

一次多回击自然闪电引发的 输电线路感应过电压特征分析

王孝波¹, 陈绍东², 张义军³, 黄智慧², 蔡力⁴

(1. 广州市气象局, 广东省 广州市 510060; 2. 广东省防雷中心, 广东省 广州市 510600;
3. 中国气象科学研究院, 北京市 海淀区 100081; 4. 武汉大学
高电压与绝缘技术研究所, 湖北省 武汉市 430072)

Analysis on Characteristics of Induced Over-Voltage in Transmission Line Caused by Natural Lightning With Multi Return Strokes

WANG Xiaobo¹, CHEN Shaodong², ZHANG Yijun³, HUANG Zhihui², CAI Li⁴

(1. Guangzhou Meteorological Bureau, Guangzhou 510060, Guangdong Province, China;
2. Guangdong Lightning Protection Center, Guangzhou 510600, Guangdong Province, China;
3. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Haidian District, Beijing 100081, China;
4. High Voltage and Insulation Research Institute, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China)

ABSTRACT: The experimental investigation on over-voltage protection for outdoor low-voltage overhead transmission lines is carried out. Based on a typical natural lightning with multi return strokes and combining with lightning location data, the values of over-voltages at entrance terminals for housings and those at front-side of collector, which locate at different positions of transmission lines and the residual voltage characteristics of surge protective devices (SPD) located at collector front-side as well as the relation between over-voltages of L-lines at entrance terminals for housings and return stroke current of lightning are analyzed and discussed. Analysis results show that close range lightning can lead to induced over-voltage with amplitude of several kilovolts on low-voltage overhead transmission lines and the duration of this over-voltage is about 1.0 ms in average; after the action of SPDs installed at the front-side of collector the over-voltage waveforms at farther entrance terminals for housings will be influenced, and the duration of residual voltage after the action of SPD is about 218 μ s in average, which is longer than the duration from standard 8/20 μ s test waveform; and there is good linear fitting relation between induced over-voltages at entrance terminals for housings and the ratio of return stroke currents to return stroke distances.

KEY WORDS: natural lightning; multi return strokes; induced over-voltage; transmission line; linear fitting

摘要: 针对野外低压架空输电线路开展了过电压防护试验研究。通过一次典型的多回击自然闪电引起的过电压并结合闪电定位资料,对输电线路不同位置的入户端及采集器前端的过电压大小、采集器前端电涌保护器(surge protective device, SPD)残压特性及入户端L线过电压和闪电回击电流之间的关系进行了分析和探讨。通过分析发现:近距离的闪电能在架空输电电路上产生几kV的感应过电压,过电压持续时间平均约1.0ms,采集器前端安装SPD动作后,较远的入户端过电压波形也会受其影响;采集器前端SPD动作残压持续时间平均约218 μ s,比标准8/20 μ s冲击波试验持续时间长;入户端感应过电压、回击电流与距离有很好的线性拟合关系。

关键词: 自然闪电;多回击;感应过电压;输电线路;线性拟合

0 引言

雷电过电压是引起架空线路故障的主要原因,不仅直击雷引起过电压,雷击导线附近时也产生过电压,称之为感应过电压。感应过电压对低压输配电线路的危害极大,有研究表明^[1-3]低压输配电线路由雷击引起闪络或故障的主要因素不是直击雷而是感应过电压,感应过电压导致的故障率超过90%。对这些系统进行有效的防护需要了解雷电在输配电线路上产生的过电压特征。文献[4]对雷电产生的过电压问题进行了概念性、较全面的论述;文献[5]分析了击中高塔的雷电在附近导线上产生的

过电压；国外利用人工引发雷电技术也对输电线路附近的过电压特征进行了研究^[6-8]。国内关于输电线路感应过电压的研究较多的是利用数值模拟进行的^[9-11]。由此可见，从实验角度对自然闪电产生感应过电压的观测和研究仍然较少。有了闪电定位系统的资料，了解闪电发生的大概位置和电流强度，为研究自然闪电引起输电线路的感应过电压特征提供了一定的参考依据^[12-13]。

1 试验布置及测量仪器

输电线路感应过电压测试布局见图 1，输电线路由架空线和穿管埋地 2 个部分组成，架空线路由火线(L 线)和零线(N 线)2 相组成，通过木杆支撑，离供电变压器距离约 1 200 m，架空线到达入户端后穿管埋地 52 m 后给自动气象站采集器供电，架空线是试验场本身的 220 V 农用输配电线路，线路弯曲但总体方向由南向北。

