

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.03.020

考虑多因素影响的大理密集输电线路绕击跳闸率计算方法

周春天^{1,2}, 张文锋³, 林敢⁴, 柴辰^{1,2}, 李帅超^{1,2}, 黎鹏^{1,2}

(1. 三峡大学湖北省输电线路工程技术研究中心, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;
3. 云南电网公司输电分公司, 云南 大理 650032; 4. 国网湖北省电力有限公司孝感供电公司, 湖北 孝感 432100)

摘要: 为提高密集输电线路绕击跳闸率计算的准确性, 以大理地区典型密集输电通道为研究对象, 引入雷电入射角和地形倾角两个影响因素, 研究了交叉跨越线路间的雷电屏蔽作用, 搭建了改进的三维电气几何模型, 计算了同塔双回输电线路的绕击跳闸率。结果表明: 由于各线路段的杆塔结构和地闪密度差异较大, 其绕击跳闸率相差较大; 考虑雷电屏蔽作用时, 两密集输电线路段的绕击跳闸率分别为0.852 5、2.297 1次/[100·(km·a)], 与不考虑雷电屏蔽作用相比, 分别减小了0.107 7、0.089 9次/[100·(km·a)]。

关键词: 密集输电线路; 电气几何模型; 交叉跨越线路; 绕击跳闸率

Calculation Method of Shielding Failure Trip-out Rate of Dali Dense Transmission Channels Considering Multiple Factor Influences

ZHOU Chuntian^{1,2}, ZHANG Wenfeng³, LIN Gan⁴, CHAI Chen^{1,2}, LI Shuaichao^{1,2}, LI Peng^{1,2}

(1. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 3. Transmission Branch of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Yunnan Dali 650032, China; 4. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Xiaogan Power Supply Company, Hubei Xiaogan 432100, China)

Abstract: For improving the accuracy of calculation of shielding failure trip-out rate of dense transmission lines, the typical dense transmission channel in Dali region of China is taken as the study object and such two influencing factors as lightning incidence angle and terrain tilt angle are introduced. The lightning shielding effect between crossing transmission lines is studied, the improved three-dimensional electrical geometric model is set up and the shielding failure trip-out rate of double-circuit transmission lines on the same tower is calculated. The result shows that the shielding failure trip-out rate of each line varies greatly due to the great difference of tower structure and ground flash density. In case of considering the lightning shielding effect, the shielding failure trip-out rate of the two dense transmission lines are 0.852 5, 2.297 1 times/[100(km·a)] respectively, which are reduced by 0.107 7, 0.089 9 times/[100·(km·a)] respectively compared with that without considering the lightning shielding effect.

Key words: dense transmission lines; electrical geometry model; crossing lines; shielding failure trip-out rate

0 引言

随着输电线路的大量建设, 为提高土地资源利用率, 节约线路走廊, 架空输电线路不可避免地出现了交叉跨越的情况^[1-3]。据电网长期运行经验表

明, 线路走廊越长, 回路越多, 其遭受绕击的概率越大^[4-5]。大理地区高压输电线路多位于山区, 地形复杂, 各线路段经常发生交叉跨越。且大理地区雷电活动强^[6], 据统计, 近5年来平均雷暴日高达249天, 落雷总数达69 717次, 地闪密度约为2.464次/(km²·a), 雷

击对密集输电通道的安全稳定运行威胁较大。因此开展密集输电通道的耐雷性能研究具有重要意义。

在实际工程中,绕击跳闸率是线路耐雷性能的重要评估指标^[7]。目前绕击跳闸率计算方法主要有规程法和电气几何模型(EGM)法^[8],规程法计算简单、但考虑因素较少,不能反映线路的具体特性。为使计算结果更贴合实际,国内外学者针对电气几何模型开展了较多研究:文[9]以传统二维电气几何模型为基础,对比分析了考虑雷击入射角前后绕击跳闸率的变化情况;文[10]分析了地形地貌对雷击跳闸率计算的影响,使得计算结果精度与实际更相符;文[11]基于改进的电气几何模型评估了500 kV山区输电线路的耐雷性能,并根据评估结果进行了有针对性的防雷改造;文[12]考虑了同塔混压线路中交流相线和直流相线间的雷电屏蔽作用,并建立了改进的电气几何模型;文[13-14]分别分析了引雷塔和树木对邻近输电线路的雷电屏蔽特性。对于密集输电线路尤其是交叉跨越线路,其下层线路的保护弧面会对上层线路的暴露弧面产生一定的雷电屏蔽作用,进而降低上层线路的绕击跳闸率,此时二维电气几何模型往往难以满足计算要求。为提高密集输电线路绕击跳闸率计算的准确性,文[15-17]提出了三维曲面输电线路绕击跳闸率的计算方法;文[18]在建立三维电气几何模型的基础上对屏蔽失效投影面积的计算方法进行了改进。但目前仍没有可以直接计算交叉跨越线路绕击跳闸率的电气几何模型。

