

山区输电线路雷电绕击跳闸率的计算

李瑞芳, 吴广宁, 曹晓斌, 马御棠, 刘平, 苏杰

(西南交通大学 电气工程学院, 四川省 成都市 610031)

Calculation of Shielding Failure Trip-Out Rate for Transmission Lines in Mountain Areas

LI Ruifang, WU Guangning, CAO Xiaobin, MA Yutang, LIU Ping, SU Jie

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: It is very important to accurately assess shielding failure tripout rate of transmission lines in mountain areas for the selection and usage of lightning protection measures. Based on the typical positions of transmission line located at mountain range, calculation formulae for corresponding shielding failure tripout rates are derived. Taking 220 kV transmission line with two overhead ground wires for example, both maximum shielding failure lightning current of transmission line located at different positions of the mountain range and the variation of shielding failure tripout rate with the dip angle of ground are calculated, and the calculation results are available for reference to lightning protection of transmission lines in mountain areas.

KEY WORDS: mountain areas; shielding failure trip-out rate; maximum shielding failure lightning current

摘要: 准确评估山区输电线路的绕击跳闸率对于防雷措施的合理选用起重要作用。基于输电线路位于山脉的典型位置, 推导了其绕击跳闸率计算公式, 以 220 kV 双避雷线输电线路为例, 计算了输电线路处于山脉不同位置时的最大绕击雷电流和绕击跳闸率随地面倾角的变化, 可为山区输电线路雷击防护提供参考。

关键词: 山区; 绕击跳闸率; 最大绕击雷电流

0 引言

山区雷电活动频繁、土壤电阻率高、地形复杂, 雷击输电线路引起的事故率较高^[1-4]。为减少山区输电线路雷击跳闸次数, 运行部门对山区输电线路实施了加装耦合地线、单避雷线改成双避雷线、施放接地降阻剂改善接地等改造措施。然而, 这些措施收效甚微, 其原因为现行的雷击跳闸率估算方法不能反映山区输电线路的防雷性能。因此, 山区输电线路的雷电绕击跳闸率计算具有重要的研究和应用价值。文献[5]给出了山区线路绕击率的计算方法;

文献[6-8]讨论了山区输电线路雷击跳闸率的计算方法, 但没有给出地面倾角和绕击跳闸率的对应关系; 文献[9]给出了地面倾角和最大绕击雷电流的对应关系, 但无论输电线路位于山顶还是山坡, 在倾角相同的情况下, 得出的结果是一样的, 这与实际情况不符; 文献[10]分析了输电线路位于山脉不同位置时的雷击跳闸率, 但没有得出相应的雷电绕击跳闸率计算公式。本文将推导输电线路位于山脉不同位置时的雷电绕击跳闸率计算公式, 并验证其合理性。

1 输电线路雷电绕击跳闸率的计算

1.1 输电线路位于山顶

双避雷输电线路位于山顶时的电气几何模型如图 1 所示。图中: r_s 、 r_c 、 r_g 分别为地线击距、导线击距、地面击距; h_s 、 h_c 分别为地线、导线平均高度; θ_L 、 θ_R 分别为山左、右侧的地面倾角; d_{CL} 、 d_{CR} 分别为输电线路左、右侧的暴露距离; α 为保护角。

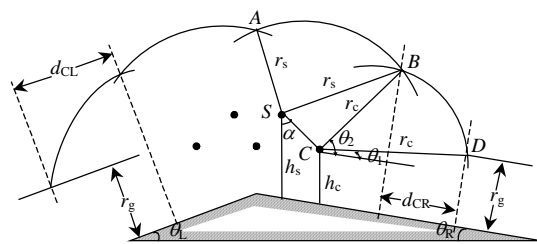


图 1 输电线路位于山顶时的电气几何模型示意图

Fig. 1 Sketch of electric geometry method of transmission lines on the top of the mountain

输电线路的暴露距离 d_{CL} 、 d_{CR} 与 r_c 、 θ_1 和 θ_2 有关, 其计算公式为

$$d_{CL}(I) = d_{CR}(I) = r_c(\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (1)$$

