

DOI: 10.7652/xjtuxb201702017

主动型过电压保护间隙场击穿触发回路的暂态特性研究

王晨光, 姚学玲, 林海, 孙晋茹, 乐杨晶, 陈景亮
(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对主动型过电压保护间隙(SPG)研究中仅从触发回路的结构及材料角度难以分析其性能差异的机理,通过建立组合波注入下触发回路的等效模型,获得了触发回路输出电压的暂态解析式。基于触发回路的电压动作过程、触发电流与主间隙电流的数值关系、发生时序的理论分析及实验验证,得出了触发回路响应时间及保护间隙击穿电压的变化规律。研究发现:触发回路中耦合气体放电管动作滞后于压敏电阻,其动作时刻主间隙两端电压约为压敏电阻阈值电压 $U_{1\text{ mA}}$ 与耦合气体放电管动作电压 U_{GM} 之和;触发电流 I_1 在时间上先于主间隙电流 I_2 出现,但在数值上 I_1 远小于 I_2 ;触发回路中耦合气体放电管及触发间隙的响应时间 t_1 、 t_2 随冲击电压峰值 U_m 的增大而减小,与之对应的主动型 SPG 的响应时间 t_3 及压比 K 远小于被动型 SPG 约 $2.224\text{ }\mu\text{s}$ 的响应时间及 2.42 的压比。该结果可为主动型过电压保护间隙触发特性的研究及优化提供理论与实验基础。

关键词: 主动触发;过电压保护间隙;组合波;动作时序;响应时间

中图分类号: TM862 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)02-0104-07

Transient Characteristics of Field-Breakdown Trigger Circuit for Active Surge Protection Gap

WANG Chenguang, YAO Xueling, LIN Hai, SUN Jinru, LE Yangjing, CHEN Jingliang
(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To overcome the difficulties in analyzing the mechanism of performance differences among the active surge protection gaps (SPG) by merely changing the structures or materials of trigger circuits, an output voltage transient formula of the trigger circuit is obtained by establishing an equivalent model of the trigger circuit under combined wave. On the basis of the quantitative analysis and experiment, the trigger circuit dynamic voltage changing sequences, the numerical relationship and action series between the trigger current and main gap current, the response time of the trigger circuit, and the voltage changing regularities of SPG are obtained. It is found that: the coupled gas discharge tube in the trigger circuit lag acts behind the varistors; the voltage of main gap approximately reaches the sum of threshold voltage of varistor $U_{1\text{ mA}}$ and gas discharge tube action voltage U_{GM} while gas discharge tube acts; the trigger current I_1 appears before main gap current I_2 but is much smaller than I_2 ; the response time of the coupled gas discharge tube t_1 and the trigger gap t_2 decrease with the increasing impulse peak voltage; and the

response time t_3 and the voltage ratio K of the active SPG are far less than the values $2 \mu\text{s}$ and 2.42 of the passive SPG.

Keywords: active trigger; surge protection gap; combined wave; action sequence; response time

信息化技术是“十三五计划”的前沿研究技术,过电压防护是信息化系统安全运行的重要保障,而过电压保护间隙(SPG)是过电压防护的核心器件^[1-2]。在 IEC 确立的分级、分区的防雷体系中,不同功能的过电压保护器相互配合,使雷击过电压的能量通过大地逐级泄放,提高了过电压防护的可靠性^[3-4];在信息化系统的多级防护体系中,过电压保护间隙通常作为第一级保护器件对雷电流的大部分能量进行泄放。由于过电压保护间隙与后级防护器件(压敏电阻、瞬态抑制二极管等)在允许承受的能量和响应时间等方面存在差异,各级之间的能量配合对系统防护功能的实现至关重要^[5-8]。

过电压保护间隙主要有两种形式,分别是两电极被动型和主动触发型。两电极被动型过电压保护间隙具有结构简单的优点,但存在电压保护水平低、响应时间长、保护特性不稳定以及与下一级过电压保护器能量配合差等缺点。主动触发型过电压保护间隙可以明显改善过电压保护间隙的电压保护水平和响应时间,与后级过电压保护器之间无需添加去耦网络或传输延时网络,而且保护特性稳定、可靠性较强,可以应用在信息化系统等对过电压防护有较高要求的场合,或者移动基站等空间小、退耦距离不足的场景。

