

# 输电线路雷击概率及影响因素研究

李瑞芳, 吴广宁, 马御堂, 甘立勇  
(西南交通大学, 四川 成都 610031)

**摘要:**雷击概率的研究对于有效的防雷、减小雷灾造成的危害有着非常重要的意义。首先分析了雷击的基本物理过程, 根据雷击路径与场强最大方向一致的原理, 假定场强最大方向为雷击概率较大的方向。在此基础上建立了雷击过程中先导放电阶段上下行先导电场分布的物理模型。分别研究了输电线路高度、所带电压极性、雷击角度几方面的因素对于雷击概率的影响, 并得出以上几种因素对雷击概率影响的变化规律。对输电线路防雷工程有一定指导作用。

**关键词:**雷击概率; 电压极性; 雷击角度

**Abstract:** Research of lightning stroke probability is very important to effective protection against lightning and decreasing the disaster caused by the lightning. Basic physical process is analyzed firstly. Let it be supposed that the direction of the largest electric field is also the direction of the largest lightning stroke probability according to the principle that both the lightning path and the largest electric field are in the same direction. The physical model of leader discharge process on lightning paths is established based on the above-mentioned theory. The effects of the height of transmission lines, voltage polarity and lightning stroke angle on lightning stroke probability are researched respectively and the conclusion is obtained, which are useful to guide the protection project against lightning for transmission lines.

**Key words:** lightning stroke probability; voltage polarity; lightning stroke angle

**中图分类号:** TM862 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)02-0018-03

## 0 引言

雷电是大自然中最宏伟壮观的气体放电现象, 对人类赖以生存的自然资源和人类创造的物质文明构成巨大的威胁, 如森林火灾有 50% 以上是由雷电引起的<sup>[1]</sup>。随着现代化进程的加快, 特别是信息产业的迅猛发展, 自动控制、通讯和计算机等微电子设备在各行各业得到日益广泛的应用。雷电更加严重地对电力、广播电视、航空航天等行业产生危害。

国内外对雷电展开了大量的研究, 主要是包括研究本身雷击通道的物理过程以及雷击概率受相关因素的影响等两个方面。研究雷击的概率是采取适当防雷措施的基础。在此方面国内做了一部分研究工作。湖南大学徐勇等研究了大气条件对空气间隙放电特性的影响<sup>[2]</sup>; 武汉高压研究所钟连宏等研究了土壤电阻率对火花放电过程的影响<sup>[3]</sup>; 广西大学王巨丰等研究了放电通道场强对放电方向的影响以及接地金属体高度对雷击概率的影响<sup>[4, 5]</sup>; 国内外对于输电线路雷击跳闸本身研究也非常成熟, 包括用规程

法、电气几何模型法、先导法<sup>[6, 7]</sup>, 对于绕击的研究和用规程法、PSCAD 等电磁暂态仿真软件对反击的研究。但是国内外尚未从电场角度研究输电线路的雷击概率。下面从影响输电线路雷击概率的一些因素, 包括线路高度、电压极性、雷击角度等方面展开研究, 为输电线路雷击的研究打下了一定基础。

## 1 模型介绍

### 1.1 雷击的物理过程分析

当下行先导下落的过程中, 地面物体的表面场强不断增长<sup>[6]</sup>。当地面某目的物表面场强达到上行先导起始场强时, 地面物体开始产生迎面上行先导, 称此时下行先导的位置为一级定位点。此后, 随着下行先导的下落, 可能有更多的地面目的物产生迎面先导。击中点的确定取决于下行先导和上行先导的相对传播和最后跃变过程, 最先与下行先导达到最后跃变的上行先导将成为击中点。成为击中点的物体也可能不产生迎面先导, 当下行先导的流注抵达该目的物, 并且其间的平均场强超过击穿临界值时, 击穿也

会发生。这里称发生最后跃变前的下行先导位置为二级定位点,简称定位点。根据雷击路径方向与场强最大方向一致的原理<sup>[4,5]</sup>,定位点的路径主要取决于场强的大小,因此这里所做的工作都假定场强大的物体更容易引雷。