因此,文中搭建了考虑交叉跨越线路间雷电屏蔽作用的改进的三维电气几何模型,提出了密集输电线路绕击跳闸率的计算方法,为密集输电通道的雷电防护奠定基础。

1 典型密集输电走廊介绍

以大理典型密集输电走廊为研究对象,该密集输电走廊位于大理西北部,共有3条输电线路,分别为:110 kV 剑鹤中线、220 kV 羊丽 I、II回线和500 kV 黄太甲乙线。3条输电走廊所处地区地形复杂,均位于山区,2019年羊丽 I、II回线发生跳闸,2020年雷击造成黄太甲乙线双回B相同时跳闸,雷害故障风险较高。

3条线路走廊内的杆塔类型较多,主要包括:TD49、ZB18、SJ451、SZ455等,各杆塔的具体位置及线路走向见图1。其中羊丽 I、II回线和黄太甲乙线均与剑鹤中线部分线路交叉跨越,具体为:剑鹤

中线 94-95号杆塔线路段与黄太甲乙线 73-74号杆塔线路段形成交叉跨越,剑鹤中线 95-96号杆塔线路段与羊丽 I、II回线 26-27号杆塔线路段形成交叉跨越。3条线路各基杆塔的大号侧档距见图2。

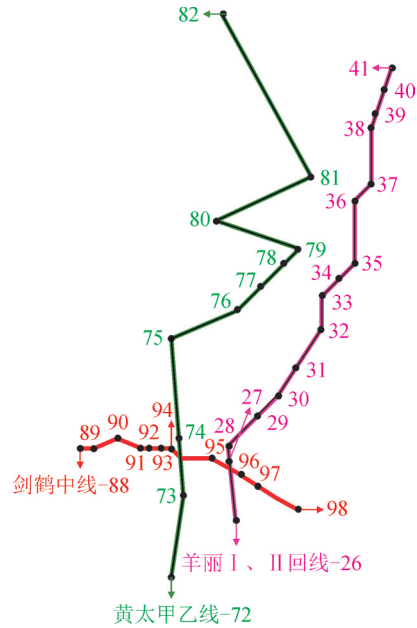


图1 典型密集输电线路

Fig. 1 Typical dense transmission line

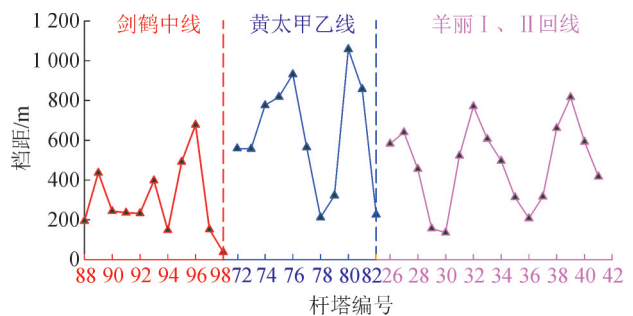


图2 杆塔大号侧档距

Fig. 2 Large side pitch of tower

2 三维电气几何模型

2.1 同塔双回线路

羊丽 I、II回线和黄太甲乙线全线为同塔双回线路,搭建电气几何模型见图3。

图3中: L 为档距长度; AA' 为避雷线; BB' 、 CC' 、 DD' 为导线。弧面 $EE'F'F'$ 为避雷线保护面,当雷电先导击中此保护面时雷电流将通过避雷线泄入大地,不会绕击线路。弧面 $FF'G'G'$ 、 $GG'H'H'$ 、 $HH'I'I'$ 为导线暴露面,雷电先导击中此面,将绕击输电线路,避雷线无法保护线路免受雷电直击。弧面 $II'K'K'$ 为大地保护面,如果雷电先导击中此面,雷电将直击大地。随着雷电流幅值增大,地线击距 r_g 增大,导线暴露面积 $FF'I'I'$ 逐渐减小,当雷电流增大到 I_{max} 时,