文献[9]报道了德国推出的一种运用主动能量配合(AEC)技术的主动触发型过电压保护间隙;文献[10]研究了主动型过电压保护间隙的电弧特性,其结构与运用德国 AEC 技术的过电压保护间隙相似;文献[11]提出了一种触发回路,研究了该回路对过电压保护间隙性能的优化;文献[12]对比研究了触发回路及触发间隙介质材料对过电压保护间隙性能的改善。上述研究均侧重于从宏观角度描述触发回路及触发方式对过电压保护间隙性能的改善,未对触发回路本身的电压、电流动作特性及响应特性等暂态过程进行分析,而研究触发回路的暂态特性,对主动型过电压保护间隙触发特性及工作性能的优化具有重要意义。

鉴于此,本文开展了组合波作用下主动型过电压保护间隙的触发回路及其特性的实验研究。通过建立组合波注入下触发回路的等效模型,研究了触发回路的各组成元件的暂态过程,定量分析了触发

回路的电压动作过程以及触发电流及主间隙电流的数值关系与发生时序,在此基础上,研究了触发回路响应时间及保护间隙动作电压的变化规律,并进行了实验验证。

1 触发回路设计及计算

主动型过电压保护间隙在传统被动过电压击穿型保护间隙的基础上增加了触发回路及触发极^[13-14]。其主电极由阳极和阴极组成,二者之间的间隙为主间隙(放电间隙),触发极位于主电极平面一侧,触发极与阴极之间的间隙为触发间隙。主动触发回路由压敏电阻 VDR、高压电容 C 、耦合气体放电管 GDT(后文简称气体放电管)以及脉冲变压器 T 组成。在正常工作电压范围内,电容两端分得的电压低于气体放电管击穿电压。在雷电冲击作用下,主动触发回路监测后级压敏电阻之上的残压,在后级能量承受极限之前引发主间隙击穿,大部分雷击能量从主间隙泄放,实现过电压保护间隙与后级压敏电阻之间的能量配合^[9]。具体过程如下:当雷击产生过电压时,由于触发回路中压敏电阻的非线性伏安特性,其两端电压被钳位在阈值电压 $U_{1\text{mA}}$ 左右,不随雷电压持续升高;电容两端电压随雷电压上升至气体放电管的击穿电压时,气体放电管利用其开关特性向脉冲变压器原边输出陡化脉冲;脉冲变压器副边耦合原边电压,输出高压脉冲使触发间隙击穿发生场击穿并释放载流子,进而引发主间隙保护动作。主动型过电压保护间隙的工作方式如图 1 所示。

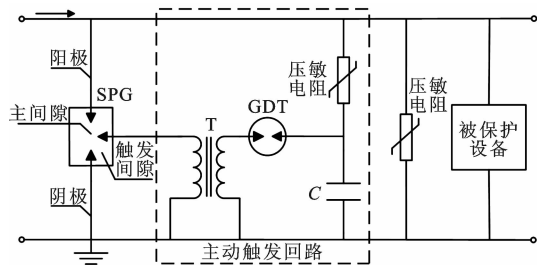


图1 主动型过电压保护间隙工作方式示意图

压敏电阻阈值电压 $U_{1\text{mA}}$ 与交流工作电压有效值 U_R 满足^[15]

$$U_{1\text{mA}} \geq 2.2U_R \quad (1)$$

由图1可知,主间隙、压敏电阻及电容的交流工作电压有效值 U 、 U_R 及 U_C 满足 $U = U_R + U_C$ 。此

外,根据工作频率及分压关系有

$$\left. \begin{aligned} Z_C &= \frac{1}{j\omega C} \\ Z_C &= Z_R \frac{U_C}{U_R} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: Z_R 为压敏电阻阻抗,主动触发回路选用的 U_{1mA} 为 1 kV 的压敏电阻,工频条件下值为 14.4 M Ω ; Z_C 为电容容抗,角频率 $\omega = 2\pi f = 100\pi$ 。当 U 为 1.414 kV 时,由式(1)、式(2)可得电容 $C \approx 100$ pF。气体放电管交流工作电压有效值 U_G 为 0.96 kV,考虑电压波动系数为 20%,气体放电管两端电压峰值为 1.63 kV,预留一定的工作裕量,在此选用 OKAYA 公司 RHCA-202H53U(PA)型直流击穿电压 U_d 为 2 kV 的气体放电管。

