

气体放电管直流击穿电压测量技术的研究

姚学玲¹, 杜志航¹, 杨志豪², 陈景亮¹

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 福建省电力有限公司泉州电业局, 362000, 福建泉州)

摘要: 为了寻找一个能有效表征气体放电管(GDT)从高阻状态转变为低阻状态的判据,在分析和实验对比现有技术的基础上,提出了利用电磁感应原理设计判据提取的方法.该方法设计了一个耦合线圈,将初级线圈串入主回路采集 GDT 击穿瞬间产生的微电流脉冲,将该脉冲整形后作为判据信号.对 GDT 击穿瞬间的电路状态进行了建模分析,首次从电路角度分析了 GDT 击穿瞬间出现的脉冲电流的形成原因,并指出不同的脉冲电流是由电流中脉冲分量和线性分量相互作用的结果.实验结果表明:在宽电压范围(50~5 000 V)测量系统中,稳态击穿电流小于 5 mA,且在上升速率为 100 V/s 直流电压作用下,从 GDT 击穿到系统响应最小时间为 2.06 μs ,最大为 3.34 μs ,平均为 2.81 μs .

关键词: 气体放电管;直流击穿电压;击穿电流;电磁感应

中图分类号: TM93 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)10-0001-07

Measuring Technology for DC Breakdown Voltage of Gas Discharge Tubes

YAO Xueling¹, DU Zhihang¹, YANG Zhihao², CHEN Jingliang¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Quanzhou Electric Power Inc., Fujian Electric Power Company Limited, Quanzhou, Fujian 362000, China)

Abstract: To find a criterion effectively representing the transition from high resistance to low impedance condition of gas discharge tubes (GDT), following electromagnetic induction law, a method according to the analytic and the experimental comparison with the existing technology, is proposed, where a coupling coil and whose primary coil are set in series in the main circuit to extract the weak impulse current in case of broken down GDT as the criterion signal. Once modeling for circuit state in the breakdown GDT, the reasons for the impulse current on the circuit view point are revealed, and different impulse current waveforms are considered as the interaction between current impulse component and linear one. The experiments indicate that in the measurement system with a wide testing voltage range (50~5 000 V), the steady-state breakdown current gets lower than 5 mA, the minimum delay time takes 2.06 μs , the maximum 3.34 μs , and the average 2.81 μs , with a 100 V/s rising rate.

Keywords: gas discharge tubes; DC breakdown voltage; breakdown current; electromagnetic induction

近年来,气体放电管(GDT)被广泛应用于电力电子、信息系统等产品的过电压保护中,它的电压等

级也随应用需求不断提升,现有 75~4 500 V 产品,种类丰富.国内外对 GDT 的研究取得了丰富的成

果,文献[1]研究了 GDT 在交流系统中被过电压触发后形成续流的机理;文献[2]研究了 GDT 中注入一定压力的氮气后,影响击穿电压的因素;文献[3]提出了基于 PSPICE 仿真软件下的 GDT 仿真模型,并利用 10/700 μs 冲击电压发生器进行实验对比,验证了仿真模型的正确性;文献[4-5]设计了 50~1 500 V 的半导体放电管和气体放电管的直流击穿电压测试系统,但只侧重于具有一定速率的电压源的实现,而未对放电管从高阻状态转变为低阻状态的判据、系统响应时间、稳定性等重要指标进行分析。

经分析表明,现有的测量方法中对判据的设计主要有电阻取样法和光耦取样法. 本文在实验分析了现有方案的基础上,提出了利用电磁感应原理设计耦合线圈来提取 GDT 从高阻抗状态转变为低阻抗状态的判据,设计完善了判据信号提取电路. 为了研究击穿电流的特征,对 GDT 击穿瞬间的电路状态进行了建模分析,并认为击穿瞬间产生的不同形状的脉冲电流是由电流中脉冲分量和线性分量相互作用的结果. 将设计的判据提取方案应用到 50~5 000 V 气体放电管直流击穿电压测量系统中,能实现稳态击穿电流 $<5\text{ mA}$,且在电压上升速率(v)为 100 V/s 下,从 GDT 击穿到系统响应最小时间为 2.06 μs ,最大为 3.34 μs ,平均为 2.81 μs ;在 v 为 1 kV/s 下,该最小时间为 2.16 μs ,最大为 3.4 μs ,平均为 2.9 μs .

