

文章编号:1000-582x(2001)02-0076-05

输电线路雷电屏蔽仿真模型^{*}

许高峰, 顾乐观, 司马文霞

(重庆大学 高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 输电线路很容易遭受雷击, 而屏蔽失效是线路雷害事故的重要原因, 因此应加强对输电线路雷电屏蔽的研究。文中在对已有的输电线路雷电屏蔽模型进行充分了解的基础上, 合理考虑了上行先导的引雷作用, 采用变步长的方式模拟下行雷电先导的下降, 建立了一个新的输电线路雷电屏蔽仿真模型。仿真计算结果表明, 该模型与输电线路现场运行经验比较吻合, 可用于输电线路的防雷屏蔽设计和评估输电线路的雷电屏蔽性能。

关键词: 仿真模型; 雷电屏蔽; 输电线路

中图分类号: TM 863

文献标识码: A

到目前为止, 输电线路和建筑物的雷电屏蔽保护仍主要以电气几何模型(EGM)为基础。EGM是一个以现场观测数据为基础的雷屏蔽工程模型, 因此在进行输电线路的防雷屏蔽设计时, 又需要重新积累经验, 以期进一步完善。

近年来, 人们对长空气间隙放电和雷击放电的研究和认识逐步深入, Eriksson、Dellera、Rizk 等人将近代长空气间隙放电的研究成果用于输电线路的雷电屏蔽性能研究, 提出了先导发展模型(LPM)^[1~3], 先导发展模型认为: 在下行先导的作用下, 接地物体上产生的上行先导的发生、发展和相遇过程, 对决定线路的雷电屏蔽性能起决定作用。上述先导发展模型是EGM的进一步发展。然而, 还有一些问题需要进一步研究: 如上行先导对引雷效果的影响; 结构物高度对引雷效果的影响等。

文中基于长空气间隙放电和雷击放电过程的相似性, 在现有长空气间隙放电研究成果的基础上, 吸收已经提出的各种输电线路雷电屏蔽分析模型的优秀思想, 建立一个新的输电线路雷电屏蔽仿真模型, 仿真模型对雷击输电线路的全过程进行了合理模拟, 并将该过程定量化, 以便于分析、计算。

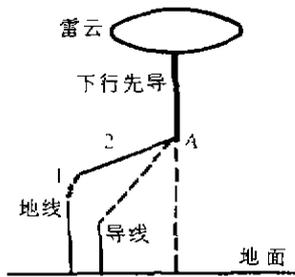
1 雷电屏蔽仿真模型介绍

1.1 模型简介

自然界中的雷电放电(对地面物体)现象, 就个别而言, 其放电路径为任意的, 几乎没有什么规律, 但从统计的角度出发, 可以近似认为雷电放电路径为垂直下行。在下行先导下落的过程中, 地面物体的表面场强不断增长, 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。对于输电线路, 导线处在避雷线的下方, 受避雷线一定的屏蔽作用, 但是避雷线和导线上都可能产生上行先导。笔者认为只要避雷线和导线的表面场强达到上行先导起始场强, 其表面就开始产生迎面上行先导, 并假定避雷线和导线表面产生的迎面上行先导在发展时互不影响, 这是一个简化处理。实际上先行产生的上行先导将会对后者的起始先导有屏蔽作用, 并且多条先导在发展过程中也会相互影响, 但文中仿真模型的结果证明了这种简化处理是可行的。下行雷电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条件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上行先导, 只要下行先导与该物体间的平均场强超过临界击穿值, 雷击就会对该物体发生。基于上述分析, 文中建立的输电线路雷电屏蔽仿真模型如图1所示。

