

王成芳^{1,2} 刘冲¹ 罗达标¹ 余金贤¹ 王昊²

电涌保护器级间退耦元件的选型分析

摘要

针对电涌保护器(SPD)级间能量配合试验中配合失效的问题,主要利用波的传输理论与基尔霍夫定律进行分析,结合 JB/T 10618—2006(组合式电涌保护器)的规定假设一套组合型 SPD,通过基础理论分析与精确计算得出:当被保护装置属于低频(直流)设备时,在不影响信号强度的情况下,退耦元件采用电感或电阻型元件均可;当被保护装置属于高频设备时,退耦元件只能选用低电感量的电阻型退耦元件.退耦元件的参数值均可按照波的传输理论与基尔霍夫定律进行理论计算.这在组合型 SPD 退耦元件的选型过程中,具有重要的指导意义.

关键词

电涌保护器;退耦;传输理论;基尔霍夫定律;选型

中图分类号 TM23

文献标志码 A

收稿日期 2015-07-01

资助项目 国家重点基础研究发展计划(2014CB441405);南京信息工程大学优秀毕业论文(设计)支持计划

作者简介

王成芳,男,主要从事气象装备的研发与维护.fangleiwcf@163.com

1 西藏自治区气象局,拉萨,850000

2 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室,南京,210044

0 引言

科技的发展对电气电子设备的雷电防护要求越来越精细,采用单个 SPD(电涌保护器)元件进行浪涌防护往往无法达到要求.SPD 研发人员将不同功能、不同级别的防雷元件进行配合使用,来达到精细保护的效果.无论是 SPD 与 SPD 之间进行能量配合,还是 SPD 内部各防雷元件之间进行能量配合,级间都必须有去耦装置,使得前后级 SPD 之间能达到通常所说的“高-低配”效果.

对于 SPD 内部退耦元件的选用,国内外已经有部分专家学者做过深入的研究:文献[1]认为不同研究人员对于 SPD 的级联配合试验会得到不同的试验结论,所以利用理论仿真的方法统一了配合方法;张栋等^[2-3]运用行波理论并结合 ATP-EMTP 软件仿真分析了 SPD 级间线路阻抗对 SPD 导通次序的影响;文献[4-6]利用大量实验数据证明了退耦电感的大小对于限压型 SPD 能量配合的影响.然而,科研工作者关注的重点在于主要防雷元件的能量吸收特性与退耦元件大小对 SPD 能量配合的影响,鲜有文献涉及到退耦元件的选型(包含退耦元件的种类与取值)方面的研究.事实上,李祥超等^[7]在进行 SPD 研发试验时发现:组合型 SPD 在能量配合失效的过程中,其主要防雷元件的防雷电气特性并未下降,而发生改变的是级间退耦元件的电气性能.由于在工况条件下,雷电过电压侵入事件为小概率事件,组合型 SPD 在实际使用过程中,遭受过电压侵害的次数有限,所以一线工作者难以觉察到退耦元件电气性能改变的问题.因此,在 SPD 出现保护失效、传输特性下降的时候,一线工作者通常是将主要防雷元件与退耦元件一同更换,并未考虑到底是由于退耦元件的电气性能出现改变还是由于主要防雷元件的电气性能发生了改变,这将造成较大的资源浪费^[8-9].

为了保证科研人员在能量配合试验时能得到可靠的测试数据,同时,为了提高 SPD 的使用寿命,本文将波的传输理论与基尔霍夫定律结合,从信号的传输与衰减角度出发,对组合型 SPD 退耦元件的选型与取值进行了深入的理论研究,得出的有益结论将有效地提高 SPD 的设计与检验的效率.

1 计算模型的搭建

在退耦参数的理论计算之前,需依据 JB/T 10618—2006(组合式

电涌保护器)来假定和计算主要防雷元件的基本参数^[10].假定研究的 SPD 为 12 V 信源专用 SPD,该 SPD 由 GDT、TVS、退耦元件组成,退耦元件依据信源的频率特征进行选型,该模型为典型的组合式 SPD 模型,其电路如图 1 所示.

