

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.08.024

电涌保护器级间退耦元件的冲击损伤分析

王成芳^{1,2}, 余建华¹, 强裕君¹, 吕振东¹, 刘 珊²

(1. 江西省气象局, 南昌 330046; 2. 中国气象局气溶胶—云—降水重点开放实验室, 南京 210044)

摘要: 为了进一步研究电涌保护器(surge protective device, SPD)级间能量配合失效的问题, 依据 IEC 61643 的规定, 利用波的传输理论与基尔霍夫定律进行理论分析后, 再进行冲击试验, 试验发现: SPD 在能量配合失效时, 其级间的退耦元件受到的损伤往往比主要防雷元件更为严重。研究表明: 在 8/20 μs 冲击电流的多次冲击作用下, 退耦元件的电气性能将发生变化。同样绕制情况下, 线径越大的电感冲击损伤越小; 同一温度下, 功率越大的电阻冲击损伤越小, 且镀膜型电阻的电气性能较绕线型电阻更稳定。从而提出: 在 SPD 的能量配合试验中, 应先校验级间退耦元件电气性能的一致性, 后分析冲击数据。这在 SPD 的级间参数配置研究过程中, 具有一定的实际参考意义

关键词: 电涌保护器; 级间配合; 退耦元件; 冲击; 损伤

Impulse Damages Analysis of the Decoupling Component Between Multi-level SPD

WANG Chengfang^{1,2}, YU Jianhua¹, QIANG Yujun¹, LYU Zhendong¹, LIU Shan²

(1. Jiangxi Meteorological Bureau, Nanchang 330046, China; 2. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to reasearch the problem of the energy cooperation failure in multi-level surge protective device (SPD), based on transmission line theory & Kirchhoff law & the request of IEC 61643, then through impulse test, it would find that the damage to decoupling component is more severe than main lighting protection component when SPD fails in energy cooperation. Results show that decoupling component's electrical specification may be changed with repeated 8/20 μs impulse current. In the same winding case, the greater wire diameter, the stronger stability of the inductance. In the same temperature, the stronger resistance has better stability. And coating resistance is more reliable than winding resistance. It comes to the conclusions that decoupling component should be verified first, then analyzing the impulse data of SPD. The conclusions will be meaningful to the parameter setting of SPDs.

Key words: surge protective device (SPD); multi-level cooperation; decoupling component; impulse; damages

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, 采用单个电涌保护器(surge protective device, SPD)元件进行浪涌防护往往无法达到要求, 需将不同功能、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“高一低配”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[1]提出了不同研究人员对于 SPD 的级联配合试验会得到不同试验结论这一现象, 所以利用理论仿真的方法统一了配合方法; 文[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[4]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耐冲击可靠程度的研究。事

实上, 笔者在进行 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^[5]。由于组合型 SPD 在实际使用过程中, 遭受过电压侵害的次数有限, 所以一线工作者也难以觉察到退耦元件电气性能改变的问题。因此, 在 SPD 出现故障的时候, 一线工作者经常将主要防雷元件与退耦元件一同更换, 造成较大的资源浪费^[6-8]。

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, 文中将波的传输理论与基尔霍夫定律结合, 推导出退耦元件的最佳取值, 然后采取 8/20 μs 冲击试验, 分析出不同退耦元件的电气性能可靠性, 进而确定退耦元件的最佳选材、最佳制作方式, 这对于 SPD 的研发与工程应用具有一定的实际参考价值。

1 退耦元件的理论量值确定

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^[9]。

假定研究的 SPD 为 12 V 直流电源专用 SPD, 该 SPD 由 GDT、TVS、退耦元件组成, 为典型的组合式 SPD, 其电路图见图 1。

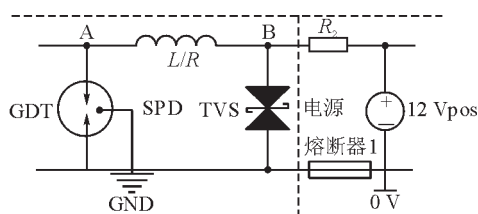


图 1 DC 12 V 电源专用 SPD 内部电路图

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

那么该 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。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(U_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式(1)^[10-11]