1 测量中的技术要求

1.1 对电压上升速率的要求

气体放电管直流击穿电压值的定义^[6-7]:放电管在缓慢增加的直流电压下,从高阻抗状态变为导通状态时刻的电压值. 根据标准定义设计的测试主回路结构见图 1,标准规定的实验电压要求见图 2. 实

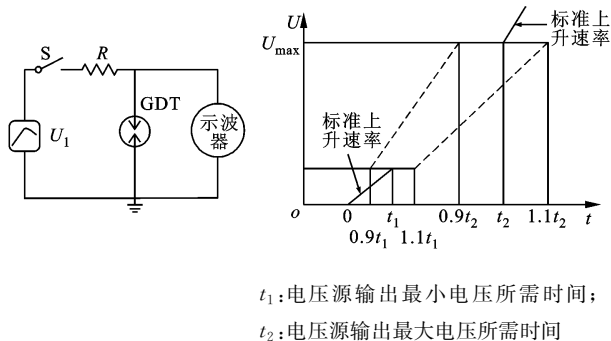


图 1 测试主回路结构

图 2 实验电压上升速率

际中,为了方便对比, v 可为 100~1 000 V/s. 实验电压波形应在图 2 中虚线所框定的范围内, U_{max} 应大于放电管直流击穿电压上限值,且小于其下限值的 3 倍^[6-7].

1.2 对击穿电流的要求

在测试过程中,标准要求放电电流应限制在 5~15 mA. 标准中所强调的放电电流应理解为稳态放电电流. 在一次测量过程中,回路中的电流波形见图 3.

由图 3 可知,当 GDT 击穿后,会即时产生一个电流脉冲 i_i ,如果直流电压继续上升或缓慢下降,当电压仍能维持 GDT 自持放电时,会产生后续稳态电流 i_s . i_i 的峰值瞬间较高,持续时间很短(几十至几百纳秒). i_i 的峰值、上升时间、持续时间等的变化与回路杂散电感、GDT 所充气体种类、测试环境等有关.

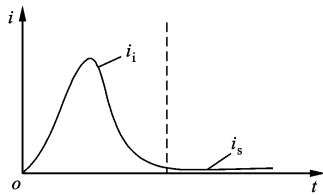


图 3 击穿电流波形示意图

1.3 实现快速精确测量的要求

图 4 是某型号 GDT 在击穿瞬间的电压和电流波形. 在电压跌落瞬间,电流发生陡变,产生电流脉冲,随后是稳态击穿电流;在电压跌落的同时,峰值电压经分压后被峰值保持电路锁定. 利用 PSPICE 软件仿真,结果见图 5.

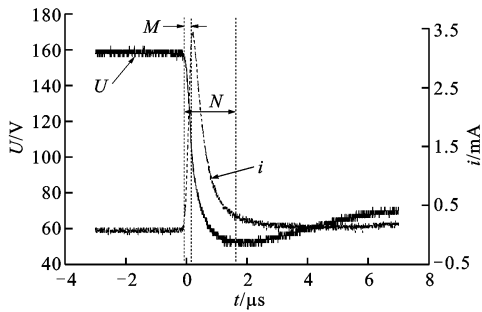


图 4 GDT 击穿瞬间的电压-电流波形

由于峰值保持电路对地存在泄漏电阻,被保持的峰值电压随时间不断下降,此时判据信号应该在图 4 中的 M 或 N 区域中产生,该信号产生得越早,所测得击穿电压值越接近真实值^[8].