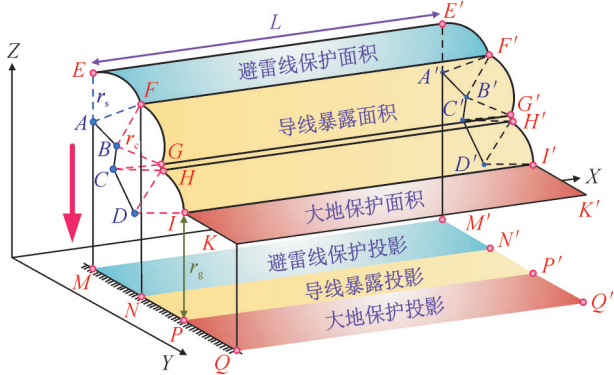


图3 同塔双回线路电气几何模型

Fig. 3 Electrical geometry model of double circuit lines in the same tower

地线击距 r_g 与避雷线保护弧面 $EE'F'F'$ 相交,此时该线路段内不会发生绕击, I_{max} 对应的雷电流即最大绕击电流。其中地线、导线和大地的击距可为^[19]

$$\begin{cases} r_s = 0.67h^{0.6}I^{0.74} \\ r_c = r_s \\ r_g = 0.9r_s \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: r_s 、 r_c 、 r_g 分别为避雷线、导线、大地的击距; h 为杆塔高度,m; I 为雷电流幅值,kA。输电线路2个杆塔之间整个档距的绕击率 P 可通过计算暴露投影面积和保护投影面积来计算,具体计算式为^[15]

$$P = \frac{S_{NN'P'P}}{S_{NN'P'P} + S_{MM'N'N}} \quad (2)$$

式(2)中, $S_{NN'P'P}$ 和 $S_{MM'N'N}$ 分别为导线暴露投影面积和避雷线保护投影面积, m^2 。

考虑档距内导线高度时,可用悬链线方程来表示,将其与绕击率计算公式联立即可得出各档距的绕击率^[20]。一般默认雷电入射方向垂直向下,但实际雷电先导入射角是满足一定概率分布的,见式(3)^[21]

$$g(\lambda) = \begin{cases} 0 & \lambda \leq -\pi/2 \\ \frac{2}{\pi} \cos^2 \lambda & -\pi/2 \leq \lambda \leq \pi/2 \\ 0 & \lambda \geq \pi/2 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: λ 为雷电入射角度; $g(\lambda)$ 为雷电入射角度分布概率。

当考虑雷电入射角的影响时,改进电气几何模型见图4。

不同雷电入射角对应的投影面积不同,当雷电入射角较小时,上层弧面不会对下层弧面产生屏蔽作用,计算避雷线保护投影面积 $S_{斜投影}$ 为

$$S_{斜投影} = (S_{垂直投影} \times \tan \lambda + K - r_{gmax}) / \tan \lambda \quad (4)$$

式(4)中: r_{gmax} 为最大绕击电流下的大地击距; K 为避雷线击距最高点即 E 点的对地高度,m; λ 为雷电入射角度;

计算弧面 $FF'G'G'$ 、 $GG'H'H$ 和 $HH'I'I$ 的暴露投影面积时, r_{gmax} 分别为 G 点、 H 点和 I 点的对地高度, K

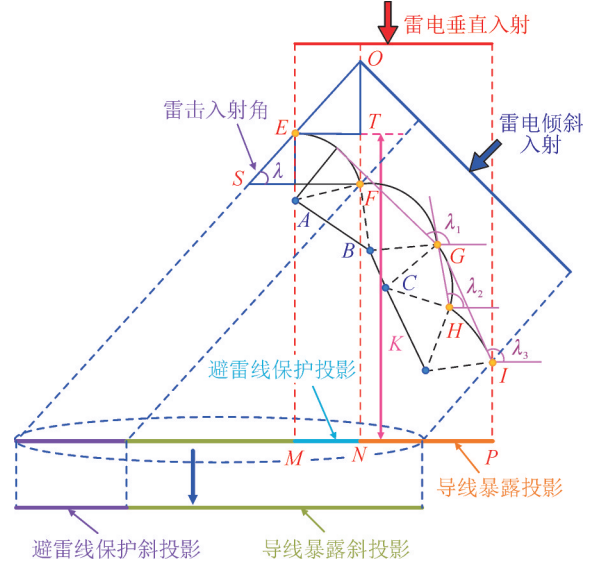


图4 考虑雷电入射角改进电气几何模型

Fig. 4 The improved electrical geometry model considering the lightning incidence angle

