

牛萍<sup>1</sup> 王培<sup>1</sup> 赵佳欢<sup>1</sup> 田德宝<sup>1</sup> 汪计昌<sup>2</sup>

# 基于组合型电涌保护器能量配合的实验研究

## 摘要

针对组合型电涌保护器(SPD)中主要防雷元件之间的能量配合问题,依据 IEC 62305-4 与 GB 50343—2010 的规定要求,通过对气体放电管(GDT)、金属氧化物压敏电阻(MOV)、瞬态抑制二极管(TVS)进行理论概述,再对这3种常见的防雷元器件进行并联组合后,分别进行多次冲击实验,发现不同的防雷元件的合理并联配合使用对于提高SPD整体的响应速度,缩短动作过程时间,提高SPD的通流容量与限压水平具有明显的效果.实验结论对于组合型SPD的设计具有一定的实际参考价值.

## 关键词

组合型;电涌保护器;气体放电管;金属氧化物压敏电阻;瞬态抑制二极管;配合

中图分类号 TM23

文献标志码 A

收稿日期 2014-05-08

作者简介

牛萍,女,高级工程师,主要从事防雷管理与技术服务工作.fangleinuiping@163.com

1 浙江省嘉兴市气象局,嘉兴,314000

2 扬州雷凯信息技术有限公司,扬州,225000

## 0 引言

随着电气设备精密度和集成度的提高,它对过电压、过电流和雷击电磁脉冲的抗干扰能力显得越发不足.在不降低电气设备使用性能的前提下,为了提高其耐受能力,常利用电涌保护器(SPD)对其进行过电压保护.电涌保护器具备良好的泄放雷电流、限制浪涌电压的功能.由于新的防雷元件不断出现,不同组合方式及不同结构的SPD也不断出现.但是,某些配型的SPD在实际应用中并没有完全发挥各防雷元件组合后的整体防过电压效果,因此,不同组合式SPD内部电路元件的选择及结构的设计仍是当今许多防雷工作者的共同研究方向<sup>[1]</sup>.

吴劲夫<sup>[2]</sup>从理论的角度分析了开关型SPD与限压型SPD的两级能量配合方式的可行性;李博等<sup>[3]</sup>验证了气体放电管(GDT)与瞬态抑制二极管(TVS)的能量配合的可行性;李清泉等<sup>[4]</sup>运用波过程理论进行了金属氧化物压敏电阻(MOV)与TVS的配合示例性的探讨,提出了两级配合的波过程理论的计算方法;卢燕<sup>[5]</sup>对GDT、MOV、TVS的三级配合实验进行了初步研究,并与其他能量配合方式进行了对比分析,得出了一系列重要的参考结论.

为了更全面地研究不同防雷元件之间在相互配合方式下的雷电防护效果,本文进行了大量冲击实验,希望利用得到的实验现象找出组合型SPD不同的配合方式对于其防雷特点的影响.

## 1 GDT、MOV、TVS的特性

### 1.1 GDT的特性

GDT是一种常见间隙型的过电压防护元件,常用于多级保护电路中的首级,起泄放雷电暂态过电流和初级限压的作用.GDT的极间绝缘电阻很大,寄生电容很小,适用于高频信号线路的雷电防护.但GDT放电时延较大,动作灵敏度不够理想,启动电压较离散,对于波头上升陡度大的雷电波难以有效地抑制,往往存在续流现象.

#### 1.1.1 GDT的伏安特性

GDT的直流电弧放电特性曲线如图1所示.