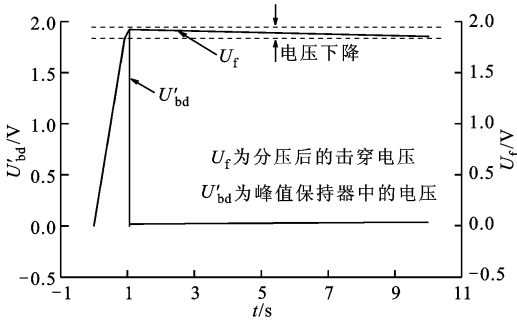
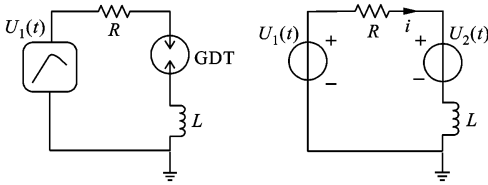


图 5 峰值保持器中的电压波形

2 GDT 击穿瞬间电路状态分析

由图 1 所示的测试主电路可得该电路的等效电路(见图 6a),及 GDT 击穿瞬间的等效电路(见图 6b)。



(a) 主回路等效电路 (b) GDT 击穿瞬间等效电路

$U_1(t)$: 直流电压源; R : 限流电阻; $U_2(t)$: GDT 放电瞬间等效电压源; L : 杂散电感(包括接线电感、电阻杂散电感、GDT 放电时火花电感等)

图 6 GDT 击穿瞬间测试回路电路状态等效图

等效电路可用一阶零状态响应的方法分析

$$L \frac{di}{dt} + Ri + U_2(t) = U_1(t) \quad (1)$$

GDT 击穿瞬间,电压先呈指数跌落,后持续辉光放电,用 $U_2(t) = Me^{Bt} + U_h$ 来表征, $B < 0$ 与电压跌落速度有关, $U_1(t) = kt + U_{bd}$ 表征实验电源,表示为

$$U_1(t) = \begin{cases} kt, & t < 0 \\ U_{bd}, & t = 0 \\ kt + U_{bd}, & t > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $U_1(t)$ 作为激励可表示为 3 种状态,分别是击穿前($t < 0$)、击穿时刻($t = 0$)和击穿后($t > 0$); k 为 $U_1(t)$ 的斜率; U_{bd} 为击穿时刻的峰值电压。时间零点设在电压刚开始跌落时刻,持续时间约几十至几百纳秒。由式(1)得

$$\frac{di}{dt} + \frac{R}{L}i = \frac{1}{L}[kt + U_{bd} - (Me^{Bt} + U_h)] \quad (3)$$

该一阶线性非齐次方程通解为

$$i(t) = Ae^{-\frac{R}{L}t} + \frac{k}{R}t - \frac{kL}{R^2} - \frac{M}{BL+R}e^{Bt} +$$

$$\frac{U_{bd} - U_h}{R} - \frac{kL}{R^2} \quad (4)$$

式中: A 为常量,与初始状态有关。初始条件为 $i(0_+) = i(0_-)$, 带入式(4),得

$$A = \frac{M}{BL+R} + \frac{kL}{R^2} - \frac{U_{bd} - U_h}{R} \quad (5)$$

其中 $(kL/R^2) \ll 10^{-12}$, 可以忽略不计, 故得

$$i(t) = \left(\frac{M}{BL+R} - \frac{U_{bd} - U_h}{R} \right) e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{k}{R}t - \frac{M}{BL+R}e^{Bt} + \frac{U_{bd} - U_h}{R} \quad (6)$$