为对应弧面的最高点即 F 点、 G 点和 H 点的对地高度。当雷电入射角较大时,上层弧面会将下层弧面屏蔽, λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别对应弧面 FG 被 EF 屏蔽、弧面 GH 被 FG 屏蔽、弧面 HI 被 GH 屏蔽时的雷电入射角^[9]。

考虑地形倾角时,与平地电气几何模型相比主要体现在大地击距的变化上^[22],见图5。根据几何位置关系可计算出考虑地形倾角后大地击距的变化情况,计算式为:

$$\delta = \arccos\left(\frac{\sqrt{(h_3 - h_4)^2 + (b_3 - b_4)^2}}{2r_s}\right) \quad (5)$$

$$\gamma = \delta + \arctan\left(\frac{h_3 - h_4}{b_4 - b_3}\right) - \pi/2 \quad (6)$$

$$r_{g1} = \cos \beta \times \{r_g - [(r_s \sin \gamma + b_4) \times \tan \beta]\} \quad (7)$$

式(5)-(7)中: h_3 、 h_4 、 b_3 、 b_4 分别为 C 和 D 两导线的对地高度和横担长度,m; r_{g1} 为考虑地形倾角后的大地击距; β 为地形倾角。

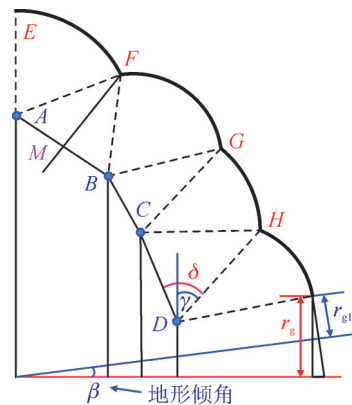


图5 考虑地形倾角改进电气几何模型

Fig. 5 Improved electrical geometry model considering topographic dip angle

将式(7)中改进的大地击距公式代入到文[20]中的绕击率计算公式中,可计算出考虑地形倾角后各导线的垂直投影,再代入到式(4)中即可计算考虑雷电入射角后各导线的斜投影,最后根据式(2)计算出整个档距内的绕击率 P 。

绕击跳闸率计算式为^[23-25]

$$PT = 2N_g \eta \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} P d\lambda \int_{I_c}^{I_{max}} f(I) dI \quad (8)$$

式(8)中: N_g 为地闪密度,次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$); η 为建弧率; I_c 为线路闪络时的最小雷电流幅值; $f(I)$ 为雷电流概率密度函数,根据GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护与绝缘配合设计规范》^[26]中推荐计算公式为:

$$f(I_0 \geq i_0) = 10^{\frac{-i_0}{88}} \quad (9)$$

$$\eta = (4.5E^{0.75} - 14) \times 10^{-2} \quad (10)$$

式(9)、(10)中, E 为绝缘子串的平均运行电压(有效值)梯度, kV/m 。

2.2 交叉跨越线路

羊丽 I、II 回线和黄太甲乙线与剑鹤中线部分线路交叉跨越,具体情况见图6。

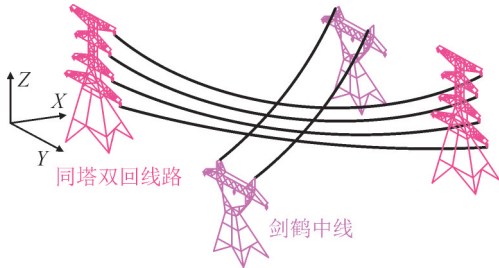


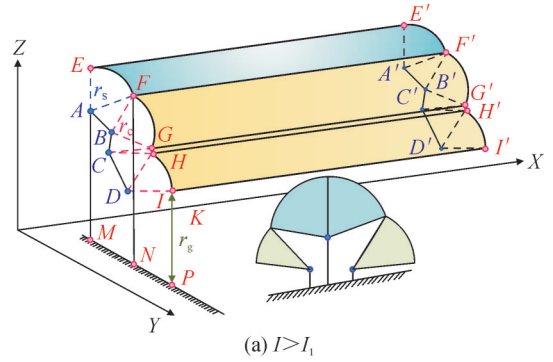
图6 交叉跨越线路示意图

Fig. 6 Cross-over circuit diagram

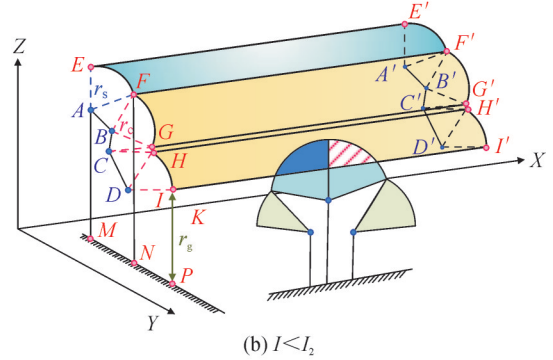
根据《DL/T 5106—2017 跨越电力线路架线施工规程》^[27]可知交叉跨越线路的最小安全距离与电压等级有关,220 kV 和 500 kV 线路最小垂直安全距离分别为 2.5 m 和 6 m,可知下层线路避雷线的对地高度一定低于上层线路导线的对地高度,但由于两线路段距离较近,因此在三维电气模型中可能出现下层线路的保护弧弧面与上层线路的暴露弧弧面相交的情况。各杆塔的呼高不同,不同雷电流作用下击距不同,其相交情况不同,主要分为4种情况,见图7。

1)当 $I > I_1$ 时,剑鹤中线保护弧弧面最高点低于羊丽 I、II 回线(黄太甲乙线)地线击距,此时剑鹤中线对上层线路无雷电屏蔽作用。

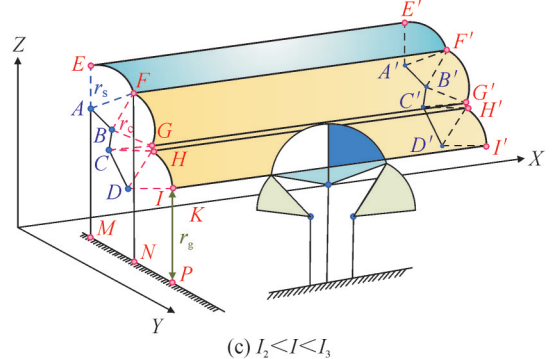
2)当 $I < I_1$ 时,剑鹤中线保护弧弧面最高点高于羊丽 I、II 回线(黄太甲乙线)地线击距,此时剑鹤中线对上层线路存在雷电屏蔽作用。当雷电流幅值为 $I < I_2$ 时,剑鹤中线保护弧弧面与同塔双回线路最下层暴露弧弧面 $HH'I'I$ 相交。



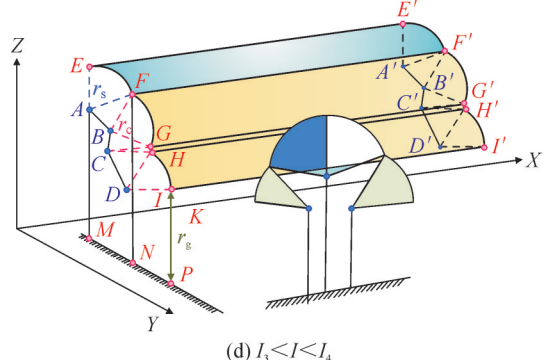
(a) $I > I_1$



(b) $I < I_2$



(c) $I_2 < I < I_3$



(d) $I_3 < I < I_4$

图7 交叉跨越情况

Fig. 7 Crossing situation

3)当 $I_2 < I < I_3$ 时,剑鹤中线保护弧弧面最高点高于羊丽 I、II 回线(黄太甲乙线)最下层暴露弧弧面 $HH'I'I$ 。

4)当 $I_3 < I < I_4(I_1)$ 时,剑鹤中线保护弧弧面最高点高于羊丽 I、II 回线(黄太甲乙线)最下层暴露弧弧面 $GG'H'H$ 。

由于在实际的计算过程中剑鹤中线保护弧弧面最高点不会与上层线路中的弧面 $EE'F'F$ 相交,因

此文中未考虑两交叉跨越线路保护弧面相交的情况。

其中 I_1 为剑鹤中线保护弧最高点与羊丽 I、II 回线(黄太甲乙线)地线击距等高时对应的雷电流。 I_2 为剑鹤中线保护弧最高点与羊丽 I、II 回线(黄太甲乙线)最下层暴露弧弧面 $HH'I'$ 最高点等高时对应的雷电流。 I_3 为剑鹤中线保护弧最高点与羊丽 I、II 回线(黄太甲乙线)暴露弧弧面 $GG'H'H$ 最高点等高时对应的雷电流。 I_4 为剑鹤中线保护弧最高点与羊丽 I、II 回线(黄太甲乙线)最上层暴露弧弧面 $FF'G'G$ 最高点等高时对应的雷电流, 如果此种情况无解则取 I_1 , 计算式为:

$$0.67h_5^{0.6} \times I_1^{0.74} + h_5 = 0.9 \times 0.67h_1^{0.6} \times I_1^{0.74} \quad (11)$$

$$0.67h_5^{0.6} \times I_q^{0.74} + h_5 = 0.9 \times 0.67h_1^{0.6} \times C_q^{0.74} \quad (12)$$