式中 $r_c = 10I^{0.65}$ 。

由于输电线路位于山顶, θ_1 、 θ_2 的大小与 θ_R 相关, 即

$$\begin{cases} \theta_1 = \arcsin[(r_g - h_c \cos \theta_R) / r_c] \\ \theta_2 = \frac{\pi}{2} + (\alpha + \theta_R) - \arccos\left(\frac{r_c^2 + d_{SC}^2 - r_s^2}{2r_c d_{SC}}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中： d_{SC} 为S、C点之间的距离^[11-16]。

输电线路的最大绕击雷电流 I_{\max} 与最大击距 r_{sm} 有关，即

$$\begin{cases} I_{\max L} = (0.1 \times r_{smL})^{1.54} \\ I_{\max R} = (0.1 \times r_{smR})^{1.54} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $I_{\max L}$ 、 $I_{\max R}$ 分别为输电线路左、右侧的最大绕击雷电流； r_{smL} 、 r_{smR} 分别为输电线路左、右侧的最大击距，其计算公式为

$$\begin{cases} r_{smL} = [\beta(h_s + h_c) + \sin(\alpha + \theta_L) \sqrt{(h_s + h_c)^2 - G_L}] \cdot \cos \theta_L / 2F_L \\ r_{smR} = [\beta(h_s + h_c) + \sin(\alpha + \theta_R) \sqrt{(h_s + h_c)^2 - G_R}] \cdot \cos \theta_R / 2F_R \end{cases} \quad (4)$$

式中： β 为击距系数； F_L 、 F_R 、 G_L 、 G_R 的计算公式为

$$\begin{cases} F_L = \beta^2 - \sin^2(\alpha + \theta_L) \\ F_R = \beta^2 - \sin^2(\alpha + \theta_R) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} G_L = F_L \left[\frac{h_s - h_c}{\cos \alpha \cos \theta_L} \right]^2 \\ G_R = F_R \left[\frac{h_s - h_c}{\cos \alpha \cos \theta_R} \right]^2 \end{cases} \quad (6)$$

得到 $I_{\max L}$ 、 $I_{\max R}$ 后，可计算输电线路左、右侧的绕击闪络率 S_{FFORL} 、 S_{FFORR} 和总的绕击闪络率 S_{FFOR}

$$\begin{cases} S_{FFORL} = N_g \int_{I_c}^{I_{\max L}} d_{CL}(I) f(I) dI \\ S_{FFORR} = N_g \int_{I_c}^{I_{\max R}} d_{CR}(I) f(I) dI \end{cases} \quad (7)$$

$$S_{FFOR} = S_{FFORL} + S_{FFORR} \quad (8)$$

式中： N_g 为落雷密度，次/(a·km²)； l 为输电线路长度； $f(I)$ 为雷电流概率密度^[17-21]， $f(I) = 0.026 \times 10^{-0.011 \times I}$ ； I_c 为临界绕击闪络电流。输电线路的雷电绕击跳闸率^[22-23]为

$$S_{FTR} = S_{FFOR} \times \eta \quad (9)$$

式中 η 为建弧率。

1.2 输电线路位于山坡

输电线路位于山坡时的电气几何模型如图2所示，图中 θ 为山坡的倾角。输电线路方向垂直于山脚到山顶的方向，距离山近侧的暴露距离为 d_{CL} ，距离山远侧的暴露距离为 d_{CR} ，其计算公式为

$$\begin{cases} d_{CL}(I) = r_c (\cos \theta_1 - \cos \theta_{2L}) \\ d_{CR}(I) = r_c (\cos \theta_1 - \cos \theta_{2R}) \end{cases} \quad (10)$$