将式(6)分解,得

$$\begin{cases} i'_1(t) = \left(\frac{M}{BL+R} - \frac{U_{bd} - U_h}{R} \right) e^{-\frac{R}{L}t} - \frac{M}{BL+R}e^{Bt} \\ i'_2(t) = \frac{k}{R}t + \frac{U_{bd} - U_h}{R} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\frac{M}{BL+R} > \frac{U_{bd} - U_h}{R} > 0$ 。 $i'_1(t)$ 、 $i'_2(t)$ 、 $i(t)$ 示意图见图 7。 $i'_1(t)$ 是典型的双指数函数, 它的波头上升速率取决于 $\left(-\frac{M}{BL+R}e^{Bt} \right)$, 即与电压跌落速率 B 有关, 称之为脉冲分量。 $i'_2(t)$ 为单调线性递增函数, 其斜率在 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 范围内, 主要作用在脉冲波形波尾部分, 称之为线性分量。在 GDT 刚击穿瞬间, 脉冲分量主导击穿过程, 当电流到达峰值后, 脉冲分量的作用逐步减弱, 线性分量为主导, 电流缓慢下降并趋于稳定。从式(6)、式(7)和图 7 可以看出, 电压上升速率对击穿电流波形的上升时间的影响不大, 但它一定程度上会影响击穿电流的持续时间, 且表现为电压上升速率越快电流持续时间越短。

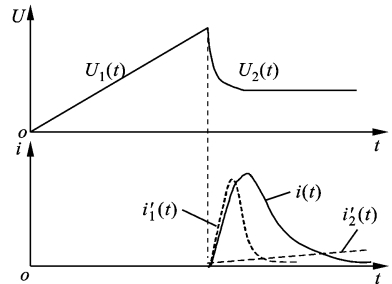


图 7 脉冲电流形成示意图

3 高阻态到低阻态的判据分析

3.1 系统设计

根据以上测试要求和需求分析,设计的测量系

统见图 8。测量系统由 MCU 作为主控单元,由 D/A 控制直流高压模块输出一定上升速率的测试电压,当试品击穿时,击穿电压经分压后进入峰值保持器。与此同时,电流测量模块快速响应回路中的脉冲电流,经整形后输出判据信号给 MCU,继而 MCU 控制 A/D 对峰值保持器中的电压开始处理,控制、显示等均通过 Modbus 协议经由人机交互环节完成。

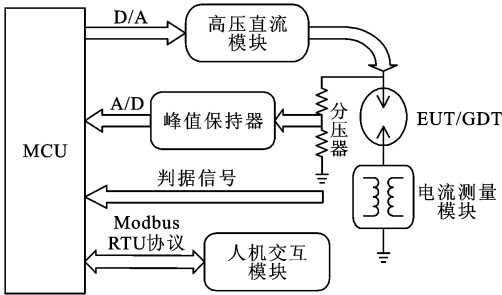


图 8 测量系统结构

3.2 现有判据方法分析

如上所述,现有判据方法有电阻取样和光耦取样。由于电阻取样响应时间慢、未经光电隔离、不适合宽范围击穿电压的测量等缺点显著,文中不再赘述^[8]。本文重点分析光耦取样技术,光耦驱动电路见图 9。

在限流电阻 R_1 为 200 k Ω 、取样电阻为 10 k Ω 、

v 为 1 kV/s 时,当放电管击穿后,取样电阻上的电压经电压跟随器驱动三极管基极,输出使能信号,MCU 开始采集击穿电压。

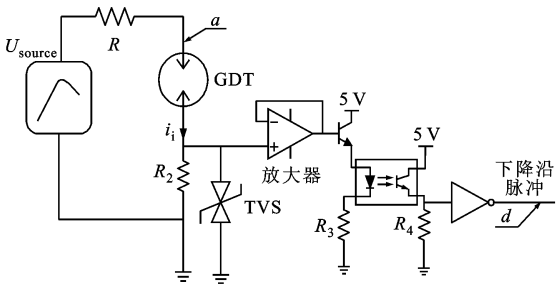


图 9 采用光耦设计的放电管击穿信号采集电路

从表 1 可知,不同等级的 GDT 击穿后,该判据信号提取电路输出的时延一致性不稳定,尤其是对电压等级相对低的 GDT,最大时延达 28 ms。在最大电压 5 000 V 下,回路中稳态击穿电流理论上最大约为 23.8 mA,最小约为 0.43 mA。为了满足标准对稳态击穿电流的要求,将 R_1 调整为 500 k Ω ,此时稳态击穿电流理论上最大约为 10 mA,最小约为 0.18 mA,时延结果见表 2。