式(11)、(12)中: q 分别取 2、3、4; h_5 和 h_1 分别为剑鹤中线和羊丽 I、II 回线(黄太甲乙线)线路避雷线距地高度, m; C_2 、 C_3 、 C_4 分别为完全屏蔽暴露弧面 $HH'I'$ 、 $GG'H'H$ 、 $FF'G'G$ 时对应的雷电流幅值, 计算式为

$$\begin{cases} y_n = \left(\frac{d_n - d_m}{h_n - h_m} \right) x_n + \frac{(d_n - d_m)(d_n + d_m)}{2(h_n - h_m)} - 1/2(h_n + h_m) \\ (x_n - d_n)^2 + (y_n - h_n)^2 = (y_n / 0.9)^2 \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中: n 分别取 1、2、3; m 分别取 2、3、4, 计算出的 (x_n, y_n) 分别对应 F 、 G 、 H 3 点的坐标, 根据击距公式即可计算出完全屏蔽各弧面时对应的雷电流幅值。

由于同塔双回线路档距都在 200 m 以上, 文中考虑下层线路的保护弧面完全在档距中, 根据图 7 可知垂直跨越截面的垂直投影, 见图 8。

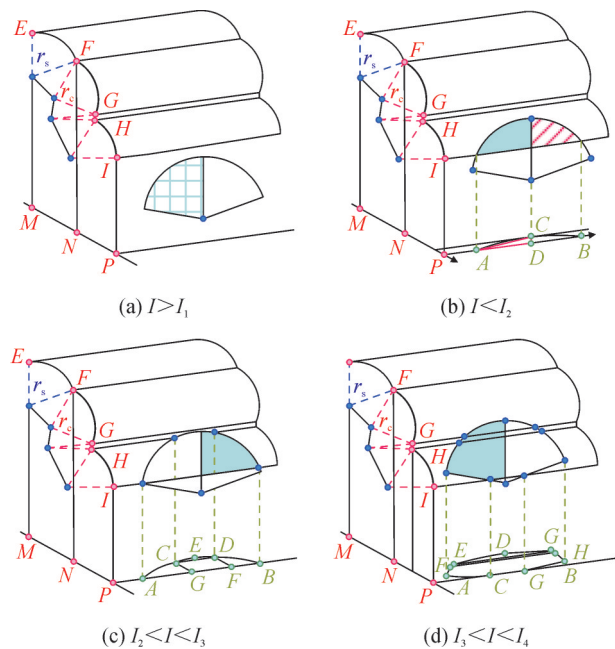


图 8 交叉截面

Fig. 8 The cross sectional

图 8 中, 上斜线截面为下层线路对上层线路产生雷电屏蔽作用的投影面积 S , 网格截面为未产生雷电屏蔽作用的保护面积。根据几何位置关系计算出上斜线截面的投影面积 S , 代入式(2)计算交叉跨越线路的绕击率

$$P = \frac{S_{NN'P'P} - S}{S_{NN'P'P} + S_{MM'N'N}} \quad (14)$$

由于杆塔结构对称, 因此只需要计算半边投影面积。下面以图 8(b) 中的相交情况为例, 求解交叉截面面积。

计算时通过建立两个坐标系来求解坐标间距, 以 D 为原点, DB 方向为 X 轴, 设 A 点横坐标为 X_a , AB 距离为

$$\begin{cases} X_a^2 + (Y_a - h_5)^2 = (0.67h_1^{0.6} I^{0.74})^2 \\ Y_a = 0.9 \times 0.67h_1^{0.6} I^{0.74} \\ AB = 2|X_a| \end{cases} \quad (15)$$

以 M 点为原点, MP 方向为 X 轴, 设 C 点横坐标为 X_c , C 点到 AB 的垂直距离 CD 计算为:

$$\begin{cases} (X_c - d_4)^2 + (Y_c - h_4)^2 = (0.67h_1^{0.6} I^{0.74})^2 \\ Y_c = 0.9 \times 0.67h_5^{0.6} I^{0.74} + h_5 \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} (X_d - d_5)^2 + (Y_d - h_5)^2 = (0.67h_1^{0.6} I^{0.74})^2 \\ Y_d = 0.9 \times 0.67h_1^{0.6} I^{0.74} \\ CD = X_d - X_c \end{cases} \quad (17)$$