式中： θ_1 、 θ_{2L} 、 θ_{2R} 是 θ 的函数，有

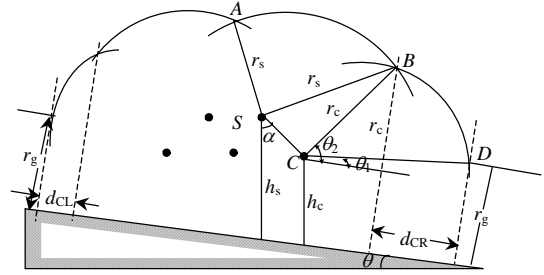


图2 输电线路位于山坡时的电气几何模型示意图
Fig. 2 Sketch of electric geometry method of transmission line on the side of the mountain

$$\begin{cases} \theta_1 = \arcsin[(r_g - h_c \cos \theta) / r_c] \\ \theta_{2L} = \frac{\pi}{2} + (\alpha - \theta) - \arccos\left(\frac{r_c^2 + d_{SC}^2 - r_s^2}{2r_c d_{SC}}\right) \\ \theta_{2R} = \frac{\pi}{2} + (\alpha + \theta) - \arccos\left(\frac{r_c^2 + d_{SC}^2 - r_s^2}{2r_c d_{SC}}\right) \end{cases} \quad (11)$$

输电线路的最大绕击雷电流 I_{\max} 与最大击距 r_{sm} 的关系由式(3)定义，其中： $I_{\max L}$ 、 $I_{\max R}$ 分别为距离山近侧、距离山远侧的最大绕击雷电流； r_{smL} 、 r_{smR} 分别为距离山近侧、距离山远侧的最大击距，其计算公式为

$$\begin{cases} r_{smL} = [\beta(h_s + h_c) + \sin(\alpha - \theta) \sqrt{(h_s + h_c)^2 - G_L}] \frac{\cos \theta}{2F_L} \\ r_{smR} = [\beta(h_s + h_c) + \sin(\alpha + \theta) \sqrt{(h_s + h_c)^2 - G_R}] \frac{\cos \theta}{2F_R} \end{cases} \quad (12)$$

式中

$$\begin{cases} F_L = \beta^2 - \sin^2(\alpha - \theta) \\ F_R = \beta^2 - \sin^2(\alpha + \theta) \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} G_L = F_L [(h_s - h_c) / \cos \alpha \cos \theta]^2 \\ G_R = F_R [(h_s - h_c) / \cos \alpha \cos \theta]^2 \end{cases} \quad (14)$$

计算出 $I_{\max L}$ 、 $I_{\max R}$ 后，由式(7)–(9)计算 S_{FFOR} 。

1.3 输电线路从山脚到山顶架设

输电线路从山脚到山顶架设时的电气几何模型如图3所示，图中 θ 为倾角。此种情形下，保护角 α 的计算公式为

$$\alpha = \arctan\{d / [(h_s - h_c) \times \cos \theta]\} \quad (15)$$

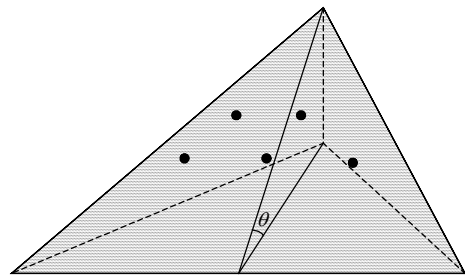


图3 线路沿山脚到山顶架设时的示意图
Fig. 3 Sketch of transmission lines set up from the foot to the top of mountain

式中 d 为导、地线在与山坡垂直方向的投影长度。

地面击距 r_g 与 h_c 、 I 和 θ 相关，其计算公式^[24-26]为

$$\begin{cases} r_g = [3.6 + 1.7 \ln(43 - h_c \cos \theta)] I^{0.65}, & h_c \cos \theta < 40 \text{ m} \\ r_g = 5.5 I^{0.65}, & h_c \cos \theta \geq 40 \text{ m} \end{cases} \quad (16)$$

输电线路的暴露距离根据式(1)计算得出，其中 θ_1 、 θ_2 是 θ 的函数，其关系为

$$\begin{cases} \theta_1 = \arcsin[(r_g - h_c \cos \theta) / r_c] \\ \theta_2 = \frac{\pi}{2} + (\alpha + \theta) - \arccos\left(\frac{r_c^2 + d_{SC}^2 - r_s^2}{2r_c d_{SC}}\right) \end{cases} \quad (17)$$