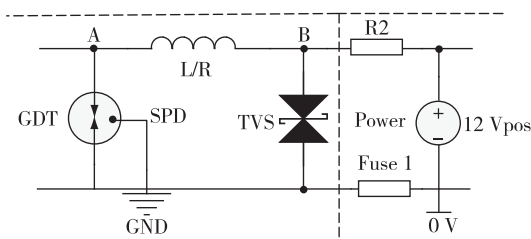


图 1 12 V 信源专用 SPD 内部电路

Fig. 1 Internal circuit of the SPD used in 12 V signal source

该 SPD 的电压保护水平 U_p 的下限值必须高于线路最大正常工作电压值,且应大于所测量的限制电压的最高值,这样才能保证 SPD 既能保护信源,又不影响信源的正常工作.

由于 SPD 的限制电压大小由最靠近被保护端口的防雷元件的箝位电压(V_c)决定,所以此处考虑的将是末级 TVS 的箝位电压参数,故其箝位电压应满足以下经验公式^[11-12]:

$$\begin{cases} \min(U_p) \geq 1.25 \times 1.15U_0, \\ V_c = \frac{\min(U_p)}{1 - 0.2} \approx 1.8U_0, \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_p 为电压保护水平, $\min(U_p)$ 为电压保护水平的下限值, $U_0 = 12$ V,系数 1.15 是考虑到系统运行电压最大可能出现的允许波动为 15%,系数 1.25 是在线路运行电压波动的基础上再追加 25%的安全裕度,计算得到 $V_c = 21.6$ V.同时由于 $V_c = 1.2 V_{BR}$, V_{BR} 为 TVS 的最小击穿电压(铭牌标示值),因此可以得到 $V_{BR} = 18$ V.

电路中 GDT 的冲击击穿电压(U_{oc})满足:

$$\begin{cases} L_{\min} \frac{di}{dt} + U_{res1} = U_{res2}, \\ U_{oc} \leq U_{res2}, \end{cases} \quad (2)$$

式中: U_{res1} 为后级电路中的总残压值, L_{\min} 为退耦电感值大小,由于 GB 50057—2010 中规定开关型 SPD₁ 与限压型 SPD₂ 之间的线距应大于 10 m,所以施工时通常按照 15 m 来进行安装,若长电缆的分布电感用集中电感来等效,则取 $L_{\min} = 22.5 \mu\text{H}$, di 为 dt 时间内流过退耦电感的电流大小,且 $U_{res1} = V_c$.

因为 $V_{BR} = 18$ V,当采用 1.5kE 系列 TVS 时,该

TVS 的通流最大值为 84 A,所以在用 8/20 μs 波形冲击时,为了达到能量配合的最佳效果,常令 $U_{res1} = 0$ V,即电流在传播到末级 TVS 之前就已经吸收殆尽.故 $di = 84$ A, $dt = 8 \mu\text{s}$,推出 GDT 的冲击击穿电压 $U_{oc} = 236$ V.冲击电压作用下,GDT 的寄生电感效应十分明显,响应时延为 $\Delta t \approx 100$ ns.GDT 的直流击穿电压 U_{dc} 与冲击击穿电压 U_{oc} 之间的关系常用经验公式 $U_{oc} = 1.5U_{dc}$ 来描述,所以 $U_{dc} \approx 150$ V.

因此,计算模型选用的 GDT 的直流击穿电压宜为 150 V,TVS 最小的击穿电压宜为 18 V.

2 退耦元件的选择性分析

2.1 退耦元件的种类选择

任何电信号的传输过程中,必然涉及到信号的衰减与失真,为了降低信号的衰减量和加强信号的保真度,必须对搭建的 SPD 模型中退耦元件的选型进行严格的考虑.

常见的退耦元件主要为电阻和电感两种.由焦耳定律 $Q = \int_0^t I^2 R dt$ 得出,当信源电流强度较大时,电阻的存在必然消耗较大的信源能量,对于信号的衰减较大,所以,在幅值较大的信号传输过程中,不能采用大电阻作为 SPD 退耦元件.由麦克斯韦的电磁场理论分析可以得出,储能元件的存在,可以使得高频信号的能量以电磁能量的形式存在于储能元件的空间周围,这就会导致信号的失真.由于电感是一种常见的储能元件,会导致高频信号的严重失真,所以,在频率较高的信号传输过程中,不能采用电感作为 SPD 的退耦元件.