式(16)、(17)中: h_4 、 d_4 分别为羊丽 I、II 回线(黄太甲乙线)最下层导线的对地高度和横担长度, m; h_5 、 d_5 分别为剑鹤中线中各基杆塔的避雷线的对地高度和横担长度, m。

文中近似将 $S_{\triangle ACD}$ 和 $S_{\triangle BDC}$ 的面积之和作为 S_{ABC} 的面积, 具体计算式为

$$S_{ABC} = (|X_a|) \times CD \quad (18)$$

最终将各情况下的交叉水平面积代入式(14)、(8)即可计算出交叉跨越线路段的绕击跳闸率。

3 计算结果与分析

当不考虑交叉跨越线路间的雷电屏蔽作用时, 计算羊丽 I、II 回线和黄太甲乙线的绕击跳闸率见表 1、图 9。

表1 同塔双回绕击跳闸率

Table 1 Shielding failure trip-out rate of double circuit transmission lines

线路名称	线路段编号	地形倾角/(°)	地闪密度/[次·(km ² ·a) ⁻¹]	绕击跳闸率/[次·100 ⁻¹ ·(km·a) ⁻¹]
羊丽 I、II 回线	26-27	5	3.201	2.387 0
	27-28	10	3.201	2.156 0
	28-29	10	3.201	1.536 0
	29-30	10	3.201	0.757 7
	30-31	15	3.201	2.010 3
	31-32	0	2.183	2.280 3
	32-33	15	3.047	0.471 5
	33-34	25	3.047	1.597 8
	34-35	10	4.219	1.653 6
	35-36	0	4.219	2.471 1
	36-37	35	4.219	0.352 8
	37-38	30	2.992	0.257 9
	38-39	25	2.992	0.290 8
	39-40	20	1.018	0.570 8
	40-41	10	1.018	0.401 1
黄太甲 乙线	72-73	25	3.518	0.878 1
	73-74	15	3.518	0.960 2
	74-75	15	3.518	0.274 1
	75-76	30	2.947	1.123 3
	76-77	30	5.107	1.353 4
	77-78	35	5.107	1.545 5
	78-79	35	5.107	1.636 5
	79-80	30	5.133	1.941 6
80-81	20	5.133	1.675 8	
81-82	15	3.730	0.513 8	

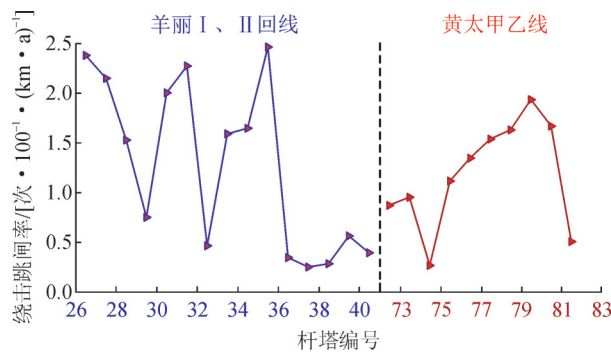


图9 同塔双回线路绕击跳闸率

Fig. 9 Shielding failure trip-out rate of double circuit transmission lines

由表1可知,由于各线路段的杆塔结构和地闪密度相差较大,绕击跳闸率有一定差异。羊丽 I、II 回线和黄太甲乙线的平均绕击跳闸率分别为 1.279 6 次/[100·(km·a)]和 1.190 2 次/[100·(km·a)]。其中羊丽 I、II 回线 35-36 号杆塔线路段的绕击跳闸率最高,为 2.471 1 次/[100·(km·a)],37-38 号杆塔

线路段绕击跳闸率最低,仅为 0.257 9 次/[100·(km·a)]。与羊丽 I、II 回线相比黄太甲乙线各线路段的绕击跳闸率相差较小,最高为 1.941 6 次/[100·(km·a)],位于 79-80 号杆塔线路段。最低为 0.274 1 次/[100·(km·a)],位于 74-75 号杆塔线路段。