输电线路的最大绕击雷电流 I_{max} 与最大击距 r_{sm} 有关，即

$$I_{max} = (0.1 \times r_{sm})^{1.54} \quad (18)$$

式中 r_{sm} 与 h_c 和 θ 有关，其计算公式为

$$r_{sm} = [\beta(h_s + h_c) + \sin \alpha \sqrt{(h_s + h_c)^2 \cos^2 \theta - G}] / 2F \quad (19)$$

式中 F 和 G 的计算公式为

$$F = \beta^2 - \sin^2 \alpha \quad (20)$$

$$G = F[(h_s - h_c) \cos \theta / \cos \alpha]^2 \quad (21)$$

输电线路的绕击跳闸率为

$$S_{FTR} = 2N_g l \eta \int_{I_c}^{I_{max}} d_{CL}(I) f(I) dI \quad (22)$$

2 算例

试验线路为 220 kV 双避雷线输电线路，导线平均高度 $h_s = 23.4 \text{ m}$ ，地线平均高度 $h_c = 29.1 \text{ m}$ ，保护角 $\alpha = 17.98^\circ$ ，落雷密度 $N_g = 0.28 \text{ 次}/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$ 。通过试验，比较了输电线路分别位于山顶、山坡和沿山脚到山顶架设时的 I_{max} 和 S_{FTR} 。

输电线路位于山顶时， I_{max} 与 S_{FTR} 的计算值如图 4、5 所示。由图 4、5 可知：地面倾角在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 间变化时， I_{max} 的变化范围为 10.8367~66.6767 kA， S_{FTR} 的变化范围为 0.252 822~8.298 73 次/(a·100 km)，二者都随着地面倾角的增加而增加，变化趋势较为一致，用 I_{max} 的变化趋势来反映 S_{FTR} 的变化趋势在工程中是可行的。

输电线路位于山坡时， I_{max} 与 S_{FTR} 的计算值如图 6、7 所示。由图 6、7 可知：杆塔外侧(离山远侧)对应的 I_{max} 与 S_{FTR} 随地面倾角增大而增大；而内侧(离山近侧)对应的 I_{max} 与 S_{FTR} 随地面倾角增加而减小，这是因为内侧受到山体的屏蔽作用，不容易被绕击；随着地面倾角在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 间变化， I_{max} 的变化范围为 0.252 282~4.149 365 kA。从图 7 可知：在地面倾角较小时，内侧也存在一定的绕击跳闸率；在

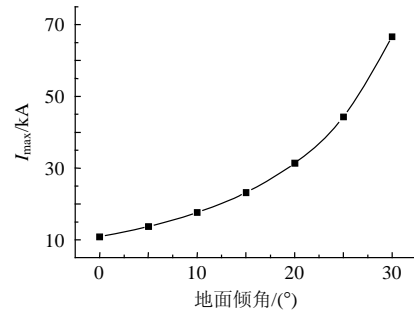


图 4 输电线路位于山顶时最大绕击雷电流与地面倾角的关系
Fig. 4 Relationship between maximum shielding failure lightning current and the dip angle of ground when the transmission lines sited on the top of mountain

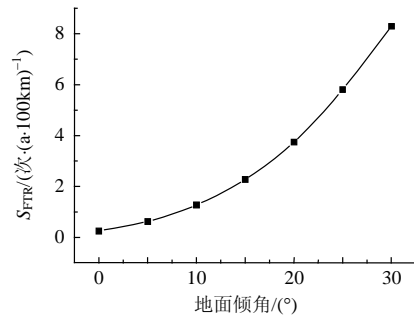


图 5 输电线路位于山顶时绕击跳闸率与地面倾角的关系
Fig. 5 Relationship between shielding failure trip-out rate and the dip angle of ground when the transmission lines sited on the top of mountain