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

式(1)中: U_p 为电压保护水平, $\min(U_p)$ 为电压保护水平的下限值, $U_0=12\text{ V}$, 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 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 $U_c=21.6\text{ V}$ 。同时由于 $U_c=$

$1.2 U_{BR}$, U_{BR} 为 TVS 的最小击穿电压(铭牌标示值); 因此可以得到 $U_{BR}=18\text{ V}$ 。

对于电路中的 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(2)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 $L_{\min}=22.5\text{ }\mu\text{H}$; di 为 dt 时间内流过退耦电感的电流大小, 且 $U_{res1}=U_c$ 。

因为 $U_{BR}=18\text{ V}$, 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 $U_{res1}=0\text{ V}$, 即电流在传播到末级 TVS 之前就已经吸收殆尽; 故 $di=84\text{ A}$, $dt=8\text{ }\mu\text{s}$, 推出 GDT 的冲击击穿电压 $U_{oc}=236\text{ V}$; 冲击电压作用下, GDT 的寄生电感效应十分明显, 响应时延为 $\Delta t \approx 100\text{ ns}$ 。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 $U_{oc}=1.5 U_{DC}$ 来描述, 所以 $U_{DC} \approx 150\text{ V}$ 。

综上所述: 试验选用的 GDT 的直流击穿电压宜为 150 V, TVS 的最小击穿的电压宜为 18 V。

1.1 退耦电感值的理论计算

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 $v=1/\sqrt{L_0 C_0}$, 传播方式见图 2, 图 2 中箭头代表波的传播方向; 其中 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^[12-14]。采用 18AWG 的单芯铜缆时, 实测 $L_0 \approx 1.5\text{ }\mu\text{H/m}$, $C_0 \approx 3\text{ pF/m}$ 。

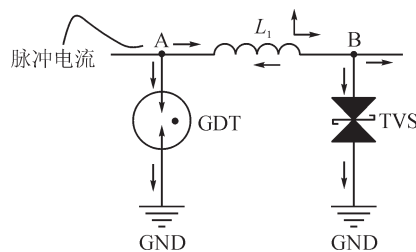


图 2 电感型退耦元件组合电路

Fig. 2 The circuit of multi-level SPDs which use decoupling inductance

将 L_0 、 C_0 代入可得 $v=1.5 \times 10^8\text{ m/s}$ 。

为了保证第 1 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 的值代入可得 $S_{\min}=15\text{ m}$;

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, 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,故考虑采用集中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;

故在 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。

1.2 退耦电阻值的理论计算

当组合电路采用的退耦元件为电阻时,可用基尔霍夫定律对电路进行简单分析,其电路图见图 3。

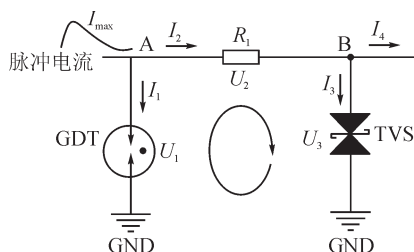


图3 电阻型退耦元件组合电路

Fig. 3 The circuit of multi-level SPDs which use decoupling resistance

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 KCL 与 KVL 可以列出式(3)

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

将数据代入式(3)可得

$$\begin{cases} U_2 = -172 \text{ V} \\ I_2 = \frac{750}{11} \text{ A} \end{cases} \quad (4)$$

由欧姆定律 $R=U/I$ 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,所以退耦电阻取值时应该要大于 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^[15-16]。

2 退耦元件的冲击损伤分析

由于目前二级 SPD 的型式试验中,使用的最大 $8/20 \mu\text{s}$ 冲击电流值为 80 kA , 所以当冲击电流小于 80 kA 时, TVS 的残压都应符合设计要求, 否则,说明 SPD 在正常通流范围内,有部分器件的电气性能发生了改变。