2 主动触发回路动作特性

2.1 动作特性实验回路

运用能在开路及短路条件下分别输出电压及电流波的组合波发生回路,对主动触发回路的动作特性进行实验研究。测量回路中各元件两端电压及流过各元件电流的大小与响应时序,总结各节点电压变化、各支路电流分配规律来研究主动触发回路暂态特性。组合波实验回路由如图 2 所示的组合波发生回路及主动触发回路组成,其中组合波发生回路由充电回路及波形形成回路两部分构成。主动触发回路及 SPG 可视为组合波发生回路的负载,当负载开路时,组合波发生回路输出 1.2/50 μ s 冲击电压波;当 SPG 主间隙被击穿时可视为负载短路,组合波发生回路输出 8/20 μ s 冲击电流波。

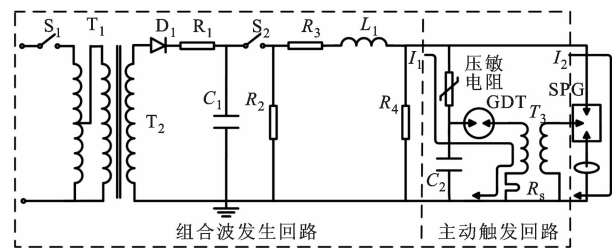


图2 组合波实验回路原理图

如图 3 所示,空载时,组合波输出的 1.2/50 μ s 冲击电压波的峰值 U_m 为 4.7 kV。接入负载后,冲击电压上升至 4 kV 时负载被击穿短路,击穿后主间隙流过 8/20 μ s 冲击电流波,其峰值 I_{pulse} 约为 2 kA。组合波的虚拟阻抗 Z_l 定义为:在相同实验条件下,组合波输出开路电压与短路电流峰值之比。计算得组合波发生回路的虚拟阻抗约为 2.35 Ω 。

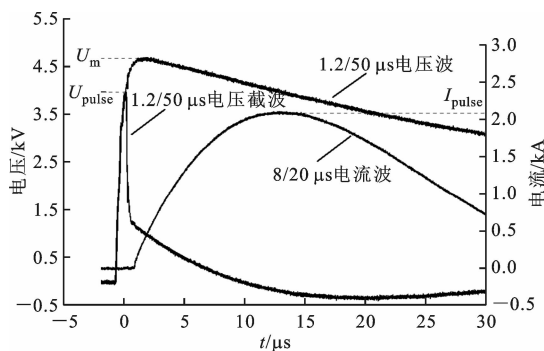


图3 组合波回路输出电压及电流波形图

2.2 回路电压动作特性

主间隙击穿前,1.2/50 μ s 冲击电压 $U(t)$ 作用于压敏电阻与电容组成的串联支路两端,压敏电阻两端电压 $U_R(t)$ 及电容两端电压 $U_C(t)$ 的值随 $U(t)$ 的瞬态变化而改变。若将压敏电阻两端电压的峰值定义为压敏电阻动作电压 U_{RM} ,在其动作前后,压敏电阻阻抗呈现明显的非线性。因此,在 1.2/50 μ s 冲击电压作用下,压敏电阻及电容两端电压的变化过程较为复杂,需建立回路等效模型并推导压敏电阻及电容电压随时间变化的函数,以分析主动触发回路的电压动作过程。

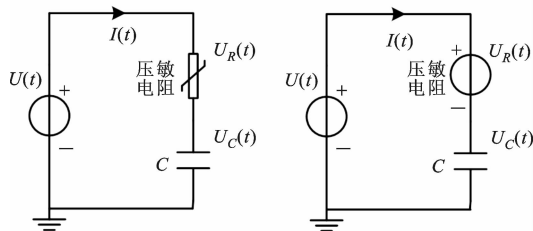
主间隙击穿前,组合波电压特性实验回路可简化为如图 4 所示的 1.2/50 μ s 冲击源 $U(t)$ 经压敏电阻对电容充电的等效模型。压敏电阻动作前,可将其等效为图 4a 所示充电电阻;压敏电阻动作后,由于压敏电阻的非线性伏安特性,其两端电压被钳位而不再继续升高,故将其近似等效为图 4b 所示恒压源。压敏电阻动作前,图 4a 所示等效电路的一阶微分方程如下

$$U_C(t) + RC \frac{dU_C(t)}{dt} = U(t) \quad (3)$$

式中: R 为压敏电阻等效阻抗;1.2/50 μ s 冲击电压函数 $U(t)$ 的表达式为

$$U(t) = AU_m(1 - e^{-t/\tau_1})e^{-t/\tau_2} \quad (4)$$

其中, $A = 1.037$, $\tau_1 = 0.4074 \mu$ s, $\tau_2 = 66.22 \mu$ s, U_m



(a) 压敏电阻动作前等效电路 (b) 压敏电阻动作后等效电路

图4 电压特性实验等效模型

为冲击电压峰值,由式(3)、式(4)得

$$U_C(t) + RC \frac{dU_C(t)}{dt} = AU_m(1 - e^{-t/\tau_1})e^{-t/\tau_2} \quad (5)$$