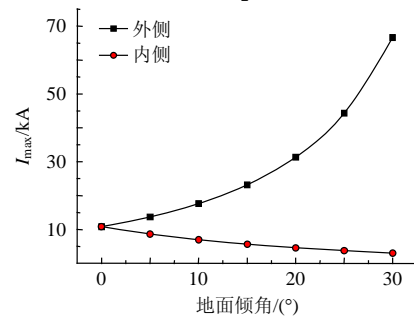


图 6 输电线路位于山坡时最大绕击雷电流与地面倾角的关系
Fig. 6 Relationship between maximum shielding failure lightning current and the dip angle of ground when the transmission lines sited on the side of mountain

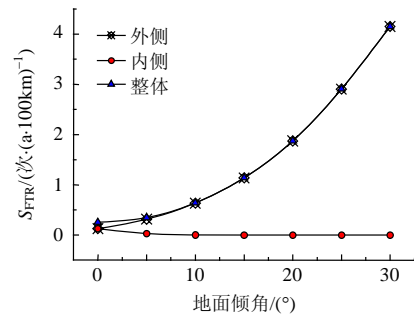


图 7 输电线路位于山坡时绕击跳闸率与地面倾角的关系
Fig. 7 Relationship between shielding failure trip-out rate and the dip angle of ground when the transmission lines sited on the side of mountain

地面倾角较大时, 外侧跳闸率和整体的跳闸率几乎重合。因此, 地面倾角越大, 总的跳闸率越接近外侧暴露距离产生的跳闸率。

输电线路沿山脚到山顶架设时, I_{\max} 与 S_{FTR} 的计算值如图 8、9 所示。由图 8、9 可知: 随着地面倾角在 $0^\circ\sim 30^\circ$ 间变化, I_{\max} 的变化范围为 10.836 7~9.107 5 kA, S_{FTR} 的变化范围为 0.252 282~0.043 617 次/(a·100km), 二者都随着地面倾角的增加而减小, 这是因为随着倾角的增加, 山坡对输电线路的屏蔽效果越来越好, 因此更不容易发生绕击。

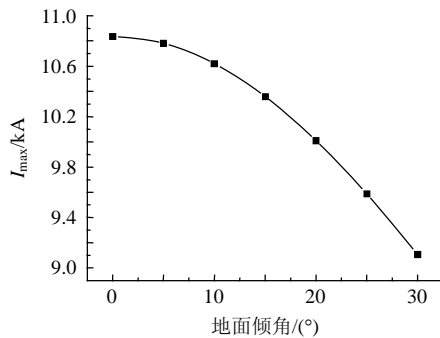


图 8 输电线路沿山脚到山顶架设时最大绕击雷电流与地面倾角的关系

Fig. 8 Relationship between maximum shielding failure lightning current and the dip angle of ground when transmission lines set up from the foot to the top of mountain

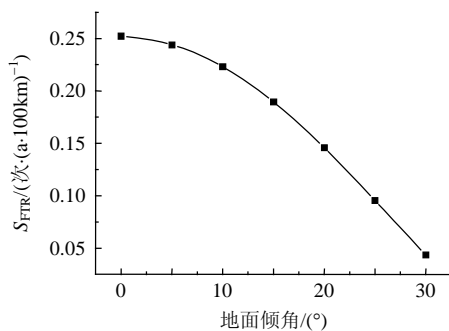


图 9 输电线路沿山脚到山顶架设时绕击跳闸率与地面倾角的关系

Fig. 9 Relationship between shielding failure trip-out rate and the dip angle of ground when transmission lines set up from the foot to the top of mountain

综合分析图 4—9 可得: 地面倾角相同时, 输电线路位于山顶时的绕击跳闸率最大, 输电线路位于山坡时的绕击跳闸率为位于山顶时的 0.5 倍左右, 输电线路沿山脚到山顶架设时的绕击跳闸率最小。山顶最容易跳闸, 山坡次之, 沿山脚到山顶架设时最不容易跳闸。这是由于山顶的线路周围没有任何的屏蔽, 最易跳闸; 山坡地形外侧没被屏蔽, 但内侧受到山体的部分屏蔽作用, 所以绕击跳闸率稍小一些; 沿山脚到山顶架设时线路被山体屏蔽的

