

智能建筑防雷电浪涌保护器的应用研究

柯善文^{1,2}, 陈 伟²

(1. 西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072; 2. 西安航空学院 电子工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要: 为提高雷击过电压出现时智能建筑用电设备的安全性, 本文根据行波理论确定了浪涌保护器的保护范围, 通过建立两级浪涌保护器集中参数的 π 型电路等效分布参数电路模型, 研究了保护级间的导通次序和配合机制, 并分析了负荷大小和线路长度等因素对有效保护的影响, 通过电磁暂态软件 ATP-EMTP 进行仿真, 验证了结果的正确性, 提出保护级间配合的最优距离范围。

关键词: 智能建筑; 浪涌保护器; 过电压保护; ATP-EMTP

中图分类号: TM 762

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)05-0757-07

Research on the application of the lightning-proof surge protector devices application in the intelligent building

KE Shanwen^{1,2}, CHEN Wei²

(1. School of automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. School of electronic engineering, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China)

Abstract: To improve the safety of electrical equipment in intelligent buildings when the lightning overvoltage occurs, this paper studies the protection range of the surge protector based on the traveling wave theory, and studies the interstage matching conduction sequence and coordination mechanism through the establishment of two levels of surge protector of lumped parameter equivalent distributed parameter circuit model with PI. It analyzes the load size and the line length on the impact of effective protection. The accuracy of the results was simulated and verified through the electromagnetic transient software ATP-EMTP. The optimal distance of interstage matching was put forward.

Key words: intelligent building; surge protector devices; over-voltage protection; ATP-EMTP

21 世纪, 人类全面步入信息化社会, 科技水平飞速进步, 内部含有大量的电子设备的智能建筑也随之兴起^[1-3], 智能建筑内部安装有多种自动化系统, 这些设备体积小, 工作电压低, 功耗小, 对线路中的浪涌过电压非常敏感。通常选择安装浪涌保护器(SPD, Surge Protective Device)的方法对用电设备进行保护^[4]。

雷电波在线路上传播的过程中, 根据行波理论分析波过程可知, 负荷和线路阻抗的大小会使波在线路上传播时发生折反射, 增大雷电流幅值的上升陡度。而 SPD 的有效保护范围是一定的, 一旦超出该范围, 则不能保证用电设备的用电安全, 此时需要选用多级 SPD 进行级间配合完成对用电设备的保护, 一般选用前一级 SPD 分流, 后一级 SPD 限压的方式进行^[5-6], 这些都与侵入的雷电流的幅值、线路长度、负荷特性有一定的关系,

不能随意选择。

文献[5-6, 11]对低压系统中 SPD 的防护距离问题进行了研究, 指出防护距离与 SPD 防护等级、设备的脉冲过电压、雷电流峰值和陡度等参数有关。文献[9]仿真研究了不同雷电电流波形对 SPD 配合方式的影响, 给出了传统的高-低配合方式适用于短波雷电流的防护, 而低-高配合方式适用于长波雷电流的防护, 但均没有涉及到 SPD 级间配合的机制。本文采用电磁暂态软件仿真 ATP, 建立直观模型, 选用 $8/20 \mu\text{s}$ 的雷电流波形^[8], 针对 SPD 的保护范围, 将雷电过电压的电压值上升沿近似看作一次函数, 分析雷电波在 SPD 和负荷间的传播过程。随后根据雷电波在两级 SPD 之间的传播, 分析不同幅值的雷电流对 SPD 正常工作的影响。最后根据多次仿真得到不同线路长度时两级 SPD 的分流大小, 以经济和安全为前提, 提出保

护级间配合的最优距离范围。

1 SPD 保护距离分析

因线路过长或负荷过小发生反射现象时, 负荷上的电压值通常会大于经过 SPD 限压后的残压值 U_p , 与 SPD 的保护水平有差异^[9]. 因此, SPD 的有效保护范围是一定的, 一旦超出该范围, 则不能保证用电设备的用电安全。

IEC61312-3 中给出的典型 SPD 保护电路^[7]如图 1 所示. 图中 Z_L 表示负荷, 即被保护设备与 SPD 并联, 线路中无其他元件. 由波的传输理论可知, SPD 和负荷之间用电缆连接, 会产生距离效应, 即 SPD 上的电压和负荷上的电压会有差别。