### 1.2 模型的建立

文中模型的建立主要是模拟各种因素对雷击概率的影响。根据前面的雷击过程分析,雷击在二级定位点的时候发生跃变,参考文献[9]把最后跃变部分的下行先导用一个圆棒来等效,被雷击物体同样用圆棒来表示。闪击距离认为在 5~60 m 之间<sup>[10]</sup>,雷电放电的临界场强在 2 500~3 000 kV/m<sup>[11]</sup>,因此最后跃变部分时下行先导与被击物体之间的电位在 10 000 kV 左右。文中研究的是尚未形成主放电前不同因素的上行先导对上行先导的吸引作用,因此文中下行先导的电压取值 9 000 kV。

## 2 不同因素对雷击概率影响的仿真

### 2.1 高度变化对雷击概率的影响研究

图 1 为模拟输电线路高度变化对电场强度影响的示意图。图 1 中中间白色矩形部分为圆棒,表示最后跃变部分的下行先导。从该仿真图便可以看到,水平位置高的输电线(1号输电线)表面场强明显大于位置相对较低的输电线(2号输电线)。保持 2 号输电线路的高度 20 m 不变,改变 1 号线路的高度,图 2 和图 3 分别为随着 1 号线路高度增加时,1 号线路表面场强和 2 号线路表面场强的变化情况。

从图 2、图 3 中看到:当 1 号输电线高度大于 20,

即 1 号输电线高于 2 号输电线时,1 号输电线顶部场强大于 2 号输电线,这是因为 1 号输电线高于 2 号输电线,因此对 2 号输电线有一定屏蔽作用,2 号输电线被保护,被雷击的概率比 1 号输电线小。当 1、2 号输电线高度相等时,场强相同,互相都无屏蔽作用。当 1 号输电线垂直高度小于 2 号输电线,即 1 号输电线低于 2 号输电线时,同样 2 号输电线对 1 号输电线起到屏蔽作用,1 号输电线被雷击概率减小。从两条曲线中还可以看出,随着高度的增加,1 号输电线表面的场强增加很快,2 号输电线的场强随着 1 号输电线场强的增加而减小,但减小的趋势较为缓慢。分析认为:1 号输电线的高度本身在不断变化,高度对场强大小又有着直接的影响,因此 1 号输电线的表面场强变化较快,2 号输电线本身的高度不变,之所以场强被削弱是因为 1 号输电线对表面雷击方向的吸引能力的增强间接削弱了 2 号输电线表面的场强,因此 2 号输电线表面的场强变化较慢。

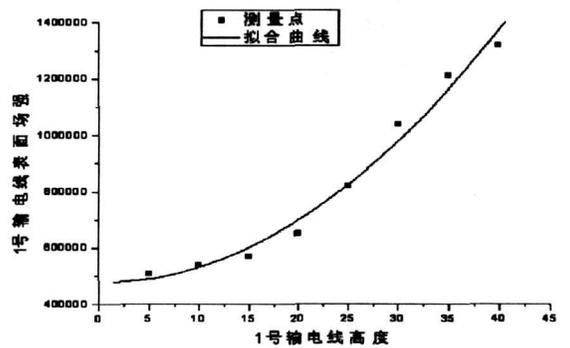


图 2 1 号线路表面场强变化情况

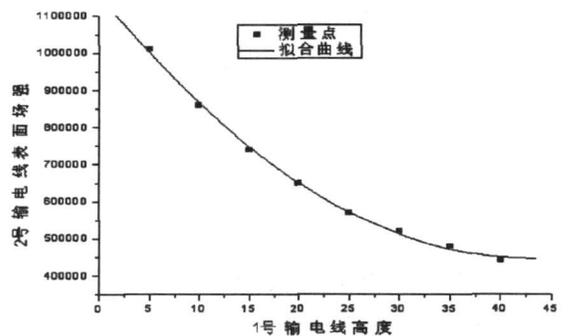


图 3 2 号线路表面场强变化情况

### 2.2 输电线路电压极性对雷击概率的影响研究

本文研究了随着电压等级的变化正负极性对输电线路表面场强的影响。从图 4 可以看出,当输电线路负载电压较小,即电压小于或等于 10 kV 的时候,负载电压极性对输电线表面电场强度几乎没什么影响,这时电压极性对雷击概率的影响可忽略。随着负