更多, 因此绕击跳闸率小的多。文中所得公式是符合工程实际情况的。

3 结论

1) 位于山顶时, 输电线路的绕击跳闸率最高; 位于山坡时输电线路的绕击跳闸率约为位于山顶时的 0.5 倍; 输电线路沿山脚到山顶架设时的绕击跳闸率最小。

2) 最大绕击雷电流与绕击跳闸率随地面倾角的变化趋势大致相同, 最大绕击雷电流能基本反映某种地形的绕击特性。

参考文献

- [1] 王巨丰, 齐冲, 车谄颖, 等. 雷电流最大陡度及幅值的概率分布[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(3): 106-110.
Wang Jufeng, Qi Chong, Che Yiyong, et al. Probability distribution on measuring parameters of the lightning supreme steepness and lightning peak current in the transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(3): 106-110(in Chinese).
- [2] 叶会生, 何俊佳, 李化, 等. 雷击高压直流线路杆塔时的过电压和闪络仿真研究[J]. 电网技术, 2005, 29(21): 31-35.
Ye Huisheng, He Junjia, Li Hua, et al. Simulation of overvoltage and flashover caused by lightning stroke at towers of HVDC transmission line[J]. Power System Technology, 2005, 29(21): 31-35(in Chinese).
- [3] 李立涅, 司马文霞, 杨庆, 等. 云广 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电线路耐雷性能研究[J]. 电网技术, 2007, 31(8): 1-5.
Li Licheng, Sima Wenxia, Yang Qing, et al. Research on lightning withstand performance of $\pm 800\text{kV}$ ultra HVDC power transmission line from Yunnan to Guangdong[J]. Power System Technology, 2007, 31(8): 1-5(in Chinese).
- [4] 莫付江, 陈允平, 阮江军. 输电线路杆塔模型与防雷性能计算研究[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 80-84.
Mo Fujiang, Chen Yunping, Ruan Jiangjun. Study on transmission tower models and their lightning performance calculation[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 80-84(in Chinese).
- [5] DL/T 620—1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [6] 王洪泽. 关于山区输电线路雷击跳闸率的计算问题[J]. 高电压技术, 1982, 8(2): 26-32.
Wang Hongze. Calculation on lightning strike trip-out rate on transmission lines in mountain terrains[J]. High Voltage Engineering, 1982, 8(2): 26-32(in Chinese).
- [7] 李如虎. 对多雷山区输电线路雷击跳闸的看法[J]. 中国电力, 1982, 15(9): 12-15.
Li Ruhu. Opinion on lightning strike trip-out of transmission lines in mountain terrains[J]. Electric Power, 1982, 15(9): 12-15(in Chinese).
- [8] 陈及时. 山区送电线路实际雷击跳闸率的分析[J]. 高电压技术, 1995, 21(1): 77-78.
Chen Jishi. Analysis of practical lightning stroke outage rate on transmission lines in mountainous district[J]. High Voltage Engineering, 1995, 21(1): 77-78(in Chinese).

