

文章编号: 1001-1609(2006)03-0205-03

# 改进电气几何模型对输电线路绕击率的计算及典型故障分析

许 飞, 王建国, 周文俊, 卫李静, 邓光武, 马 斌

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

Calculation of Shielding Failure Rate on Transmission Line Based on Improved EGM and the Analysis of Typical Accident

XU Fei, WANG Jian-guo, ZHOU Wen-jun, WEI Li-jing, DENG Guang-wu, MA Bin

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

摘要: 提出了改进的电气几何模型,成功地解释了用原 EGM 法难以解释的现场事故原因。应用改进的电气几何模型分析了输电线路杆塔结构、避雷线和导线的布置、雷电流的幅值、地面倾角对绕击率的影响。结果表明,在地形复杂的山区,大电流也能对线路造成绕击。

关键词: 输电线路; 电气几何模型; 绕击率

中图分类号: TM726

文献标识码: A

Abstract: The improved electric geometrical model is proposed, and some on-site accidents are successfully explained, which are difficultly commented by EGM. With such model the effect of tower structure, lightning current amplitude, angle of the lightning incidence, as well as the ground angle on the shielding failure rate are analyzed. It is concluded that large lightning current can stride across lightning conductors to strike conductors under certain conditions in mountain areas.

Key words: transmission line; electric geometrical model (EGM); shielding failure rate

## 1 引言

目前, 计算输电线路雷电绕击率的方法有规程法和 EGM(电气几何模型)法两种, 规程法是建立在高压线路经验累积的基础上制定的, 经常不能反映线路的具体特性, 这是因为用规程法计算线路绕击率时并未考虑雷电流的过程及地面倾角等对屏蔽效果的影响。EGM 法提出用求最大击距的方法来判断输电线路是否会遭受雷电绕击。由于引入了绕击率与雷电流幅值相关的观点, 考虑了线路结构和雷电流参数对绕击率的影响, 因而更接近实际运行情况。

但 EGM 法在推导的求最大击距  $r_{\text{max}}$  的公式中, 既没有考虑地面倾角  $\theta_0$  对绕击的影响, 也没有考虑雷击于导线的平均电场强度与雷击于地面的平均电场强度之不同。事实上, 雷(负极性)击导(地)线时, 雷电通道的临界电场强度一般要比雷击地面时的雷电通道的临界电场强度小, EGM 法不能反映不同形式的临界场强对绕击率的影响, 也无法解释山区线路绕击率过大和某些理论上处于完全屏蔽的线路屏蔽失效的原因<sup>[1-9]</sup>。

IEEE 导则<sup>[1]</sup>推荐当避雷线高度小于 40 m 时, 雷击导线与雷击地面时的平均临界场强之比系数  $K$  取 0.8, 实验室进行的模拟实验也证实了这一取值。在详细分析地形、雷电先导入射角、线路受雷宽度等因素的情况下, 运用数学方法可推导出计算雷电绕击导线的通用最大击距公式和线路绕击率表达式。改进后 EGM 法成功地解释了以往难以解释的现场事故原因。

## 2 改进的电气几何模型的计算方法

### 2.1 标准模型

图 1 为绕击的电气几何模型。图中:  $h$  为避雷线距地面的高度;  $y$  为导线距地面有效高度;  $d$  为避雷线间的距离;  $\theta_0$  为杆塔保护角;  $\theta_g$  为地面倾角;  $r_1, r_2, r_3, r_4$  分别为弧线半径  $oc, ob, mb, ma$  与地平面的夹角;  $r_{\text{max}}$  为地面倾角为 0 时的最大击距;  $r_{\text{max}, \theta_g}$  为地面倾角为  $\theta_g$  时的最大击距;  $\phi$  为雷击接近地面时先导入射角;  $ab$  为雷击避雷线时的屏蔽弧段;  $bc$  为雷击导线时的暴露弧段;  $bc$  为地面倾角为  $\theta_g$  时雷击导线时的暴露弧段;  $ce, c'e$  为雷击先导头到达  $ce, c'e$  弧