对比表 1 和表 2 可知,在 GDT 电压等级较低、稳态击穿电流较小的情况下,输出时延不稳定,分散性较大,从几十毫秒至几十微秒。

表 1 R_1 为 200 k Ω 时的 α - d 时延统计

GDT 电压等级/V	90	150	230	350	470	600	1 000	1 600	2 000	3 000	4 500
α - d 时延/ μ s	28 000	12.00	9.56	9.68	9.68	9.60	9.62	9.62	9.68	9.66	9.66

表 2 R_1 为 500 k Ω 时的 α - d 的时延统计

GDT 电压等级/V	90	150	230	350	470	600	1 000	1 600	2 000	3 000	4 500
α - d 时延/ μ s	52 000	17.60	15.60	9.68	9.68	9.62	9.62	9.62	9.68	9.66	9.66

3.3 基于电磁感应原理的判据提取方案设计

由上可知,在 GDT 击穿瞬间产生脉冲电流,交变的电流会在电感上产生电压降,因此可以设计电磁感应线圈^[9-13],由串入回路中的初级电感提取电流信号,经过隔离后传给整形电路,最后输出给 MCU。电磁感应线圈的工作原理见图 10。主磁通 Φ_0 沿铁芯闭合,并与初次级绕组的所有线匝相交链;漏磁通 Φ_{11} 只与初级绕组相交链,沿空气气隙闭合;次级绕组的漏磁通 Φ_{12} 只与次级绕组相交链,沿空气气隙闭合。如果忽略初、次级电阻压降和漏磁的影响,可得

$$N_1/N_2 = n$$

式中: N_1 、 N_2 分别为初、次级绕组的匝数。

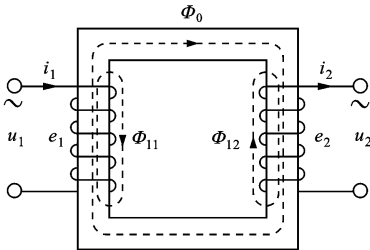


图 10 电磁感应线圈原理图

由于本系统中线圈为微电流激励,为了尽可能大地传递能量,线圈应该选择合适的铁心材料.铁芯在窄脉冲下有较高的磁导率,损耗电阻大,磁化电流小,在匝数不变的情况下,可以获得较大的磁化电感^[14].所设计的判据信号提取电路见图 11.

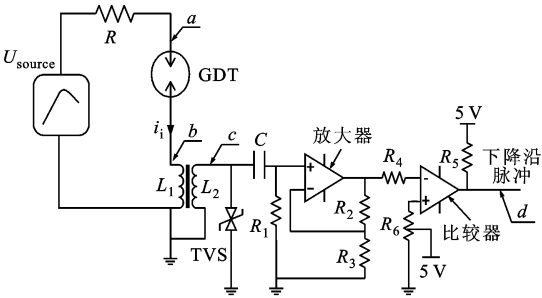


图 11 设计的判据信号提取电路

电路工作过程如下:当 GDT 击穿时,主回路中产生瞬时电流脉冲,线圈原边感应瞬时的电流脉冲,而后续稳态电流不能激励该线圈;瞬态抑制二极管(TVS)将线圈副边感应的电压限制在 5 V 以内;隔直电容 C 将变化缓慢的直流信号滤除,经正向放大器放大后再经过电压比较器,为 MCU 提供一个可识别的下降沿脉冲,使 MCU 控制 A/D 开始采集并分析击穿电压数据^[14].