冲击平台充放电回路见图 4。平台选用 SJTU20 型 $1.2/50$ 、 $8/20 \mu\text{s}$ 组合波发生器与 ICGS 型 $8/20 \mu\text{s}$ 冲击电流发生器,其中充电(冲击)电压 $<10 \text{ kV}$ 时利用 SJTU20 型组合波发生器,充电(冲击)电压 $\geq 10 \text{ kV}$ 时利用 ICGS 型冲击电流发生器,两个平台的同时选用可以使得充电(冲击)电压能够从 0 V 开始进行冲击设置,从而保证测试数据的连续性。由于使用的冲击平台的源阻抗 R 为 2Ω , 所以冲击电流的大小将是冲击电压值的一半^[17]。参考理论计算结果,可选用 3RM150-8 型 GDT, 1.5KE18CA 型 TVS, $28 \mu\text{H}$ 退耦电感(无磁芯), 2.7Ω 退耦电阻。

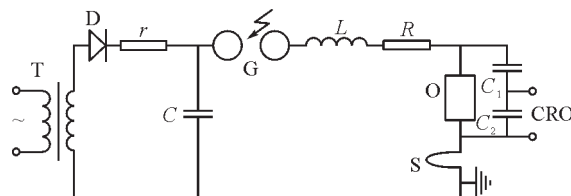


图4 冲击平台充放电回路原理图

Fig. 4 The schematic of ICGS

为了保证减小布线对分布参数的影响,所有测试器件均焊接于 PCB 板上。然后利用冲击平台对电路进行冲击,冲击从 0.1 kV 开始,步长为 0.1 kV ,待测试波形完全失真时停止冲击,每次冲击瞬间都将末级 TVS 的残压及通流波形使用 Tektronix TDS220B 型存储记忆示波器记录保存,每次冲击后待退耦元件冷却,再补充测量退耦元件的参数大小。将冲击所得到的残压、通流、退耦参数数据用 Origin 软件进行滤波处理,得到残压、通流及退耦参数的变化曲线。分析过程中,由于冲击波能量的大小与电流大小正相关,所以用电流的变化趋势来判定能量的变化趋势^[18-20]。

2.1 能量配合试验方法及相关测试数据

在进行静态能量配合试验时,由于被测试的 SPD 末端不接被保护设备,所以通过 SPD 末级 TVS 的电流与通过退耦元件的电流值大小、方向相同。

2.1.1 电感型退耦元件能量配合冲击测试数据分析

电感利用“美规”漆包线(18AWG)绕制而成,骨架为普通电木,预计 $Q>10$,为了控制变量,防止电感线圈线一线间击穿放电,在绕制之前在漆包线表面喷涂十二烷基苯(易固型绝缘软胶),使得线间的绝缘耐压值至少在 40 kV 以上。

同时为了准确测量电感值的细微变化,可利用 Hay 电桥法进行测量。TVS 的残压、通流变化曲线见图 5;退耦电感实际值大小变化曲线见图 6。典型的冲击波形见图 7,图 7 表示的是 12.5 kV 冲击电压作用于被测电路时,示波器采集到的瞬时波形。