* 收稿日期: 2000-06-21

作者简介: 许高峰(1975-), 男, 湖南衡南人, 重庆大学博士生。从事高电压技术研究。



1—地线上产生的上行先导；2—先导最后跃变；
A—雷击发生时下行先导位置
图 1 输电线路雷击过程

1.2 模型说明

1.2.1 下行雷电先导通道电荷分布

对于下行负雷闪，地面附近空间及先导头部空间电场主要决定于下行先导通道电荷密度及其分布。关于下行雷电先导的电荷分布，不同研究者的看法不一，但一般认为下行雷电先导的电荷分布可由常数分布或者指数分布表征。文中将下行雷电先导电荷当作线电荷处理，并由一双指数分布来表征其电荷分布特征，下行雷电先导的线电荷密度(kC/m)为：

$$q(z) = \frac{I_1 r}{c\alpha} \left[\left(\frac{\alpha}{v} - b_1 \right) e^{-b_1 z} - \left(\frac{\alpha}{v} - b_2 \right) e^{-b_2 z} \right] \quad (1)$$

式中： z —雷电先导头部离地面的高度(m)； b_1 、 b_2 —正常数，且 $b_2 > b_1$ ，它们可根据雷电流的波头和波尾时间确定； v —反雷速度，一般可取 0.3 倍光速； c 、 α —常数； I_1 —由对应的雷电流幅值确定(kA)。

文中的雷电屏蔽仿真模型中，上述各参数的具体取值为： $b_1 = 0.0015$ ， $b_2 = 0.025$ ， $v = 90\,000\,000$ ， $\alpha = 180\,000$ ， $c = 100$ 。

1.2.2 上行先导起始判据

文中采用 Peek 方程作为上行先导起始判据，只要避雷线或导线的表面场强达到由 Peek 方程计算得出的临界电离场强，那么其表面就开始产生迎面上行先导。Peek 方程用于计算导线表面的临界电离场强，其形式如下^[4]：

$$E_{cl} = 3\,000 \times \delta \times m \times (1 + 0.03/\sqrt{r}) \quad (2)$$

式中： δ —空气相对密度； m —导线表面粗糙系数； r —导线半径(m)； E_{cl} —临界电离场强(kV/m)。

考虑一般情况，取 δ 、 $m = 1$ ，因此(2)式简化为：

$$E_{cl} = 3\,000(1 + 0.03/\sqrt{r}) \quad (3)$$

1.2.3 上下行先导的发展

文[5]认为：上行先导起始后，上下行先导按各自先导前方的最大场强方向运动。这样处理跟实际情况相符，但进行电场计算时有一定的难度。

文中对该问题进行了简化处理，认为线路上产生上行迎面先导后，下行雷电先导仍然为垂直下行，而迎面先导始终向下行先导的头部方向运动。关于这一点，Rizk 在其先导发展模型中作了同样的假设^[3]。

上下行先导运动的速率比对地面物体的引雷能力有影响：上行先导相对运动较快时，就能拦截距离较远的下行先导，其引雷能力就越强；反之，则引雷能力较弱。

Dellera 取速率比 $v_{\downarrow}/v_{\uparrow}$ 在 1~4 间变化，Rizk 和 Eriksson 取速率比为 1，文[5]取速率比为 2.5。笔者计算中发现上下行先导间的速率比 $v_{\downarrow}/v_{\uparrow}$ 在 1~4 间变化时对仿真计算结果的影响不是太大，取等速率比时仿真计算结果最为理想，因此本模型取速率比为 1。

1.2.4 最后跃变判据

长间隙放电研究表明，当满足条件：上下行先导间或者下行先导与未产生上行先导的某目的物(包括大地)间的平均场强超过平均击穿临界场强 500 kV/m，就会发生最后跃变。文中仿真模型将此原则作为最后跃变判据。

文[3]认为：当下行雷电先导已经下降到低于输电线路高度时还未发生雷击避雷线或者雷击导线，那么此次雷必定击中地面。这种处理方式用来评估普通高度线路的雷电屏蔽性能时没有问题，但是，对于高杆塔和特高杆塔线路，会导致线路绕击率偏低，这是因为高杆塔和特高杆塔线路，大地对线路的雷电屏蔽作用将显著减弱，有可能出现当下行雷电先导已经下降到低于输电线路高度时还发生雷击导线的“回头雷击”情况，图 2 为“回头雷击”现象的示意图。