GDT在直流冲击电压冲击下, $U-I$ 之间呈现的线性与非线性关系,在实际SPD的设计研发过程中,得到了很好的运用.雷电冲击时,GDT处于自持放电区域,可以看出仅有V-VI部分区域电压较高,其余均在点火电压 $V_0$ 以下,且电弧放电区域电流能达到kA量级,可见其

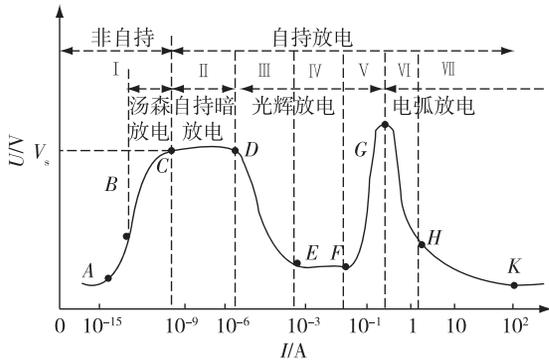


图1 GDT 放电的伏安特性曲线

Fig.1 U-I curve of GDT's sparking in low atmospheric pressure

泄流箝位效果非常明显<sup>[6]</sup>.

1.1.2 GDT 的响应特性

暂态过电压作用于 GDT 时,管子会经过一个延迟时间才开始放电.微观上,这个延迟时间(即响应时间)是由统计时延和形成时延组成的.GDT 的响应时间随过电压波波头上升陡度的增大而减小,所以 GDT 对于陡波冲击的能量抑制反应更快.

1.2 MOV 的特性

MOV 由于其独特的晶粒构型和物理特性,使其具备较好的伏安特性和能量吸收能力,但是作为主要防雷元件,其缺点如漏电流特性、残压比特性、非线性特性、电容量特性等<sup>[7-9]</sup>一直是防雷工作者研究的热点.

1.2.1 MOV 的伏安特性

MOV 的全电流伏安特性曲线如图 2 所示.通常, U-I 坐标使用双对数坐标表示,以便在很宽的电流范围内,表示出电压与电流之间的非线性关系.

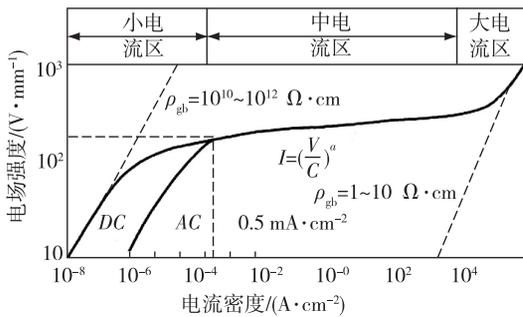


图2 MOV 伏安特性曲线

Fig.2 U-I curves of MOV

全电流区域包含小、中、大 3 个电流区.由图 2 可知,MOV 在实际冲击电流作用下,电压幅值不仅与电流幅值有关,而且还与其变化率有关,其关系可用

式(1)(动态伏安特性的电压幅值是电流幅值和变化率的函数)来表示:

$$V(d_c) = V_c. \tag{1}$$

1.2.2 MOV 的响应特性

MOV 的导电机理与其他半导体元件相似,导通速度很快,响应时间可达 10 ns.在实际测量中,受接线电感等因素的影响,所测的响应时间为 50 ns 左右.

研究表明,在冲击电压幅值相同的情况下,波头时间越短则残压越高,冲击电流越大则残压越高.由此,可推论:降低冲击电压波的波头陡度可以有效地降低 MOV 的残压.但是,在实际冲击实验过程中,测试波形在测试标准中已经统一规定,实际测试的波头时间不可改变,只能通过添加退耦元件与其他防雷元件进行配合,才能延长波头作用的持续时间.

1.3 TVS 的特性

TVS 是在稳压管工艺基础上发展起来的一种新产品,具有大多数 PN 结半导体器件的优点,即响应速度快、箝位稳定,它被广泛用于 IC 电路的浪涌防护电路中.但是它也有多数二极管共同的功率小、寄生电容大、发热严重<sup>[10-11]</sup>等弊端.

1.3.1 TVS 的伏安特性

TVS 的伏安特性曲线如图 3 所示.TVS 抑制浪涌脉冲的过程可作如下描述:在瞬态峰值脉冲电流作用下,流过管子的电流由原来的反向漏电流  $I_D$  上升到  $I_R$  时,管子两极的电压由额定反向关断电压  $V_{WM}$  上升到击穿电压  $V_{BR}$ ;当流过管子的电流达到峰值脉冲电流  $I_{PP}$  时,管子电压被箝位到预期的最大箝位电压以下;随着脉冲电流按  $I = \alpha^t$  规律衰减,管子两端的电压也不断下降,最后恢复到起始状态.