收稿日期: 2006-01-16; 修回日期: 2006-03-09

作者简介: 许 飞 (1977-), 男, 硕士研究生, 从事输电线路防雷研究。

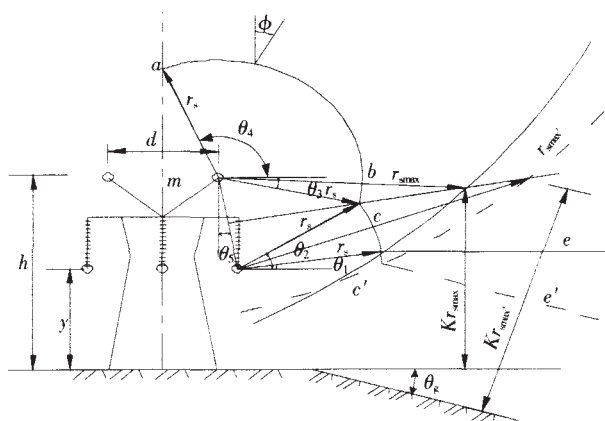


图 1 绕击的电气几何模型

段时将击于地面。

### 2.2 绕击率和绕击跳闸率的表达式

绕击率由击距分布概率和条件概率决定，击距  $r$  的概率为  $f(r)$ ，先导头部处于对相导线闪络的空间位置的条件概率为  $x$ ，则对相导线闪络的概率为  $x \cdot f(r)$ 。 $f(r)$  由雷电流分布概率推导， $x$  除决定于杆塔几何参数有关外，还和先导入射角的分布有关。当先导入射角为  $\phi$  时，Whitehead 提出了  $\phi$  的分布函数式： $g(\phi) = 2\cos^2\phi/$ ， $-2/ < \phi < 2/$ 。按照电气几何模型，对于击距为  $r$  的一次雷击事件，条件概率  $x$  可由暴露弧线与总弧线长度（即暴露弧线与屏蔽弧线之和）的比值来确定<sup>[10]</sup>。

击距  $r$  与雷电流  $I$  的表达式和击距分布概率的公式如下<sup>[11]</sup>，其几何图见图 2。

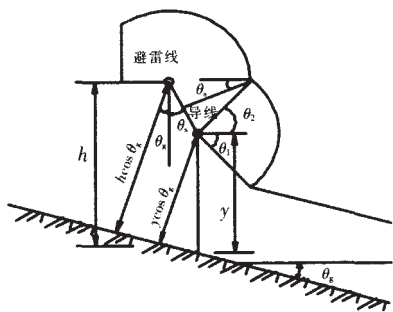


图 2 计算最大击距时的几何图

$$r = 6.7 \times I^{0.8}$$

$$f(r) = \left[ \frac{5.837}{(r^{1.25} + 5.36)^{0.8} - (r^{1.25} + 5.36)^{0.8}} \right] \times r^{-1.25} \times \exp\left[ \frac{1}{2} - \left( \frac{\ln r^{1.25} - 5.778}{0.737} \right)^2 \right]$$

$$x = \frac{L_1}{L_1 + L_2}$$

$$L_1 = \frac{2}{3} r \left[ \frac{1}{2} (\alpha_2 - \alpha_1) - \frac{1}{12} (\sin 2\alpha_2 - \sin 2\alpha_1) - \frac{2}{3} (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \right]$$

$$L_2 = \frac{2}{3} r \left[ \frac{1}{2} (\alpha_4 - \alpha_3) - \frac{1}{12} (\sin 2\alpha_4 - \sin 2\alpha_3) - \frac{2}{3} (\cos \alpha_4 - \cos \alpha_3) \right]$$

$$\frac{2}{3} (\cos \alpha_4 - \cos \alpha_3)]$$

由图中几何关系可得：

$$\alpha_1 = \alpha_g + \arcsin(K - y \cos \alpha_g / r); \alpha_2 = \alpha_s + \arcsin(p / 2r)$$

$$\alpha_3 = \alpha_s - \arcsin(p / 2r); \alpha_4 = -\arccos(d / 2r)$$

其中： $p = \frac{(h-y) \cos \alpha_g}{\cos(\alpha_s - \alpha_g)}$ ， $p$  为导线到避雷线的直线距离； $d$  为水平排列的双避雷线之间的距离。 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  以地面顺时针方向为正； $\alpha_s$  以基准轴反时针方向通过导线的为“+”，以杆塔处向下倾斜的地面倾角为“-”，反之则为“+”。

