

# 基于改进电气几何模型的输电线路雷电屏蔽性能的研究

朱时阳, 邓雨荣

(广西电力试验研究院有限公司, 广西 南宁 530023)

摘要: 为了提高线路绕击耐雷性能, 笔者研究了高压输电线路绕击耐雷性能的分析方法, 对考虑击距系数  $K$  和地面倾角  $\alpha$  后的电气几何模型, 以杆塔中心线与大地交点作参考点, 推导了最大击距的计算方法, 同时探讨了最大击距不存在情形下击距系数  $K$ 、避雷线保护角  $\theta$ 、地面倾角  $\alpha$  的关系问题, 论证了可以通过平衡  $K$ 、 $\theta$ 、 $\alpha$  的取值而有效提高线路绕击耐雷性能。

关键词: 改进电气几何模型; 最大击距; 绕击耐雷性能

中图分类号: TM863

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)01-0056-03

## Research on Shielding Lightning Performance of Electric Transmission Line with the Improved EGM

ZHU Shi-yang, DENG Yu-rong

(Guangxi Electric Power Testing & Research Institute Co. Ltd., Nanning 530023, China)

Abstract: In order to improve the performance of electric transmission line protecting around hit lightning, this paper focuses on the analysis method of the high voltage transmission line about the lightning protection performance of shielding failure. According to the EGM in which the striking distance factor  $K$  and ground obliquity  $\alpha$  is considered, it takes the intersection of transmission tower central line and ground as reference point, and then derives the calculation method of the maximum striking distance. It also discusses the relationship among the striking distance factor  $K$ , protection angle of lightning conductor  $\theta$  and ground obliquity  $\alpha$  when the maximum striking distance does not exist, and demonstrates that the lightning protection performance of shielding failure can be enhanced effectively through the balance of  $K$ ,  $\theta$ , and  $\alpha$ .

Key words: improved EGM; maximum striking distance; lightning protection performance of shielding failure

### 0 引言

目前, 国内学者对输电线路绕击耐雷性能的参数主要是依据现行规程(DL/T 620-1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》)和电气几何模型(EGM)。前者是基于统计结果而建立的近似解析计算, 带有综合、平均的性质, 并未考虑实际线路的复杂结构和雷电放电特性, 因而常常不能反映具体线路的雷击状况。20世纪70年代, Whitehead-Brown建立了经典的电气几何模型<sup>[1]</sup>, 提出了击距的概念, 将雷电的放电特性同线路的结构尺寸联系起来, 比传统的经验方法前进了一大步, 但是经典电气几何模型也存在一些不足之处<sup>[2]</sup>: 它未考虑放电的分散性, 未考虑输电线路走廊实际地形等因素对击距的影响, 未考虑雷击大地、避雷线、输电导线时的差别, 而假定雷电先导对三者的击距相等。经典的EGM

问世后几十年来, 不断有专家学者对其提出改进, 使其更具体地将雷电放电特性与线路结构尺寸联系起来, EGM也因此得以焕发蓬勃的生命力, 目前在世界上许多国家得到进一步推广和应用。

### 1 改进的电气几何模型

不同学者对经典的EGM的改进有不同的思路, 但目前被实践证明比较成功的改进是考虑击距系数  $K$  和地面倾角  $\alpha$  后的EGM。击距系数是雷电先导对地击距与先导对输电导线击距的比率(文中假定先导对避雷线、输电导线的击距相等), 目前学界大多公认击距系数值  $K$  小于 1, 且  $K$  是杆塔高度  $h$  的函数<sup>[3,4]</sup>; 考虑地面倾角  $\alpha$  主要是为了更客观地衡量山区输电线路的雷害状况, 以期合理解释山区线路绕击跳闸频发的原因。

考虑击距系数  $K$  和地面倾角  $\alpha$  后, 经典的EGM的作图法不变<sup>[5]</sup>, 见图1。图中O点为杆塔中心线与地面的交点; G、L分别为避雷线和导线。以避雷线G

收稿日期: 2007-09-21; 修回日期: 2007-12-25

作者简介: 朱时阳(1982-), 男, 河南信阳人, 硕士, 助理工程师, 从事电力系统过电压方面的试验研究工作。

和导线L为圆心、以击距 $r_s$ 为半径的两个圆弧交于 $B_i$ 点,离地面高度为 $K \cdot r_s$ 并与地面平行的直线与以L为圆心的圆弧交于 $C_i$ 点,由圆弧 $A_i B_i$ 、 $B_i C_i$ 和直线 $C_i D_i$ 在线路方向形成一个定位曲面。当雷落在 $B_i C_i$ 曲面上,即雷绕击于导线,因此 $B_i C_i$ 为暴露弧段。由于不同的雷电流幅值对应不同的击距 $r_s$ ,所以可以作出一系列的定位曲面及绕击面。