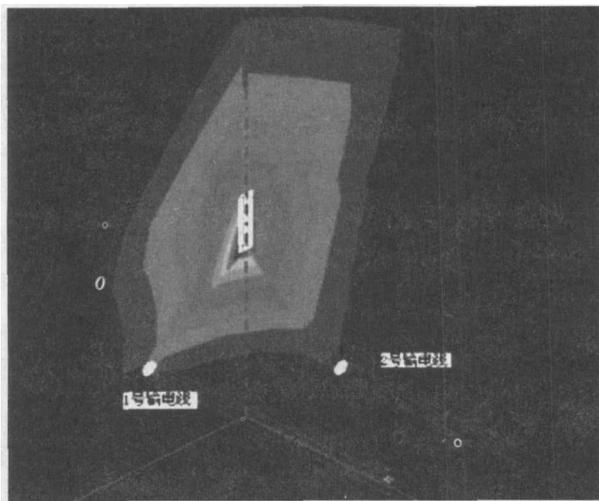


图 1 高度变化对雷击概率影响的电场分布图

载电压的逐渐增大,当电压大于或等于 220 kV 时候,同一电压等级正负极性对输电线表面电场强度的影响逐渐增大,从图 4 中还可以看出,负载电压为正极性的输电线路表面场强明显大于负载为负极性的输电线。原因很简单,多数情况下引发雷击的带电云层所带电荷为负极性,由于电荷的同性相斥,异性相吸,因此正极性线路表面场强大于负极性线路。这使得高电压输电线路在运输电压等级相同时,负载电压为正极性的情况下更容易遭受雷击。尤其是当电压等级达到 1 200 kV 及以上时,这种情况更容易发生。因此在实际应用中,高电压输电线路负载电压极性对雷击概率的影响应当充分考虑。

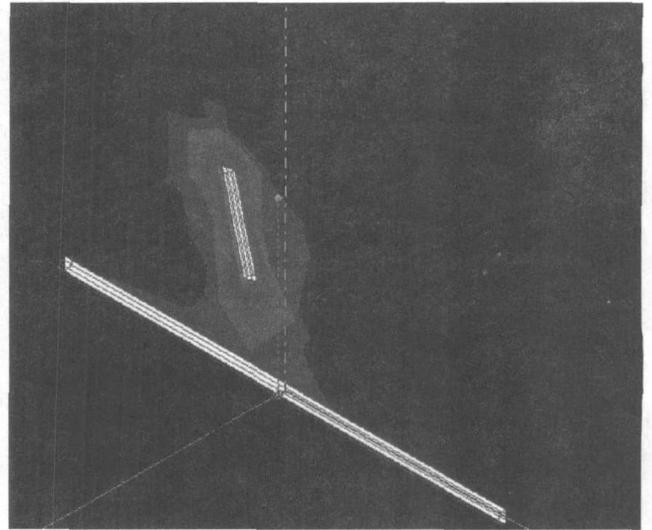


图 5 一定雷击倾角时电场分布示意图

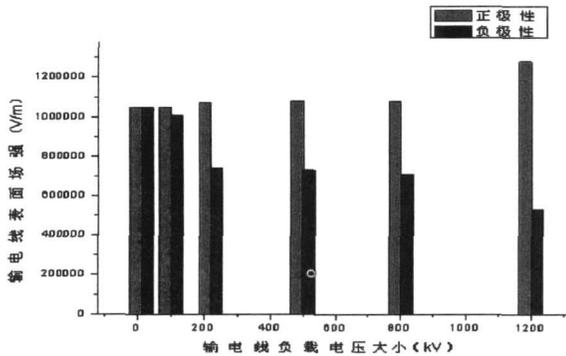


图 4 电场强度随电压变化的柱状图

### 2.3 雷击入射角变化对雷击概率的影响

雷击入射角对雷击概率有何种影响,至今这方面的研究尚属空白,文中在此方面做了初步的探讨。根据 BROWN 和 WHITEHEAD 于 1969 年提出的,雷击物体假定先导接近地面的入射角服从某一给定的分布函数<sup>[12]</sup>,如式 (1) 所示。

$$g(\phi) = \begin{cases} 0 & \phi < -\frac{\pi}{2} \\ \frac{2}{\pi} \cos^2 \phi & -\frac{\pi}{2} \leq \phi \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 & \frac{\pi}{2} < \phi \end{cases} \quad (1)$$