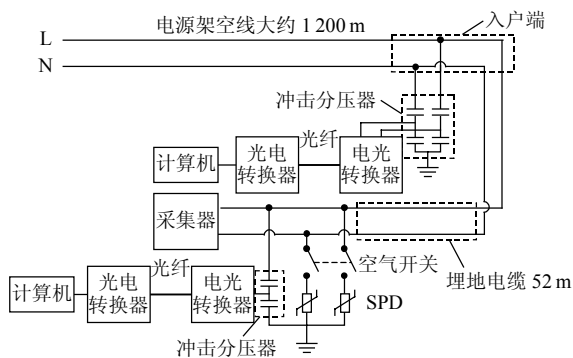


图 1 电源线路感应过电压测试布局

Fig. 1 The layout of induced over-voltage test for the power system

为了测量邻近闪电(包括人工引雷和自然闪电)在电源线路上耦合产生的感应过电压，分别在入户端 L 线、N 线和采集器前端 L 线安装了冲击分压器。分压器为阻容式，一端接 L 线或 N 线、一端接地。分压器分压比分别为 205.4、204.9 和 203.0。感应过电压的测量信号由高压隔离光纤数据采集系统进行采集和记录，采样率为 5 M/s，采样长度为 0.8 s。为了研究残压和感应过电压之间的关系，在采集器前端安装了电涌保护器(surge protective device, SPD)，如图 1 所示，SPD 标称放电电流为 20 kA，电压保护水平 $U_p \leq 1.75$ kV。所有测量设备及系统都经过现场的测试和标定。

2 输电线路感应过电压

2.1 感应过电压波形

2008 年 8 月 12 日 16:56:58 在测量系统附近发

生了一次多回击的自然闪电(以下称 N080812)，测量系统记录了这次过程入户端 L、N 线及采集器前端 L 线的感应过电压，由于采集器前端加装了 SPD，所以其前端测量的过电压当超过 SPD 压敏电压时就表现为残压。根据电场变化及过电压测量数据发现这次闪电共有 11 次回击过程，如图 2 所示。

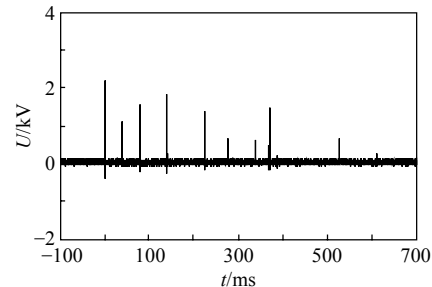


图 2 闪电 N080812 引发的入户端 L 线感应过电压波形

Fig. 2 Over-voltage waveform induced by lightning N080812 on L-line in home-side

闪电 N080812 引发的不同线路不同回击过电压波形如图 3 所示，入户端 L 线和 N 线感应过电压波形一致，只是峰值略有差别。在采集器前端由于加装了 SPD，当过电压超过压敏电压时表现出残压，如图 3(c)所示；而当过电压没有超过压敏电压时，其电压波形与入户端一致，只是峰值略有减小，如图 3(f)所示。分析入户端 11 次回击引发的感应过电压，大致可以分成 3 种类型：第 1 种类型是首次回击，是过电压峰值较高，持续时间较长的波形，如图 3(a)、(b)所示；第 2 种类型是感应过电压较大，超过 SPD 压敏电压，但持续时间相对首次回击较短的波形，如回击 2、3、4、5 和 8，如图 3(d)、(e)所示；第 3 种类型就是过电压没有超过压敏电压，持续时间最短的波形，如回击 6、7、9、10、11，如图 3(g)、(h)所示。

2.2 入户端 L 线感应过电压波形特征

由于 SPD 的影响，架空线入户端 L 线感应过电压波形类似残压，特别是残压对应时间内的波形与自然闪电感应过电压的波形区别较大。图 4 是第 6 次回击过电压波形放大图，与文献[7]测到的感应过电压波形相似，由于其过电压较小未受 SPD 的影响，文中选取其作为入户端感应过电压的典型例子分析其特征。另外，根据对没有加装 SPD 线路感应过电压波形的统计也发现，90%以上自然闪电的继后回击波形与图 4 一致。分析后发现典型继后回击引起的感应过电压持续时间约 80 μ s，半峰宽度约 50 μ s，波头时间 T_1 及波尾时间 T_2 ^[14]分别为 20 和 52 μ s，波头时间较波尾时间小，前者是后者的 1/3~