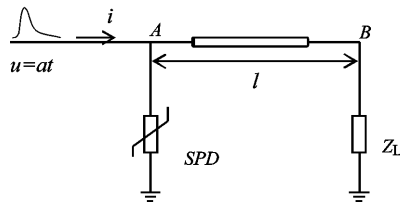


图 1 SPD 保护范围示意图

Fig. 1 SPD scope of protection schematic

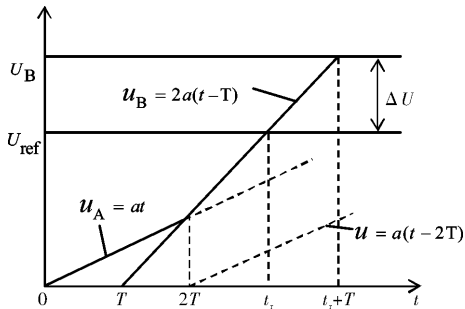


图 2 SPD 和负载端电压变化示意图

Fig. 2 SPD and load voltage variations schematic

图 2 中雷电波从 A 点出发时, 其电压值近似看作以 $u_A = at$ (a 表示雷电波上升沿陡度, 单位: $\text{kV}/\mu\text{s}$, $t < T_1$, T_1 为雷电过电压的电压上升时间) 的规律上升, 计时起点 $t=0$. 雷电波经过电缆, 用时 $t=T$ 后到达 B 点的负荷处, 根据行波理论, 若负荷的阻抗远大于线路上的波阻抗, 则雷电波在 B 点处发生全反射, 在 $t=2T$ 时刻, 反射波到达 A 点. 此时由于 SPD 还没有进行泄流时, 因此 A 点的电压如下:

$$u_A = at + a(t-2T) = 2a(t-T) \quad (1)$$

由式(1)可知, 此时雷电波因为反射波的叠加, 其上升沿陡度变为原来的 2 倍, 当 $t=t_r$ 时, A 点电压 u_A 达到 SPD 的参考电压 U_{ref} , 使 SPD 导通进行泄流, 之后短时间内 SPD 上的电压为其残

压值 U_p , 该残压值相当于时间 $t > t_r$ 时, 在 A 点有一个负电压波, 所以此时 A 点电压

$$\begin{aligned} u_A(t) &= 2a(t-T) - 2a(t-t_r) = \\ &= 2a(t_r - T) = U_p \end{aligned} \quad (2)$$

在 $t=T$ 时刻, 雷电波到达负荷 B 处, 并在 B 点全反射, 故此时 B 点电压为

$$u_B = 2a(t-T) \quad (3)$$

因为 A、B 两点之间用电缆连接, 有一定距离. 流经 A 点的雷电波经过时间 T 后才传播到 B 点, SPD 所产生的电压限制效果在 $t=t_r+T$ 时才会影响到负荷, 即被保护设备, 因此此时 $U_B = 2at_r$.

可以计算得到 A 点 SPD 和 B 点负荷之间的电压差为

$$\begin{aligned} \Delta U &= u_B - u_p = 2at_r - 2a(t_r - T) = \\ &= 2aT \end{aligned} \quad (4)$$

假设 A、B 之间电缆长度为 l , 单位长度电感为 L_0 , 单位长度电容为 C_0 , 电缆上阻抗 $Z = \sqrt{L_0/C_0}$, 电缆上波传播速度 $v = 1/\sqrt{L_0C_0}$. 可以得出雷电波从 A 点传播到达 B 点所用时间

$$T = l/v = l \sqrt{L_0C_0} \quad (5)$$

将式(5)代入(4)可得

$$\Delta U = 2al \sqrt{L_0C_0} \quad (6)$$

由式(6)可以看出, 在雷电波波形一定, 所选用电缆型号确定时, 被保护设备与 SPD 之间的电缆长度越长, 所形成的电压差 ΔU 越大。

2 SPD 保护距离仿真分析

低压配电线路一般较短, 满足雷电波波长 λ 远大于线路长度 l 的条件, 因此可以选择使用集中参数的 π 型电路等效分布参数电路进行研究和仿真. 使用 ATP-EMTP 软件, 建立仿真模型如图 3 所示。

选用截面积为 50 mm^2 的 YJV 型电缆作为连接电缆, $R_0 = 0.435 \Omega/\text{km}$, $L_0 = 0.251 \mu\text{H}/\text{m}$, $C_0 = 0.004187 \mu\text{F}/\text{m}$. 外加冲击雷电流波形为 8/20, 峰值 10 kV , SPD 保护水平 $U_p = 1.2 \text{ kV}$. 标准规定, 220/380 V 配电系统的最大耐压水平是 1.5 kV .