4 实验结果与分析

实验电路见图 11,其中 $R=1\text{ M}\Omega$, $L_1=15.9\text{ mH}$, $L_2=12.4\text{ mH}$, $R_2=10\text{ k}\Omega$, $R_3=R_4=1\text{ k}\Omega$. 实验电源升压速率分别为 1 kV/s 、 100 V/s ,对比这两种速率下测量时的分散性与稳定性.

4.1 b 、 c 点脉冲的上升时间(t_r)、脉冲宽度(t_{pw})、幅值(U_p)的变化规律

以 v 为 1 kV/s 为例,对 6 种电压等级的试品测量 4 次,其 t_r 、 t_{pw} 的变化规律见表 3.

从表 3 可以看出, b 、 c 两点脉冲的上升时间和宽度随 GDT 电压等级的不同而各异,且同一种 GDT 在多次测量中表现出一定的分散性,这与放电管自身构造密切相关^[15],但 t_r 、 t_{pw} 的分散性并不影响判据信号输出时延的稳定性. 在 100 V/s 速率下 b 、 c 点的 t_r 、 t_{pw} 也呈现类似的分散性. 图 12 给出了 v 为 100 V/s 时,多次测量并取平均值后的变化曲线,可以看出 b 、 c 点脉冲的 t_r 、 t_{pw} 具有良好的一致性.

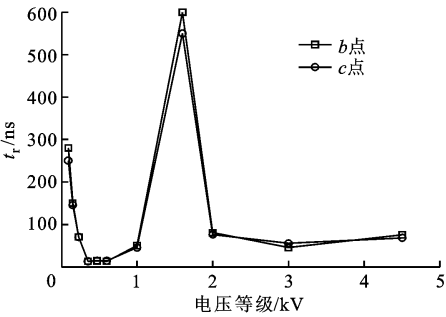
表 3 v 为 1 kV/s 时 b 、 c 点的 t_r 、 t_{pw} 特性

电压等级/V	t_r/ns		t_{pw}/ns	
	b 点	c 点	b 点	c 点
90	300.0	250.0	487.0	489.4
	308.6	246.6	487.0	459.0
	308.0	256.0	487.0	449.3
	304.0	250.6	487.0	513.0
600	12.2	8.2	8.75	13.4
	14.5	8.2	8.6	13.4
	16.5	8.2	8.24	13.5
	13.8	8.4	9.4	13.4
1 600	22.5	15.7	105.8	101.4
	22.0	15.4	112.6	110.8
	20.6	15.4	105.6	97.2
	22.0	15.6	99.4	96.2
2 000	38.6	34.5	114.4	107.7
	36.7	34.5	116.6	109.6
	38.0	34.5	114.0	107.6
	38.6	34.4	112.2	106.4
3 000	480.0	450.0	675.0	645.5
	482.5	442.0	686.4	644.0
	480.5	444.8	689.5	647.8
	476.0	447.3	666.8	646.6
4 500	38.0	35.0	62.0	49.2
	36.0	36.7	60.8	59.2
	32.6	38.7	65.2	47.8
	36.7	35.4	70.0	48.8

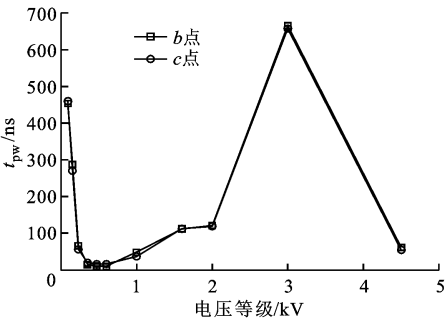
从表 4 可知,不同电压等级的 GDT 击穿时,电流脉冲在初级电感上(b 点)产生的电压幅值 U_p 不同,在 v 为 1 kV/s 时其幅值变化范围为 $0.380\sim64\text{ V}$,在 v 为 100 V/s 时为 $0.488\sim112\text{ V}$. 次级电感电压达到 TVS 的动作电压后,经限压作用保持在较小的范围内变化. 在 v 为 1 kV/s 时, c 点最小电压为 0.464 V ,最大电压为 7.84 V ;在 v 为 100 V/s 时, c 点最小电压为 0.5 V ,最大电压为 8.32 V .