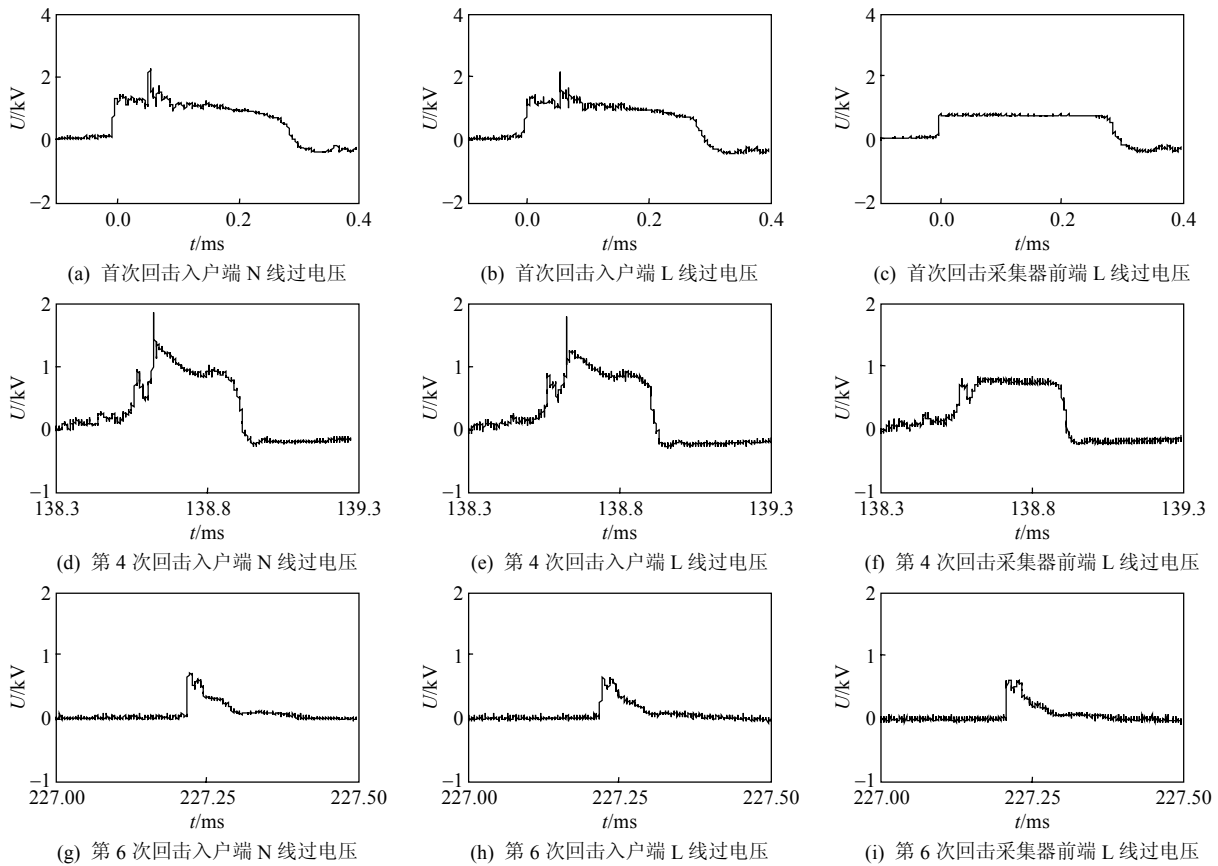


图3 闪电 N080812 不同回击的感应过电压波形

Fig. 3 Induced over-voltage waveform of different return strokes of lightning N080812

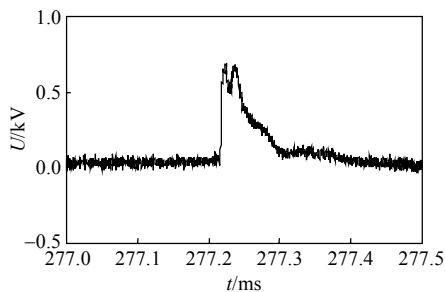


图4 N080812 第6次回击感应过电压波形

Fig. 4 Amplified induced over-voltage waveform of the sixth return stroke of lightning N080812

