验回路

图1给出了试验与测量回路的原理接线图。图

中直流高压源由硅堆内置的100 kV 负极性直流高压发生器与大 RC 负载组成(由于大 RC 负载,使得直流高压发生器内部即使存在局部放电也会被硅堆阻截),其中 $R=200\text{ M}\Omega$ 、 $C=30\text{ nF}$ 。电阻 R_1 和 R_0 构成10 000:1的电阻分压器,从 R_0 两端读取试验电压值。 C_k 为85 pF耦合电容, R_z 为阻值数百k Ω 的水电阻, C_x 为试品。

由于油中单次放电脉冲的持续时间一般在几十纳秒到几纳秒之间,波头可能更陡^[8](几纳秒到几十纳秒)。为了得到足够多的放电波形信息,必须用很高的采样频率对放电脉冲波形进行采集。试验中采用DPO4054 数字示波器,500 MHz 模拟带宽,2.5 Gs/s的采样率(理论上可能测得的最陡脉冲前沿为0.7 ns)。

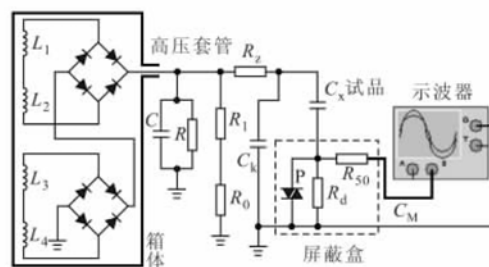


图1 直流下局部放电脉冲测试回路

2.2 测量电阻

脉冲检测阻抗由无感电阻 R_d (阻值取为100 Ω)和保护单元 P 并联而成,封装在一屏蔽铜管内。测量电缆 C_M 的波阻抗 z 及首、末端接入的电阻 R_{50} 为50 Ω (图1中末端匹配省略显示)。为检验脉冲测量系统的频率响应特性,利用方波源信号的陡下降沿(为2 ns)作为输入信号,并与经测量电阻后的信号进行比较。

方波源的陡下降沿信号与经过测量电阻后的信号波形如图2所示。示波器测得方波源的下降沿为2 ns,经过测量电阻后的下降沿为3 ns,相比之下下降沿只增加了1 ns,波形无过冲和振荡现象,对比图2b可发现振荡是方波源信号自身的(曲线上没有增加拐点)。据此,可以认为无感测量电阻 R_d 的性能是满足使用要求的。

2.3 空气中电晕试验

为了验证试验和测量系统的稳定性,对直流下空气中电晕放电波形进行了测量。图3所示为用于连接试品的导线端部没有进行处理的情况下,在加压后示波器检测到的电晕放电波形。在整个升压过程中,放电脉冲波形稳定,放电频率随电压幅值的升

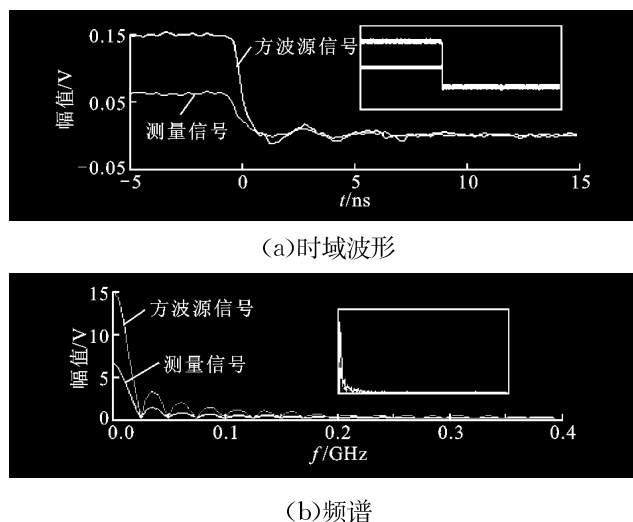


图2 校验脉冲和经测量系统传输后脉冲及其频谱

高而增大。文中给出的脉冲波形都是使用小波消噪后的波形,其原始波形在图中均以小图显示。从图3可以得出,电晕放电脉冲波形的波头时间约为30 ns,脉冲持续时间约为300 ns,没有振荡和过冲。此试验结果表明整个系统是满足试验要求的。