2.2 退耦电感值的理论计算

当模型的信源为高幅值的低频信号时,退耦元件应选用电感型元件.依据波的传输理论,雷电波在沿着导线传播的过程中,会发生反射与折射,其传播速度小于光速,理论计算传播速度 $V = 1/\sqrt{L_0 C_0}$, L_0 为单位长度电缆的电感, C_0 为单位长度电缆对地电容^[13-15],传播方式如图 2 所示,图 2 中箭头代表波的传播方向.采用 18AWG 的单芯铜缆时,实测 $L_0 \approx 1.5 \mu\text{H}/\text{m}$, $C_0 \approx 3$ pF/m,将 L_0 、 C_0 代入公式可得 $V = 1.5 \times 10^8$ m/s.

为了保证第一级 GDT 比末级 TVS 先动作,则应该使得两级之间的距离 $S \geq V \cdot \Delta t$,将 V 、 Δt 的值代入上式可得 $S_{\min} = 15$ m,故可以认为当两级间的导线长度大于 15 m 时,就能够保证前级比末级先动作,

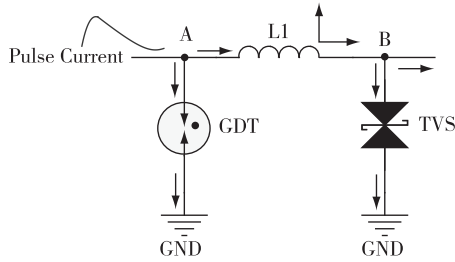


图2 电感型退耦元件组合电路

Fig. 2 Circuit of multi-level SPDs with inductance type of decoupling component

吸收泄放大部分的能量。

由于雷电波的传播速度只与传输路径的 L 、 C 有关,故考虑采用集总电感代替分布电感的积分,所以,集总电感 $L = \int_0^s L_0 dl$,将 S 、 L_0 代入可得 $L = 22.5 \mu\text{H}$,与假设值 L_{min} 一致,则在 150 V 直流击穿电压的 GDT 与 18 V 击穿电压的 TVS 配合时,中间的退耦电感值应大于 $22.5 \mu\text{H}$ 。但是退耦电感值也不能无限增大,因为电感的存在将使得高频信号失真,严重时可导致信号无法传输。

2.3 退耦电阻值的理论计算

当模型的信源为低幅值的高频信号时,退耦元件应选用电阻型元件,其阻值大小可用基尔霍夫定律对电路进行简单分析后得出,其电路如图3所示。

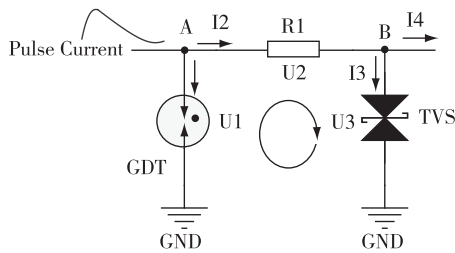


图3 电阻型退耦元件组合电路

Fig. 3 Circuit of multi-level SPDs with resistance type of decoupling component

取极端情况,雷电波能量完全被 SPD 的两级吸收,且 GDT 已稳定工作,即 $I_4 = 0$, $U_1 = 150 \text{ V}$,同时,TVS 达到最大瞬时脉冲功率 1.5 kW ,即 $U_3 = 22 \text{ V}$, $I_3 = 750/11 \text{ A}$ 。

由基尔霍夫电流电压定律可以列出以下公式:

$$\begin{cases} U_1 + U_2 + U_3 = 0, \\ I_2 = I_3 + I_4, \end{cases} \quad (3)$$

将数据代入以上公式可得

$$U_2 = -172 \text{ V}, \quad I_2 = \frac{750}{11} \text{ A}.$$

由欧姆定律得 $R_1 \approx 2.62 \Omega$ 。

故认为当退耦电阻 $R = 2.62 \Omega$ 时,GDT 恰好能与 TVS 同时工作,所以退耦电阻取值应大于 2.62Ω 。但是电阻不能无限增大,因为电阻越大,对于信号的衰减损耗越大^[16-17]。

2.4 12 V 信源专用 SPD 的冲击试验

基于本文对于退耦电感与退耦电阻的理论计算分析,并结合文中第1部分对于 12 V 信源专用 SPD 中主要防雷元件的选型与取值计算结果,笔者自行设计了两款 12 V 信源专用 SPD TypeA/B,两款 SPD 中主要防雷元件相同,均为 $2\text{RGDT}150, 18\text{VTVS}$,主要区别在于退耦元件,A型 SPD 的退耦元件采用的是 $28 \mu\text{H}$ 退耦电感,B型 SPD 的退耦元件采用的是 2.8Ω 退耦电阻。