对 $U_C(t)$ 进行拉普拉斯变换,可得

$$U_C(s) = \frac{AU_m(1/(s + 1/\tau_2) - 1/(s + 1/\tau_1 + 1/\tau_2))}{RCs + 1} \quad (6)$$

对式(6)结果进行反拉普拉斯逆变换,求出压敏电阻动作前电容两端电压随时间变化函数 $U_C(t)$ 的表达式为

$$U_C(t) = AU_m \left(\frac{\tau_2 e^{-t/\tau_2}}{\tau_2 - RC} + \frac{\tau_1 \tau_2 e^{-t(\tau_1 + \tau_2)/\tau_1 \tau_2} - RC \tau_2^2 e^{-t/RC}}{RC \tau_1 - \tau_1 \tau_2 + RC \tau_2} \right) \quad (7)$$

压敏电阻动作后,如图4b等效回路中电压源 $U_R(t)$ 电压与 U_{1mA} 相等,故电容两端电压变化函数

$$U_C(t) = U(t) - U_R(t) = AU_m(1 - e^{-t/\tau_1})e^{-t/\tau_2} - U_{1mA} \quad (8)$$

由式(2)、式(5)可得,压敏电阻动作前,其两端电压函数

$$U_R(t) = U(t) - U_C(t) = AU_m(1 - e^{-t/\tau_1})e^{-t/\tau_2} - AU_m \left(\frac{\tau_2 e^{-t/\tau_2}}{\tau_2 - RC} + \frac{\tau_1 \tau_2 e^{-t(\tau_1 + \tau_2)/\tau_1 \tau_2} - RC \tau_2^2 e^{-t/RC}}{RC \tau_1 - \tau_1 \tau_2 + RC \tau_2} \right) \quad (9)$$

经测试,在峰值 U_m 为 4.7 kV 的 1.2/50 μ s 冲击电压作用下,气体放电管动作电压 U_{GM} 为 2.64 kV,压敏电阻动作电压 U_{RM} 约为 1.28 kV,动作前其阻抗 R 约为 300 k Ω ,电容 $C=100$ pF。组合波发生回路的负载(主动触发回路及 SPG)使其实际输出的冲击电压波与标准 1.2/50 μ s 电压波略有差异,但仍满足偏差范围,经测算, $A=1.037$, $\tau_1=0.5374$ μ s, $\tau_2=50.22$ μ s。

将上述参数带入式(7)~式(9)进行曲线绘制,并与实验得到的曲线进行对比,结果如图5所示,可见压敏电阻及电容变化规律与上述公式推导结果一致,压敏电阻动作在前,而气体放电管动作在后。此外,当气体放电管被击穿,脉冲变压器原边电压陡升,副边耦合输出高压击穿触发间隙,释放载流子引发主间隙击穿,1.2/50 μ s 电压波被截波,压敏电阻残压缓慢下降而主间隙、电容及脉冲变压器绕组两端电压陡降。由于压敏电阻动作呈现出一定的过冲特性,即压敏电阻动作电压 U_{RM} 略大于其阈值电压 U_{1mA} ,压敏电阻动作后,其两端电压回落,被钳位在

其阈值电压 U_{1mA} 左右,故气体放电管动作时,1.2/50 μ s 冲击电压的幅值略低于 U_{RM} 与 U_{GM} 之和,约等于 U_{1mA} 与 U_{GM} 之和。