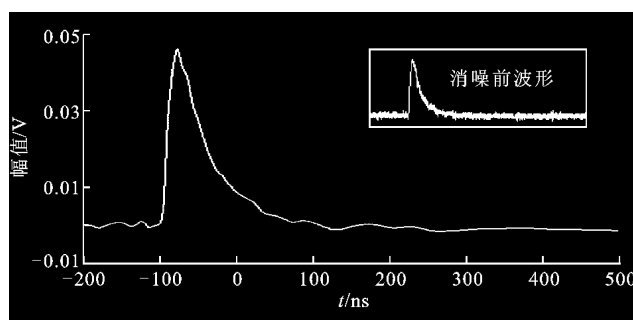


图3 直流下空气中电晕放电波形

3 油纸绝缘模型设计

作者设计了6种油纸绝缘局部放电模型以模拟换流变压器油纸绝缘的典型缺陷,试验中试品 C_x 分别为油纸针板、油纸平行板间隙、油纸沿面、油纸内部缺陷、油纸楔形和油纸悬浮,放电模型如图4所示。6种模型分别装于盛满变压器油的带有排气孔的密封有机玻璃筒内。

4 放电脉冲波形测量与分析

4.1 油纸针板放电

直流下油纸针板放电相对非常稳定,跟以下所有缺陷模型产生的脉冲波形一样,均没有过冲和振荡。试验时,当直流高压加到一定值时,针板模型开始放电,示波器偶尔(电压较低时,需等一段时间)捕捉到图5a所示的单个脉冲。该脉冲波形与其他缺陷模型产生波形的区别最大,为多峰脉冲,脉冲包络可

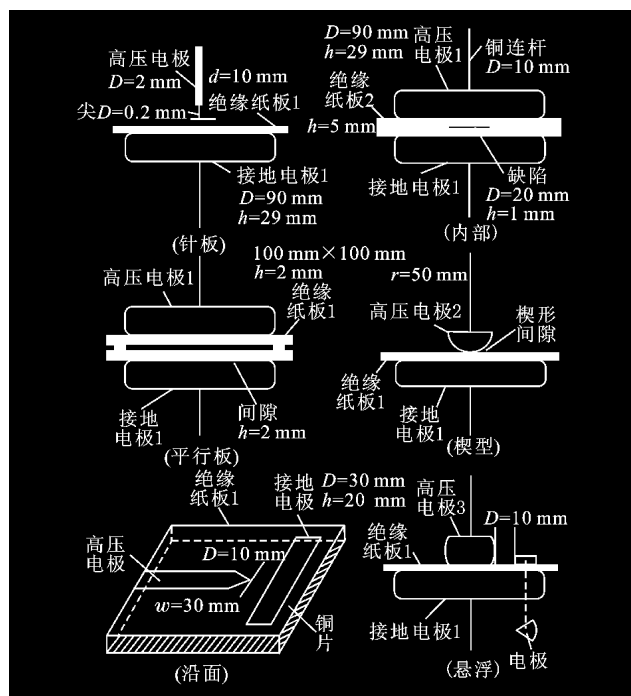


图4 油纸绝缘放电缺陷模型

视为单指数衰减波形,第一个峰的上升沿较陡,约为1 ns,包络下降沿约为30 ns,半峰宽约20 ns,整个脉冲持续时间约为150 ns。

继续升高电压,放电频率增加,放电幅值也相应增大,出现了100 mV以上的高幅值脉冲。当电压升高到一定值时,开始听到明显的放电声,油间隙频繁被击穿,出现图5b所示的强放电脉冲群,但是单个脉冲波形没有发生变化(图5b中I)。脉冲群有两种形式,图5b中I是单个脉冲没有完全发展的连续脉冲群,II是单个脉冲发展较完整的连续脉冲群,这两种放电脉冲群的幅值都是逐渐增大的。