1/2。根据其他自然闪电的统计,首次回击感应过电压的持续时间比继后回击要大,其过电压振荡成份丰富,其他特征较为类似。由图4还可见,感应过电压上升过程中会出现初始峰值,之后达到次峰值。初始峰值上升时间约5 μs,其与次峰值间隔约12 μs。

2.3 入户端 L、N 线感应过电压

由图3可见,架空线路 L、N 线感应过电压波形一致,其峰值如表1所示,感应过电压幅值也基本相等,大部分回击(10/11)N 线过电压要比 L 线的略高,L、N 线架设高度基本一致,N 线过电压偏高可能与其在变压器端接地有关。另外,入户端感应过电压持续时间范围为0.2~1.8 ms,平均1.0 ms。

表1 架空线路入户端 L、N 线感应过电压峰值和过电压持续时间

Tab. 1 The peak and duration of induced over-voltage of L&N line at the home-side on overhead transmission line

回击/次	L 线过电压峰值/V	N 线过电压峰值/V	T/ms
1	2 176.4	2 291.1	1.25
2	1 113.3	1 140.6	0.95
3	1 554.5	1 630.8	1.50
4	1 815.3	1 870.9	1.80
5	1 384.0	1 440.7	1.50
6	692.0	740.4	0.20
7	621.8	660.3	0.50
8	1 504.4	1 580.8	1.20
9	230.6	250.1	0.20
10	641.9	620.3	1.20
11	240.7	260.1	0.20

2.4 采集器前端 L 线感应过电压

图5为 N080812 采集器前端 L 线 6 次回击对应残压波形。由于 SPD 的存在,采集器前端感应过电压是典型的 SPD 残压波形。表2是 11 次回击对应的入户端 L 线过电压峰值(U_{L1})、采集器前端 L 线过电压峰值(U_{L2})及采集器前端残压持续时间(T_r)。

由图5和表2可见,采集器前端第1、2、3、4、5、8 次回击对应的感应过电压是典型的残压波形,残压峰值范围为 832.6~882.2 V,平均 862.4 V。第6、7、9、10、11 次回击由于感应过电压偏小,