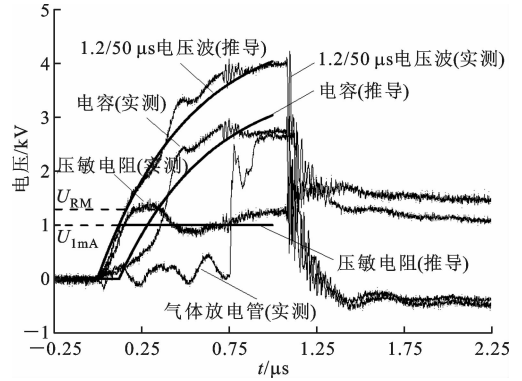


图5 公式推导与实测波形对比图

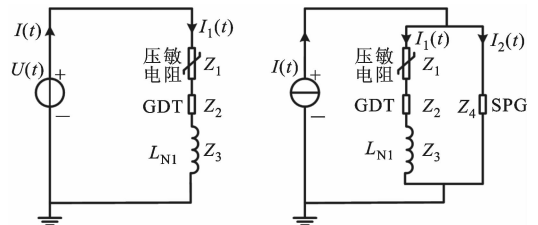
2.3 回路电流动作特性

除电压动作特性外,电流动作特性也是触发回路暂态特性的重要组成部分之一,雷击能量的释放过程及路径与之相关。

如2.1节图2所示,在触发回路中,分流器 R_s 测量触发回路脉冲变压器原边电流为 I_1 (以下简称触发电流),罗可夫斯基线圈测量主间隙流过的电流为 I_2 (以下简称主间隙电流)。当气体放电管被击穿而主间隙未被击穿时, I_1 流经压敏电阻、气体放电管、脉冲变压器原边回到电源负极,其等效电路如图6a所示,此时组合波波形成回路等效为电压源 $U(t)$,压敏电阻阻抗为 Z_1 、气体放电管的弧阻抗为 Z_2 、脉冲变压器原边的感抗为 Z_3 。当电压继续上升,主间隙被击穿,即组合波发生回路的负载短路时,此时 8/20 μ s 电流波 I_2 流过主间隙,等效回路如图6b所示,此时组合波波形成回路应等效为电流源,主要电流通道增加为2条,主间隙的弧阻抗为 Z_4 。根据上述分析结果可得方程组

$$\left. \begin{aligned} I(t) &= I_1(t), & t < 0 \\ I(t) &= I_1(t) + I_2(t), & t \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: $I(t)$ 为组合波波形成回路输出电流, $t=0$ 时



(a) 主间隙击穿前等效电路 (b) 主间隙击穿后等效电路

图6 电流特性实验等效模型

刻为主间隙击穿时刻。当 $t < 0$ 时, $I(t)$ 与触发电流 $I_1(t)$ 的值相等; 当 $t \geq 0$ 时, $I(t)$ 为 $I_1(t)$ 与主间隙电流 $I_2(t)$ 之和。根据电流分配关系 $I_1/I_2 = Z_4/(Z_1 + Z_2 + Z_3)$ 。如图 5 所示, 主间隙击穿瞬间压敏电阻与电容串联支路两端电压陡降, 压敏电阻恢复高阻, 触发回路迅速退出工作状态, 此时 $Z_4 \ll Z_1 + Z_2 + Z_3$, $I_1 \approx 0$ 。结合 2.1 节的分析结果, 可得

$$I_{2m} \approx U_m / (Z_4 + Z_f) \tag{11}$$

式中: I_{2m} 为主间隙电流峰值; U_m 为组合波输出冲击电压峰值。

根据上述分析结果, 在时间上 I_1 先于 I_2 出现, 但在数值上 $I_2 \gg I_1$ 。对上述定性分析结果进行实验验证并作进一步定量分析: 组合波回路充电电压为 5 kV, 输出冲击电压峰值 U_m 为 4.7 kV, 测量 I_1 、 I_2 电流波形, 其示波图如图 7 所示, 将触发回路部分电压测量波形在电流波形示波图中一并显示, 作为电流出现时刻的参照。其中, U_1 为 1.2/50 μ s 冲击电压, U_2 为脉冲变压器原边电压, I_1 触发电流, I_2 为主间隙电流。

气体放电管过压击穿瞬间, 电压 U_2 陡升至电容电压的同时电流 I_1 通路形成, 其峰值为 25 A。随后, 当电压 U_1 升至 4 kV 时, 主间隙击穿导通, 与此同时, 电流 I_2 流过主间隙, 峰值为 2 kA。主间隙击穿后, 由于脉冲变压器原边绕组呈感性, 电感电流无法突变, 电流 I_1 缓慢下降至 0, 该过程中脉冲变压器原边电压为负。由于电流 I_1 先于 I_2 出现, 若电流 I_1 出现时, I_1 的通路成为了雷击能量释放的主要通道, 即触发回路流过的电流 I_1 过大, 超过器件承受极限, 会导致触发回路器件损坏。经实际测量, 电流 I_2 的峰值约为 I_1 的 80 倍, 因此能量的主要释放通道为主间隙而非触发回路, 符合过电压保护间隙的保护原理及能量分配原则。