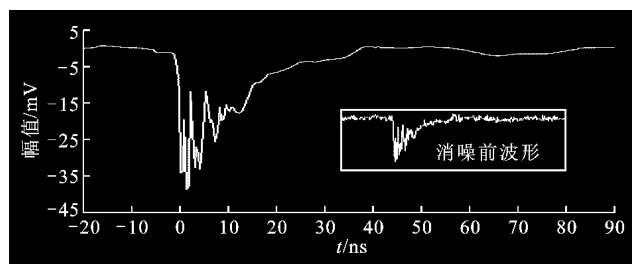
4.2 油纸平行板间隙放电

图4所示的平行板间隙模型,由于上下电极大小一致,可以视为均匀场,与其他5个电极模型不一样,放电点不确定,因此试验主要考核的是该模型可能存在的薄弱环节。

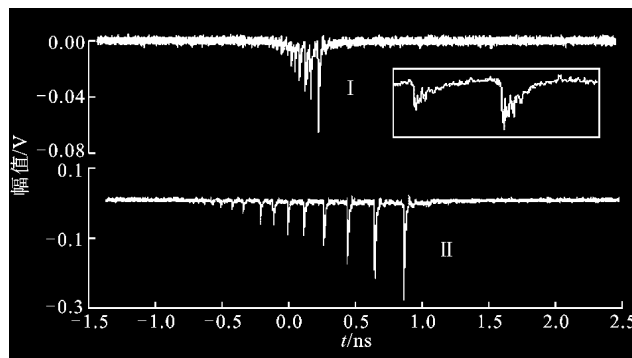
油纸平行板间隙模型产生的单个放电波形如图6所示。试验过程中,电压加到一定值时,偶尔出现的放电波形与继续升高电压后高频率出现的脉冲波形相同,幅值上略有差异,放电一直很稳定,没有出现其他形式的放电波形。由图6中得出,油纸平行板间隙放电是单指数衰减波形,脉冲持续时间较长,可达2.5 μ s以上,半峰宽约为40 ns,上升沿和下降沿分别约为10 ns和80 ns,与其他脉冲波形的特征参数比较来看,其上升沿和下降沿均较缓。

4.3 油纸内部缺陷放电

油纸内部间隙模型产生的单个放电波形如图



(a) 单个脉冲



(b) 放电脉冲群

图5 油纸针板放电脉冲

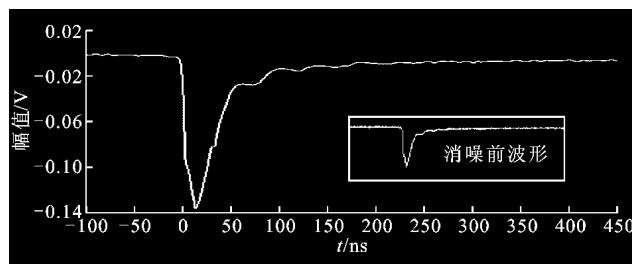
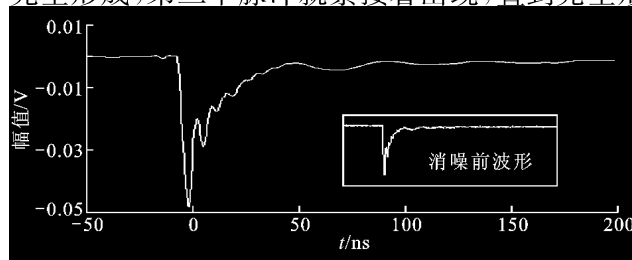
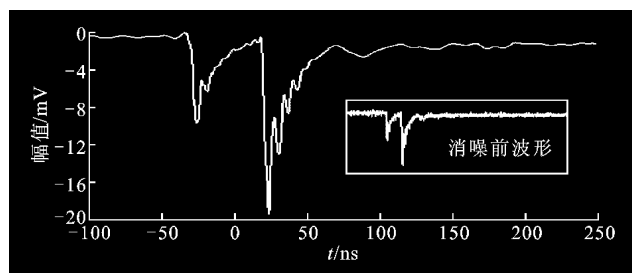


图6 油纸平行板间隙单个放电脉冲

7a所示. 单个脉冲出现规律与油纸平行板缺陷模型一样, 只是当高压升高到一定值时, 会出现小幅值的连续双脉冲. 如图7b所示, 第一个放电脉冲还没有完全形成, 第二个脉冲就紧接着出现, 直到完全形



(a) 单个脉冲



(b) 双脉冲

图7 油纸内部缺陷放电脉冲

成. 脉冲波形属于带次峰的单指数衰减波形, 脉冲持续时间也较长, 可达 $3 \mu\text{s}$ 以上, 半峰宽约为 10 ns , 上升沿和下降沿分别约为 3 ns 和 30 ns .