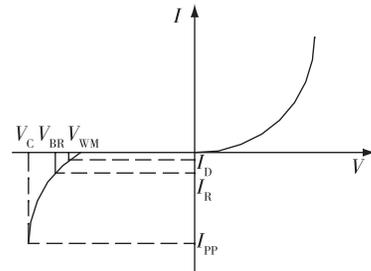


图3 TVS 伏安特性曲线

Fig.3 U-I curves of TVS

1.3.2 TVS 的响应特性

TVS 的响应速度取决于 PN 结的反应速度.当一个瞬态的尖峰脉冲加在 TVS 时,对应的  $U(I)-t$  曲线

如图4所示,可见当脉冲侵入时,电压先于电流达到峰值,即箝位动作更为迅速.

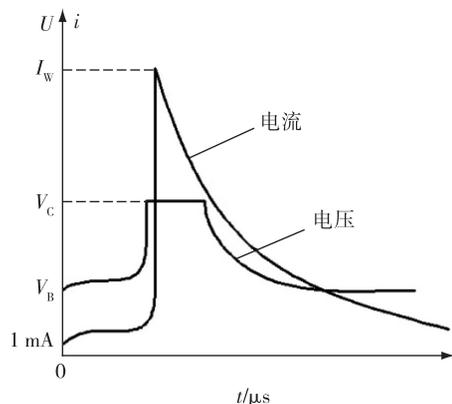


图4 TVS电压(电流)的时间特性  
Fig. 4  $U(I)-t$  curves of TVS

## 2 GDT、MOV、TVS 之间的并联能量配合实验分析

### 2.1 实验方案

依据 SPD 的基本设计思想,采用高低配置防雷元件的方式进行组合设计,形成首级泄流、次级限压的效果.因此,在排列组合 GDT、MOV、TVS 的配合方案中,可以排除一些不符合上述思想的配合,减少实验量<sup>[12]</sup>.

3种防雷元件之间的二级、三级并联中,一共有4种配合方式,如图5所示,分别为GDT与MOV并联(a),GDT与TVS并联(b),MOV与TVS并联(c),GDT、MOV、TVS三级并联(d).每组并联中,级间都串有退耦电感,使得两级之间对于浪涌能量得到配合.实验中,残压、通流均取自最后一级,即靠近被保护设备的一级.

实验波形为组合波(1.2/50和8/20 μs),选取的元件型号分别为GDT(3RM090-8)、MOV(TVR14680)、TVS(1.5KE47CA).实验前,先对GDT和MOV元件进行静态参数测试;另外,为了与3种防雷元件单独作为SPD主体部件时的防护效果形成对比,在对以上4个电路冲击前,先对3种防雷元件进行单独冲击,采集波形,用于对比分析.对于退耦电感的选择,可参考公式

$$L_{\min} \frac{di}{dt} + U_{\text{res1}} = U_{\text{res2}}, \quad (2)$$

其中,  $U_{\text{res1}}$  为后级残压,  $U_{\text{res2}}$  为前级残压,  $L_{\min}$  为  $di/dt$  取最大值时对应的值.

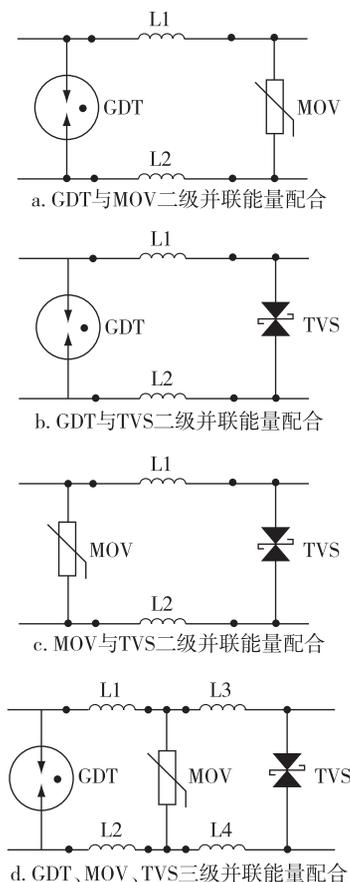


图5 3种防雷元件之间的能量配合实验电路  
Fig. 5 Test circuit of three kinds of combined lightning protective components