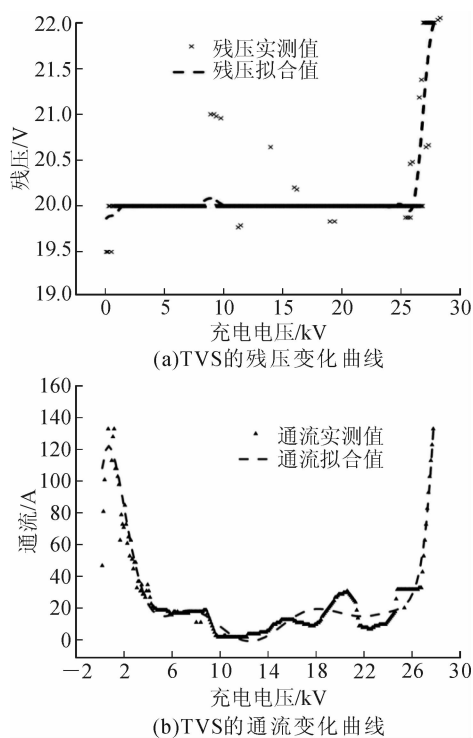


图5 TVS的残压、通流变化曲线

Fig. 5 The curve of TVS' residual voltage and discharge

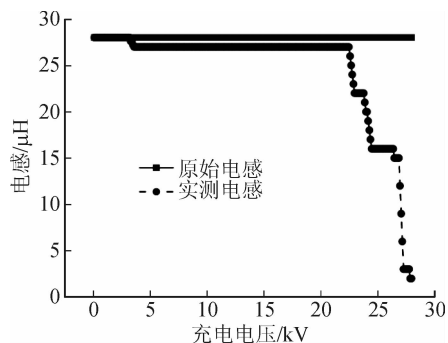


图6 退耦电感变化曲线

Fig. 6 The curve of changing & decoupling inductance

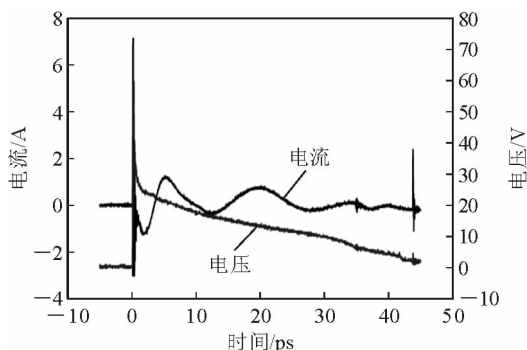


图7 12.5 kV 冲击 SPD 时末级的残压、通流波形

Fig. 7 The waveform of residual voltage and discharge with 12.5 kV impulse current

由图 5、6,并结合原始数据,可以分析得到,当冲击电压波在充电电压达到 0.5 kV 时末级 TVS 才开始正常启动,也就是说,在充电电压小于 0.5 kV

时,大部分能量并未传递到末级 TVS,这是因为退耦电感的反射作用下,过电压波在到达末级 TVS 之前就已经被 GDT 基本吸收完全;当充电电压达到 0.8 kV 左右的时候,通过 TVS 的电流由上升开始变为下降,说明 GDT 开始深度导通;在充电电压达到 3 kV 左右的时候,通过 TVS 的电流仍然保持下降趋势,而退耦电感已经开始出现了电感量下降情况,由原始的 28 μH 下降到 27.6 μH ,下降的百分比为 1.4%,尚不明显;当充电电压达到 9 kV 左右的时候,通过 TVS 的电流开始保持平稳,并且开始有微弱的上升趋势,这是由于 GDT 导通完全,能量吸收和释放达到其工作极点,所以,后续升压冲击时,若电感量不发生变化,通过电感传递到 TVS 的能量将线性上升;当充电电压达到 22.5 kV 以后,可以看出,通过 TVS 的电流开始保持持续上升的趋势,且上升斜率逐渐增大,不是线性变化,这说明了电感在改变,结合图 6,可以发现电感的下降速率开始变大。当充电电压达到 25 kV 时,退耦电感的电感量已经由原始的 28 μH 下降到了 15.1 μH ,下降的百分比为 46.1%,同时可以看出,TVS 的残压值也已经达到了最大箝位电压,这是由于电感的大幅度下降导致大部分能量涌向末级,两级配合能力逐渐变差;当充电电压达到 27.5 kV 时,退耦电感量已经降到 3 μH ,下降百分比为 89.3%,同时 TVS 的瞬时功率(残压与通流的乘积)已经达到 1.83 kW,超过了其瞬时额定功率的 22%,属于过载状态,后续继续抬升充电电压时,TVS 出现了炸裂的情况。不断抬高冲击电压的过程中,电感线圈逐渐发硬,线—线之间的距离不断变小,最终出现断裂的现象,但是在断裂,未发现电感线圈有击穿放电现象。

另外,从图 7 可以看出,当退耦元件为电感时,将使得通过退耦元件后的冲击波形的波头变得更为平缓,同时,其能量衰减方式也以阻尼震荡的形式进行衰减,能量完全衰减为 0 J 耗时较大,这是由于电感在只考虑电感效应时,只起到将能量形式改变的作用,并不起到能量吸收的功能。