选用负荷为 50Ω 的电阻型负荷, 线路电缆长度为 20 m . 在未安装浪涌保护器时, 通过仿真可以得到负荷上的电压可以达到 400 kV , 远超线路

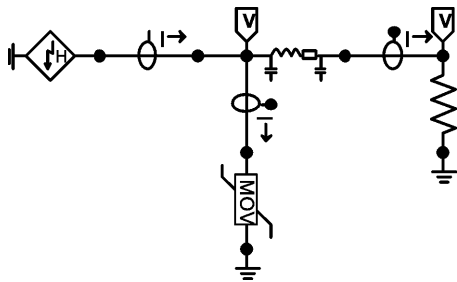


图 3 SPD 保护距离仿真模型

Fig. 3 Simulation model of the SPD protection distance

允许的过电压，极易发生事故，造成设备损坏。安装浪涌保护器后，因其具有泄流和限压作用，测得负荷上的电压峰值为 1.36 kV，小于最大耐压水平 1.5 kV，可以保证设备正常工作。

由前面的分析可知负荷大小和线路长度对 SPD 和负荷之间的电压差影响极大，为保证配电系统的正常运行，必须考虑 SPD 的有效保护距离。

表 1 为测得的几种负荷在不同距离下的电压最大值。

表 1 不同负荷电压最大值/kV

Tab. 1 Different load maximum voltage /kV

电缆长度/m	负载/ Ω		
	5	10	20
50	1.24	1.30	1.36
100	1.25	1.32	1.49
200	1.26	1.37	1.56

由仿真数据可以看出，电缆长度越长，负荷阻值越大，则负荷上的过电压最大值越大，SPD 的有效保护距离越短。当负荷阻值不同时，被保护负荷的冲击电压改变较小，说明 SPD 有比较好的过电压限制效果。

负荷为 50 Ω 、100 Ω 和 200 Ω 的情况下，仿真得到的负荷电压波形如图 4—图 6 所示（均以最大保护距离进行仿真），线路长度分别为 23 m、20 m 和 16 m。观察仿真得到的波形，可见，负荷上的过电压波形震荡幅度随负荷阻值变大，震荡时间也越长，SPD 保护范围也越小。

3 SPD 级间配合分析

单级 SPD 构成的保护电路只能对浪涌过电压形成一次抑制，对于耐压水平较低的设备来说还不能达到保护的目的。为了实现各保护等级内的设备安全运行，需要在各防雷保护区的交界处安装不同型号的 SPD 进一步抑制雷电过电压，实现对

各耐压水平用电设备的保护^[10]。

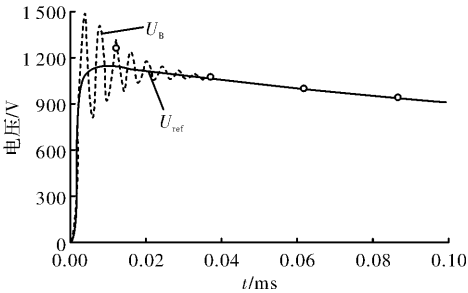


图 4 电压波形——50 Ω /23 m

Fig. 4 Voltage waveform—50 Ω /23 m

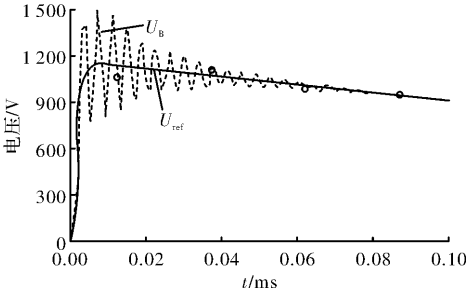


图 5 电压波形——100 Ω /20 m

Fig. 5 Voltage waveform—100 Ω /20 m

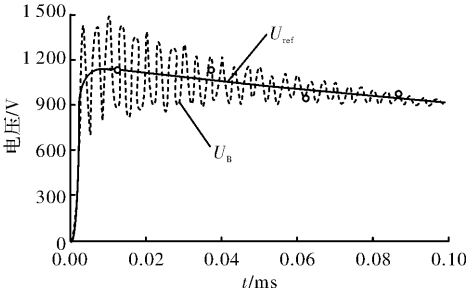


图 6 电压波形——200 Ω /16 m

Fig. 6 Voltage waveform—200 Ω /16 m

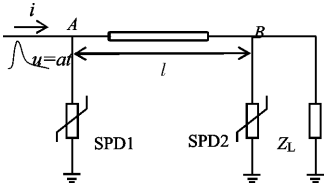


图 7 两级 SPD 配合接线图

Fig. 7 The wiring diagram of two SPD

使用两级限压型 SPD 对配电系统进行保护时，SPD1 要起到泄流的作用，SPD2 起到抑制过电压水平的作用，这时 SPD1 的参考电压应该适当高于 SPD2^[9]。SPD 级间配合的典型连接方式^[7]如图 7 所示，负荷用 Z_L 表示。

依旧假设雷电波在 $t = 0$ 时刻从 A 点，即 SPD1 出发，经过时间 T 到达 B 点，在 SPD1 导通前，A 点的电压

$$a_A = aT = al/v \tag{7}$$

雷电流到达 B 点时, 根据是否大于 SPD1 的启动电压 U_{ref1} 分以下两种情况:

(1) $u_A > U_{\text{ref1}}$. 此时在雷电波传播到 B 点前已经使 SPD1 导通并泄流. 此时可以根据下面的公式对 SPD1 是否先于 SPD2 导通进行判断.