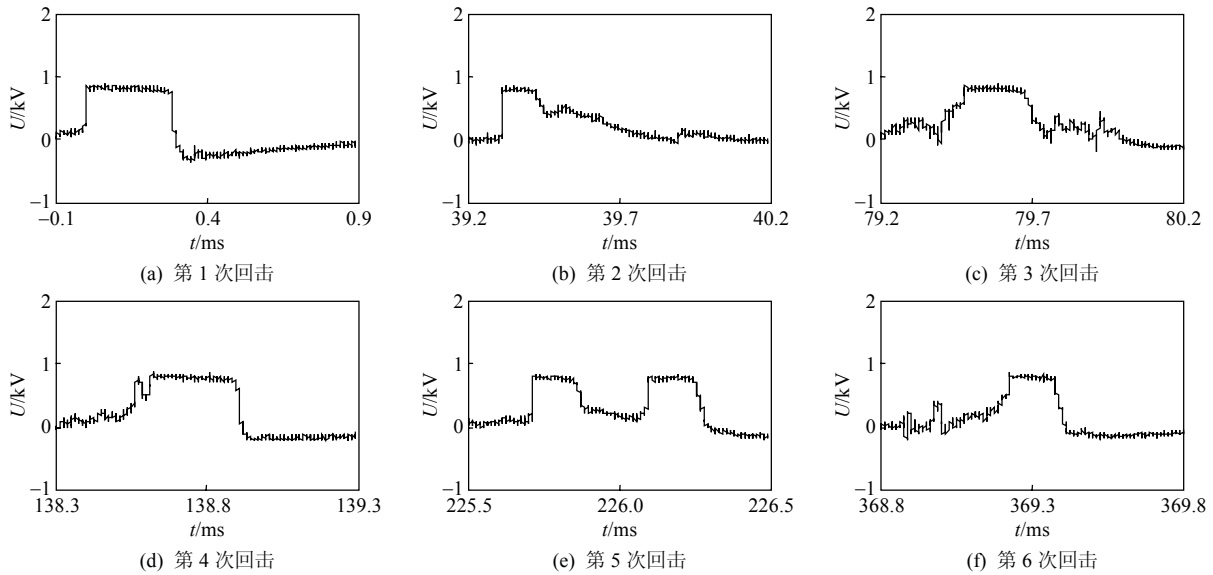


图 5 N080812 采集器前端 L 线 6 次回击对应残压波形

Fig. 5 L-line residual voltage waveform of six strokes in front of collector

表 2 入户端、采集器前端 L 线过电压峰值及采集器前端残压持续时间

Tab. 2 The residual voltage duration at collector front-side and the peak of induced over-voltage of L line at the home-side and collector front-side

回击/次	U_{L1}/V	U_{L2}/V	$T_r/\mu s$
1	2176.4	872.3	277
2	1113.3	832.6	121
3	1554.5	872.3	195
4	1815.3	882.2	263
5	1384.0	842.5	145/158
6	692.0	642.5	—
7	621.8	594.7	—
8	1504.4	872.3	151
9	230.6	218.1	—
10	641.9	614.6	—
11	240.7	228.0	—

未能达到 SPD 的动作电压,但其过电压值比入户端 L 线峰值小,这是由于入户端至采集器前端线路穿管埋地后对过电压的削弱作用而引起,后者对前者过电压的减小率为 4.4%~7.2%。由表 2 可知首次回击残压持续时间最长为 277 μs ,其余几次残压的持续时间在 120~270 μs 之间,比 SPD 冲击试验(标准冲击波形 8/20 μs)残压持续时间长^[15]。

3 过电压与闪电电流的相关性

3.1 闪电定位系统定位结果

根据广东电力部门闪电定位系统的资料,N080812 的电流及落雷位置(经纬度)如表 3 所示。根据感应过电压回击间隔及闪电定位结果的时间间隔可以发现,N080812 的 11 次回击除了最弱的第 9、11 次回击外,其余 9 次回击全部有定位结果且落雷位置都在同一点,距离输电线路约 3 km。由定位的电流结果可以看出 9 次回击电流变化范围

表 3 闪电 N080812 定位系统资料

Tab. 3 Data of lightning N080812 from lightning location system

时刻	时间/ms	电流/kA	经度/(°)	纬度/(°)
16:56:58	194.2780	-50.4	113.618614	23.655277
16:56:58	233.5863	-20.6	113.618614	23.655277
16:56:58	273.7686	-36.2	113.618614	23.655277
16:56:58	332.9017	-44.2	113.618614	23.655277
16:56:58	4199.9710	-35.4	113.618614	23.655277
16:56:58	4714.9600	-8.5	113.618614	23.655277
16:56:58	5318.1280	-6.9	113.618614	23.655277
16:56:58	5635.2480	-37	113.618614	23.655277
16:56:58	7226.1950	-7.7	113.618614	23.655277

-6.9~50.4 kA。其中电流幅值小于 10 kA 的第 6、7、10 次回击产生的过电压较小,未使采集器前端的 SPD 动作。

3.2 入户端 L 线过电压与闪电电流峰值之间的相关关系

输电线路由于雷电引起的感应电压的计算分为 2 步: 1) 利用回击模式计算雷电周围的电磁场; 2) 利用耦合模式计算电场磁在线路上耦合产生的感应电压。最常用的多根水平导线感应电压耦合模式的计算方程为^[16]

$$\frac{\partial U}{\partial x} + L \frac{\partial I}{\partial t} + RI = -\frac{\partial}{\partial t} \int_0^h B_y dz \quad (1)$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} + C \frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_0^h E_U dz \quad (2)$$

式中: L 、 C 、 R 分别为导线的电感、电容和阻抗; U 和 I 为导线的感应电压和电流; B_y 和 E_U 为导线周围的水平磁场和垂直电场。除去外部激励的电磁场源,该方程就是传统的传输线电报方程。当考虑地面上单根导线感应电压的耦合时,上述方程就更为

简化了^[17-18]。

文献[19]基于电报方程和回击模型发展了输电线路感应过电压的模型,无线长水平输电线路中心点感应过电压方程为

$$U_{\max} = \frac{30I_{\max}h}{d} \left[1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{v}{c} \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2/2}} \right] \quad (3)$$