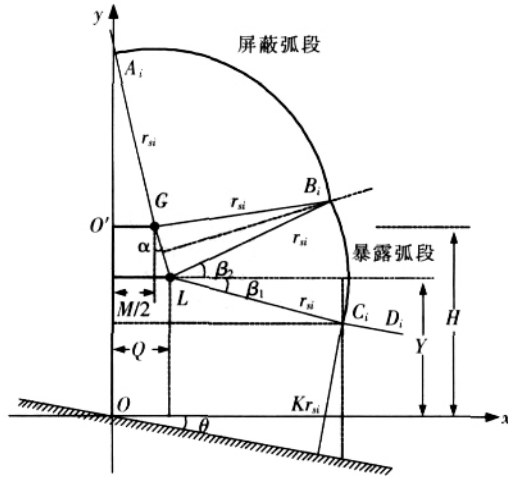


图1 考虑 $K$ 与 $\theta$ 之后的EGM

随着击距 $r_s$ 的变化,暴露弧段的大小也将发生变化。如果在某一个 $r_s$ 值情况下, $B_i C_i$ 减小到0,则此时线路将不再会受更大雷电流绕击,那么这个击距 $r_s$ 即为最大击距 $r_{sm}$ 。再如果将线路绝缘配合设计为绕击耐雷水平对应的击距,即临界击距 $r_{sc}$ ,大于或等于最大击距 $r_{sm}$ ,则线路将达到有效屏蔽,其遭受绕击的可能性极小。

## 2 最大击距的计算方法

由已知的各线路参数,建立适当的参考坐标系,利用图1中各点的几何关系,计算出最大击距 $r_{sm}$ 。

笔者以杆塔中心线与地面的交点为参考点,建立计算坐标系(见图1),推导最大击距 $r_{sm}$ 的计算方法。需要注意的是,图1中角 $\alpha$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 均是有“+”、“-”符号的:对于 $\alpha$ ,以避雷线位置的竖直线为基准轴,逆时针扫过导线时的角度为“+”,反之为“-”; $\beta_1$ 的符号是以地面向下倾斜时为“-”,反之为“+”;对于 $\beta_2$ 与 $\theta$ ,约定以水平线为基准线,向上方划过的角度为“+”,反之为“-”。显然,圆心角 $(\beta_2 - \beta_1)$ 对应的弧段即为暴露弧段。当 $\beta_2 - \beta_1 = 0$ 时, $B_i C_i$ 减小到0,线路实现有效屏蔽。

对于 $\beta_1$ 由几何关系易得

$$r_s \sin(\beta_1) = Y - \left\{ \frac{Kr_s}{\cos(\beta_1)} - [Q + r_s \cos(\beta_1)] \cdot \tan(\beta_1) \right\} \quad (1)$$

式(1)中 $r_s$ 为闪击距离, $m$ ;  $K$ 为击距系数; $Y$ 为导线的平均高度, $m$ ;  $Y = h_c - (2/3)f_c$ ;  $h_c$ 为杆塔上导线悬挂

点的高度, $m$ ;  $f_c$ 为导线的弧垂, $m$ ;  $\theta$ 为雷击点地面倾角; $Q$ 为导线悬挂点到杆塔中心线的距离, $m$ 。

对式(1)进行整理,有

$$\beta_1 = -\arcsin\left(\frac{Y \cos \theta - Q \sin \theta}{r_s} - K\right) \quad (2)$$

对于 $\beta_2$ ,显然其与保护角 $\beta$ 具有相同的正负号,其表达式由几何关系易求得为

$$\beta_2 = +\arcsin\left(\frac{H - Y}{2r_s \cos \theta}\right) \quad (3)$$

式(3)中 $H$ 为避雷线的平均高度, $m$ ;  $H = h_g - (2/3)f_s$ ;  $h_g$ 为避雷线在杆塔上的高度, $m$ ;  $f_s$ 为避雷线弧垂, $m$ ;  $\beta$ 为避雷线的保护角。

由式(2)、(3)可以看出,随着 $r_s$ 的增大, $\beta_1$ 增大而 $\beta_2$ 减小,当某一个 $r_s$ 值下有 $\beta_1 = \beta_2$ 时,暴露弧段将缩减为零。据此,可得到 $r_{sm}$ 与 $\beta$ 、 $\theta$ 及线路其他结构参数的关系式

$$-\arcsin\left(\frac{Y \cos \theta - Q \sin \theta}{r_{sm}} - K\right) = +\arcsin\left(\frac{H - Y}{2r_{sm} \cos \theta}\right) \quad (4)$$