文中的雷击仿真模型中包括了“回头雷击”的情况，因此它适用于各种高度的线路雷电屏蔽性能估算。

同时，仿真模型还作了另外一些假定：忽略导线的工作电位，认为地线和导线都保持地电位；暂时不考虑上行迎面先导的压降，近似认为上行先导头部电位为地电位；不考虑除下行雷电先导电荷外的其它所有电荷对空间电场的影响。下行先导头部电位由下行先导空间电荷在其头部形成的电位确定。

考虑,这样处理对雷击输电线路过程的描述更贴近真实情况。图 3 给出了仿真模型计算程序框图。

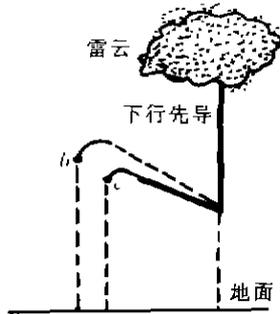


图 2 回头雷击现象

1.2.5 线路绕击跳闸率的确定

如果以幅值为 I 的雷电流在离线路不同的侧面距离处进行了 N 次模拟雷击,有 N_d 次击中了导线,有 N_b 次击中了避雷线,那么幅值为 I 的雷电流对导线的绕击率为:

$$R(I) = \frac{N_d}{N_b + N_d} \quad (4)$$

线路的绕击跳闸率(次 /100 km · a · 40 雷电日)可由下式计算:

$$N_{tz} = N \cdot \eta \cdot \int_{I_c}^{\infty} R(I) \cdot f(I) dI \quad (5)$$

式中: N —线路的落雷次数(次 /100 km · a · 40 雷电日); η —建弧率; I_c —能引起线路绕击闪络的最小雷电流(kA); $f(I)$ —幅值为 I 的雷电流出现的概率密度。

为了使计算结果尽可能准确,在进行雷击仿真时,线路侧面的雷击仿真区域应该足够宽(直到模拟雷击全部击中地面为止),模拟雷击的空间密度应足够大,雷电流幅值的范围足够广泛。只有这样,才能保证仿真模型计算结果的准确性。当然,这会造成计算量很大,但是利用计算机来进行计算,其计算时间是可以接受的。

1.2.6 仿真模型计算程序框图

文[3]在建立输电线路雷击仿真模型时,将地线和导线分别单独考虑其吸引距离,然后按线路结构组合起来考虑线路的屏蔽特性。文中的输电线路雷电屏蔽仿真模型,将地线、导线和大地作为一个整体来进行