4.4 油纸沿面放电

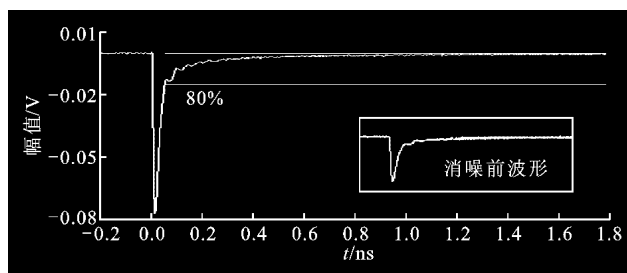
直流下油纸沿面放电模型由于其自身结构在较低电压下就开始放电, 产生的单个放电波形如图8a所示, 升高电压后也出现了小幅值的连续双脉冲(图8b). 在整个升压过程中, 放电频率增加, 幅值基本不变, 放电波形参数也基本不变. 单个脉冲波形属于单指数衰减波形, 脉冲持续时间约 $1.5 \mu\text{s}$, 半峰宽约为 30 ns , 上升沿和下降沿约为 6 ns 和 100 ns .

由上述分析结果可以看出, 直流下油纸平行板间隙、内部缺陷以及油纸沿面放电脉冲的持续时间都可达 $1 \mu\text{s}$ 以上, 从波形上看, 从下降沿的 80% 处恢复至放电初始位置需要的时间占整体脉冲持续时间的 95% 以上(见图8a). 这与前述基于直流下局部放电模型的放电规律一致.

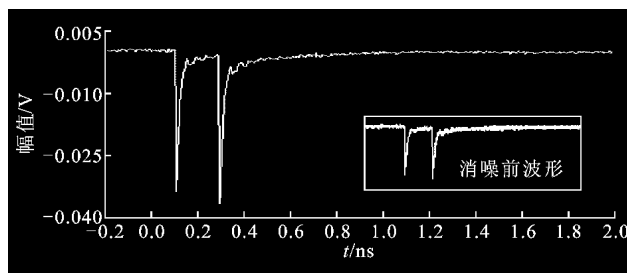
4.5 油纸楔形放电

楔形放电模型在较高电压下才开始放电, 出现单个脉冲, 波形如图9a所示. 脉冲幅值较小, 可视为双指数衰减波形, 脉冲持续时间达 $2 \mu\text{s}$, 半峰宽约为 20 ns , 上升沿和下降沿分别约为 4 ns 和 30 ns .

试验中升高电压, 放电频率增高, 幅值也变大, 单个脉冲波形没有变化, 波形特征参数也基本没有变化. 升高电压至一定值时, 除了能稳定捕提高幅值的单个脉冲外, 出现了大量其他形式的脉冲(见图9b). 图9b中 I、II 两个脉冲峰的时间间隔以及 III 前两个脉冲峰值的时间间隔均约为 30 ns , IV 所示

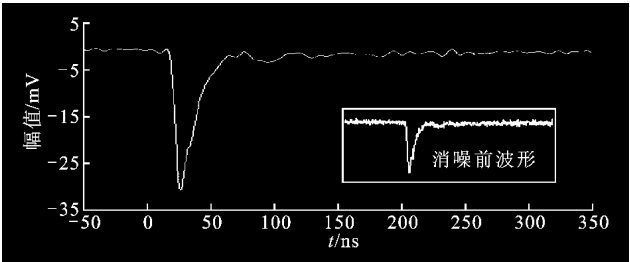


(a) 单个脉冲

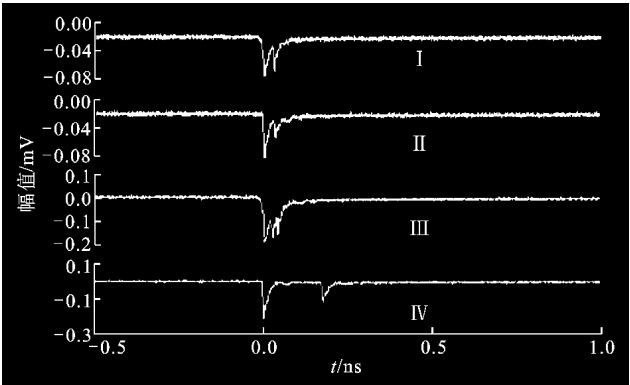


(b) 双脉冲

图8 油纸沿面放电脉冲



(a)单个脉冲



(b)其他形式脉冲

图9 油纸楔形放电脉冲

的是时间间隔大于100 ns的两个脉冲.这可能是由于在高场强下,楔形表面单点的连续放电或是多点放电引起的.

4.6 油纸悬浮放电

油纸悬浮缺陷放电脉冲幅值较小,放电也十分稳定,升高电压只是影响放电频率,并不影响放电波形及其波形参数.如图10所示,放电波形为单指数衰减波形,脉冲持续时间约为1 μ s,半峰宽约为20 ns,上升沿和下降沿分别约为3 ns和30 ns.