式中: I_{\max} 为闪电回击电流峰值; h 为输电线路的高度; d 为回击点离输电线的距离; v 为回击速度; c 为光速。

式(3)提供了估算感应过电压峰值的方法,一般 v/c 取 0.4,文中输电线路高 2 m,对应电流和距离值代入式(3)计算得到输电线路感应过电压峰值列于表 4。由表可以发现文献[19]中的 Rusck 理论估算值要比实际的观测值小,当电流较大时估算值比较接近于实测值,前者约为后者的 3/5 左右,当电流较小时误差较大,但估算值的量级是一致的。

表 4 输电线路感应过电压 Rusck 估算值与实测值的比较
Tab. 4 The comparison of Rusck estimates and the measured values of induced over-voltage on transmission line

回击/次	电流/kA	Rusck 计算结果/V	观测值/V
1	50.6	1 310.4	2 176.4
2	20.6	533.5	1 113.3
3	36.2	937.5	1 554.5
4	44.2	1 144.7	1 815.3
5	35.4	916.8	1 384.0
6	8.5	220.1	692.0
7	6.9	178.7	621.8
8	37.0	958.2	1 504.4
10	7.7	199.4	641.9

由于 Rusck 理论估算公式只考虑了回击速度及线路高度等参数,而对线路本身的长度及线路两端的接地等情况在公式中并没有体现,过电压耦合计算较为复杂,与 I/d 成简单的比例关系肯定存在不合理之处。闪电 N080812 的电流与入户端 L 线感应过电压峰值之间存在着较好的线性拟合关系,而不是简单的正、反比例关系,两者最小二乘法拟合曲线如图 6 所示。由图可知,感应过电压与回击电流

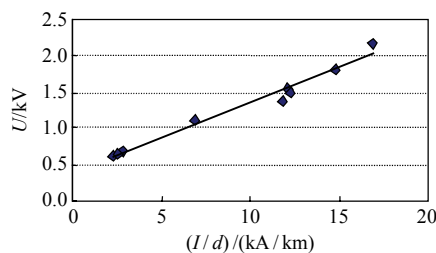


图 6 自然闪电(N080812)9 次回击入户端感应过电压峰值与 I/d 的线性拟合

Fig. 6 Linear fitting between the peak of induced over-voltage and I/d at home-side

和距离的比值有很好线性拟合关系,拟合公式的相关系数达到 0.977,拟合直线的点基本在同一条直线上。

4 结论

1) 近距离的闪电能在架空输电线路上产生几 kV 的感应过电压,过电压持续时间平均约 1.0 ms,采集器前端安装 SPD 动作后,入户端的过电压波形也会受其影响。

2) 输电线路穿管埋地 52 m 后,采集器前端线路过电压比入户端的要小,减小百分率范围为 4.4%~7.2%。

3) 近距离自然闪电引发线路 SPD 动作残压持续时间平均约 218 μ s,比标准 8/20 μ s 冲击波试验持续时间要长。

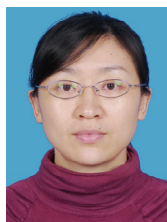
4) 入户端感应过电压与回击电流和距离的比值有很好的线性拟合关系,采集器前端残压的持续时间也与电流大小有一定的正比例关系。

本文分析的闪电是 2008 年观测到的自然闪电中的一个典型的个例,其他闪电也有类似的特性,通过本文的分析对架空线路感应过电压的波形、大小以及线性拟合公式在实际雷电防护应用中具有一定的参考和指导作用。

参考文献

- [1] Chisholm W, Cress A, Polak J. Lightning-caused distribution outages [C]//Transmission and Distribution Conference and Exposition. Atlanta, USA: IEEE, 2001: 2502-2507.
- [2] Matsuo N M, Zanetta L C. Frequency of occurrence of lightning overvoltages on distribution lines[C]//Eletricity Distribution 14th International Conference and Exhibition. Birmingham, UK: IEEE, 1997: 1-5.
- [3] 文习山,彭向阳,解广润,等. 架空配电线路感应雷过电压的数值计算[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(4): 299-301.
Wen Xishan, Peng Xiangyang, Xie Guangrun, et al. Numerical calculation of lightning induced voltages on overhead distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(4): 299-301(in Chinese).
- [4] Nucci C A, Michel F R, Ianoz C, et al. Lightning-induced voltages on overhead lines[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1993, 35(1): 75-86.
- [5] Michishita K, Ishii M, Asakawa A, et al. Voltage induced on a test distribution line by negative winter lightning strokes to a tall structure[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2003, 45(1): 135-140.
- [6] Marcos Rubinstein, Uman M A, Pedro J, et al. Measurements of the voltage induced on an overhead power line 20 m from triggered lightning[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1994, 36(2): 134-140.
- [7] Barker P P, Short T A, Eybert Berard A R, et al. Induced voltage measurements on an experimental distribution line during nearby