- [9] 王洪泽. 导线和地面临界电场强度不同时雷电最大击距的计算公式[J]. 广西电力技术, 1996(2): 10-14.
Wang Hongze. A formula for calculating the maximum striking distance with different critical electric field strengths of conductors and the ground[J]. Guangxi Electric Power Technology, 1996(2): 10-14(in Chinese).
- [10] 周远翔, 鲁斌, 燕福龙. 山区复杂地形输电线路绕击跳闸率的研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(6): 45-49.
Zhou Yuanxiang, Lu Bin, Yan Fulong. Shielding failure flash-over rate under conditions of complex landscape in a mountainous area[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(6): 45-49(in Chinese).
- [11] IEEE Std 1243-1997 IEEE guide for improving the lightning performance of transmission lines[S].
- [12] 贾磊, 张桂红, 舒亮, 等. 计算输电线路绕击跳闸率的新模型[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(2): 223-227.
Jia Lei, Zhang Guihong, Shu Liang, et al. New model for calculating the shielding failure trip-out rate of transmission line[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(2): 223-227(in Chinese).
- [13] James T W, William A C. Estimating lightning performance of transmission lines II-updates to analytical models[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3): 1254-1267.
- [14] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005: 195-196.
- [15] 吴广宁. 高电压技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 205-206.
- [16] 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.
Zhang Zhijin, Sima Wenxia, Jiang Xinliang, et al. Study on the lightning protection performance of shielding failure for UHV&EHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 1-6(in Chinese).
- [17] 陈家宏, 童雪芳, 谷山强, 等. 雷电定位系统测量的雷电流幅值分布特征[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1893-1897.
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): 1893-1897 (in Chinese).
- [18] 陈家宏, 冯万兴, 王海涛, 等. 雷电参数统计方法[J]. 高电压技术, 2007, 33(10): 6-10.
Chen Jiahong, Feng Wanxing, Wang Haitao, et al. Statistical method of lightning parameters[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(10): 6-10 (in Chinese).
- [19] Shim E B, Woo J W, Han S O, et al. Lightning characteristics in Korea and lightning performance of power systems[J]. Proceedings of the IEEE/PES, 2002, 1(3): 534-539.
- [20] Carlo A N, Mario P. Estimation of the statistical distributions of lightning current parameters at ground level from the data recorded by instrumented towers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 1400-1409.
- [21] IEEE Std 1243-1997 IEEE Guide for improving the lightning performance of transmission lines[S].
- [22] 李晓岚, 尹小根, 余仁山, 等. 基于改进电气几何模型的绕击跳闸率的计算[J]. 高电压技术, 2006, 32(3): 42-44.
Li Xiaolan, Yin Xiaogen, Yu Renshan, et al. Calculation of shielding failure flashover rate for transmission line based on revised EGM[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(3): 42-44 (in Chinese).
- [23] 苏红梅, 刘晓冬, 魏国平, 等. 500kV 交流同塔四回线路的绕击耐雷性能[J]. 高电压技术, 2007, 33(11): 205-209.
Su Hongmei, Liu Xiaodong, Wei Guoping, et al. Characteristic of lightning shielding failure for 500kV AC transmission lines with quadruple-circuits on one tower[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(11): 205-209 (in Chinese).
- [24] 伏进, 司马文霞, 李建标, 等. 基于分形理论的超特高压线路绕击耐雷性能评估[J]. 高电压技术, 2009, 35(6): 1274-1278.
Fu Jin, Sima Wenxia, Li Jianbiao, et al. Estimation on lightning shielding performance of the transmission lines based on the fractal theory[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(6): 1274-1278 (in Chinese).
- [25] 邓维, 篮磊, 文习山, 等. 用广义回归神经网络研究输电雷电绕击特性[J]. 高电压技术, 2006, 32(5): 26-30.
Deng Wei, Lan Lei, Wen Xishan, et al. Application of GRNN to study of the lightning shielding performance for 500kV transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(5): 26-30 (in Chinese).
- [26] 魏本刚, 傅正财, 袁海燕, 等. 改进先导传播模型法 500kV 架空线路雷电绕击分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 25-29.
Wei Bengang, Fu Zhengcai, Yuan Haiyan, et al. Analysis of lightning shielding failure for 500kV overhead transmission lines based on improved leader progression model[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 25-29 (in Chinese).



李瑞芳

收稿日期: 2010-06-18。

作者简介:

李瑞芳(1980), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事过电压及接地技术的应用与研究, E-mail: lrf_lirf@home.swjtu.edu.cn;

吴广宁(1969), 男, 教授, 博士生导师, 从事高电压绝缘技术与电气化铁路方面的教学与研究, E-mail: gnwu@home.swjtu.edu.cn;

曹晓斌(1974), 男, 博士研究生, 主要从事过电压及接地技术的应用与研究, E-mail: caoxiaobin@163.com。

(编辑 蒋毅恒)