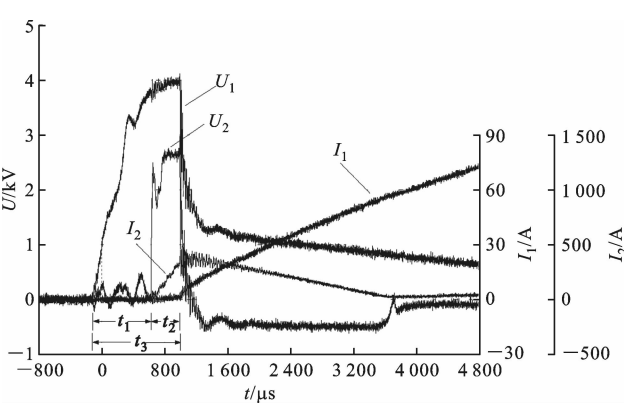


图 7 电流波形与电压波形的相对关系示意图

3 主动触发回路响应特性

如图 7 所示, 将过电压保护间隙的响应时间 t_3 定义为其主间隙两端电压从 0 上升至击穿电压 U_{pulse} 所需时间, t_3 是表征主动型过电压保护间隙防护性能优劣的重要参数之一, 而触发回路的响应特性会对该参数的好坏产生较大影响。将 1.2/50 μ s 电压从 0 开始上升时刻到气体放电管击穿、电流 I_1 通路形成时刻所需时间定义为 t_1 (以下简称放电管响应时间), 将气体放电管击穿时刻到脉冲变压器耦合原边电压输出高压脉冲击穿触发间隙、引发主间隙击穿、形成 I_2 时刻所需时间定义为 t_2 (以下简称触发间隙响应时间), 在数值上 $t_3 = t_1 + t_2$ 。由第 2.2 节推导结果可知, 气体放电管动作时刻对应的 1.2/50 μ s 冲击电压的幅值 $U(t_1)$ 为压敏电阻阈值电压 $U_{1\text{mA}}$ 与气体放电管击穿电压 U_{GM} 之和, 带入式 (2), 可得

$$U(t_1) = AU_m(1 - e^{-t_1/\tau_1})e^{-t_1/\tau_2} = U_{1\text{mA}} + U_{\text{GM}} \tag{12}$$

不同 U_m 的 1.2/50 μ s 冲击电压具有不同的电压上升速率, U_{GM} 随冲击电压上升速率的加快而升高, 而 $U_{1\text{mA}}$ 保持不变。故式 (12) 中 t_1 主要由 U_m 及 U_{GM} 决定, 在不同 U_m 的冲击电压作用下, U_{GM} 及 t_1 如表 1 所示。当 U_m 由 4.23 kV 增长至 5.17 kV, 虽然 U_{GM} 由 2.28 kV 上升至 2.85 kV, $U(t_1)$ 由 3.46 kV 增长至 3.96 kV, 但 t_1 由 800 ns 减小至 681 ns, 故 U_m 增长带来的冲击电压上升速率的加快会对 t_1 的改变造成更大的影响。

表 1 t_1 及 $U(t_1)$ 随冲击电压变化情况			
U_m/kV	U_{GM}/kV	$U(t_1)/\text{kV}$	t_1/ns
4.23	2.28	3.46	800
4.42	2.36	3.60	787
4.70	2.64	3.70	720
4.89	2.70	3.80	694
5.17	2.85	3.96	681

除 t_1 外, 在不同升压速率的冲击电压作用下, t_2 及 t_2 时间内主间隙两端电压升 $\Delta U(t_2)$ 也有所差异, 其变化情况如表 2 所示。当 U_m 由 4.23 kV 增加至 5.17 kV 时, t_2 由 598 ns 减小至 317 ns。其原因为: 在脉冲变压器匝数比、触发间隙距离、触发间隙击穿方式不变的条件下, 触发间隙两端电压的上升速率决定了 t_2 的时长。由表 1 可知, U_m 的增加使得 U_{GM} 随之升高, 故气体放电管击穿后, 由脉冲变

压器副边耦合输出的施加在触发间隙两端的脉冲更陡,故 t_2 时长更短。当 U_m 变化时, $\Delta U(t_2)$ 变化不大,仅在 0.26 kV~0.38 kV 范围内波动,主要原因是在 t_2 时间内,1.2/50 μ s 冲击电压接近其峰值,上升速率变缓,故在此过程中 $\Delta U(t_2)$ 基本不变。

表 2 t_2 及 $\Delta U(t_2)$ 随冲击电压变化情况

U_m/kV	$\Delta U(t_2)/\text{kV}$	t_2/ns
4.23	3.46	598
4.42	3.60	441
4.70	3.70	428
4.89	3.80	426
5.17	3.96	317