4.2 a - d 时延

a - d 时延是表征测量系统响应速度快慢的重要



(a)脉冲的上升时间



(b)脉冲的宽度

图 12 v 为 100 V/s 时 b 、 c 点脉冲的上升时间和宽度

表 4 b 、 c 点的脉冲电压幅值

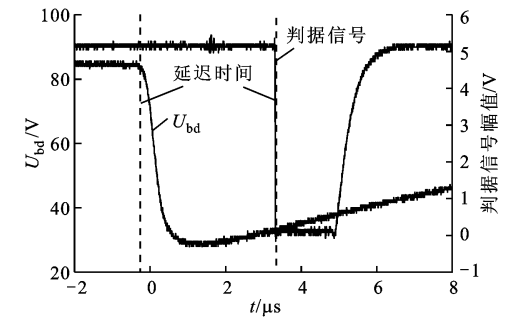
电压等级/V	U_p/V			
	$v=1\text{ kV/s}$		$v=100\text{ V/s}$	
	b 点	c 点	b 点	c 点
90	0.38	0.46	0.49	0.50
150	1.20	1.44	1.62	1.74
230	4.60	5.56	7.36	5.68
350	22.20	6.40	17.80	5.84
470	32.40	3.84	29.00	5.84
600	27.60	2.52	44.60	4.82
1 000	35.60	2.16	38.60	3.68
1 600	15.00	1.92	30.80	3.86
2 000	4.08	2.00	40.00	4.56
3 000	2.88	2.68	10.60	2.56
4 500	64.00	7.84	112.00	8.32

指标. 由表 5 可得, 从 GDT 击穿到 MCU 响应, 在 v 为 1 kV/s 时最小时间为 2.16 μs , 最大为 3.4 μs , 平均为 2.9 μs ; 在 v 为 100 V/s 时最小时间为 2.06

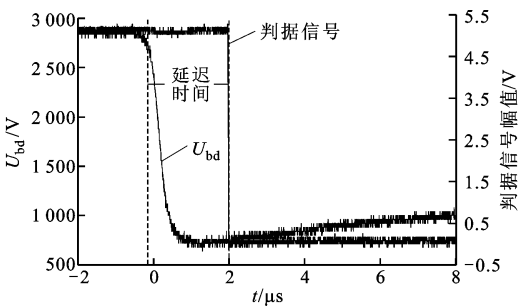
μs , 最大为 3.34 μs , 平均为 2.81 μs . 由于时延短, MCU 响应时间快, 且不同等级的放电管时延相对稳定, 可以保证系统稳定可靠工作. 在 v 为 1 kV/s 时, 90 V 和 3 kV 放电管测量时 a 、 d 点的波形见图 13.

表 5 a - d 时延的统计

电压等级/V	α -d 时延/ μ s	
	v =1 kV/s	v =100 V/s
90	3.40	3.34
150	3.40	3.12
230	3.28	3.12
350	3.20	3.04
470	3.12	3.08
600	3.00	2.72
1 000	2.54	2.52
1 600	2.82	2.52
2 000	2.66	3.02
3 000	2.16	2.34
4 500	2.32	2.06



(a)90 V



(b)3 kV

图 13 不同等级 GDT 测试时判据信号的输出时延

5 结 论

在分析了现有电阻取样和光耦取样方案的基础上,提出了利用电磁感应原理设计耦合线圈的方法,提取 GDT 击穿瞬间产生的电流脉冲作为 GDT 从高阻抗状态转变为低阻抗状态的判据.建立了 GDT 击穿瞬间的电路模型,实验研究了 GDT 导通瞬间的电压与电流特性,分析了 GDT 击穿瞬间出现的脉冲电流的形成原因,发现通过 GDT 的脉冲电流是由脉冲分量和线性分量组成.实验结果表明:本文设计的测量系统,可以对 50~5 000 V 气体放电管的直流击穿电压进行测量,稳态击穿电流小于 5 mA;在 v 为 100 V/s 的直流电压下,从 GDT 击穿到系统响应最小时间为 2.06 μ s,最大为 3.34 μ s,平均为 2.81 μ s;在 v 为 1 kV/s 时,最小时间为 2.16 μ s,最大为 3.4 μ s,平均为 2.9 μ s.研究结果对 GDT 直流击穿电压的准确测量具有重要的理论意义与工程价值.

