

陈绍东, 张义军, 颜旭, 等. 初始长连续电流引起的地电位抬升和 SPD 损坏. 应用气象学报, 2020, 31(2): 236-246.

DOI: 10.11898/1001-7313.20200210

初始长连续电流引起的地电位抬升和 SPD 损坏

陈绍东^{1)*} 张义军²⁾ 颜旭¹⁾ 杜赛¹⁾ 吕伟涛³⁾ 张阳³⁾

¹⁾(中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080)

²⁾(复旦大学大气与海洋科学系/大气科学研究院, 上海 200438)

³⁾(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室/雷电物理和防护工程实验室, 北京 100081)

摘 要

在电子电气系统接地领域,地电位抬升对电子设备的破坏效应一直是人们关注的焦点。基于触发闪电技术,开展了电网地电位抬升冲击电涌保护器(surge protective device, SPD)的观测试验,重点分析了触发闪电初始长连续电流过程对 SPD 的冲击和损坏效应。结果发现,触发闪电注入地网后,闪电的初始长连续电流和继后回击的共同作用下很容易造成额定通流量的 SPD 损坏,当流经 SPD 的能量累积达到一定程度时仅初始长连续电流过程也会损坏 SPD;冲击 SPD 的效应与初始长连续电流过程不同的波形密切相关,当长连续电流过程叠加上沿较快幅值较大的初始连续电流脉冲(ICCP, initial continuous current pulse)时,流经 SPD 的能量会迅速增加,是长连续电流过程中 SPD 损坏的最为关键因子。个例分析发现,当初始长连续电流过程持续时间和平均电流量级达到 100 ms 和 200 A 左右,泄放电量为 25 C,流经 SPD 的能量达 1000 J 左右,易造成标称放电电流 20 kA 甚至更高的 SPD 损坏。

关键词: 触发闪电; 初始长连续电流; 地电位抬升; SPD; 损坏

引 言

针对氧化锌阀片冲击能量耐受能力人们已开展了大量试验研究^[1-4],SPD 损害的 4 种主要途径国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)也进行了详细阐述,除耦合感应外,雷电直击线路和地电位抬升引起的加载到电涌保护器(surge protective device, SPD)两端的电压也是人们关注的焦点。无论哪种方式损坏 SPD,在真实的雷电环境中都由闪电放电过程特征所决定。

地闪的基本特征^[5-8],除脉冲式的回击过程(电流峰值很高,但持续时间很短,高压实验室 SPD 的测试大多为脉冲式)外,回击后和回击间常伴随连续电流过程的发生,连续电流虽然强度不大,但其持续时间很长,且通常叠加多个幅值相对较小的电流脉冲,即 M 分量^[9-11],长连续电流叠加 M 分量过程常造成 SPD 损害,但其机制与回击不同。

SPD 在高压实验室的测试已成熟,近年根据对雷电放电过程的观测引进了全雷电波的概念并开展多回击等测试^[12-13],但仍无法完全模拟自然界的闪电,所以在实际系统运行中,由于闪电事件造成额定电流范围内的 SPD 损坏^[14]难以避免。人工触发闪电是一种很好的在线测试方式^[15-17],针对 SPD 的损坏机理已开展诸多的尝试性研究和测试^[18-19]。但与自然闪电不同,触发闪电在开始阶段是长时间的连续电流,且幅值较大^[20],这对 SPD 的性能是否有影响尚不清楚。另一方面,人工触发闪电的物理过程与高建筑物上的上行闪电一样,随着建筑物高度增加上行闪电的比例也增加,大量观测也发现,高建筑物不仅可以在一定的雷暴条件下自行激发产生上行闪电,还常常被其附近的其他闪电触发产生上行闪电^[21-24],因此,研究这种闪电中持续时间长的初始连续电流对 SPD 的影响和损坏机制具有重要意义。DeCarlo 等^[25]在美国佛罗里达试验场开展雷击居民住宅楼与电源系统分流试验, Birkel 等^[26]在开展

2019-10-08 收到, 2020-01-17 收到再改稿。

资助项目: 国家重点研究发展计划(2017YFC1501506), 国家自然科学基金项目(41775007), 中国气象科学研究院基本科研业务费专项(2018Z003)

* 邮箱: 15035026@qq.com

通信基站和电源系统分流试验中均发现初始长连续电流过程损坏 SPD 的现象,但由于缺乏数据,并没有深入讨论。基于触发闪电试验,前人已开展有关地电位抬升破坏效应的试验研究^[27-28],为后人的研究奠定了基础。本文将利用触发闪电直击于地网,建立简单实用的模型,评估雷电流在入地同时初始长连续电流过程对 SPD 的损坏效应。

1 试验布置

本试验利用位于广州市从化区的中国气象局雷电野外科学试验基地人工引雷试验场开展。2018 年开展的地电位抬升(ground potential rise,GPR)冲击 SPD 试验如图 1 所示,触发闪电电流注入引流杆下地网,地网 GPR 电压通过 SPD 的接地线反击进入埋地电缆,电缆长度约 120 m,在远端接地,工频接地电阻 120 Ω。由于埋地电缆远端接地,GPR 冲击 SPD 后形成电流,接地线电流由皮尔森线圈测量,其带宽为 150 Hz~150 MHz。SPD 两端残压测

量利用阻容式分压器,分压比为 4000:1,高压臂阻抗为 300 pF,带宽为 0~300 MHz。接地线电流和残压波形通过光、电转换由 HBM 高压隔离系统采集和记录,采样率为 10 MS/s。引流杆地网由水平接地体和垂直接地体共同组成,地网规格为 10 m×10 m,分 4 个网格(5 m×5 m),由规格为 40 mm×4 mm 的镀锌扁钢连接,埋深 0.8 m,垂直接地体规格为 40 mm×40 mm×4 mm,长 2.5 m 的镀锌角钢,每隔 5 m 均匀分布于地网的四周,测得地网的工频接地电阻为 15.8 Ω。埋地电缆远端接地为一镀锌角钢,其规格和埋深同上述引流杆地网角钢。触发闪电电流波形由引流杆下同轴分流器进行采集,其采样带宽为 0~20 MHz,之后通过 HBM 系统采集和记录,其采样率为 100 MS/s。SPD 标称放电电流(I_n)有 20 kA 和 40 kA 两种,对应最大放电电流(I_{max}) 40 kA 和 80 kA,电压保护水平(U_p) 1750 V,直流 1 mA 测量的压敏电压大约为 600 V,文中根据 MOV 的压敏电压判断残压的持续时间。