根据以上几何关系，可推导出考虑地面倾角  $\alpha_g$  以及击距系数  $K$  的最大击距的通用计算公式：

$$r_{smax} = \frac{K(h+y) \cos \alpha_g + 2\sqrt{(h+y)^2 - G} \times \sin(\alpha_s - \alpha_g)}{2F} \cos \alpha_g$$

$$\text{式中：} F = K^2 \sin^2(\alpha_s - \alpha_g); G = F \times \left[ \frac{(h-y)}{\cos(\alpha_s - \alpha_g)} \right]^2$$

由此可得线路绕击率：

$$P_a = \int_{r_s}^{r_{smax}} x f(r) dr$$

$$\text{线路绕击跳闸率：} n = P_a N_g / \text{百公里} \cdot \text{年};$$

$$N_g = 0.1 \times W \times N_p$$

经与我国高压线路运行的实际雷击跳闸率相比较，地面落雷密度选用国际大电网会议<sup>[12]</sup>推荐的以下公式计算的绕击跳闸率与我国高压线路的运行性能比较吻合。

$$N_g = 0.023 \times T_d^{1.3} \text{ (次/平方公里} \cdot \text{年)}; W = (d + 4h^{1.09}) m$$

式中： $N_g$  为线路的落雷次数； $N_p$  为地面落雷密度； $W$  为引雷宽度； $T_d$  为年均雷暴日，取 40 个雷暴日。

### 3 典型事故分析

2004 年 3 月 19 日，湖北省某 500kV 线路 199 号铁塔附近边相发生雷击故障跳闸，按以往的电气几何模型算法分析，199 号铁塔处的导线处于完全屏蔽状态，不能发生绕击。根据现场资料， $\alpha_g$  约为  $-35^\circ$ ；利用本文改进的电气几何模型及上述公式，可以算出 199 号处  $r_{smax} = 205.6 m$ ，相应的能引起绕击的最大雷电流  $I_{max} = 147.6 kA$ ，而引起绝缘子串闪络的最小绕击雷电流<sup>[13]</sup>  $I_{f0} = \frac{2U_{50\%}}{Z} = 16.7 kA$ 。由于  $I_{max} > I_{f0}$ ，199 号附近线路发生大电流绕击的可能性是存在的，从而解释了该事故发生的原因。并可进一步求得该段线路绕击跳闸率  $n$  为 0.911 次/百公里·年。

### 4 影响绕击跳闸率的因素分析

利用该改进后的电气几何模型，分析了绕击率与不同雷电流下地面倾角、杆塔高度和雷电流大小、保护角的关系，结果见图 3~ 图 7。

从图中结果可以看到：

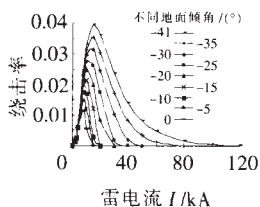


图 3 不同雷电流下地面倾角与绕击率的关系

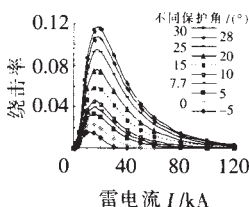


图 4 不同雷电流下保护角与绕击率的关系

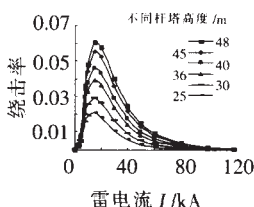


图 5 不同雷电流下杆塔高度与绕击率的关系

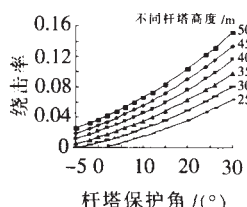


图 6 绕击率与保护角和杆塔高度的关系

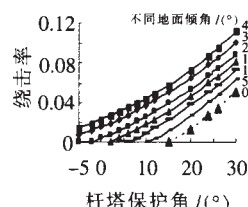


图 7 绕击率与保护角和地面倾角的关系

### (1) 地面倾角的影响

对同一杆塔高度，绕击率会随地面倾角的增大而增大，由图 3 和图 7 可以看出，地形对绕击跳闸率有较大的影响，对于一般杆塔，平原地区的雷电绕击率非常低，线路基本都能满足全屏蔽的条件，但随着地面倾角的改变，丘陵和山区线路会出现较大的绕击率。本文计算实例的结果表明，当杆塔尺寸一定时，地面倾角每增加 10°，绕击率将增大大约 1.5 倍，而且随倾角增大，能够对线路发生绕击的雷电流的幅值也增大较快，这也解释了山区线路易发生绕击，且大雷电流易对山区线路造成绕击跳闸事故的原因。