### 2.2 实验进行与波形分析

#### 2.2.1 实验进行

利用静态参数测试仪 K-3162 对试品进行测量,得到GDT的点火电压为92 V,MOV的压敏电压为78 V,漏电流为0.4 μA.剩余未测量的参数可依据产品说明书得到:GDT的通流为10 kA,MOV的通流为3 kA,TVS的反向关断电压为47 V,最大瞬时功率为1.5 kW.依据以上参数,可以计算出电感参数.考虑到实际电感绕制的难度,电感均取整数.故GDT与MOV配合中,电感取50 μH,GDT与TVS配合中,电感取90 μH,MOV与TVS配合中,电感取70 μH,而在三级配合中,电感量与二级配合中电感量取值类似,GDT与MOV之间串接50 μH电感,MOV与TVS之间串接70 μH电感.

#### 2.2.2 波形分析

图6a、6b、6c分别为GDT、MOV、TVS被2 kV组合波冲击时采集到的波形.图7a、7b、7c、7d分别是GDT与MOV配合、GDT与TVS配合、MOV与TVS

配合、GDT 与 MOV 和 TVS 三级配合实验组合波冲击时得到的波形,除了 GDT 与 TVS 的配合采用的是 4 kV 电压冲击外,其余都是 2 kV.

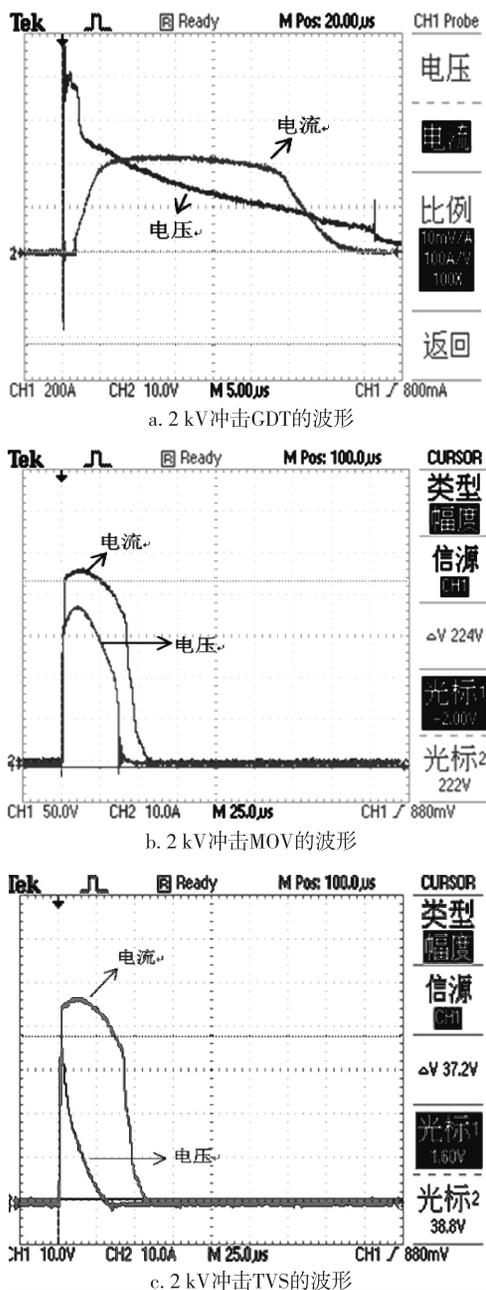


图6 GDT、MOV、TVS 单独冲击实验

Fig. 6 Impact test on GDT, MOV and TVS

由图 6a 可以发现,GDT 在冲击电压为 2 kV 时电流启动略有滞后,从波形的起始处可以看出电流的作用时间要短于电压,启动后电流始终维持在一个较高的水平(0.4 kA),时间长达 40  $\mu\text{s}$ ,同时 GDT 两端电压并不因为电流的恒定而保持不变,而是一直下降,但是下降过程耗时比较长,特别是当 GDT