使用自行设计的 TypeA/B 两款 SPD,在 $10 \text{ kV } 1.2/50 \mu\text{s}, 8/20 \mu\text{s}$ 组合波冲击测试条件下进行冲击测试,以对比不同退耦元件对于 SPD 的冲击试验性能的影响^[18]。

从图4a、4b的对比可以看出:当退耦元件为电感时,冲击测试得到的残压曲线具有较大的震荡,说明组合波冲击能量在退耦电感存在时是通过在前后两级防雷元件之间进行逐渐震荡吸收的;当退耦元件为电阻时,冲击测试得到的残压最大值低于 18 V ,说明 SPD 在吸收组合波冲击能量时,退耦电阻也起到了吸收能量的作用。所以,无论退耦元件采用电感元件还是电阻元件,都能起到级间退耦的作用,但当退耦元件采用电感时,会有电感效应的存在,一定程度上会存在高频震荡现象,影响信号的传输品质;当退耦元件采用电阻时,会有焦耳热效应的存在,一定程度上会损耗信号的能量,导致信号的衰减。

3 结论

1) 利用焦耳定律与麦克斯韦电磁场理论对退耦元件的选材进行理论分析,可以得出:当被保护装置属于低频(直流)设备时,在不影响信号强度的情况下,退耦元件采用电感或电阻型元件均可;当被保护装置属于高频设备时,退耦元件只能选用低电感量的电阻型退耦元件。