文中对雷击角度对雷击概率的影响做了初步的仿真研究,雷击倾角存在时电场分布示意图如图 5 所示。图 6 为输电线表面电场强度变化与雷击倾角的变化规律图。从图 6 上可以看出,随着入射倾角的增加,顶部的场强逐渐减小,变化规律几乎完全符合下列多项式函数。

$$Y = 1.18208 \times 10^6 - 2.0122765X - 11.42981X^2$$

## 4 结 论

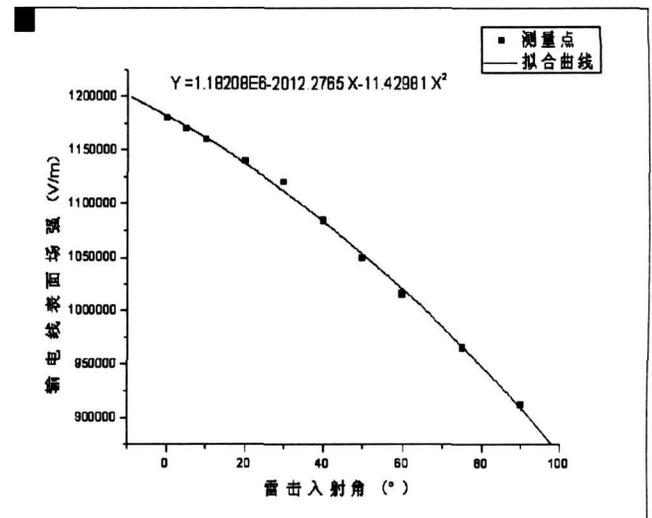


图 6 电场强度随雷击倾角变化曲线图

通过建立雷击过程中先导放电阶段上下行先导电场分布的物理模型,模拟了不同因素对雷击概率的影响,得出了如下结论。

(1) 从电场强度变化的角度分析高度对雷击概率的影响,地面上的两条输电线,当其中一条高度不变,另外一条高度变化的情况下,总体来说输电线路随着高度的增加,雷击概率增大。在高度增加过程中,当该输电线高度小于另一输电线高度时,表面场强小于另外一条输电线,被另外一条输电线屏蔽,被雷击概率较小。两输电线高度相当时,表面场强相同,被击概率相当。随着高度增长,大于另外一条输电线时,表面场强大于另外一条输电线,反过来对另外一条输电线起屏蔽作用。

(2) 输电线负载电压极性对雷击概率的影响如下:当电压小于、等于 10 kV 的时候极性对输电线表

(下转第 56 页)

### 参考文献

[1] 王建, 李兴源, 邱晓燕. 含分布式发电装置的电力系统研究综述 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 90—97.

[2] 梁才浩, 段献忠. 分布式发电及其对电力系统的影响 [J]. 电力系统自动化, 2001(6): 53—56.

[3] BORGES C L T, FALCAO D M. Impact of Distributed Generation Allocation and Sizing on Reliability, Losses and Voltage Profile [J]. In: Proceedings of IEEE Power Tech Conference Bologna (Italy); 2003. 5p

[4] 崔金兰, 刘天琪. 分布式发电技术及其并网问题研究综述 [J]. 现代电力, 2007, 3(24): 53—57.

[5] Fernando Bastiao Paulo Cruz Rui Fiteiro. Impact of Distributed Generation on Distribution Networks [J]. European Electricity Market 2008. EEM 2008. 5th International Conference on 28—30 May 2008; 1—6.

[6] 王志群, 朱守真, 周双喜. 分布式电源对配电网电压分布的影响 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 56—60.

[7] 王成山, 成凯, 谢莹华, 郑海峰. 配电网扩展规划中分布式电源的选址和定容 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 38—43.