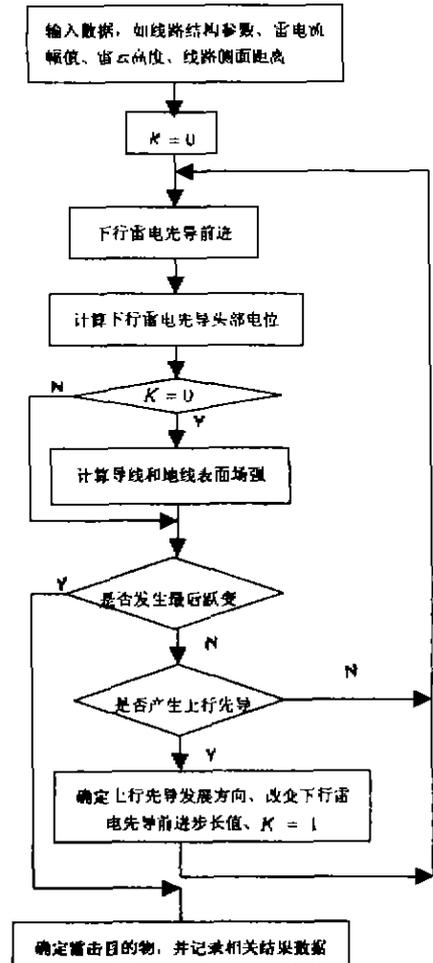


图 3 仿真模型程序框图

在编制雷击仿真模型计算机程序时,下行先导每次前进步长值的确定需要仔细考虑。如果步长过大,会导致仿真结果不准确;如果步长过小,则计算量很大,导致计算时间过长,甚至不能接受,因此,在确定步长时两方面都要考虑。文中采用变步长的方法确定步长值:先导刚开始下降时,步长取得较大($dZ = 3 \text{ m}$);当下行先导快靠近线路或者线路上出现上行先导时,改变步长值,使其变小($dZ = 0.2 \text{ m}$),这样既能节省计算时间,又能保证仿真结果准确。

2 雷电屏蔽仿真模型的验证

2.1 雷击输电线路基本规律的验证

为认识清楚雷击仿真模型所描述的雷击过程和基本规律,以文[1]中代码为EFID的线路(线路参数为 $H_b = 43\text{ m}$, $H_d = 24\text{ m}$, 保护角 $\theta = 31^\circ$)为例进行了计算,计算结果见表1。

从该结果可以看到仿真模型所描述的雷击输电线路的基本规律:

① 同一雷电强度的下行先导,当其距离线路水平侧向距离由近及远变化时,表现出如下规律:1) 当侧向水平距离很近时,雷击击中地线;随着侧向水平距离

的增加,雷击将在地线和导线两者之间选择;当侧向水平距离进一步增大,雷击主要在导线和大地之间进行选择;当侧向水平距离增加到一定程度时,雷全部击中大地;2) 导线相对地线产生迎面上行先导困难,这主要是由于导线处在地线的下方,受到地线及其先行发展起来的上行先导的屏蔽作用的缘故。

② 当雷电流强度增加到一定程度后,随着下行先导侧向水平距离的增加,雷击将由完全击中地线直接过渡到完全击中大地,而不再发生雷电绕击。

表1 仿真模型计算结果

序号	雷电流 /kA	侧向距离 /m	最后跃变点	地线上行 先导长度	导线上行 先导长度	雷击部位		
						地线	导线	大地
1	15	30	(30,68.5)	3	0	是	*	*
2	15	35	(35,60.2)	3.2	0	是	*	*
3	15	40	(40,55.6)	4.3	0	是	*	*
4	15	45	(45,52.7)	5.7	2.1	*	是	*
5	15	50	(50,49.7)	6.2	2.5	*	是	*
6	15	60	(60,45.1)	3.1	0	*	*	是
7	15	70	(70,44.1)	1.6	0	*	*	是
8	50	70	(70,87.6)	5.2	0	是	*	*
9	50	80	(80,79.3)	5.7	0	*	*	是

表2 运行经验与仿真计算结果的比较

线路代码	耐雷 U_{50}/kV	I_c/kA	$\theta/(\circ)$	H_b/m	H_d/m	N_{rjtz}		
						运行数据	仿真模型	Rizk 模型
CIGRE 30	1 650	8.3	15	28	16	0.0	0.0	0.0
EFID	1 760	8.6	31	43	24	5.35	5.03	4.89
CIGRE 39	1 760	10.5	-15	29	16	0.0	0.0	0.0
CIGRE 40	1 736	8.7	14	27	19	0.0	0.0	0.0
EFI K	1 210	5.9	0	31	23	0.45	0.0	0.15
TVA 1	1 825	11.7	10.4	23	12	0.0	0.0	0.0
TVA 2	1 825	11.7	10.4	28	17	0.0	0.0	0.0
CIGRE 31	1 760	8.7	22	43	24	2.30	2.0	1.91
CIGRE 63/75	1 727	9.6	18	32	23	0.0	0.0	0.0
CIGRE 88/89	1 980	11.0	19	23.6	18.4	0.0	0.0	0.0
CIGRE 85/86	1 386	6.9	10.5	43.5	30.0	2.02	1.71	1.70
CIGRE 109	1 860	11.1	26	50.0	29.0	5.65	4.77	4.51