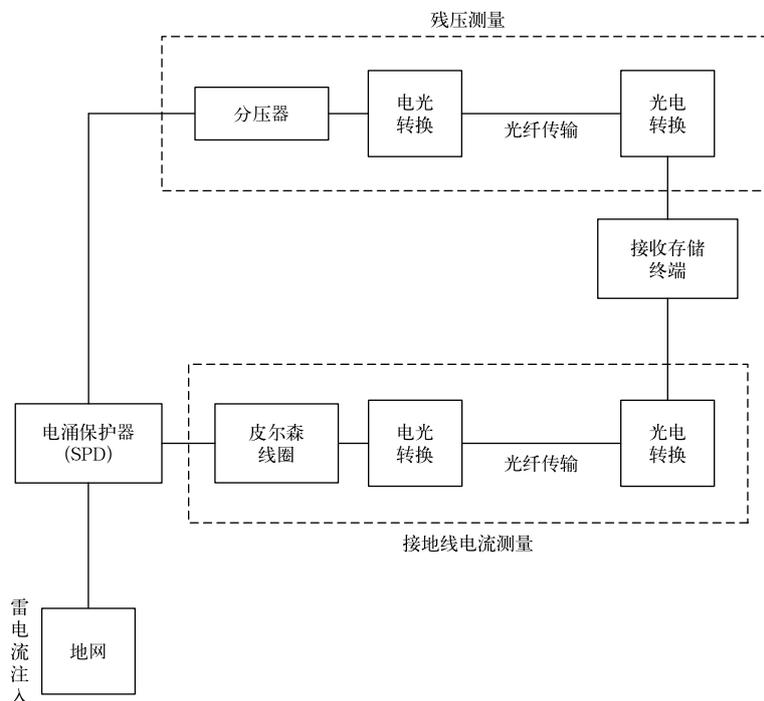


图 1 地网 GPR 冲击 SPD 效应试验布置示意图

Fig. 1 The schematic diagram of GPR's impact on SPD effect

2 观测结果

2.1 观测数据情况

2018 年夏季试验,共有 9 个雷暴过程 27 次触

发闪电成功,其中 4 个雷暴过程试验后氧化锌 SPD 发生损坏,日期分别为 6 月 26 日,7 月 2 日,7 月 25 日和 7 月 26 日。6 月 26 日,触发成功 1 次,记为 T0626,由于触发阈值设置偏高,此过程只记录到触发闪电通道底部电流,为仅有长连续电流的触发闪

电过程,连续电流长达 480 ms,且电流幅值超过 2 kA 的持续时间约 1.3 ms。7 月 2 日触发成功 3 次,第 1 次过程 SPD 已经损坏,记为 T0702。7 月 25 日和 7 月 26 日均只有 1 次触发闪电成功,分别记为 T0725 和 T0726。这 3 次过程均由初始长连续电流和之后的回击组成,其中 T0702 有 1 次继后回击,T0725 和 T0726 各有 4 次继后回击。经分析发现,T0725 在第 1 次回击过程中 SPD 出现明显异常,其余 3 次回击均在初始长连续电流过程中出现损坏。

触发闪电成功后通道底部电流的测量(记为 OB1 测量系统)和地网电位抬升及 SPD 电流测量(记为 OB2 测量系统)是两个不同的测量系统,T0725 成功后,由于各自的触发阈值设置不同,OB2 对应的初始长连续电流的初始部分未能测量到。T0726 触发成功后,第 4 次回击的电流过大(超过

30 kA),野外观测的电力系统瞬间瘫痪,OB1 测量故障,OB2 测量由于系统采用了隔离变压器,数据测量正常,同时还测量到了由 OB1 经过 BNC 线分接过来第 4 次回击之前的通道底部电流数据。由此可见,数据最完整的过程为 T0702,下面将重点分析。另外,T0726 过程 SPD 的标称放电电流为 40 kA,其余 3 个过程 SPD 标称放电电流均为 20 kA。

2.2 T0702 观测结果

由触发闪电通道底部电流观测结果可知,T0702 触发闪电初始长连续电流持续时间较长,为 433.8 ms(如图 2 所示),期间最大的峰值电流为 718.5 A,是出现在 36.5 ms 的一次 M 分量过程,整个过程平均电流为 146.1 A,中和电量为 63.4 C。初始长连续电流过程之后有 1 次回击过程,电流幅值为 19.1 kA。

T0702 当触发闪电电流注入地网后,地网的电

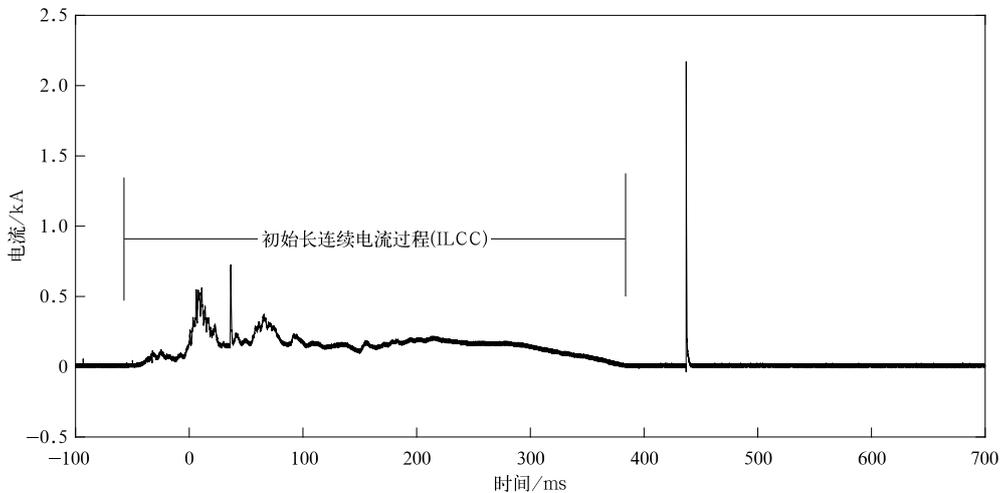


图 2 T0702 小量程触发闪电通道底部电流

Fig. 2 Small range triggered lightning channel bottom current of T0702

位瞬间抬升,由于 SPD 接地线与地网相连,GPR 电压反过来冲击 SPD 形成明显残压,SPD 起到保护后端设备的作用,整个过程的残压如图 3a 所示。由残压和触发闪电电流波形曲线可知,随着注入闪电电流的波动,SPD 的残压在整个初始长连续电流过程中也波动明显。当 GPR 电压较小时,SPD 没有动作也就没有残压;SPD 动作情况下,冲击电压不同时残压的表现形式也有区别,如图 3b 中初始电流幅值较大的阶段,其残压相应也较大。以 SPD 压敏电压 600 V 为标准,初始连续电流(initial continuous current,ICC)过程出现 3 段较明显的残压,其持续时间分别为 1.9 ms,16.5 ms 和 109.1 ms,持续时间最长的第 3 段过程起始于-9.9 ms,结束为 99.2 ms