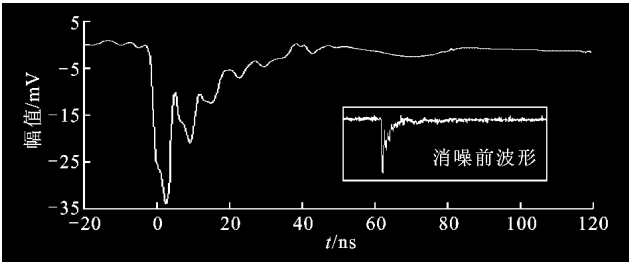


图10 油纸悬浮单个放电脉冲

4.7 单个脉冲波形对比

对6种缺陷模型在直流高压试验中的局部放电现象分别进行了描述及分析,表1为6种缺陷模型对应单个脉冲的部分特性对比,表中波形参数项依次为上升沿、下降沿和半峰宽.从波形外形来看,除楔型模型产生的脉冲为双指数衰减波形外,其他5种模型产生的脉冲均为单指数衰减波形;从脉冲波形参数整体上看,上升沿均较陡,但下降沿较缓,持

续时间长(针板模型放电除外).

表1 脉冲波形对比

类型	外形	次峰	多峰	波形参数/ns	持续时间/ μ s
针板	单衰	—	+	1,30,20	< 1
平行板	单衰	—	—	10,80,40	> 1
内部	单衰	+	—	3,30,10	> 1
沿面	单衰	—	—	6,100,30	> 1
楔型	双衰	—	—	4,30,20	> 1
悬浮	单衰	+	—	3,30,20	> 1

5 结 论

(1)建立了直流下局部放电试验与脉冲波形的测试系统,利用方波源的陡下降沿信号对测量电阻进行校验,并对直流下空气中电晕放电波形进行了检测,结果表明测量系统可以满足试验要求.设计了6种油纸绝缘放电模型以模拟换流变压器实际工况条件下的典型缺陷,试验结果表明,相同条件下的缺陷模型放电稳定、重复性较好.这为直流下油纸绝缘局部放电研究提供了一个试验平台.

(2)直流下放电脉冲波形不存在振荡分量和过冲,部分脉冲波形呈多峰状以及下降沿带有毛刺.不同缺陷模型放电脉冲的上升沿、下降沿、半峰宽等波形参数均有差别,为直流下利用放电脉冲波形参数识别放电类型提供了可能.从波形测量结果来看,放电波形符合直流下局部放电规律,单个脉冲的完整持续时间较长,可达1 μ s以上.

参考文献:

[1] 于钦学,邱昌容,谢恒坤,等. 油纸绝缘直流局部放电的研究[J]. 变压器, 1998, 35(5): 17-20.
YU Qinxue, QIU Changrong, XIE Hengkun. Study on partial discharge in oil-immersed insulation under DC voltage [J]. Transformer, 1998, 35(5): 17-20.

[2] RENATE S, JOHN L. Partial discharge testing under direct voltage conditions [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic System, 1982, 18(1): 82-93.

[3] RENATE S. Ramp technique for DC partial discharge testing [J]. IEEE Trans on Electrical Insulation, 1985, 20(1): 38-46.

[4] FROMM U. Interpretation of partial discharge at dc voltages [J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(5): 761-770.

[5] PETER H F, JOHAN J. Partial discharges at dc

- voltage: their mechanism, detection and analysis[J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(2): 328-340.
- [6] 冉汉政, 吴广宁, 于成龙, 等. 膜纸复合储能电容器的直流局部放电信号分析方法 [J]. 电工技术学报, 2006, 21(4): 47-49.
- RAN Hanzheng, WU Guangning, YU Chenglong, et al. Study of DCPD analyzing method of energy-store capacitors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(4): 46-49.
- [7] 白建社, 盛戈皓, 江秀臣, 等. 基于移动时间窗的直流局部放电特征提取方法 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(14): 55-58.
- BAI Jianshe, SHENG Gehao, JIANG Xiuchen, et al. Features extraction method of DC partial discharge based on mobile time window [J]. Automation of Electric Power System, 2005, 29(14): 55-58.
- [8] 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(2): 1-5.
- GAO Wensheng, WANG Meng, TAN Kexiong, et al. Typical pulse shape and frequency characteristic of the PD signal in oil-paper insulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 1-5.
- (编辑 杜秀杰)