注: N_{rjtz} —线路雷电绕击跳闸率(次/100 km·a·40雷电日)

上述规律与人们对雷击认识长期积累的规律相符。

2.2 输电线路运行经验与仿真结果的对比验证

为了验证文中的输电线路雷电屏蔽仿真模型,运用该模型对文[1]中的12条输电线路的绕击跳闸率进行了计算,文[1]同时提供了这些线路的实际运行统计

数据,仿真模型计算结果与实际运行数据如表2所示,为便于对比分析,表2中同时给出了Rizk先导发展模型的计算结果。

从表2的结果可以看到,除个别线路(表中为线路EFI K)外,文中雷电屏蔽仿真模型的计算结果与线路现场运行数据非常接近,仿真结果略为偏小,但是同

Rizk 模型的结果相比较,仿真计算结果更接近线路的运行数据。Rizk 先导发展模型认为下行雷电先下降到低于线路高度时如还未发生雷击线路,那么此次雷必定击中地面,这对于高度稍大的输电线路,可能会漏掉“回头雷击”的情况,因此导致结果偏低,表2中的结果确证了这一点。另外,文中的仿真模型将地线、导线和大地作为一个整体来进行雷击模拟,相比较 Rizk 先导发展模型中将地线和导线的引雷作用分别考虑,然后再按线路结构组合起来计算线路的雷电屏蔽性能而言,更符合雷击输电线路的真实情况。

3 结论

1) 基于长空气间隙放电和雷击放电过程的相似性,在现有长空气间隙放电研究成果的基础上,对雷击输电线路这一过程进行了合理的模拟,考虑了迎面上行先导对雷击的影响,采用变步长的方式来模拟下行雷电先导的下降,建立了一个新的输电线路雷电屏蔽仿真模型,仿真模型计算结果很好地反映了雷击输电线路的基本规律,而且与输电线路运行经验能够很好地吻合,表明了文中仿真模型的可信性和正确性。

2) 文中建立的输电线路雷电屏蔽仿真模型可用

于指导输电线路的防雷屏蔽设计和评估输电线路的雷电屏蔽性能,而且,它对于各种高度的输电线路都适用,同其它输电线路雷电屏蔽分析模型相比,这是一个很大的进步,它代表了目前输电线路雷电屏蔽研究领域的最新成果。

参考文献:

- [1] ERIKSSON A J. An improved Electrogeometric Model for Transmission Line Shielding Analysis[J]. IEEE TPWRD, 1987,2(3):859-870.
- [2] DELLERA L, GARBAGNATI E. Lightning strokes simulation by means of the leader progression model[J]. IEEE TPWRD, 1990,5(5):2 009-2 030.
- [3] RIZK F A M. Modeling of transmission line exposure to direct lightning strokes[J]. IEEE TPWRD, 1990,5(4): 1 983-1 997.
- [4] CHOWDHURI P. SIGNIFICANT PARAMETERS IN ESTIMATING THE STRIKING DISTANCE OF LIGHTNING STROKES TO OVERHEAD LINES[J]. IEEE TPWRD, 1989,4(3):1 970-1 981
- [5] 钱冠军. 输电线路雷击仿真模型[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(8):40-44.

Lightning Shielding Simulation Model of Transmission Line

XU Gao-feng, GU Le-guan, SIMA Wen-xia

(The Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Transmission lines are easily hit by lightning, and lightning shielding failure is an important reason of lightning accidents of transmission line. So researches on lightning shielding of transmission line should be strengthened. On the basis of the abundant understand to known lightning shielding models of transmission line, a new lightning shielding simulation model of transmission line is presented in the paper. In this model, the effect of attracting lightning of upward leader is considered reasonably, and the method of variable descending step is adopted to simulate the descending process of lightning leader. The simulation calculating results show that the model is in good agreement with field experience of transmission line. It can guide lightning shielding design of transmission line and estimate the performance of lightning shielding of transmission line.

Key words: simulation model; lightning shielding; transmission line

(责任编辑 李胜春)