参考文献:

- [1] BIZJAK M, PREGELJ A, BRECELJ F, et al. Breaking of follow currents by gas discharge tube in over-voltage protection[C]//2003 IEEE International Conference on Industrial Technology. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 657-662.
- [2] PEJOVIC M M, MILOSAVLJEVIC C S. The estimation of static breakdown voltage for gas-filled tube at low pressures using dynamic method[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2003, 31(4): 776-781.
- [3] ZOLA J G. Gas discharge tube modeling with PSPICE [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2008, 50(4): 1022-1025.
- [4] 张耀宇.全自动半导体放电管分选测试系统研究与开发[D].南京:东南大学,2006.
- [5] 黎步银,赵俊,周东祥,等.气体放电管直流击穿电压自动测试系统的研制[J].计量学报,2005,26(1): 74-76.
- LI Buyin, ZHAO Jun, ZHOU Dongxiang et al. DC spark-over voltage auto-testing system for the arrester [J]. Acta Metrologica Sinica, 2005, 26(1): 74-76.
- [6] International Electrotechnical Commission. IEC 61643-311 2001 Components for low-voltage surge protective devices: Part 311 Specification for gas discharge

tubes[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2001.

- [7] 国家质量技术监督局. GB/T9043—1999 通信设备过电压保护用气体放电管通用技术条件[S]. 北京:中国标准出版社,1999.
- [8] 杨志豪. 气体放电管直流击穿电压测试技术的研究[D]. 西安:西安交通大学,2010.
- [9] 王峰,米东,徐章遂,等.基于法拉第电磁感应法的脉冲强磁场测量方法[J].高电压技术,2008,34(4): 674-677.
- WANG Feng, MI Dong, XU Zhangsui, et al. Measurement of high pulse magnetic field based on Faraday electromagnetic induction[J]. High Voltage Engineer, 2008, 34(4): 674-677.
- [10] 梁天学,孙凤举,邱爱慈,等.百 ns 直线型脉冲变压器模块仿真及初步试验[J].高电压技术,2007,33(7): 18-22.
- LIANG Tianxue, SUN Fengju, QIU Aici. Simulation and primary experimentation of fast linear transformer driver module[J]. High Voltage Engineer, 2007, 33(7): 18-22.
- [11] 李士钟,刘金亮.部分磁芯的带绕式脉冲变压器的研制[J].高电压技术,2007,33(10): 118-122.
- LI Shizhong, LIU Jinliang. Development of the spiral strip pulse transformer with magnetic core[J]. High Voltage Engineer, 2007, 33(10): 118-122.
- [12] 李明加,阮江军,康强,等.脉冲变压器锥形绕组电压分布数值分析[J].高电压技术,2004,30(6): 51-54.
- LI Mingjia, RUAN Jiangjun, KANG Qiang, et al. Numerical calculation of the voltage distribution on pulse transformer's taper windings[J]. High Voltage Engineer, 2004, 30(6): 51-54.
- [13] 姚学玲,陈景亮.气体放电管直流击穿电压测量和测试方法:中国,201010199158.8[P].2010-09-29.
- [14] HUANG Zhonghua. Weak current signal detection and reception of quasi-electrostatic field[C]//The 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 61-64.
- [15] CHEN Jingliang, HU Shangmao, YAO Xueling. Periodic oscillatory damping pulse current conditioning of gas discharge tubes[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 602-605.

(编辑 杜秀杰)