如果雷电流的上升陡度 a 是已知的, 则由式(7)可以算出线路长度应满足如下条件:

$$l > U_{\text{ref1}} / (a \cdot \sqrt{L_0 C_0}) \quad (8)$$

式(8)可以看出, 电缆型号相同, $\sqrt{L_0 C_0}$ 保持不变, 知道雷电流上升陡度 a 的情况下, 表达式 $U_{\text{ref1}} / (a \cdot \sqrt{L_0 C_0})$ 是一个固定值, 所以线路长度 l 越长, 可促使 SPD1 比 SPD2 先导通. 同理可知若线路长度 l 已知, 则雷电流上升陡度越大, 同样可以使 SPD1 比 SPD2 先导通.

(2) $u_A < U_{\text{ref1}}$. 此时需要考虑到负荷对线路上雷电波的折射反射作用, 分以下两种情况分析:

① $Z_L = Z_c$. 如果负荷等于电缆的阻抗相同, 雷电波传播至 SPD2 之后全部经过折射传播至负荷 Z_L . 雷电波到达 B 点, SPD2 的电压要达到启动电压 U_{ref2} 所需要的时间为

$$t_2 = U_{\text{ref2}} \quad (9)$$

要满足 SPD1 先于 SPD2 动作, 需要满足

$$U_{\text{ref1}} < a(T + t_2) \quad (10)$$

$$U_{\text{ref1}} - U_{\text{ref2}} < aT = al \sqrt{L_0 C_0} \quad (11)$$

$$l > \frac{U_{\text{ref1}} - U_{\text{ref2}}}{a \sqrt{L_0 C_0}} \quad (12)$$

② $Z_L \neq Z_c$. 根据行波理论, 雷电波传播至 B 点, 因负荷阻抗不等于电缆阻抗, 所以会同时产生折反射. 发生折射时, 折射系数为

$$\alpha = \frac{2Z_L}{Z_L + Z_c} \quad (13)$$

SPD2 的电压要达到启动电压 U_{ref2} 所需时间为

$$t_3 = \frac{U_{\text{ref2}}}{a \cdot \alpha \cdot Z_c} = \frac{U_{\text{ref2}}}{a} \cdot \frac{Z_L + Z_c}{2Z_L Z_c} \quad (14)$$

此时, 要 SPD1 先于 SPD2 动作, 必须满足:

$$U_{\text{ref1}} < a(T + t_3) \quad (15)$$

$$U_{\text{ref1}} - \frac{1}{\alpha Z_c} U_{\text{ref2}} < aT = al \sqrt{L_0 C_0} \quad (16)$$

$$l > \frac{U_{\text{ref1}} - \frac{1}{\alpha Z_c} U_{\text{ref2}}}{a \sqrt{L_0 C_0}} \quad (17)$$

显然, 当电缆型号不变, 雷电波的幅值和上升陡度以及线路的长短都对 SPD 级间配合的导通次序和配合效果有一定程度的影响.

4 SPD 级间配合仿真分析

两级 SPD 配合的 ATP-EMTP 仿真电路如图 8 所示.

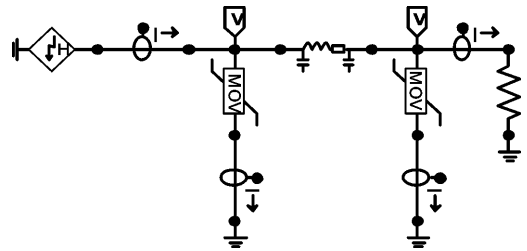


图8 两级 SPD 配合仿真电路

Fig. 8 Emulation Circuit with two SPD

在仿真中, 电缆选择 YJV 型电缆, 电缆截面积 50 mm^2 , 电缆的波阻抗 $Z_c = 7.74 \Omega$. 选用限压型 SPD, 启动电压分别为 $U_{\text{ref1}} = 510 \text{ V}$, $U_{\text{ref2}} = 260 \text{ V}$.