2.1.2 电阻型退耦元件能量配合冲击测试数据分析

电阻采用目前市面上组合型 SPD 内部常用的 2 W 碳膜电阻,阻值为 2.7 Ω ,直接利用万用表进行测量。电阻型退耦元件的能量配合冲击试验及分析方法类似于电感型退耦元件的能量配合冲击试验及分析方法;TVS 的残压、通流变化曲线见图 8。退耦电阻实际值大小变化曲线见图 9。典型的冲击波形见图 10,图 10 表示的是 0.6 kV 冲击电压作用于被测电路时,示波器采集到的瞬时波形。

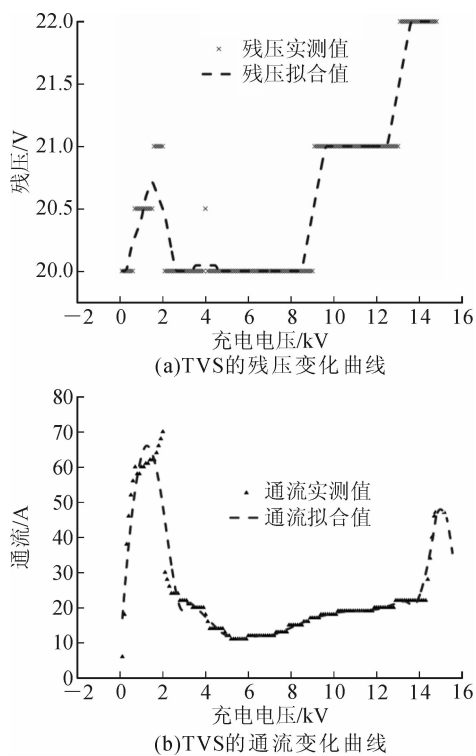


图8 TVS的残压、通流变化曲线

Fig. 8 The curve of TVS' residual voltage and discharge

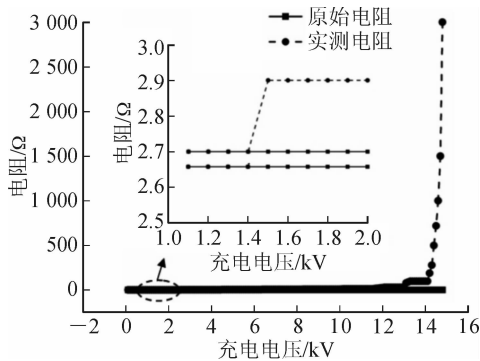


图9 退耦电阻变化曲线

Fig. 9 The curve of changing & decoupling resistance

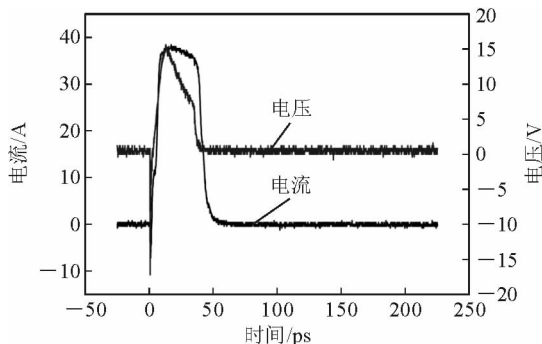


图10 0.6 kV冲击SPD时末级的残压、通流波形

Fig. 10 The waveform of residual voltage and discharge by 0.6 kV impulse current

由图8、9,并结合原始数据,对比退耦元件为电感的SPD,可以分析得到,当退耦元件为电阻时,只要开始冲击(起始电压0.1 kV),末级TVS就开始工

作,说明电阻对于过电压的作用与电感不同,电阻对冲击波不起到反射与隔离的作用,而且在过电压小于GDT的启动电压时,冲击波能量将直接通过电阻传递到末级TVS,完全由退耦电阻与TVS吸收、泄放。当充电电压大于1.4 kV时,退耦电阻阻值大小开始发生变化,由原始2.7 Ω上升为2.9 Ω,上升的百分比为7.4%,超过了电阻 $\pm 5\%$ 的误差允许范围,可以认为电阻性能在下降。当充电电压达到0.6 kV的时候,TVS的残压与通流发生了轻微的跳变,这是由于GDT开始启动,吸收了一部分冲击能量;当充电电压达到2 kV左右时,GDT开始深度导通,末级TVS的通流有了明显的下降趋势;当充电电压达到6 kV时,GDT已经导通完全,末级通流开始随冲击电压升高而变大;当充电电压达到8.5 kV时,TVS的残压也开始抬升,逐渐接近最大箝位电压22 V;当充电电压达到13 kV时,TVS残压及通流的上升趋势在加快,同时退耦电阻阻值大小发生了明显改变,由2.7 Ω变大为90 Ω,上升了32.3倍,这是由于过电压波的抬升导致前级分流能力达到了极点,更多能量将涌至末级TVS,说明流过退耦电阻的电流也将越大,大电流的通过,将使得电阻丝/膜由于发热而融化变细,从而阻值发生改变。当冲击电压达到14 kV以后,退耦电阻阻值已经可以认为完全损坏,表面爬电痕迹十分明显,阻值达到千欧量级,而TVS的残压及通流仍然保持上升的趋势,待充电电压达到15 kV时,通流陡降,这是由于电阻虽然损坏,但当过电压波到达电阻一端时,产生击穿放电,使得末级TVS依然能够接收到冲击能量,但最终,电阻的炸裂导致前后两级完全分开导致末级TVS接收的能量主要为过电压感应,能量减小,所以TVS的残压未变,而通流发生了突然下降的情况。