(也是 SPD 损坏的时刻)。由图 3a 可知,期间平均电压为 813.8 V,最大电压为 969.0 V,是 SPD 损坏最为重要的阶段。

由于地电位抬升经地网流经 SPD 的电流,其幅值变化与触发闪电电流的变化趋势基本一致,如图 3b 和图 3c 所示,流经 SPD 电流幅值较大的主要出现在两个阶段,ICC 上升较快幅值较大的阶段和叠加在 ICC 上的 M 分量(图 3b)。分析发现,SPD 接地线电流除与注入电流的幅值有关外,与电流的快速上升也存在明显的对应关系,由图 3b 可见,M 分量后有一段电流幅值较大过程,但其电流变化缓慢,对应的 SPD 电流则很小(图 3c),可能是 GPR 冲击 SPD 的过程中,当电流变化较慢时缺少电流耦合作

用的缘故。对应前述残压的第 3 阶段,流经 SPD 接地线电流峰值达 396.5 A,平均电流为 23.6 A,是对应阶段触发闪电电流均值(220.4 A)的 10.8%,电

量为 2.57 C,期间流经 SPD 电流 50 A 以上的持续时间达 9.2 ms,有多个波峰和波谷,属振荡型。

SPD 残压曲线在 99.2 ms 出现了断崖式突变,

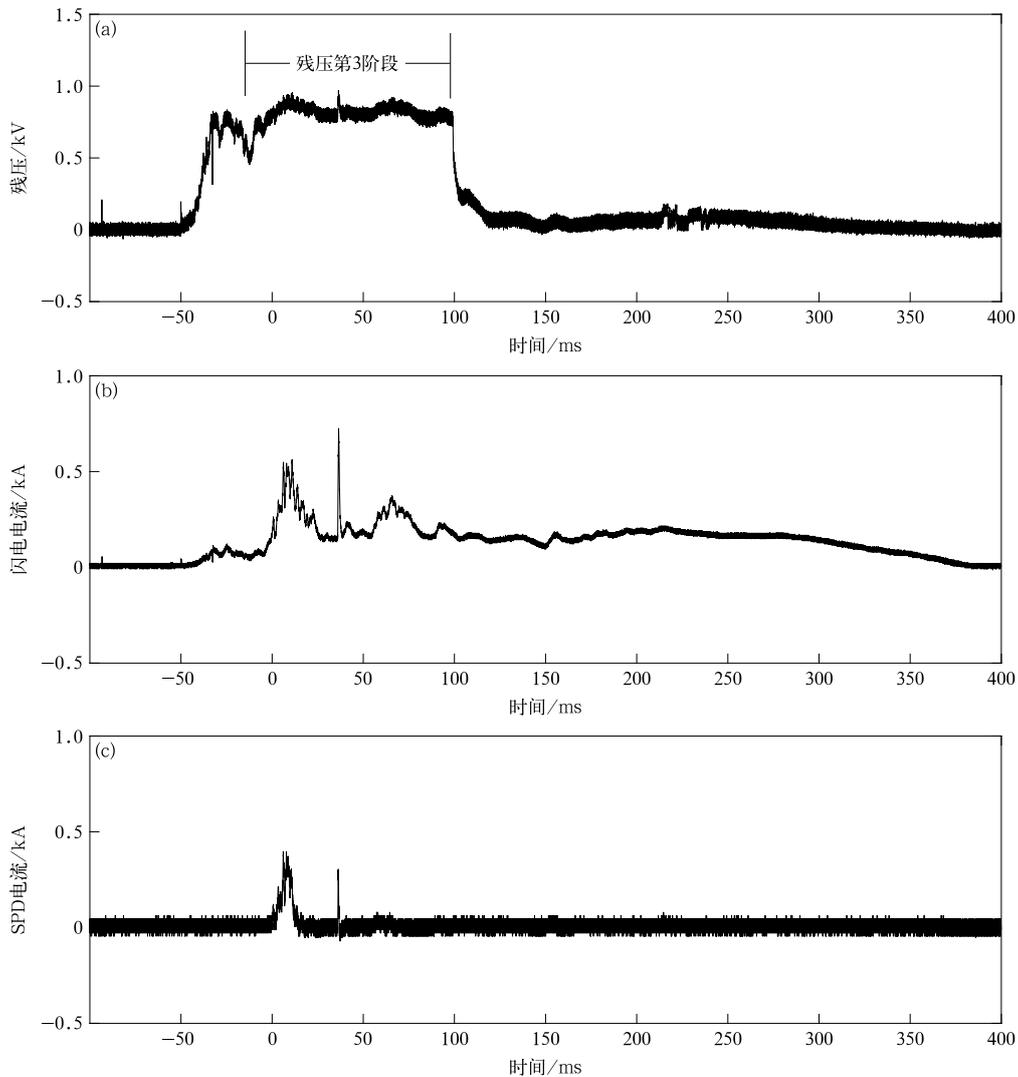


图 3 T0702 初始长连续电流对应的 SPD 残压(a)、触发闪电电流(b)和 SPD 接地线电流(c)波形

Fig. 3 The waveform of SPD residual voltage(a), triggered lightning current(b) and current flowing through SPD(c) due to the initial long continuous current of T0702

SPD 的箝位电压消失了(如图 3a 所示),从正常 SPD 箝位电压减弱的对比和其他数据分析判断,此刻 SPD 已经损坏。残压突变出现时,触发闪电电流幅值为 181.3 A,远大于出现残压初始时刻对应的电流幅值 69.3 A,且突变之后还存在几百毫秒较大电流幅值的连续电流过程,说明此时并不是真的残压消失,而是 SPD 损坏,初始连续电流后的回击过程,SPD 没有动作,进一步说明 SPD 损坏事实。SPD 损坏时,触发闪电初始长连续电流持续时间为 149.2 ms,期间峰值电流为 718.5 A,平均电流为

173.8 A,泄放电量为 25.9 C。Mata 等^[18]利用人工触发闪电开展雷电直击不带电架空线路的试验发现,当初始长连续电流持续时间达 100 ms、平均电流达 100 A 的量级时,线路上氧化锌避雷器出现损坏现象。值得关注的是,SPD 损坏或出现异常后,由地网抬升引起的电流或者能量仍源源不断涌入低压系统,SPD 损坏后的初始连续电流过程,有较微弱的电流流经 SPD,第 1 次回击过程流经 SPD 的电流峰值达到 4.6 kA,这可能是由于 SPD 氧化锌阀片内部的晶体结构虽已经损毁,但其仍能够传导电

流的缘故。

2.3 T0726 观测结果

T0726 触发闪电过程由长初始连续电流和 4 次回击组成,初始长连续电流呈现明显残压(图 4a),而回击对应的残压呈饱和现象。前 3 次回击电流峰值分别是 11.7 kA,21.9 kA 和 28.7 kA(图 4b),第 4 次回击闪电电流峰值更大,且造成 OB1 测量系统