(1) 线路与雷电流幅值较小

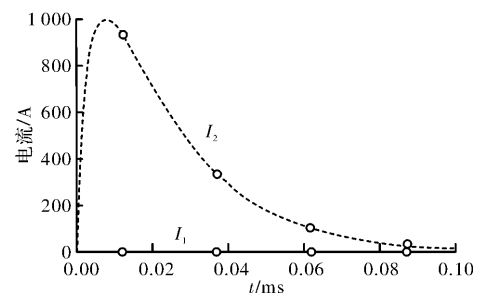
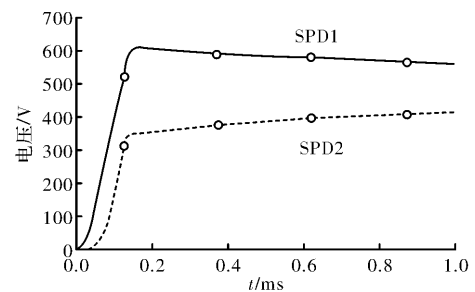


图9 两级 SPD 配合时电压电流波形

Fig. 9 Voltage and current waveforms in two SPD

cooperation

外加 1 kA 的 $8/20 \mu\text{s}$ 雷电流波形, 线路长度设置为 2 m , 负荷选用 $Z_L = 200 \Omega$ 的电阻型负荷. 仿真得到的波形如图 9 所示. 仿真得到 SPD2 的导通时间为 $0.13 \mu\text{s}$, SPD1 的导通时间为 $0.15 \mu\text{s}$. 下面根据推导的公式可以从理论上计算 SPD 的导通时间, 与仿真结果对比, 验证理论推导的合理性.

从图 9 上测得外加雷电流产生的过电压上升沿的陡度为 $a = 2760 \text{ V}/\mu\text{s}$, 根据式(14)可以算出 SPD2 的导通时间 $t_3 = 0.006 \mu\text{s}$, 雷电流从 SPD1

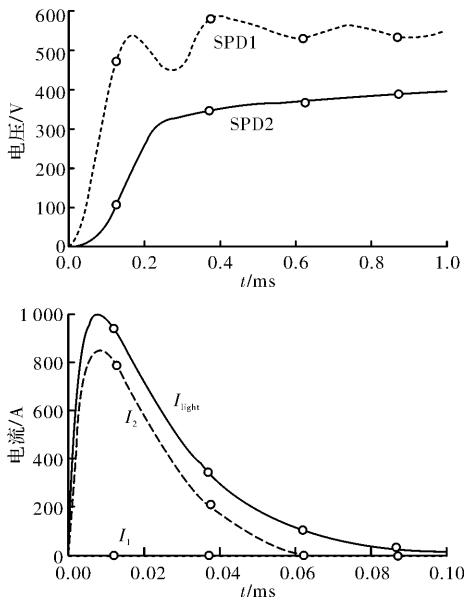


图10 负荷小于线路阻抗时的电压电流波形
Fig. 10 Voltage and current waveform when load less than Line impedance

传播到达 SPD2 的时间 μs , 此时电压还没有达到 SPD2 的启动电压, $t=2T$ 时, SPD2 才能导通, 因此 $t=2T+t_3=0.126\mu\text{s}$, 与仿真得到的 $0.13\mu\text{s}$ 基本相等, 而在此时, SPD1 上的电压为 539 V, 并没有导通。

观察 SPD 泄流情况, 可以发现雷电流的能量几乎全部由 SPD2 泄流, 而 SPD1 导通后几乎没有泄流, 相当于 SPD1 没有工作。此时虽然可以正常泄流, 降低配电系统中的浪涌, 但是容易使 SPD2 损坏, 也没有达到使用第二级浪涌保护器进一步对系统中电压进行限制的目的。仿真结果得到通过 SPD1 的分流量非常小, 放大后可以得到 SPD1 上通过的电流峰值为 21 A。

在相同情况下(雷电流 1 kA, $8/20\mu\text{s}$, $l=2\text{m}$), 负荷若小于线路阻抗(取 $Z_L=3$), 仿真得到的波形如图 10 所示。分析仿真结果, $t=0.169\mu\text{s}$ 时, SPD1 导通, 其电压为 538 V, SPD2 上的电压为 199 V。但由于选用的电缆自身具有的阻抗是大于负荷本身的, 在时刻, 负荷处 B 点的反射波到达 SPD1, 所以 U_{spd1} 小于启动电压 U_{ref1} , SPD1 不能正常工作。随着雷电流的增大, 在 $t=0.382\mu\text{s}$ 时, SPD1 又重新导通, 此时 SPD1 上的电压为 586 V, SPD2 上的电压为 348 V, SPD2 也是导通的, 所以可以近似看作两个 SPD 同时导通。