直接求解式(4)比较困难,但借助计算软件,如Matlab软件<sup>[6]</sup>,可以迅速、精确求解 $r_{sm}$ 的值。

## 3 最大击距不存在情形下的关系式

按照经典EGM,仅仅是较小电流幅值的落雷就会引起输电线路绕击雷害事故,这与当前超高压输电线路的运行实际已经有较大偏离。文[7]在分析一起雷害事故时勾勒了如图2所示的一个极端情形,EGM作图法中的暴露弧段随着击距 $r_s$ 的增大而不断增加,此时,最大击距 $r_{sm}$ 不存在,任意大的雷电流都将可能绕击输电导线,避雷线在某种意义上失去屏蔽作用。

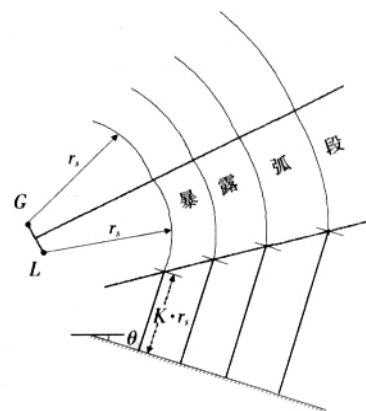


图2 EGM作图示意最大击距不存在的情形

利用上文计算最大击距 $r_{sm}$ 的分析方法,可以定量分析该情形下的 $K$ 、 $\beta$ 、 $\theta$ 的关系。

使用式(4)求解最大击距是在默认了等式两边的函数其值域有交集的前提下,然而,如果对任意的 $r_s$ ,都有 $\beta_2$ 恒大于 $\beta_1$ ,那么式(4)将不再成立,即如果 $\beta_2$ 恒大于 $\beta_1$ ,则最大击距不存在。从改进的EGM本身

来探讨这个问题,根据击距系数 K 的定义,由平面解析几何知识可知,图 1 中 C<sub>i</sub> 点的轨迹是以点 L 为焦点、地平线为准线的双曲线的一部分;显然,最大击距存在的条件是 C<sub>i</sub> 点的轨迹与 G、L 连线的中垂线有交点;一旦 C<sub>i</sub> 点轨迹双曲线的渐近线与 G、L 连线的中垂线平行,则线路将始终无法达到有效屏蔽。

当  $r_s$  时,对式(2)求极限有

$$\lim_{r_s \rightarrow \infty} \alpha_1 = +\arcsin K \quad (5)$$

同样地,对式(3)求极限有  $\lim_{r_s \rightarrow \infty} \alpha_2 =$  (6)

如果  $\lim_{r_s \rightarrow \infty} \alpha_2 = \lim_{r_s \rightarrow \infty} \alpha_1$  (7)

即  $\alpha_2 = \arcsin K$  (8)

则最大击距不存在,此时,可能对线路发生绕击的雷电流其幅值无上限。

因此,使线路达到有效屏蔽的必要条件是

$$\alpha_2 < \arctan K \quad (9)$$

即当 K、 $\alpha_2$  不满足式(9)时,就会出现最大击距不存在的情形;而对达到了有效屏蔽的线路, K、 $\alpha_2$  一定满足上述约束关系。

#### 4 计算实例

一条典型的 500 kV 单回线路其线路参数为:避雷线悬挂点高度  $h_g=38$  m, 避雷线弧垂  $f_g=9.5$  m, 导线悬挂点高度  $h_c=29$  m, 导线弧垂  $f_c=12$  m, 则避雷线平均高度  $H=31.6667$  m, 导线的平均高度  $Y=21$  m, 避雷线间距  $M=24$  m, 导线到杆塔中心线的距离  $Q=14$  m, 则保护角  $\alpha = \arctan(\frac{Q-M/2}{H-Y}) = 0.1853$ , 即为  $10.6^\circ$ ;

绝缘子串为 25 片 XP-160 绝缘子, 串长 4 m, 输电导线选用 4 × LGJ-400/35, 分裂间距 450 mm, 避雷线选用 LGJB20-95/55, 线路平均档距为 400 m, 杆塔冲击接地电阻取为 15 Ω; 线路走廊所经区域地面倾角为  $-15^\circ$ ;