瘫痪。OB1 测量系统瘫痪导致通道底部电流只记录了大量程波形。T0726 初始长连续电流过程持续时间为 183.3 ms,期间最大电流峰值为 1079.2 A,整个过程的平均电流为 176.4 A,中和电量为 32.3 C。与 T0702 相比,其持续时间较短,但峰值电流和平均电流均较大,即长连续电流过程泄放电流更集中。

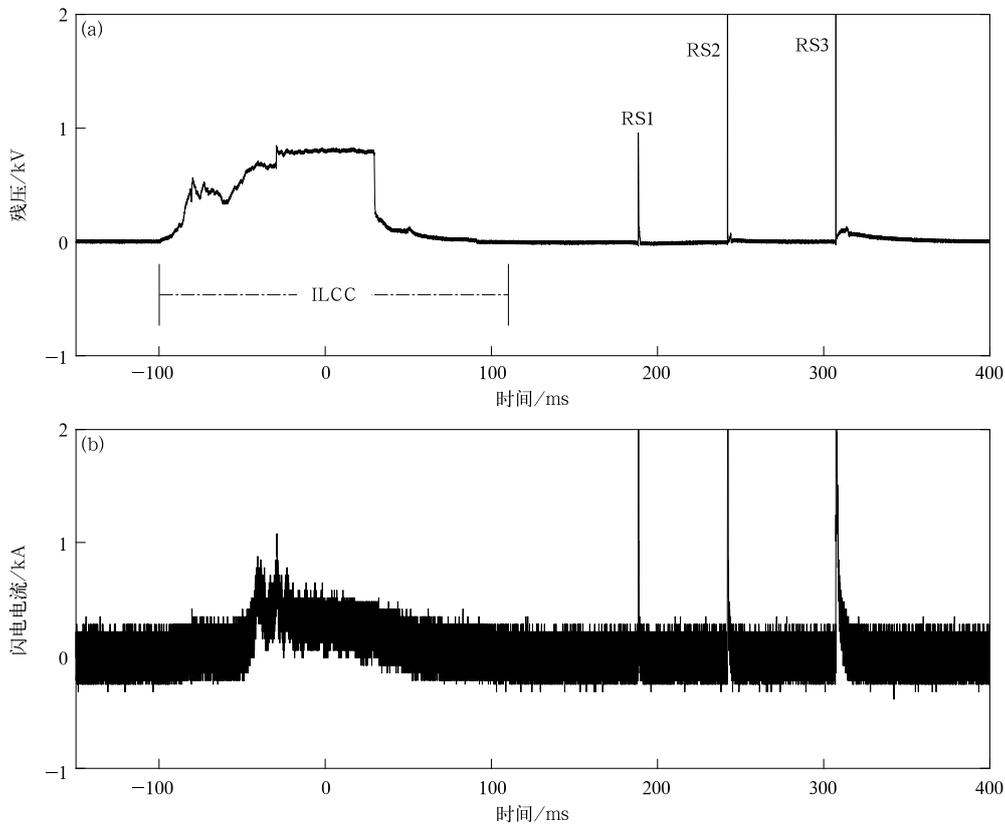


图 4 T0726 SPD 残压波形(a)和大量程触发闪电通道底部电流(b)

Fig. 4 SPD residual voltage(a) and large range triggered lightning channel bottom current(b) of T0726

T0726 初始长连续电流过程造成标称放电电流为 40 kA 的氧化锌 SPD 损坏,发生损坏的时刻也为残压的突变点,对应的时间轴为 29.9 ms(如图 5a 所示)。由图 4a 也可以看到,后面的回击过程 SPD 不再动作。由图 5b 中 GPR 电压曲线可知,当 GPR 达到了 SPD 的动作电压后,SPD 表现出明显的残压特征,以 600 V 为残压的起始点,首次出现残压的时刻为 -48.3 ms。

将残压分为 2 个阶段,第 1 阶段由残压的起始点开始,此刻对应 GPR 幅值为 -1.3 kV,之后 GPR 缓慢抬升,达到了第 1 次峰值电压 -7.9 kV,之后又有所回落,期间残压也随之缓慢变化,在 -29.4 ms 左右,对应出现较大的初始连续电流脉冲(initial continuous current pulse, ICCP, 上升沿小于 20 μ s),

GPR 电压出现突变(峰值电压 -8.3 kV),SPD 残压和流经的电流对应出现明显脉冲变化,幅值迅速上升(如图 5a 和图 5c 所示)。突变之后残压为第 2 阶段,直至 SPD 损坏。值得关注的是,残压突变后,冲击 SPD 的 GPR 电压在缓慢下降的过程中,残压在较长时段内一直维持较高电压水平,这可能与氧化锌电阻片本身的特性有关。第 1 阶段残压持续时间为 18.9 ms,平均值为 660.1 V,虽然电位抬升电压较大,但流经 SPD 的电流非常小,经计算平均值仅为 1.8 A;第 2 阶段残压持续时间约 59.3 ms,平均值为 796.7 V,流经 SPD 电流突变后迅速升高,峰值达 392.7 A,波形呈单峰型缓慢下降,200 A 以上的持续时间达到 1 ms 左右,50 A 以上的持续时间达到 6.6 ms,平均值 19.7 A,明显大于第 1 阶段的