另外,从图10可以看出,当退耦元件为电阻时,通过退耦电阻后的波形形状与发生器所产生的波形差别不大,仅仅是能量幅值上发生了较大改变,这是由于电阻作为耗能元件,冲击电流通过时,将被吸收损耗掉一部分。

2.2 退耦元件可靠性验证试验方法及结果分析

为了验证退耦元件在冲击条件下确实存在不稳定的情况,并且为了研究其在冲击后的量值变化趋势,利用SJTU20型组合波发生器对退耦元件进行单独冲击,冲击方式与文中2.1处一致。

2.2.1 退耦电感可靠性验证试验及结果分析

取线径不同的3种漆包线绕制3个28 μH螺线管电感,为了防止冲击过程中出现磁饱和现象,骨架采用普通电木;3种漆包线规格参数见表1。

表 1 选用漆包线线材规格表

Table 1 The specification table of enamel wire

AWG线规	公制直径 d/mm	裸线截面 积 S/mm^2	可绕匝数/ (匝 $\cdot\text{cm}^{-1}$)	电阻 $R(20\text{ }^\circ\text{C})$ / ($\mu\Omega\cdot\text{cm}^{-1}$)
16	1.370	1.307 0	7.32	131.8
18	1.090	0.822 8	9.13	209.5
20	0.879	0.518 8	11.37	332.3

注: 由于每个电感所耗线材长度 $<10\text{ cm}$, 故每个电感的阻值 $<4\text{ m}\Omega$, 在冲击电路中可近似为 $0\text{ }\Omega$ 。

将 Hay 电桥所测量得到的电感量数据处理后, 得到不同直径导线绕制的电感在冲击电流波作用下的电感变化曲线, 见图 11。

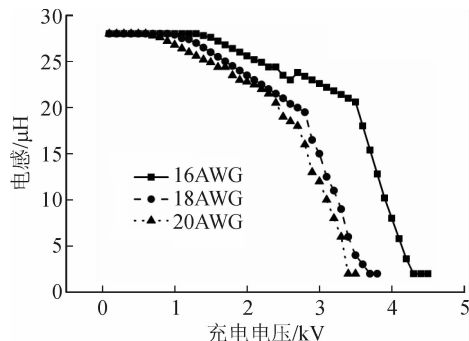


图 11 冲击电流作用下的电感变化曲线

Fig. 11 The curve of changing & decoupling resistance with impulse current

依据图 11 中 3 种不同线径绕制的电感的冲击变化曲线, 可以得出: 当冲击电压达到一定大小的时候, 电感在冲击电压作用下, 会发生电感量下降的情况。当冲击电压为 3 kV 的时候, 16AWG、18AWG、20AWG 漆包线绕制的电感分别下降为 22.6 、 15 、 $12\text{ }\mu\text{H}$, 降的百分比为 19.3% 、 46.4% 、 57.1% ; 在同一冲击电压作用下, 16AWG 线径绕制的电感下降明显要小于 20AWG 线径绕制的电感, 同时, 发现冲击过程中, 线圈逐渐发硬, 线一线间距不断缩小, 最后线圈的漆包线断裂, 所以, 线径越大, 冲击可靠性越强。