因为电缆长度比较短, 外加雷电流的幅值比较小, 电缆上电感形成的电压降 ΔU 和 SPD2 的钳压 U_p 之和也较小, 不足以使 SPD1 有效导通, 所以 SPD2 基本分流了全部的雷电流, SPD1 分流很

小, 其余的电流进入负荷, 极易造成用电设备损坏。

由此可见, 不论负荷的大小, 若线路长度和雷电流的幅值都比较小, SPD 之间不能实现正常的配合, 有很大的可能性不能保护用电设备。此时必须采用增加去耦元件的方法^[9,11-13]来完善 SPD 的级间配合。

(2) 线路与雷电流幅值较大

选用浪涌保护器的型号保持不变, 所使用的电缆型号参数也不改变。线路长度为 20 m, 外加雷电流幅值为 10 kA, 负荷分别为 200Ω 和 2Ω 。波形如图 11 所示。

图 11 中仿真所用负荷分别为 200Ω 和 2Ω 时, SPD 上的电压和电流的波形, 其中 U_2 表示负荷为 200Ω 时 SPD2 的电压波形, U'_2 表示负荷为 2Ω 时 SPD2 的电压波形, 在两种负荷情况下, SPD1 上的电压基本相同, 用 U_1 表示。 I_1 和 I_2 分别表示负荷为 200Ω 时 SPD1 和 SPD2 上的分流情况, I'_1 和 I'_2 分别表示负荷为 2Ω 时 SPD1 和 SPD2 上的分流情况。

对比图 9、图 10 和图 11, 如果电缆长度和雷电流幅值都比较大, 可以认为负荷大小几乎不会影响两级 SPD 的导通顺序。分析图 11 可知, 线路长度相同, 雷电流幅值相同时, 负荷大小对两级 SPD 配合时导通泄流情况基本没有影响。

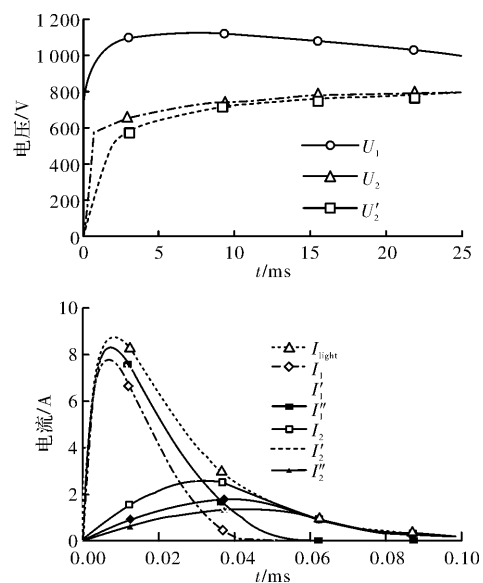


图11 不同负荷情况下 SPD 上的电压电流波形
Fig. 11 Voltage and current waveforms on the SPD under different load

5 线路长度对 SPD 保护的影响

研究级间配合时, 发现线路长度对两级 SPD

分流有影响, 未进一步确定两级 SPD 之间的合理距离, 线路长度分别选择 10 m、20 m、30 m, 负荷为 200 Ω . 各 SPD 的限压和分流如图 12 所示.

图中 U_1 、 U'_1 、 U''_1 和 U_2 、 U'_2 、 U''_2 分别表示三种线路长度 (依次为 10 m、20 m、30 m) 情况下 SPD1 和 SPD2 上的电压大小; I_{light} 表示外加雷电流的波形, I_1 、 I'_1 、 I''_1 和 I_2 、 I'_2 、 I''_2 分别表示三种不同的线路长度情况下 SPD1 和 SPD2 上的分流情况.

分析可知, 级间距离和负荷大小均满足使 SPD1 可以优先导通进行泄流的条件下, SPD1 上的电压 U_1 在刚导通时相差不大, 随着级间距离增大, U_1 减小, 级间距离越小, 减小的幅度越大; 其分流的大小随着线路长度的增加而增加. SPD1 导通后泄放绝大部分雷电流, SPD2 起到对雷电产生的过电压进一步限制的效果, SPD2 的分流大小随着线路长度的增加而减小.