电流幅值, 占对应阶段触发闪电电流平均值 (294.0 A) 的 6.7%, 电量达 1.17 C。SPD 损坏时, 电流出现明显拐点, 之后仍有较弱的电流流经

SPD, 且其幅值大于第 1 阶段。

表 1 是初始长连续电流过程引起 GPR 冲击 SPD 的 4 个闪电过程, 表中给出对应闪电过程的电

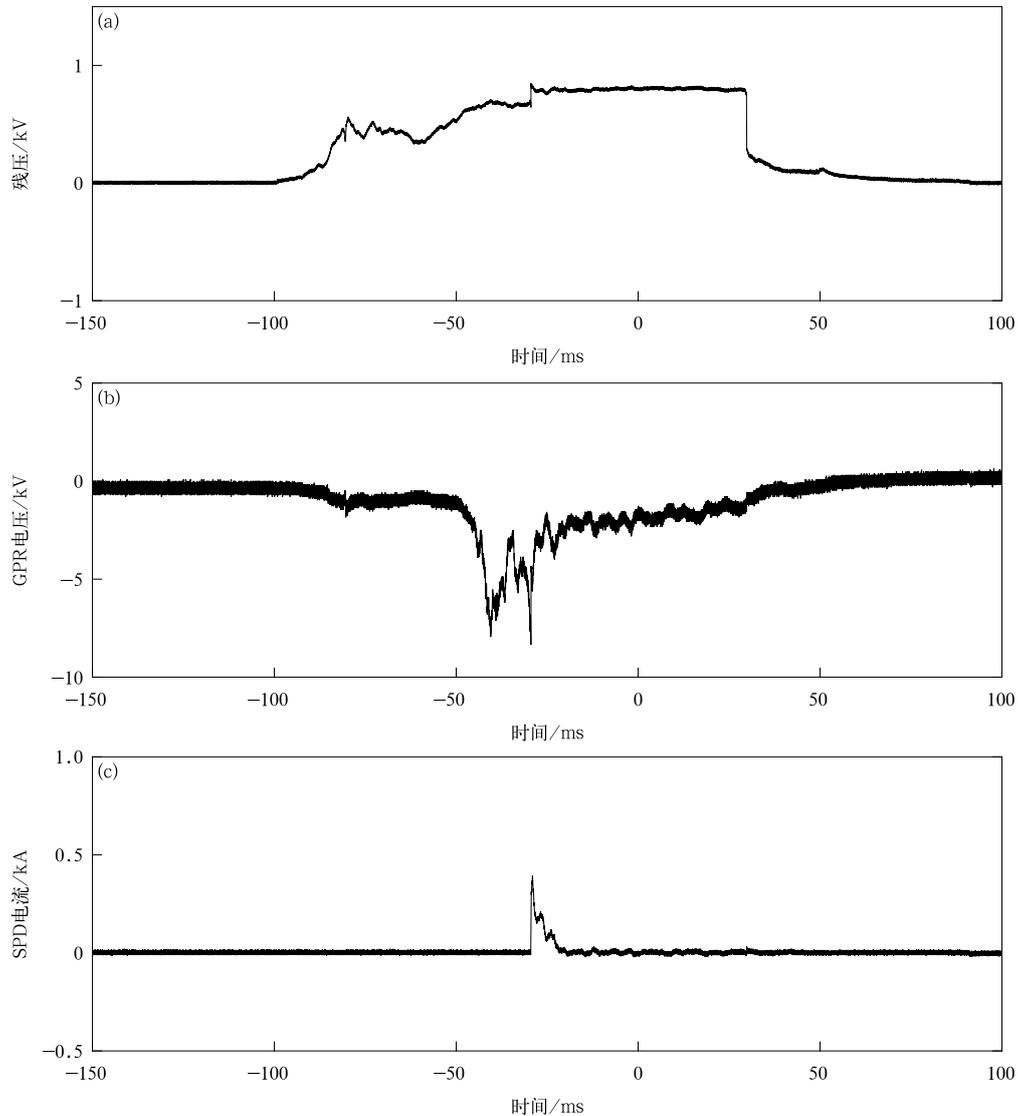


图 5 T0726 初始长连续电流对应的 SPD 残压(a)、地电位抬升电压(b)和 SPD 接地线电流(c)波形
Fig. 5 The waveform of SPD residual voltage(a), GPR voltage(b) and current flowing through SPD(c) due to the initial long continuous current of T0726

表 1 初始长连续电流过程引起 GPR 冲击 SPD 的闪电过程

Table 1 Triggered lightning processes of GPR impulse to SPD caused by initial long continuous current processes

触发闪电过程	回击次数及电流峰值	初始长连续电流特征	SPD 损坏时刻前的初始连续电流特征	SPD 标称放电电流/kA
T0626	无回击	长连续电流长达 480 ms, 2 kA 以上电流持续时间长达 1.3 ms(只有小量程数据)		20
T0702	1 次回击, 电流幅值为 19.1 kA	持续时间为 433.8 ms, 峰值电流为 718.5 A, 平均电流为 146.1 A, 中和电量为 63.4 C	持续时间为 149.2 ms, 期间平均电流为 173.8 A, 泄放电量为 25.9 C	20
T0725	4 次回击, 最大回击电流为 26.1 kA	持续时间为 313.6 ms, 峰值电流为 287.4 A, 平均电流为 106.8 A, 中和的电量为 33.5 C	初始连续电流期间未损坏, 第 1 次回击出现异常	20
T0726	4 次回击, 最大回击电流峰值大于 28.7 kA	持续时间为 183.3 ms, 峰值电流为 1079.2 A, 平均电流为 176.4 A, 中和的电量为 32.3 C	持续时间为 110.1 ms, 平均电流为 238.3 A, 泄放电量为 26.2 C	40

流峰值、回击数、闪电初始长连续电流的情况以及 SPD 损坏时刻之前初始连续电流的基本情况。T0725 过程 OB1 测量系统触发时间滞后导致仅测量到部分初始连续电流的数据,从残压的波形看,SPD 损坏发生在回击过程。

3 能量和电量

3.1 流经 SPD 的能量

从以上结果可以看到,地网注入的初始连续电流波形不同,冲击 SPD 的效应差别很大。有多个方面的因素影响 SPD 效应,除了初始电流的幅值、释放的电量等重要因素外,电流上升沿的快速变化以

及电量释放的缓慢程度等都有影响。由表 1 可见,T0725 初始电流阶段 SPD 没有损坏,可能是因为电流幅值比较小,但其释放电量并不小,甚至大于 T0702 过程的电量。而 T0702 和 T0726 SPD 损坏时,两者释放的电量差别不大,但前者造成 20 kA 的 SPD 损坏,后者造成 40 kA 的 SPD 损坏,起决定性作用的参数将从流经 SPD 的能量和触发闪电电量的变化曲线寻找。

将 SPD 两端的残压和流经 SPD 电流的乘积在时间上的积分称为流经 SPD 的能量,表 1 中的 4 个过程,初始连续电流过程只有 T0702 和 T0726 可以完整计算能量。图 6 为两者 SPD 损坏之前 0.5 ms 时间内能量值和时域内能量累积曲线。由能量累积