熄弧的过程中,GDT 两端电压仍然没有迅速降低至 0 V.由图 6b 可知,MOV 在冲击电压为 2 kV 时,箝位时间大概维持在 30  $\mu\text{s}$  左右,电流最大值为 0.045 kA,残压为 180 V,且电压比电流先降为 0.由图 6c 可知,TVS 在冲击电压为 2 kV 时,箝位时间大概维持在 20  $\mu\text{s}$  左右,电流最大值为 45 A,箝位电压为 35 V,且电压比电流提前 25  $\mu\text{s}$  先降为 0.

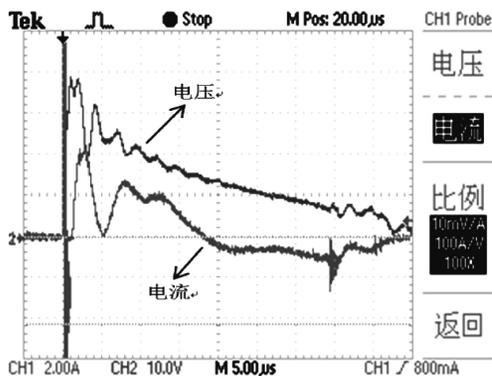
经过这 3 组冲击,可以验证在同一冲击电压下,流过 GDT 的最大电流最大,MOV 次之,TVS 最小;而箝位稳定程度是 TVS 最好,MOV 次之,GDT 最差,即 GDT 的箝位电压离散程度较大,并且 GDT 的响应时延也非常明显.

图 7a 表明,在 GDT 与 MOV 的配合中,末级 MOV 的残压仅为 20 V,远低于单个 MOV 进行 2 kV 冲击时的残压值(180 V),同时通过 MOV 的电流也由单独冲击时的 88 A 降至 8 A,减小了 10 倍,效果十分明显,但是响应时延依然明显(仔细观察波形的起始处,可以看到电流依然落后于电压一小段时间),另外,电流的持续时间由 GDT 单独冲击时的 40  $\mu\text{s}$  降低到了 18  $\mu\text{s}$ ,即动作时间大大缩短了.

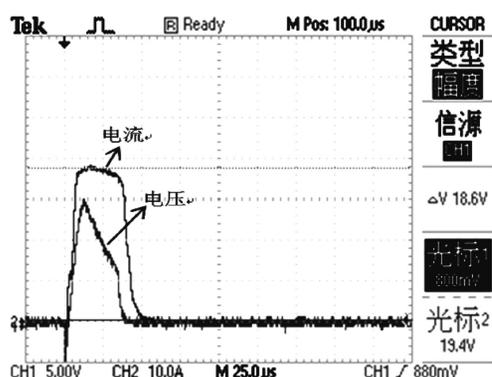
在 GDT 与 TVS 的配合中,不断升压冲击发现:冲击电压在 2 kV 时,能量完全被第一级吸收,在第二级未检测到电压和电流,一直升压到 2.8 kV 时,才检测到微弱的电压和电流信号.图 7b 是冲击电压在 4 kV 时末级电压、电流的实测波形,说明此配合在同一冲击电压下,到达后级的能量更少,即整体的通流更大,此外,其动作时间也相应减小,但响应时延是否变化,在该数据采集密度的波形图中已无法给出判断.

图 7c 表明,在 MOV 与 TVS 的配合中,电压和电流在波形开始时完全重合,即响应时延一定是比前面 2 种配合要小,同时可以发现流过其末级 TVS 的电流、TVS 两端的残压都要小于前 2 种配合,但是相对于单独冲击 TVS 时的电压、电流基本没有改变,说明此时 MOV 基本没有吸收能量,这是由于 TVS 响应速度特别快,在 MOV 动作之前已经把能量吸收,所以特别难以准确地选择退耦元件大小,故该配合在实际应用中比较少.对于特殊场合必须要采用该配合时,一定要精确计算冲击电流的传播速度,合理准确地确定退耦元件的等效物理长度.