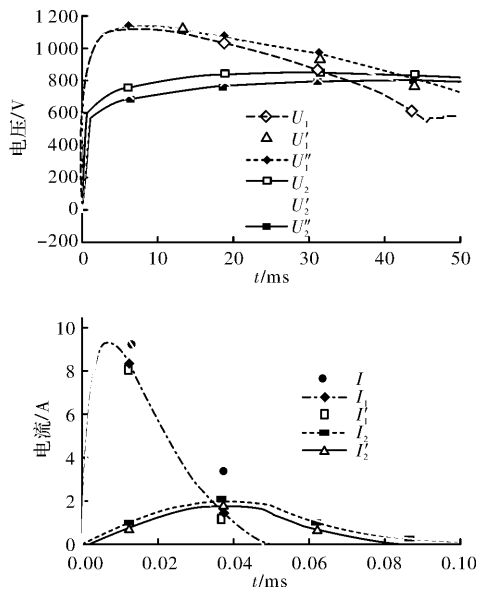


图 12 不同线路长度 SPD 配合时电压电流波形

Fig. 12 Different line length SPD cooperation voltage and current waveforms

为进一步确定两级浪涌保护器之间线路的合理距离, 再取不同的线路长度仿真 (1 m 增加至 90 m, 负荷 200 Ω), 得到数据并绘制其变化曲线如图 13.

在仿真中, SPD 级间线路长度从 1 m 增加至 90 m, 第二级浪涌保护器上的泄流大小呈现出下降的趋势, 下降程度随电缆长度增加而减小.

根据以上的分析, 如果电缆太短, SPD2 会泄放大部分电流, 远远大于第一级, 容易造成 SPD2 损坏; 如果电缆太长, 大部分浪涌电流则会通过前一级 SPD, 第二级几乎没有发挥其作用. 因此,

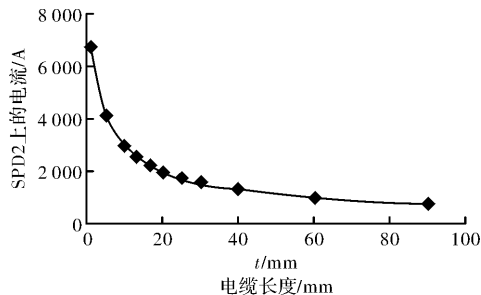


图 13 SPD2 电流随级间距离变化曲线

Fig. 13 The current curve on SPD2 follow with inter-stage distance

两级浪涌保护器在进行级联配合, 并且级间没有加装去耦元件的情况下, 电缆长度的最小值应大于 5 m, 最大值在 30 m 内选取是比较合适的.

6 结论

(1) 线路越长, 末端形成的压降越大, 使用浪涌保护器保护用电设备时, 应保证被保护设备在 SPD 的有效保护范围内. 负荷越大, 有效保护范围越小. 由于雷电波的波长远远大于线路长度, 因此在仿真中使用集中参数的 π 型电路代替分布参数的线路模型, 验证了理论分析的正确性.

(2) 利用行波理论分析了负荷与线路波阻抗大小关系不同时 SPD 的导通次序, 推导出满足 SPD1 先导通时的线路长度应该达到的条件.

(3) 两级 SPD 的分流情况和线路长度密切相关, 第二级 SPD 上通过的电流的大小和其下降的幅度都随级间距离的增加而减小, 经仿真得到的数据可以看出, 要兼顾成本和效能, 两 SPD 的级间距离在 5~30 m 内为最佳距离.

参考文献 References

- [1] 徐兴声. 智能建筑的发展与可持续发展方向[J]. 建筑学报, 1997(6):20-22.
XU XINGSHENG. Development and sustainable development of intelligent architecture [J]. Journal of Architecture, 1997 (6) : 20-22.
- [2] 董海岩, 李曼. 智能建筑的过电压保护[J]. 电力建设, 2004, 25(12):59-61.
DONG Haiyan, LI Man. The overpressure protection of intelligent building [J]. Power Construction, 2004, 25 (12) : 59-61.
- [3] 沈建忠. 智能建筑配电系统的防雷电过电压保护[J]. 华东电力, 2005, 33(7):139-139.
SHEN Jianzhong. Lightning protection and overvoltage protection of intelligent building power distribution system [J]. East China Power, 2005, 33 (7): 139-139.

(下转第 770 页)