由上述分析可知, t_1 、 t_2 以及二者之和 t_3 随着 1.2/50 μ s 冲击电压升压速率的增加而减小。经计算,当 U_m 由 4.23 kV 增加至 5.17 kV 时,主动型过电压保护间隙的响应时间 t_3 由 1.398 μ s 减小至 0.998 μ s。该值远小于同等实验条件下、未使用主动触发回路时、两电极被动型过电压保护间隙约 2.224 μ s 击穿响应时间。另外,过电压保护间隙的击穿电压 U_{pulse} 和直流击穿电压 U_{DC} 的比值 K 被定义为压比,即 $K=U_{\text{pulse}}/U_{\text{DC}}$, K 值越小,在一定程度上表示过电压保护间隙保护水平越高^[11-12]。本实验选用的过电压保护间隙的 $U_{\text{DC}}=2.64$ kV,未使用主动触发回路时, $U_{\text{pulse}}=6.41$ kV,压比 $K=2.42$ 。当 U_m 在 4.23 kV 至 5.17 kV 的范围内变化时,主动型过电压保护间隙的 U_{pulse} 由 3.76 kV 增长至 4.32 kV,压比 K 由 1.55 升高至 1.64,远低于两电极被动型过电压保护间隙的测量值。主动型过电压保护间隙的响应时间 t_3 及冲击击穿电压 U_{pulse} 的变化趋势如图 8 所示。

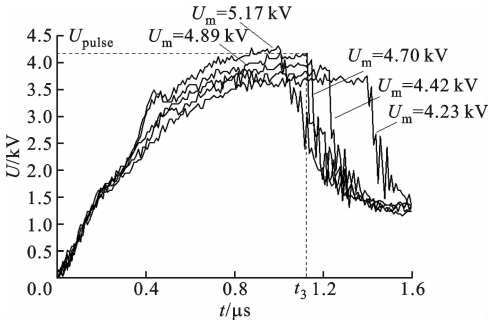


图 8 t_3 及 U_{pulse} 的变化趋势($U_d=2$ kV)

主动型过电压保护间隙的 $U_{\text{pulse}}=U(t_1)+\Delta U(t_2)$,根据上述分析, $U(t_1)$ 为主要变量,而 U_{GM} 又是 $U(t_1)$ 的影响因素之一。适当降低 U_d 的值,可减小 U_{GM} 在不同上升速率的冲击电压作用下的变化

量,使 U_{pulse} 趋于稳定。选取 $U_d=1$ kV 的气体放电管,同时根据第 1 节的计算方法,选取阈值电压为 2 kV 的压敏电阻、容值约为 400 pF 的电容进行实验,实验结果如图 9 所示。当 U_m 在相同范围内变化时,主动触发回路不仅缩短了过电压保护间隙的响应时间,同时使 U_{pulse} 的值稳定在 4 kV 左右。

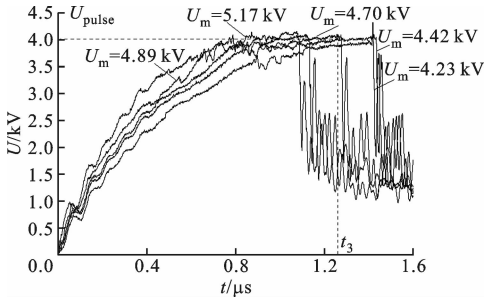


图 9 t_3 及 U_{pulse} 的变化趋势($U_d=1$ kV)

4 结 论

(1)建立了组合波注入下触发回路的等效模型,获得了触发回路的电压动作过程及暂态解析式,分析了触发电流及主间隙电流的数值关系与发生时序,得到了响应时间及保护间隙击穿电压的变化规律。为主动型过电压保护间隙触发特性的研究及优化提供了理论与实验基础。

(2)电压动作特性方面:当雷击产生过电压时,触发回路中气体放电管动作滞后于压敏电阻,其动作时刻主间隙两端电压约为压敏电阻阈值电压 $U_{1\text{ mA}}$ 与耦合气体放电管动作电压 U_{GM} 之和。

(3)电流动作特性方面:触发电流 I_1 在时间上先于主间隙电流 I_2 出现,但在数值上 I_1 远小于 I_2 ,雷击能量的主要释放通道为主间隙而非触发回路,符合过电压保护间隙的保护原理及能量分配原则。