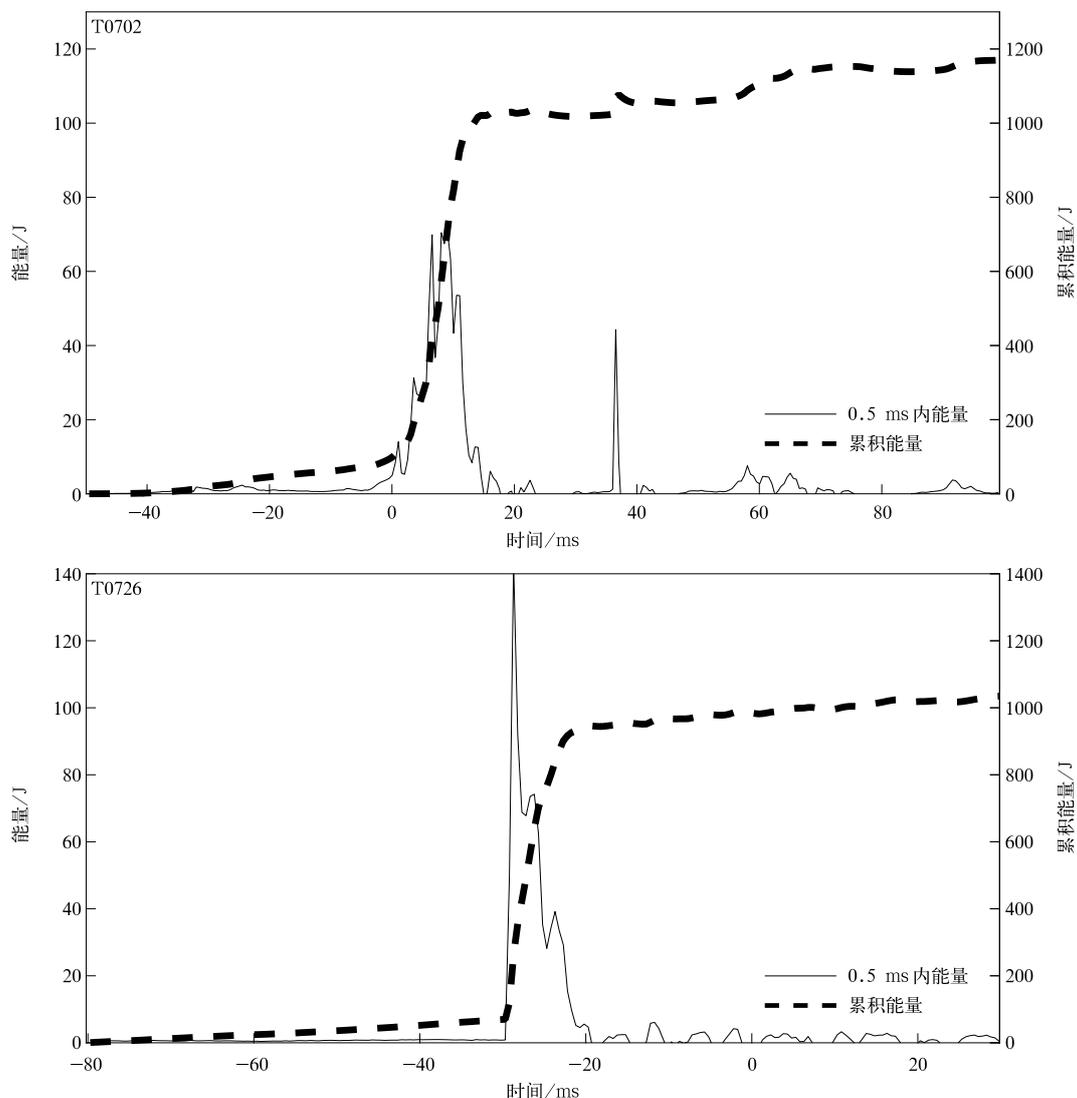


图 6 T0702 和 T0726 流经 SPD 0.5 ms 能量值和时域能量累积曲线

Fig. 6 The energy accumulated in 0.5 ms and time domain of current flowing through SPD during T0702 and T0726

曲线可知,能量累积存在相对较快上升的阶段,在其前后的阶段能量累积变化较缓慢,这是流经 SPD 电流的主要阶段,其主要特点是电流幅值较大,持续时间较长。由前述分析可知,能量贡献的主要阶段正是初始长连续电流过程中上升沿较为快速且电流幅值较大的阶段,从这个角度讲,或许这是影响 SPD 能量最关键的因子。T0702 过程在 SPD 损坏时,能量累积达到 1169.9 J, T0726 则为 1037.5 J,后者累积的能量虽小,但造成的是 40 kA SPD 损坏,这可能是因为后者冲击的能量比前者更集中,分析发现,后者快速上升至 1000 J 的时间约为 8 ms,而前者则为 14 ms 左右。由 0.5 ms 能量累积曲线同样可见,

T0702 最大值为 71.0 J,且在能量主上升阶段出现了较多振荡,而 T0726 过程对应 0.5 ms 能量的最大值为 143.1 J,在能量主上升阶段呈单脉冲特征,也就是说 T0726 过程,冲击 SPD 的能量更快速、更猛烈,而 T0702 相对较缓和。

3.2 注入地网的电量

T0725 由于触发阈值设置偏高,测量系统未能完整记录初始连续电流过程的数据,故其流经 SPD 的能量也无法计算,但可以从触发闪电电量的分布和累积解析不同波形的冲击效应,以下将初始电流过程 SPD 损坏的 T0702 和未损坏的 T0725 进行对比分析。由图7可知,T0702当闪电电流累积到25.1 C