2.2.2 退耦电阻可靠性验证试验及结果分析

取功率为 2 、 5 W 的碳膜电阻、 5 W 有机实芯电阻、 5 W 水泥绕线电阻各 5 只, 阻值统一为 $2.7\text{ }\Omega$; 每次冲击过后, 等电阻冷却至室温再测量电阻, 将测得的数据进行平均处理, 得到冲击电流波作用下的电阻变化曲线, 见图 12。

由图 12 可以看出: 当冲击电压达到 4 kV 时, $2.7\text{ }\Omega$ 的 2 W 碳膜电阻、 5 W 碳膜电阻、 5 W 有机实芯电阻、 5 W 水泥绕线电阻分别上升为 241 、 27.5 、 7.2 、 $24.5\text{ }\Omega$, 分别上升了 88.2 、 9.1 、 1.7 、 8.1 倍, 再结合曲线整体变化趋势, 可以得到, 2 W 碳膜电阻比

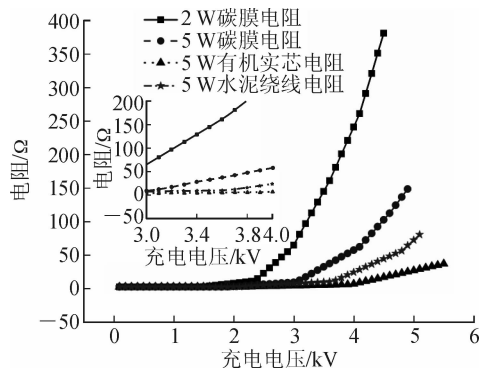


图 12 冲击电流作用下的电阻变化曲线

Fig. 12 The curve of changing & decoupling inductance with impulse current

5 W 的碳膜电阻的阻值随冲击电压的升高增大的更快, 故冲击可靠性更差; 5 W 碳膜电阻、有机实芯电阻、水泥绕线电阻中, 有机实芯电阻的冲击可靠性最好, 水泥绕线电阻次之, 碳膜电阻最差。所以, 可以简单得出: 对于同一材料、同一生产方式的电阻, 功率越大, 冲击可靠性越强; 对于同一功率、不同材料、不同生产方式的电阻, 冲击可靠性不同, 镀膜型电阻的冲击可靠性要优于绕线型电阻。产生以上现象是由于电阻在冲击电流作用下会吸收能量发热, 对于绕线电阻, 由于电感分量较大, 高频电流的通过将使得其震荡更为明显, 容易崩裂, 阻值变大。

3 结论

通过 SPD 的能量配合试验及对退耦元件的单独冲击试验, 可以得出以下有益结论:

1) SPD 的级间退耦元件在冲击的过程中会受到不同程度的损坏, 进行能量配合试验时, 退耦元件的参数改变将使得能量配合试验的 SPD 配置参数无法保持一致, 研究结果可信度下降。

2) 退耦元件在 $8/20\text{ }\mu\text{s}$ 波形冲击下, 性能变化有规律可循。随着冲击电压的抬升、冲击次数的增加, 退耦电感的电感量将保持下降趋势, 在一定线径范围内, 线径越大的电感其通流容量越大, 故受到的冲击损伤越小; 退耦电阻的阻值由于焦耳热积累与电动力效应, 电阻丝/膜的逐渐融化, 截面积变小, 直至电阻丝/膜断裂, 故阻值将保持上升趋势, 相同条件下, 功率越大的电阻, 其耐热性能及机械强度更高, 电阻丝/膜更不容易融化、断裂, 从而使得其冲击稳定性越好, 同时, 由于镀膜电阻的电动力效应没有绕线电阻那么明显, 保证了镀膜电阻的冲击稳定性要优于绕线电阻。