- rocket triggered lightning flashes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996(11): 980-995.
- [8] 陈绍东, 张义军, 杨少杰, 等. 人工触发闪电引发的低电压电源系统过电压特征[J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 2944-2952.
Chen Shaodong, Zhang Yijun, Yang Shaojie, et al. Characteristics analysis on the induced overvoltage generated by triggered lightning in the electronic equipment power system[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 2944-2952 (in Chinese).
- [9] 杨静, 邴秀书, 王建国, 等. 雷电在水平导体中产生感应电压的观测及数值模拟研究[J]. 物理学报, 2008, 57(3): 1968-1975.
Yang Jing, Qie Xiushu, Wang Jianguo, et al. Observation of the lightning-induced voltage in the horizontal conductor and its simulation[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(3): 1968-1975(in Chinese).
- [10] 文武, 阮江军, 陈允平, 等. 架空传输线在间接雷击作用下负载浪涌的分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 116-120.
Wen Wu, Ruan Jiangjun, Chen Yunping, et al. Surge analysis on load of transmission line under indirect lightning strike[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 116-120(in Chinese).
- [11] 何平, 蓝磊, 文习山, 等. 关于架空线路感应过电压的计算问题[J]. 高电压技术, 1999, 25(2): 65-73.
He Ping, Lan Lei, Wen Xishan, et al. The problem in the calculation of induced voltages on overhead distribution lines[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(2): 65-73(in Chinese).
- [12] 陈家宏, 童雪芳, 谷山强, 等. 雷电定位系统测量的雷电幅值分布特征[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1893-1898.
Chen Jiahong, Tong Xuefang, Gu Shanqiang, et al. Distribution characteristics of lightning current magnitude measured by lightning location system[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(9): 1893-1898(in Chinese).
- [13] 陈绿文, 张义军, 吕伟涛, 等. 闪电定位资料与人工引雷观测结果的对比分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 1896-1902.
Chen Lüwen, Zhang Yijun, Lü Weitao, et al. Comparative analysis between LLS and observation of artificial-triggered lightning[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(8): 1896-1902(in Chinese).
- [14] 陈绍东, 王孝波, 李斌, 等. 标准雷电波频谱分析及其应用[J]. 气象, 2006, 32(10): 11-19.
Chen Shaodong, Wang Xiaobo, Li Bin, et al. Frequency spectrum of standard lightning currents and its application[J]. Meteorological Monthly, 2006, 32(10): 11-19(in Chinese).
- [15] 卢振亚, 杨凤金, 江涛, 等. ZnO 压敏元件雷电流冲击试验残压波形分析[J]. 电子元件与材料, 2004, 23(4): 29-35.
Lu Zhenya, Yang Fengjin, Jiang Tao, et al. The residual voltage waveform of ZnO varistors subject to a 8/20 μ s surge current test[J]. Electronic Components and Materials, 2004, 23(4): 29-35(in Chinese).
- [16] Master M J, Uman M A. Lightning induced voltages on power lines: theory [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984, 13(9): 2502-2518.
- [17] Agrawal A K, Price H J, Gurbaxani S H. Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1980, 22(2): 119-129.
- [18] Baba Y, Rakov V A. Voltages induced on an overhead wire by lightning strikes to a nearby tall grounded object[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2006(48): 212-224.
- [19] Golde R H, Rusck S. Lightning, vol.2: lightning protection[M]. London: London Academic Press, 1977: 747-771.



王孝波

收稿日期: 2010-04-02。

作者简介:

王孝波(1977), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为雷电防护及雷击风险评估, E-mail: wxb-1977@163.com;

陈绍东(1977), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为雷电防护与大气电气(人工引雷);

张义军(1963), 男, 博士, 研究员, 研究方向为雷电物理和防护。

(编辑 张磊)