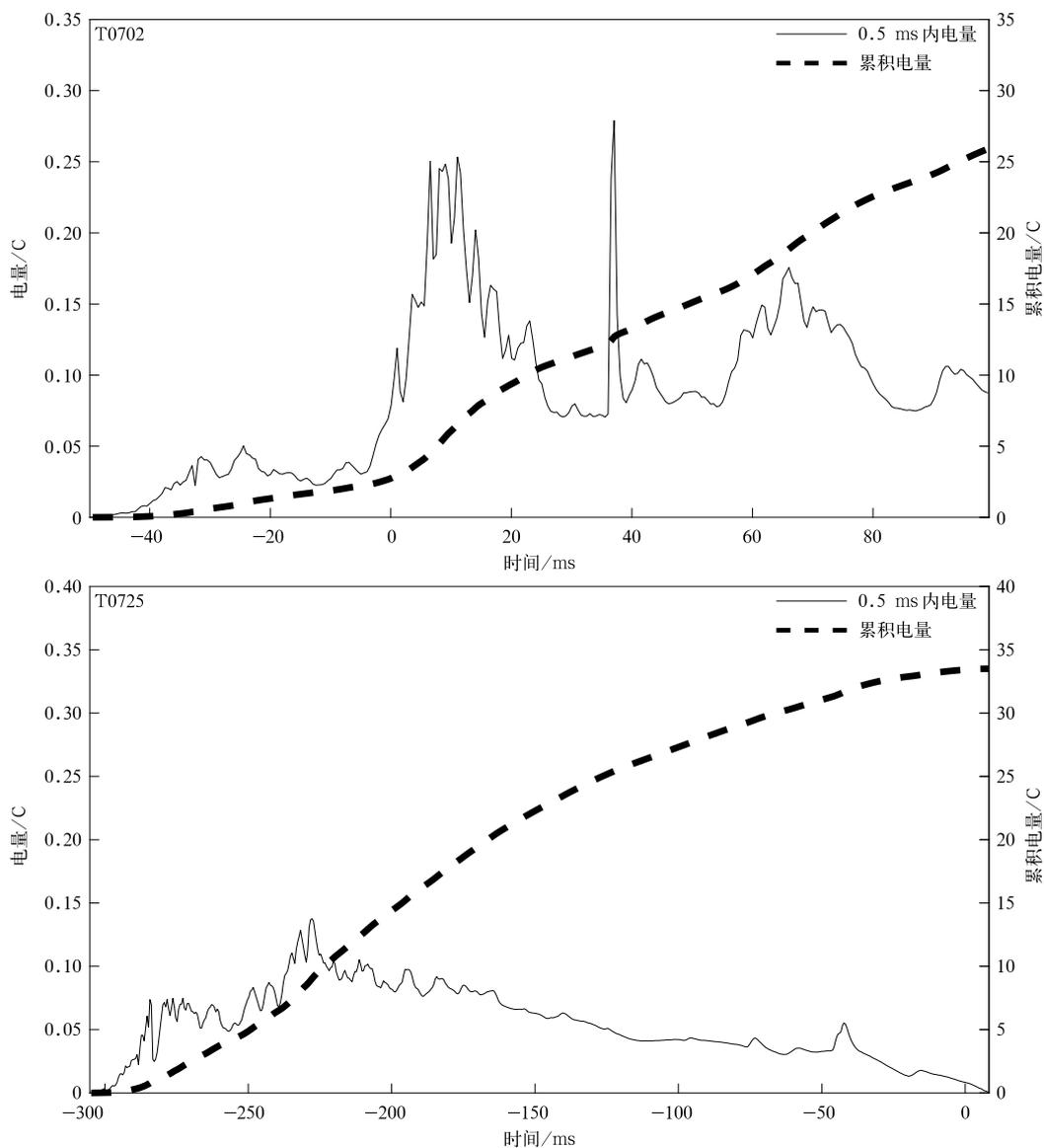


图7 T0702 和 T0725 触发闪电 0.5 ms 电量和时域电量累积曲线
Fig. 7 The quantity in 0.5 ms and time domain quantity accumulation curves of triggered lightning current during T0702 and T0725

时,SPD损坏,而 T0725 电量累积到 33.5 C 仍无损坏,对比可见,T0725 整个过程电量累积值虽然较高,但其电量释放的时间比 T0702 长,前者为 313.6 ms,而后者为 109.1 ms。另外,0.5 ms 内的电量累积值差别更大,T0702 过程在 0.1 C 线以上的持续时间很长,最大值可达 0.28 C,而 T0725 则小很多,0.1 C 线以上的点很少,最大值仅为 0.14 C,这表明 T0725 电量释放不集中,这也导致流经 SPD 的能量相对分散,最终造成两者冲击 SPD 完全不同的结果。

4 结论与讨论

经过对夏季观测试验的分析,主要得到如下结论:

1) 触发闪电注入地网后,地网 GPR 电压反击通过 SPD 接地线进入电源系统的能量较大,触发闪电的初始长连续电流和继后回击的共同作用易造成额定通流量的 SPD 损坏,而且仅有长连续电流过程,当流经 SPD 的能量累积达到一定程度也会损坏 SPD。

2) 波形不同的初始长连续电流,冲击 SPD 的效应存在很大差异。当长连续电流过程叠加上沿快速、较大电流幅值的 ICCP 时,流经 SPD 的能量迅速增加,这是长连续电流过程中 SPD 损坏的最关键因子。

3) 当初始长连续电流过程持续达到 149.2 ms,期间平均电流达 173.8 A,泄放电量量级为 25.9 C,流经 SPD 的能量达 1000 J 左右,可造成标称放电电流 20 kA 的 SPD 损坏;当初始长连续电流过程持续达到 110.1 ms,期间平均电流达 238.3 A,泄放电量量级为 26.2 C,流经 SPD 的能量达 1000 J 时,可造成标称放电电流 40 kA SPD 损坏。

文中对触发闪电注入地网初始连续电流阶段 GPR 冲击 SPD 进行了试验和分析,闪电过程类似于地闪回击间的连续电流过程以及高建筑物上行闪电的初始连续电流过程。对于 SPD 的冲击损坏,目前更多研究关注高压实验室的电流或电压脉冲,而由地网 GPR 冲击 SPD 的研究相对较少。从试验观测看,当触发闪电注入到地网时,除了少数几个过程(只有长连续电流且电流非常小的过程)外,大部分过程都可造成 20 kA SPD 的损坏,且从外观上看,损坏异常严重,外壳大多炸裂,内部也有明显穿孔,

表 1 中 4 个个例,T0626 过程造成 SPD 损坏相对较轻,其由单一的初始长连续电流过程引起,而 T0702 和 T0726 过程的 SPD 损坏严重,是由初始长连续电流和其后的回击过程共同作用的结果。SPD 的损坏是闪电放电过程中多个子过程共同作用的结果,因此,无法给出初始连续电流过程对应 SPD 损坏的细节特征。虽然低压 SPD 的相关标准并未规定诸如方波(长连续电流波)的测试,但电力系统交流无间隙金属氧化物避雷器有相关规定,从本文的试验看,测试很有必要。标称放电电流为 20 kA 的氧化锌 SPD 在实验室测试波形为波前上升时间 8 μ s,半峰宽度为 20 μ s,假设电流全部流经 SPD,其电量可达 367.7 mC,按 T0702 过程中主要阶段的平均残压为 813.8 V 计算,一次冲击流经 SPD 的总能量约 300 J;按上述标准波形 40 kA 计算,其电量为 694.6 mC,T0726 主要阶段平均残压 796.7 V,一次冲击过程流经 SPD 的能量约为 553 J。综合上述分析可见,T0702 和 T0726 过程 GPR 损坏 SPD 时,实测流经 SPD 的能量远大于高压测试 8/20 波形的能量值,因为连续电流的能量累积相对较缓慢,但能量不断累积,达到极限时,SPD 同样也会损坏,特别是在长时间连续电流过程上叠加上沿较快速的脉冲(ICCP)时,SPD 更易损坏,T0726 就属于这种情况。本文仅基于观测结果得出上述定性结论,关于初始连续电流过程叠加 ICCP 的定量结果有待进一步研究。