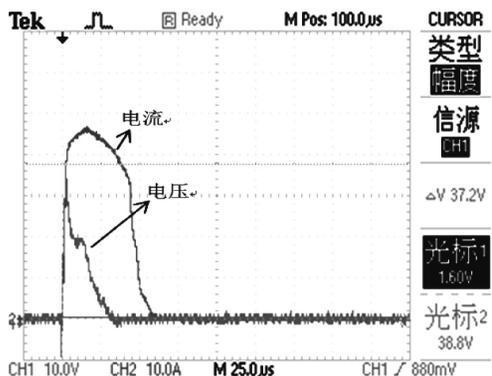
图 7d 表明,在 GDT、MOV、TVS 三级配合中,通过 TVS 电流非常小,只有 7 A,说明绝大部分能量已经被前两级所吸收,因此,三级配合设计可以耐受更



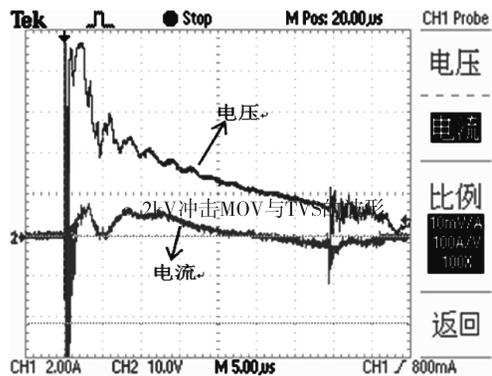
a. 2 kV冲击GDT与MOV的波形



b. 4 kV冲击GDT与TVS的波形



c. 2 kV冲击MOV与TVS的波形



d. 2 kV冲击三级(GDT、MOV、TVS)配合的波形

图7 GDT、MOV、TVS的配合冲击实验

Fig. 7 Impact test on different combinations of GDT, MOV, and TVS

大的冲击电流,前两级能承担大部分的能量,最后一级 TVS 两端的残压也比较稳定,与单独冲击 TVS(图 6c)时的残压基本一致,在 47 V 左右.然而,响应时延在图 7d 中不能看出,即可以认为响应时间比图 6a、图 7a 的要短,但是其动作过程的时间,相对于图 7a 的并没有缩短,都在 18  $\mu$ s 左右.

### 3 结论

通过多组不同形式的并联组合方式,在多次组合波冲击实验后,可以得出,不同的防雷元件的组合有不同的特点,具体表现为以下几个方面:

1) GDT 与 MOV、TVS 配合后,能有效减小 SPD 的响应时延、缩短放电动作过程时间.前提是合理选择主要防雷元件和退耦元件的种类及参数,不确切的配型通常难以使各级防雷元件同时动作,达不到最佳防雷效果.

2) 多级防雷元件配合的设计方法,能够在一定程度上提高 SPD 的通流容量.动作过程中,大部分能量将被前级吸收,动作后电涌保护器的箝位电压更为稳定,分散性较小.

### 参考文献

#### References

- [ 1 ] 李祥超,赵学余,姜长稷,等.电涌保护器(SPD)原理与应用[M].北京:气象出版社,2011:6-15  
LI Xiangchao,ZHAO Xueyu,JIANG Changji et al.Principles and applications of Surge Protective Device (SPD) [M].Beijing:China Meteorological Press,2011:6-15
- [ 2 ] 吴劲夫.电涌保护器级间能量配合设计[J].煤炭技术,2012,31(9):41-42  
WU Jinfu.SPD stage to stage energy cooperating design [J].Coal Technology,2012,31(9):41-42
- [ 3 ] 李博,李洋,王俊飞.通信设备用浪涌保护器中放电管与 TVS 管最佳组合的探讨[J].铁道技术监督,2012,40(12):47-48  
LI Bo,LI Yang,WANG Junfei.Discussion on the optimum combination of discharge tube and TVS tube in SPD of communication equipment [J].Railway Quality Control,2012,40(12):47-48
- [ 4 ] 李清泉,张伟政,袁鹏,等.浪涌抑制器配合的动态研究[J].高压技术,2002,28(9):11-13  
LI Qingquan,ZHANG Weizheng,YUAN Peng,et al. Research of the coordination of the SPDs [J].High Voltage Engineering,2002,28(9):11-13
- [ 5 ] 卢燕.电涌保护器的性能与试验方法研究[D].南京:南京信息工程大学遥感学院,2008:44-51  
LU Yan.Research on surge protection device capability and test methods [D]. Nanjing: School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology,2008:44-51