2) 当退耦元件为电感时,可利用波的传输理论进行电感量的精确计算;当退耦元件为电阻时,可利用基尔霍夫定律进行精确计算。

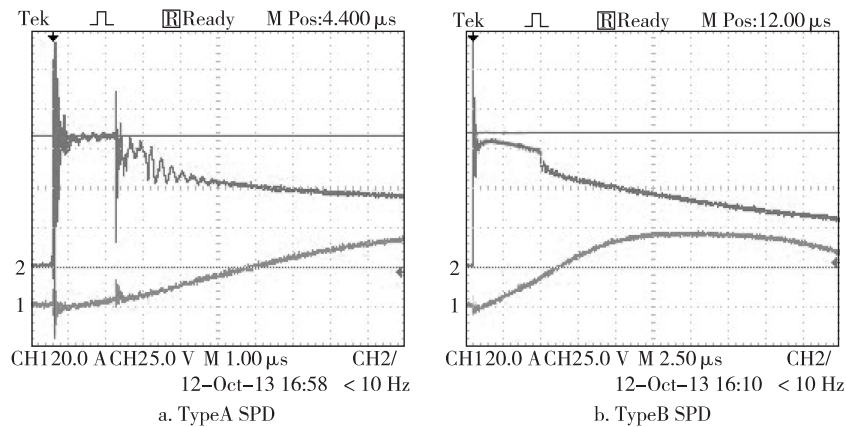


图4 Type A/B两种SPD的组合波冲击测试波形

Fig. 4 Test waveforms of type A/B SPD under the impact test with combined wave

参考文献

References

- [1] Lai J-S, Martzloff F D. Coordinating cascaded surge protection devices: High-low versus low-high [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 1993, 29 (4): 1812-1818
- [2] 张栋,傅正财,赵刚,等. 低压配电系统中浪涌保护器配合机理[J]. 电工技术学报, 2009, 24(7): 145-149
ZHANG Dong, FU Zhengcai, ZHAO Gang, et al. The coordination mechanism of cascaded SPDs in low voltage distribution systems [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(7): 145-149
- [3] 张栋. 低压配电系统中SPD保护和配合的研究 [D]. 上海: 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 2007
ZHANG Dong. Study on the protection and coordination of surge protective devices in low-voltage distribution systems [D]. Shanghai: School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 2007
- [4] 李祥超, 张彬, 张鹏, 等. 限压型SPD能量配合中退耦电感参数选择的研究 [J]. 电瓷避雷器, 2012 (6): 102-106
LI Xiangchao, ZHANG Cheng, ZHANG Peng, et al. Research on the selection of decoupling inductance parameters in energy cooperation between voltage-limiting type SPDs [J]. Insulators and Surge Arresters, 2012 (6): 102-106
- [5] 王金虎, 李祥超, 刘晓东, 等. RS-232 端口光电隔离型电涌保护器 [J]. 南京信息工程大学学报 (自然科学版), 2011, 3 (6): 539-543
WANG Jinhua, LI Xiangchao, LIU Xiaodong, et al. Optical isolation and surge protection of RS-232 port [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2011, 3 (6): 539-543
- [6] 李祥超, 唐宏科, 王金虎. 电感在两级电涌保护器设计中的应用 [J]. 南京信息工程大学学报 (自然科学版), 2011, 3 (3): 275-279
LI Xiangchao, TANG Hongke, WANG Jinhua. Design and application of series inductance in two-stage SPD [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2011, 3 (3): 275-279
- [7] 李祥超, 王成芳, 周中山, 等. 基于带通滤波器原理对电视网络SPD的研制 [J]. 电瓷避雷器, 2014 (5): 109-115
LI Xiangchao, WANG Chengfang, ZHOU Zhongshan, et al. Development of television networks signal surge protection device based on band-pass filter [J]. Insulators and Surge Arresters, 2014 (5): 109-115
- [8] 杨仲江, 陈琳, 孙涌. 雷电冲击试验中的压敏电阻性能 [J]. 南京信息工程大学学报 (自然科学版), 2010, 2 (4): 353-356
YANG Zhongjiang, CHEN Lin, SUN Yong. Performance of MOV in impulsive test [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2010, 2 (4): 353-356
- [9] 李祥超, 赵学余, 杜志航. 自动气象环境监测站雷电过电压的抑制措施 [J]. 南京信息工程大学学报 (自然科学版), 2009, 1 (3): 279-282
LI Xiangchao, ZHAO Xueyu, DU Zhihang. Lightning over-voltage protection of automatic meteorological environment monitoring station [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2009, 1 (3): 279-282
- [10] 国家发展和改革委员会. JB/T 10618—2006 组合式电涌保护器 (箱) [S]. 北京: 机械工业出版社, 2006
National Development and Reform Commission. JB/T 10618—2006 Multi-levels SPD [S]. Beijing: China Machine Press, 2006
- [11] He J L, Yuan Z Y, Wang S C, et al. Effective protection distances of low-voltage SPD with different voltage protection levels [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25 (1): 187-195
- [12] IEC. IEC 61643-1 Low-voltage surge protective devices Part 1: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems-Requirements and tests [S].

- 2005-03
- [13] Kisielwicz T, Fiamingo F, Mazzetti C, et al. Simulated and tested protection effects on electrical equipment terminals at overvoltages incoming through distant SPD [C]// International Youth Conference on Energetics, 2011:1-6
- [14] Wang S C, He J. Discussion on worst distance between SPD and protected device [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2011, 53(4):1081-1083
- [15] 庞华基, 盛立芳, 傅刚. 电涌保护器之间退耦线圈的选用[J]. 电瓷避雷器, 2012(2):90-94
PANG Huaji, SHENG Lifang, FU Gang. Select of decoupling coil between SPDs[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(2):90-94
- [16] Bulson J M. Low-impedance cable for parallel-connected surge protective devices[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(4):1816-1821
- [17] 张栋, 傅正财. 线路电阻对 SPD 配合的影响分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(4):660-663
ZHANG Dong, FU Zhengcai. Analysis of effects of line resistance on cascaded coordination of SPDs in low-voltage AC power systems[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4):660-663
- [18] 胡东, 钱文海, 杜志航, 等. 以电流分档的热稳定试验方法的不足及试验分析[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2014, 6(1):47-51
HU Dong, QIAN Wenhai, DU Zhihang, et al. Experiment analysis on deficiencies of thermal stability experiment based on stepping current [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2014, 6(1):47-51

Analysis of the decoupling component between multi-level SPD's type selection

WANG Chengfang^{1,2} LIU Chong¹ LUO Dabiao¹ YU Qianxian¹ WANG Hao²

¹ Meteorological Service of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000

² Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract This paper addresses the failed energy cooperation in experiment of multi-level Surge Protective Device (SPD). In accordance with the requirement of JB/T 10618-2006, a model of multi-level SPD is constructed and analyzed by transmission line theory and Kirchhoff law. Theoretical analysis and precise calculation show that resistance or inductance type of decoupling component works well when the protected equipment is working in status of low frequency; while only resistance type of decoupling component with low inductance should be selected when the protected equipment is working in status of high frequency. The value of decoupling component parameters could be calculated by transmission line theory and Kirchhoff law. It's helpful for designer to choose an applicable decoupling component for multi-level SPD.

Key words surge protective device; decoupling; transmission line theory; Kirchhoff law; type selection