参考文献

- [1] Eda K. Destruction mechanism of ZnO varistors due to high currents. *J Appl Phys*, 1984, 56(10): 2948-2955.
- [2] Sakshaug E C, Burke J J, Kresge J S. Metal oxide arresters on distribution systems: Fundamental considerations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1989, 4(4): 2076-2089.
- [3] 何金良, 吴维韩, 沈力, 等. ZnO 阀片的冲击破坏机理. *中国电机工程学报*, 1993, 13(增刊 D): 34-38.
- [4] 瞿金炜, 戴明秋, 李锐海, 等. 配网线路避雷器阀片 90/200 μ s 冲击电流耐受特性试验. *南方电网技术*, 2015, 9(7): 46-51.
- [5] 吴姗姗, 吕伟涛, 齐奇, 等. 基于光学资料的广州塔附近下行地闪特征. *应用气象学报*, 2019, 30(2): 203-210.
- [6] Yang J, Qie X, Zhang G, et al. Characteristics of channel base currents and close magnetic fields in triggered flashes in SHATLE. *J Geophys Res*, 2010, 115(D23), DOI: 10.1029/2010jd014420.
- [7] 张骁, 张阳, 张义军, 等. NBE 和 IBP 始发的闪电初始特征. *应用气象学报*, 2018, 29(3): 364-373.
- [8] 姜睿娇, 董万胜, 刘恒毅, 等. 雷暴中双极性窄脉冲事件的位置

- 与辐射强度. 应用气象学报, 2018, 29(2): 177-187.
- [9] Rakov V A, Uman M A. Lightning: Physics and Effects. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 265-307.
- [10] Jiang R, Qie X, Yang J, et al. Characteristics of M-component in rocket-triggered lightning and a discussion on its mechanism. *Radio Science*, 2013, 48(5): 597-606.
- [11] 谢盟, 张阳, 张义军, 等. 两种类型 M 分量物理特征和机制对比. 应用气象学报, 2015, 26(4): 451-459.
- [12] Haryono T, Sirait K T, Tumiran T, et al. The damage of ZnO arrester block due to multiple impulse currents. *Telkonnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 2011, 9(1): 171-182.
- [13] 李鹏飞, 张春龙, 吕东波, 等. 多脉冲雷电冲击下金属氧化物的破坏形式. 高电压技术, 2017, 43(11): 3792-3799.
- [14] Chen S, Zhang Y, Chen C, et al. Influence of the ground potential rise on the residual voltage of low-voltage surge protective devices due to nearby lightning flashes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 31(2): 596-604.
- [15] 朱良, 陈绍东, 颜旭, 等. 基于触发闪电的共用地网雷电流分布观测及分析. 高电压技术, 2018(5): 1715-1722.
- [16] 张义军, 杨少杰, 吕伟涛, 等. 2006—2011 年广州人工触发闪电. 应用气象学报, 2012, 23(5): 513-522.
- [17] 钱勇, 张阳, 张义军, 等. 人工触发闪电先驱电流脉冲波形特征及模拟. 应用气象学报, 2016, 27(6): 716-724.
- [18] Mata C T, Rakov V A, Rambo K J, et al. Measurement of the division of lightning return stroke current among the multiple arresters and grounds of a power distribution line. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2003, 18(4): 1203-1208.
- [19] Zhang Y, Chen S, Zheng D, et al. Experiments on lightning protection for automatic weather stations using artificially triggered lightning. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2013, 8(4): 313-321.
- [20] 周方聪, 张义军, 吕伟涛, 等. 人工触发闪电连续电流过程与 M 分量特征. 应用气象学报, 2014, 25(3): 330-338.
- [21] Saba M M, Schumann C, Warner T A, et al. Upward lightning flashes characteristics from high-speed videos. *J Geophys Res Atmos*, 2016, 121(14): 8493-8505.
- [22] Yuan S, Jiang R, Qie X, et al. Characteristics of upward lightning on the Beijing 325 m meteorology tower and corresponding thunderstorm conditions. *J Geophys Res Atmos*, 2017, 122(22): 12093-12105.
- [23] 武斌, 吕伟涛, 齐奇, 等. 一次正地闪触发两个并发上行闪电的光电观测. 应用气象学报, 2019, 30(3): 257-266.
- [24] 陈绿文, 吕伟涛, 张义军, 等. 不同高度建筑物上的下行地闪回击特征. 应用气象学报, 2015, 26(3): 311-318.
- [25] DeCarlo B A, Rakov V A, Jerauld J E, et al. Distribution of currents in the lightning protective system of a residential building—Part I: Triggered-lightning experiments. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, 23(4): 2439-2446.
- [26] Birkel J, Barbosa C F. Modeling the Current Through the Power Conductors of an Installation Struck by Lightning // 2011 International Symposium on Lightning Protection. IEEE, 2011: 36-41.
- [27] Schoene J, Uman M A, Rakov V A, et al. Lightning currents flowing in the soil and entering a test power distribution line via its grounding. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009, 24(3): 1095-1103.
- [28] Chen S, Zhang Y, Zhou M, et al. Observation of residual voltage in low-voltage surge protective devices due to nearby M-components. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2018, 60(3): 776-784.

Ground Potential Rise and Surge Protective Device Damage Caused by Initial Long Continuous Current Process in Triggered Lightning

Chen Shaodong¹⁾ Zhang Yijun²⁾ Yan Xu¹⁾ Du Sai¹⁾ Lü Weitao³⁾ Zhang Yang³⁾

¹⁾ (*Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510080*)

²⁾ (*Department of Atmospheric and Oceanic Sciences & Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200438*)

³⁾ (*Laboratory of Lightning Physics and Protection Engineering/State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

Abstract

In the field of grounding on electronic and electrical systems, damage effects of ground potential rise on electronic equipments are of great importance. Based on triggered lightning technology, an observation experiment is carried out on impacts of the ground potential rise in grounding grid upon surge protective device (SPD), especially on damage effects of initial long continuous current process of triggered lightning on SPD. It's found that upon injection of triggered lightning into grounding grid, SPD damage of rated flow rate is likely to occur under combined effects of initial long continuous current process and subsequent return stroke of triggered lightning. When the energy flowing through SPD is accumulated to a given extent, initial long continuous current process alone can also cause SPD damage. The impact on SPD is closely related to different waveforms of initial long continuous current process. When initial long continuous current process superposes ICCP with current of faster rise time and higher amplitude, energy flowing through SPD will increase rapidly, which is the most critical factor causing SPD damage in long continuous current process. The analysis of two cases indicates that, when the duration of initial long continuous current process and average current reaches about 100 ms and 200 A, the magnitude of discharge is 25 C, and energy flowing through SPD is up to about 1000 J, it is apt to cause 20 kA nominal discharge current and even higher SPD damage. Two processes (T0702 and T0726) of SPD are damaged by initial long continuous current of triggered lightning, when the peak value of current flowing through ground wire is 396.5 A and 392.7 A, respectively, the average current of main stage before damage is 23.6 A and 19.7 A, accounting for 10.8% and 6.7% of the average value of trigger lightning current, and the duration of current flowing through SPD above 50 A is 9.2 ms and 6.6 ms, respectively. When SPD is damaged, there is a sudden change in the residual voltage at both ends of SPD, which is obviously different from the disappearance of normal SPD residual voltage.

Key words: triggered lightning; initial long continuous current; ground potential rise; surge protective device; damage