- [9] 俞东伟. 城市建筑能源需求预测模型研究[D]. 上海: 同济大学, 2013: 72-104.
YU Dongwei. Study on Forecast Model of Urban Building Energy Demand [D]. Shanghai: Tongji University, 2013: 72-104
- [10] 陶川, 韩杰, 欧阳磊鑫, 等. 基于贝叶斯模型的区域建筑冷/热负荷预测方法研究[C]//中国建筑学会建筑热动力分会学术交流大会论文集. 重庆: 中国建筑学会, 2015.
TAO Chuan, HAN Jie, OUYANG Lei Xin, et al. Application and study of regional building cooling and heating load forecasting model based on Bayesian Theory[C]//China Architecture Society Building Thermal Energy Branch Academic Exchange Conference. Chongqing: The Architectural Society of China, 2015.
- [11] 刘军. 科学计算中的蒙特卡罗策略[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 2-15.
LIU Jun. Monte Carlo strategies in scientific computing [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009: 2-15.
- [12] JACOB D, BURHENNE S, FLORITA A R, et al. Optimizing building energy simulation models in the face of uncertainty[J]. IBPSA-USA Journal, 2010, 4 (1): 118-125.
- [13] SORATANA K, MARRIOTT J. Increasing innovation in home energy efficiency: Monte Carlo simulation of potential improvements [J]. Energy and Buildings, 2010, 42(6): 828-833.
- [14] HAARHOFF J, MATHEWS E H. A Monte Carlo method for thermal building simulation [J]. Energy and Buildings, 2006, 38(12): 1395-1399.
- [15] SORATANA K, MARRIOTT J. Increasing innovation in home energy efficiency: Monte Carlo simulation of potential improvements[J]. Energy & Buildings, 2010, 42(6): 828-833.
- [16] HASSAN A E, BEKHIT H M, CHAPMAN J B. Using Markov Chain Monte Carlo to quantify parameter uncertainty and its effect on predictions of a groundwater flow model[J]. Environmental Modelling & Software, 2009, 24(6): 749-763.
- [17] ZHAO F, MARTINEZ-MOYANO I J, AUGENBROE G. Agent-based modeling of commercial building stocks for policy support[C]//Proceedings of Building Simulation 2011; 12th Conference of International Building Performance Simulation Association. Sydney: IBPSA, 2011: 2385-2392.
- [18] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 303-314.
LU Yaoqing. Practical heating and air conditioning design manual. [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008: 303-314.
- [19] 赵荣义. 简明空调设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 26-61.
ZHAO Rongyi. Concise Handbook of air conditioning system design [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998: 26-61.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准: JGJ 75-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Residential building energy saving standards in hot summer and warm winter area; JGJ 75-2012[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.
- [21] 中国建筑科学研究院. 公共建筑节能设计标准: GB50189-2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
China Academy of Building Research. Design standard for energy efficiency of public buildings; GB50189-2015[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015.

(编辑 桂智刚)

(上接第 762 页)

- [4] 中华人民共和国建设行业标准. 建筑物防雷设计规范: GB50057-94[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
Construction industry standard of the People's Republic of China. Design code for protection of structures against lightning: GB50057-94[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2000.
- [5] LI M, YUAN J, ZHAO Z. Lowvoltage SPD coordination analysis[C]// Lightning (APL), 2011 7th Asia-Pacific International Conference on. Yew york: IEEE, 2011: 913-916.
- [6] FIAMINGO F, MARZINOTTO M, MAZZETTI C, et al. Evaluation of SPD protection distance in low-voltage systems[J]. Journal of Electrostatics, 2007, 65(5/6): 363-370.
- [7] Protection against lightning electromagnetic impulse-Part 3: Requirements of surge protective devices (SPD): IEC61312-3[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2000.
- [8] 王玮菲, 仇一凡, 冯世涛, 等. 雷电流特性及其波形分析[J]. 黑龙江电力, 2010, 32(6): 404-407.
WANG Weifei, QIU Yifan, FENG Shitao, et al. The characteristics of lightning current and its waveform analysis [J]. Heilongjiang Electric Power, 2010, 32 (6): 404-407.
- [9] 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.
- [10] WANG Xigui. The Standby Protection of SPD in the Field of Low Voltage Power System [J]. World of Power Supply, 2007, (8): 37-39.
- [11] 潘家利, 周茂华. 低压配电系统浪涌保护器及雷电浪涌防护[J]. 广西气象, 2002, 23(2): 61-63.
PAN Jiali, ZHOU Maohua. High voltage distribution system surge protector and lightning surge protection [J]. Guangxi Meteorological, 2002, 23 (2): 61-63.
- [12] 中国航空工业规划设计研究院. 工业与民用配电设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
China aviation industry planning and design institute. Manual of industry and civil distribution [M]. Beijing: China Power Press, 2005.
- [13] 李庆君, 刘晓东, 马云海, 等. 低压配电系统中多级电涌保护器的能量配合[J]. 内蒙古气象, 2006(4): 56-57.
LI Qingjun, LIU Xiaodong, MA Yunhai, et al. The energy of multistage surge protector in low voltage distribution system [J]. Inner Mongolia Meteorological, 2006 (4): 56-57.
- [14] LI X, YANG Z, TANG H. Studying of energy coordination on transparent theory [C]// International Conference on Information Science and Technology. Nanjing: IEEE, 2011: 947-952.

(编辑 沈波)