### (2) 保护角的影响

同样条件下绕击率随避雷线保护角的增大而增大，图 4 为不同地面倾角下绕击次数与雷电流 I 的关系，在同一绕击电流下，地面倾角越大，绕击率就越大。由图 6 和图 7 可知，改变保护角与改变地面倾角和改变杆塔高度相比，绕击率的改变更明显，一般情况下，在地面倾角较小的平原地区，采用 20° 保护角比 30° 保护角可使绕击率减小 70% 左右，而在丘陵和山区，随着地面倾角的增大或者杆塔高度的增大，减小保护角也能使绕击率显著降低。如当地面倾角为 15° 时，采用 20° 保护角比 30° 保护角可使绕击率可减小 52% 左右；当地面倾角为 30°，绕击率可减小 40% 左右。可以认为相对于其它因素，保护角对线路的绕击率影响更显著。同时也应该看到，当山坡陡度较大时，即使采用较小的保护角，暴露弧段也不一定收敛到零，较大的雷电流也会绕击到导线，这也说明了山区线路存在绕击的可能性是很难避免的。

### (3) 杆塔高度的影响

当保护角相同、地面倾角相同、绝缘子片数相同时，绕击率随杆塔高度的增大而增大。由图 5 和图 6 可以看出，当线路保护角为 10° 时，在不改变线路绝缘耐雷水平的情况下采用 35 m 的杆塔比采用 45 m 的杆塔可使绕击率减小 40%。

## 5 结论

(1) 提出了改进的电气几何模型及改进的最大击距通用计算公式，并应用到输电线路绕击率的计算中，成功地解释了原 EGM 法难以解释的现场事故原因。

### (2) 输电线路雷击绕击率的计算结果表明，绕击率会随地面倾角的增大而增大，减小保护角能有效减少绕击的暴露弧段，对雷电流活动较强的山区应采用较小的保护角，甚至是负的保护角，才能有效的降低绕击率。当山坡陡度较大时，即使采用较小的保护角，暴露弧段也不一定收敛到零，较大的雷电流也会绕击到导线，故山区线路存在绕击的可能性是很难避免的。

(3) 杆塔高度也影响到了暴露弧段，绕击率随杆塔高度的增大而增大，设计时宜在满足对地距离，临界电场强度等条件下选择合适高度的铁塔<sup>[14-15]</sup>。

## 参考文献:

- [1] IEEE Std 1243 - 1997. IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines[S]. 1997.
- [2] DL/T620-1997. 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S]. 1997.
- [3] 关根志. 高电压工程基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [4] 钱冠军. 输电线路绕击分散性的实验研究[J]. 高电压技术, 1998, 24(3): 17-20.
- [5] 王晓彤. 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(3): 85-87.
- [6] 张纬发. 电力系统过电压与绝缘配合[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [7] 李宏. 输电线路绕击跳闸率计算与探讨[J]. 西北电力技术, 2004(3): 84-86.
- [8] 李如虎. 架空输电线路下导线遭受雷电绕击的分析[J]. 高电压技术, 1993, 19(3): 37-39.
- [9] 孙万忠. 超高压线路绕击率计算方法探讨[J]. 四川电力技术, 1999(6): 1-3.
- [10] 陈维贤. 电网过电压教程[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [11] 章润陆. 输电线路绕击跳闸率的计算方法和 500 kV 超高压线路防雷设计的几个问题[Z]. 武汉: 武汉高压研究所, 1982.
- [12] Anderson J G. 345 kV 及以上超高压输电线路[M]. 北京: 电力工业出版社, 1981.
- [13] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [14] 易辉. 我国输电线路运行现状及防雷保护[J]. 高电压技术, 2001, 21(6): 44-46.
- [15] 钱冠军. 500 kV 线路直击雷典型事故调查研究[J]. 高电压技术, 1997, 23(2): 72-75.