[8] Nara K, Hayashi Y, Ikeda K et al. Application of Tabu Search to Optimal Placement of Distributed Generators [C]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting O-

hio USA, 2001.

[9] GRIFFIN T, TOMSOVIC K, SECREST D et al. Placement of Dispersed Generation System for Reduced Losses [J]. In: Proceeding of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences Maui (HI USA), 2000; 1446—1454.

[10] G. Capinelli Member IEEE, G. Celli Member IEEE, F. Pilo Member IEEE, A. Russo Member IEEE. Distributed Generation Siting and Sizing under Uncertainty [J]. Power Tech Proceedings IEEE Porto V, 2001, (4): 7.

[11] CELLI G, PILO F. Optimal Distributed Generation Allocation in MV Distribution Network [J]. In: Proceedings of 22nd IEEE Power Industry Computer Applications Sydney (Australia) 2001; 81—86.

[12] 段玉倩, 贺家李. 遗传算法及其改进 [J]. 电力系统及其自动化学报, 1998, 10(1): 39—52.

[13] 张奇. 配电网规划中分布式电源的选址和定容 [D]. 济南: 山东大学, 2008.

### 作者简介:

冯 宁 (1983—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统调度及其自动化、智能电网;

王 倩 (1962—), 女, 教授, 研究方向为电力系统调度及其自动化。

(收稿日期: 2010—01—20)

(上接第 20 页)

面电场强度几乎没什么影响, 即电压极性对雷击概率的影响可忽略。当电压大于、等于 220 kV 时候, 同一电压等级正负极性对输电线表面电场强度的影响逐渐增大, 负载电压为正极性的输电线表面场强大, 其被雷击概率也大。所以在负载电压等级大于 220 kV 时, 电压极性对雷击概率的影响应当考虑。

(3) 随雷击倾角的增大, 输电线被雷击的概率逐渐减小, 二者的关系函数呈多项式函数, 表达式为:  $Y = 1.18208 \times 10^6 - 2.0122765X - 11.42981X^2$ , 其中 Y 为输电线表面场强, X 为雷击入射角度。

### 参考文献

[1] 吴薛红. 防雷与接地技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.

[2] 徐勇, 汪霄飞, 朱英浩, 等. 大气条件对空气间隙放电特性的影响及其数值解析式 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(4): 21—26.

[3] 钟连宏, 常美生. 不同土壤电阻率对雷电放电过程的影响 [J]. 高电压技术, 1997, 23(1): 64—66.

[4] 王巨丰, 周世濂, 田树军, 等. 基于雷电走向与场强最大方向一致原理的接地导体雷击范围的计算 [J]. 广西电力, 2004(6): 39—41.

[5] 王巨丰, 周世濂, 田树军, 等. 地面上金属接地体高度对雷击概率的影响 [J]. 高电压技术, 2005, 31(4): 64—65.

[6] 王晓彤, 施围, 刘文泉. 改进电气几何模型计算输电线路绕击率 [J]. 高电压技术, 1998, 24(1): 85—87.

[7] 张志劲, 司马文霞, 蒋兴良. 超 特高压输电线路雷电绕击防护性能研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 1—6.

[8] 钱冠军, 王晓瑜, 汪雁. 输电线路雷击仿真模型 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(8): 39—44.

[9] 钱冠军, 王晓瑜, 徐先芝. 输电线路绕击分散性的试验研究 [J]. 高电压技术, 1998, 24(3): 17—20.

[10] 孔祥贞, 郝秀书, 张广庶, 等. 多接地点的梯级先导及回击过程的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 142—147.

[11] 刘振亚. 特高压电网 [M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.

[12] 章润陆, 陆宠惠, 李劲波. 输电线路绕击率的探讨 [J]. 高电压技术, 1985, 1(9): 39—45.

### 作者简介:

李瑞芳 (1980—) 女, 博士研究生, 主要从事防雷接地技术的研究。

吴广宁 (1969—) 男, 博士生导师, 主要从事高电压与绝缘技术的研究。

马御堂 (1986—) 男, 硕士研究生, 主要从事防雷接地技术的研究。

(收稿日期: 2009—10—22)