(4)响应特性方面:放电管响应时间 t_1 、触发间隙响应时间 t_2 以及主动型过电压保护间隙的响应时间 t_3 随着 1.2/50 μ s 冲击电压升压速率的增加而减小, t_3 明显低于两电极被动型过电压保护间隙约 2.224 μ s 击穿响应时间。

(5)击穿特性方面:气体放电管的动作电压 U_{GM} 为主动型过电压保护间隙的冲击击穿电压 U_{pulse} 的主要影响因素,合理选取触发回路元件参数,适当降低气体放电管的直流击穿电压 U_d ,有助于使 U_{pulse} 的值趋于稳定。

参考文献:

[1] IEC. Protection of structures against lightning: part 1

- General principles, IEC61024 [S]. Geneva, Switzerland: IEC, 1990.
- [2] IEC. Protection against lightning electromagnetic impulse: part 1 General principles, IEC61312 [S]. Geneva, Switzerland: IEC, 1995.
- [3] IEC. Low-voltage surge protective devices: part 1 Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems-requirements and tests, IEC61643-1 [S]. 2nd ed. Geneva, Switzerland: IEC, 2005.
- [4] IEC. Protection against lightning, part 4: electrical and electronic systems within structures, IEC62305-4 [S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2006.
- [5] LAI J, MARTZLOFF F D. Coordinating cascaded surge protection devices: high-low versus low-high [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1993, 29(4): 680-687.
- [6] CHRYSANTHOS C, BOKSINER J. Analysis of coordination between primary and secondary protectors [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(4): 1501-1507.
- [7] 袁智勇, 许菁, 何金良, 等. 低压浪涌保护器的有效保护距离 [J]. 高电压技术, 2003, 29(8): 29-31.
YUAN Zhiyong, XU Jing, HE Jinliang, et al. Analysis of the effective protection distance of low-voltage SPD to equipment [J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(8): 29-31.
- [8] HE Jinling, YUAN Zhiyong, XU Jing, et al. Evaluation of the effective protection distance of low-voltage SPD to equipment [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 123-130.
- [9] 徐祝勤. 德国新一代主动能量控制退耦技术的发展及其产品介绍 [C]//第三届中国防雷论坛论文集. 北京: 中国气象学会, 2004: 187-190.
- [10] AIT-AMAR S, DUCOURNEAU J B, SERRIE G, et al. Arc extinguishing method of SPD type 1 [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(3): 711-717.
- [11] YAO Xueling, CHEN Jingliang. An active triggered surge protective gap [J]. Plasma Science Technology, 2012, 14(8): 759-764.
- [12] YAO Xueling, CHEN Jingliang, CHEN Antong. Research of surge protective gap with active-energy-coupling-triggered circuit [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(11): 3222-3226.
- [13] 许年生, 刘明东. 开关型 SPD 触发技术的探讨 [J]. 低压电器, 2010(7): 14-17.
XU Niansheng, LIU Mingdong. Research on trigger technology for switching type SPD [J]. Low Voltage Apparatus, 2010(7): 14-17.
- [14] 王石成, 杜志航, 曹新星, 等. 触发、灭弧技术在几种开关型 SPD 上的应用分析 [J]. 电瓷避雷器, 2014(5): 80-86.
WANG Shicheng, DU Zhihang, CAO Xinxing, et al. Analysis on the application of triggering and arc extinction technologies on several switching type SPDs [J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(5): 80-86.
- [15] 方晶, 毛承雄, 陆继明, 等. ZnO 压敏电阻在高压变频器过电压保护中的应用 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 145-152.
FANG Jing, MAO Chengxiong, LU Jiming, et al. Application of ZnO varistor in overvoltage protection of neutral point clamped three-level high voltage inverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 24(4): 145-152.

(编辑 杜秀杰)

(上接第 32 页)

- [20] YANG Bin, GUO Chenjuan, JENSEN C S. Travel cost inference from sparse, spatio temporally correlated time series using Markov models [J]. Proceedings of the VLDB Endowment, 2013, 6(9): 769-780.
- [21] CHEN Xihui, PANG Jun, XUE Ran. Constructing and comparing user mobility profiles [J]. ACM Transactions on the Web, 2014, 8(4): 261-266.
- [22] XUE Andy Yuan, ZHANG Rui, ZHENG Yu, et al. Destination prediction by sub-trajectory synthesis and privacy protection against such prediction [C]// Proceedings of the 29th IEEE International Conference on Data Engineering. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 254-265.

(编辑 武红江)