基于以上结论, 研究认为: 在 SPD 的级间能量配合试验中, 只有先校验级间退耦元件电气性能的

一致性,后分析冲击数据,才能保证多级配合 SPD 冲击数据的可信度,进而保证 SPD 级间配合保护中配置参数的准确、可靠。

参考文献:

- [1] LAI J S, MARTZLOFF F D. Coordinating cascaded surge protection devices: High-low versus low-high[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1993, 29(4): 680-687.
- [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, 2007.
ZHANG Dong. Study on the protection and coordination of surge protective devices in low-voltage distribution systems[D]. Shanghai: 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] 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. The development of television networks signal surge protection device based on band-pass filter[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(5): 109-115.
- [6] 孙 伟, 李 勇, 郭瑞艳, 等. 间隙型浪涌保护器低气压条件下防雷保护特性研究[J]. 高压电器, 2014, 50(1): 26-30.
SUN Wei, LI Yong, GUO Ruiyan, et al. Lightning protection characteristics of surge protective gap under low gas pressure[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 26-30.
- [7] 高 鑫, 刘全桢, 毕晓蕾, 等. 电涌保护器残压测量中的影响因素分析[J]. 高压电器, 2012, 48(12): 18-21.
GAO Xin, LIU Quanzhen, BI Xiaolei, et al. Analysis on the factors influencing residual voltage measurement of surge protection device[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(12): 18-21.
- [8] 刘全桢, 王欣眉, 刘宝全, 等. 浪涌保护器电气连线雷电流冲击阻抗特性探讨[J]. 高压电器, 2008, 44(6): 541-542.
LIU Quanzhen, WANG Xinmei, LIU Baoquan, et al. Impedance characteristics of electrical connection wire of surge protection device under lightning current impulse[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(6): 541-542.
- [9] JB/T 10618—2006 组合式电涌保护器[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2006.
JB/T 10618—2006 Surge protective device assembly[S]. Beijing: The National Standardization Management Committee of China, 2006.
- [10] HE Jinliang, YUAN Zhiyong, WANG Shunchao, 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.
- [11] IEC 61643-1:2005 Low-voltage surge protective devices Part 1: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems Requirements and tests[S]. 2015.
- [12] KISIELEWICZ T, FIAMINGO F, MAZZETTI C, et al. Simulated and tested protection effects on electrical equipment terminals at overvoltages incoming through distant SPD[J]. Energetics (IYCE), 2011(7): 1-6.
- [13] WANG Shunchao, HE Jinliang. Discussion on worst distance between SPD and protected device[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2011, 53(4): 1081-1083.
- [14] 姚学玲, 陈景亮, 孙 伟. 耦合方式对浪涌保护器组合波输出波形特性影响的研究[J]. 高压电器, 2009, 45(2): 36-39.
YAO Xueling, CHEN Jingliang, SUN Wei. Influence of coupling mode on output characteristics of combination wave generator of surge protective device[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(2): 36-39.
- [15] BULSON J M. Low-impedance cable for parallel-connected surge protective devices[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(4): 1816-1821.
- [16] 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.
- [17] 姚学玲, 陈景亮, 孙 伟. 非线性被试品冲击电流发生回路的研究[J]. 高压电器, 2005, 41(6): 412-415.
YAO Xueling, CHEN Jingliang, SUN Wei. Study on the impulse current for non-linear resistances[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(6): 412-415.
- [18] 王铁街. 浪涌抑制器配合距离的动态研究[J]. 高电压技术, 2002, 28(12): 16-17.
WANG Tiejie. Research of the distance coordination of the SPD[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(12): 16-17.
- [19] 李清泉, 范士锋, 袁 鹏, 等. 振荡波两级低压浪涌保护器配合情况的实验研究[J]. 高压电器, 2004, 40(1): 9-10.
LI Qingquan, FAN Shifeng, YUAN Peng, et al. Experimental study of the cascaded SPD coordination under ring wave[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 40(1): 9-10.
- [20] WAGNER C F, McCANN G D. Induced voltages on transmission lines[J]. Electrical Engineering, 1942, 61(12): 916-929.

王成芳(1991—),男,助理工程师,主要从事雷电防护技术研究。