- 牛萍,等.基于组合型电涌保护器能量配合的实验研究.  
NIU Ping, et al. Energy coordination of combined surge protective device. 2167-2172
- [ 6 ] 徐学基, 诸定昌. 气体放电物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1996: 121-156  
XU Xueji, ZHU Dingchang. Physics of gas discharge[M]. Shanghai: Fudan University Press, 1996: 121-156
- [ 7 ] Van Der Laan P C T, Van Deursen A P J. Reliable protection of electronics against lightning: Some practical applications [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1998, 40(4) : 513-520
- [ 8 ] 柴健. SPD 级间能量配合的研究分析[D]. 南京: 南京信息工程大学大气物理学院, 2011: 2-4  
CHAI Jian. Research on coordination between levels of SPD [D]. Nanjing: School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, 2011: 2-4
- [ 9 ] 杨仲江, 陈琳, 杜志航, 等. 氧化锌压敏电阻劣化过程中电容量变化的分析应用[J]. 高电压技术, 2010, 36(9) : 2167-2172  
YANG Zhongjiang, CHEN Lin, DU Zhihang, et al. Application on capacitance during the degradation of ZnO varistor [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9) : 2167-2172
- [ 10 ] 任晓明, 傅正财. 限压型低压电涌保护器级间配合研究[J]. 低压电器, 2008(19) : 4-6  
REN Xiaoming, FU Zhengcai. Research on coordination between levels of voltage-limiting low voltage SPD [J]. Low Voltage Apparatus, 2008(19) : 4-6
- [ 11 ] 张希军, 杨洁, 张庆海. 瞬态电压抑制器在快上升沿电磁脉冲作用下的瞬态响应[J]. 高电压技术, 2012, 38(9) : 2242-2243  
ZHANG Xijun, YANG Jie, ZHANG Qinghai. Transient response of transient voltage suppressor device under EMP with fast rise time [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(9) : 2242-2243
- [ 12 ] 孟梅, 韩伟, 王建文, 等. 压敏电阻器与气体放电管配合使用的主要特性探析[J]. 电源世界, 2012(5) : 44-45  
MENG Mei, HAN Wei, WANG Jianwen, et al. Presses the sensitive resistor and the gaseous tube coordination use principal characteristic searches analyzes [J]. The World of Power Supply, 2012(5) : 44-45

## Energy coordination of combined surge protective device

NIU Ping<sup>1</sup> WANG Pei<sup>1</sup> ZHAO Jiahuan<sup>1</sup> TIAN Debao<sup>1</sup> WANG Jichang<sup>2</sup>

1 Jiaxing Meteorological Bureau of Zhejiang Province, Jiaxing 314000

2 Yangzhou Leikai Information Technology Co., Ltd, Yangzhou 225000

**Abstract** The energy coordination between main lightning protective components is an important issue in the combined Surge Protective Device (SPD). The principles of Gas Discharge Tube (GDT), Metal Oxide Varistor (MOV), and Transient Suppression Diode (TVS) are analyzed theoretically, and then the three kinds of components were combined in parallel connection, and tested by impact experiments, in accordance with the specifications and requirements of IEC62305 and GB50343—2010. The results show that reasonable parallel combination of different SPD components has a significant effect on improving the overall response rate, shortening the action progress time, increasing the flow capacity and limit voltage level. The conclusions have practical values for the design of combined SPD.

**Key words** combination; surge protective device; gas discharge tube; metal oxide varistor; transient suppression diode; coordination