文[8]使用电磁暂态计算软件仿真得到该线路的绕击耐雷水平为 15.8 kA。根据 IEEE 工作组提出的击距公式<sup>[9]</sup>

$$r_s = 8I^{0.65} \quad (10)$$

可得该线路的临界击距  $r_{sc}=48.1$  m。

根据经典 EGM<sup>[7]</sup>,  $r_{sm} = \frac{H+Y+2\sqrt{HY} \sin \alpha}{2\cos^2 \alpha} =$

$17.4 \text{ m} < r_{sc}=48.1 \text{ m}$ , 线路有效屏蔽。

选用文[3]提出的击距系数与杆塔高度的函数关系式  $K=1.18-H/108.69$  (11)

可得  $K=0.8884$ 。再根据式(4), 对上述的线路各参数, 用 Matlab 程序求得  $r_{sm}=62.9 \text{ m} > r_{sc}=48.1 \text{ m}$ , 线路只能实现部分屏蔽。

利用改进 EGM 进一步考察该线路雷电屏蔽性能: 地面倾角  $\alpha=0^\circ$  时的最大击距  $r_{sm}=37.3 \text{ m}$ , 其数值即

小于线路的临界击距  $r_{sc}$ , 线路达到有效屏蔽; 当地面倾角  $\alpha = 7.6^\circ$  时,  $r_{sm}=48.1 \text{ m} = r_{sc}$ , 若地面下倾大于  $7.6^\circ$ ; 线路将只能部分屏蔽。这表明, 当 K、 $\alpha_2$  不变, 随着地面倾斜度的增大, 线路的雷电屏蔽性能将迅速恶化。

再来看极端情形下线路的雷电屏蔽性能: 当避雷线保护角  $\alpha$  保持  $10.6^\circ$  不变, 根据式(9)计算表明, 当地面下倾  $-20^\circ$  角时, K 值必须大于 0.5092, 否则线路将无论如何都不能实现有效屏蔽; 当地面下倾  $-30^\circ$  角时, K 的临界值是 0.6508; 相应地,  $-10^\circ$  倾角对应的 K 的临界值是 0.3521。这表明, 线路走廊越平坦, K 值的‘裕度’就越大, 线路设计时对杆塔塔型及结构参数的选择其自由度就越大。同样地, 由式(9)可知, 对特高塔, 当值没有很大选择空间时, 可以通过改善线路路径或者减小杆塔保护角的方法, 提高线路绕击耐雷性能。K、 $\alpha_2$  的关系对线路设计、技改, 特别是大档距、特高塔的设计、技改具有指导意义。

#### 5 结论

(1) 考虑击距系数和地面倾角  $\alpha$  后的 EGM 是对经典的 EGM 的成功改进, 利用这一改进模型可以结合输电线路实际结构尺寸分析线路绕击耐雷性能, 却并未大幅增加模型的复杂性, 因而适合工程应用。

(2) 利用以杆塔中心线与大地交点作参考点的改进 EGM, 通过计算、比较最大击距与临界击距, 于工程上可方便、迅速地判断线路是否有效屏蔽, 进而为研究高压输电线路雷电屏蔽性能提供依据。

(3) K、 $\alpha_2$ 、 $\alpha$  这 3 个参数是由输电线路杆塔的尺寸、结构和线路走廊状况决定的, 通过权衡 K、 $\alpha_2$ 、 $\alpha$  的取值, 可以有效提高线路绕击耐雷性能。K、 $\alpha_2$ 、 $\alpha$  的关系对线路设计、技改, 特别是大档距、特高塔的设计、技改具有指导意义。

#### 参考文献:

- [1] 陈国庆, 张志劲. 输电线路耐雷性能计算方法的研究现状分析[J]. 重庆大学学报, 2003, 26(5): 137-142.
- [2] 李如虎. 用电气几何模型分析天广 500 kV 输电线路(广西段)绕击性能[J]. 广西电力技术, 1993(1): 50-52.
- [3] 张志劲, 司马文霞. 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.
- [4] 蓝 磊, 邓 维. 平原地区 500 kV 输电线路雷电屏蔽性能的模型试验研究[J]. 电网技术, 2006, 30(9): 72-76.
- [5] 章润陆. 输电线路绕击率的探讨 [J]. 高电压技术, 1985, 1(11): 39-45.
- [6] 张志涌. 精通 MATLAB 6.5 版 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [7] 王洪泽. 100 kA 大雷电流绕击西南线可能性问题的论证[J]. 广西电力工程, 1997(1): 28-33.
- [8] 朱时阳. 交流超高压输电线路耐雷性能的研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2006.
- [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, 22(6): 1-3, 29.