剑鹤中线 94-96 号杆塔所在线路段与两条同塔双回线路发生交叉跨越,根据调研数据可知交叉跨越线路走廊内的线路信息见表 2。

表2 交叉跨越线路信息

Table 2 Cross line information

线路名称	杆塔编号	导线高度/m	横担长度/m
剑鹤中线	94-95	$h_1=22.5;h_2=18.0$	$d_1=2.80;d_2=2.80$
	95-96	$h_1=21.6;h_2=19.6$	$d_1=2.80;d_2=2.80$
黄太甲乙线	73-74	$h_1=88.0;h_2=84.0$	$d_1=13.50;d_2=11.30$
		$h_3=68.0;h_4=54.0$	$d_3=13.35;d_4=11.60$
羊丽 I、II 回线	26-27	$h_1=50.0;h_2=48.0$	$d_1=7.00;d_2=5.00$
		$h_3=43.0;h_4=40.0$	$d_3=7.00;d_4=6.00$

考虑交叉跨越线路间的雷电屏蔽作用时,计算线路走廊内各线路段的绕击跳闸率见表 3。

表3 考虑雷电屏蔽作用时的绕击跳闸率

Table 3 The shielding failure trip-out rate considering lightning shielding

线路名称	杆塔编号	未考虑雷电屏蔽的绕击跳闸率/[次·100 ⁻¹ ·(km·a) ⁻¹]	考虑雷电屏蔽的绕击跳闸率/[次·100 ⁻¹ ·(km·a) ⁻¹]
黄太甲乙线	73-74	0.960 2	0.852 5
羊丽 I、II 回线	26-27	2.387 0	2.297 1

由表3可知,不考虑雷电屏蔽作用时,两同塔双回线路段绕击跳闸率分别为 0.960 2、2.387 次/[100·(km·a)]。考虑雷电屏蔽作用时,两线路段的绕击跳闸率分别为 0.852 5、2.297 1 次/[100·(km·a)],与不考虑雷电屏蔽作用相比,分别减小了 0.107 7、0.089 9 次/[100·(km·a)],占比 11.21%和 3.76%。可见由于两线路间垂直距离较大,雷电屏蔽作用较小。

4 结论

根据大理典型密集输电线路走廊内的杆塔信息建立了改进的三维电气几何模型,计算了各线路段的绕击跳闸率,分析了交叉跨越线路间的雷电屏蔽效果,获得的结论如下:

- 1)两条同塔双回线路中,由于杆塔结构和地闪密度相差较大,使得各线路段的绕击跳闸率差异较大。羊丽 I、II 回线和黄太甲乙线中绕击跳闸率最高分别为 2.471 1、1.941 6 次/[100·(km·a)],最低分别

为0.257 9、0.274 1次/[100·(km·a)]。

2)考虑雷电屏蔽作用时,交叉跨越走廊中羊丽 I、II回线和黄太甲乙线两线路段的绕击跳闸率分别为0.852 5、2.297 1次/[100·(km·a)],分别减小了0.107 7、0.089 9次/[100·(km·a)],可见由于线路间垂直距离较大,雷电屏蔽作用较弱。

参考文献:

- [1] 谷泓杰,黄艳岩,张家浩,等. 500/±800 kV 交直流同塔混压输电线路对并行油气管道的电磁影响分析[J]. 电瓷避雷器,2021(3): 22-28.
GU Hongjie, HUANG Yanyan, ZHANG Jiahao, et al. Electromagnetic influence of 500/±800 kV AC/DC mixed voltage transmission lines on parallel oil and gas pipelines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(3): 22-28.
- [2] 甘艳,柳双,肖劲松,等.基于组合赋权法分析后续回击对线路反击跳闸影响研究[J]. 电测与仪表,2024,61(3):70-75.
GAN Yan, LIU Shuan, XIAO Jinsong, et al. Research on influence of subsequent return stroke on line counterattack trip based on combination weighting method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(3): 70-75.
- [3] 宋福根,吕学伟. 交流输电线路交叉跨越区域下方电场影响因素研究[J]. 电机与控制学报,2022,26(6):40-52.
SONG Fugen, LYU Xuewei. Research on the influencing factors of electric field under AC transmission line crossover area[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(6): 40-52.
- [4] 杜志叶,何靖萱,柳双,等.考虑后续回击的500 kV单回交流线路耐雷水平研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2023,50(2): 157-164.
DU Zhiye, HE Jingxuan, LIU Shuang, et al. Study on lightning resistance level of 500 kV single circuit AC transmission line considering subsequent lightning return stroke[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2023, 50(2): 157-164.
- [5] 黎鹏,肖盼,谌洪,等.地闪长连续电流对500 kV直流输电线路故障重启动特性的影响[J]. 电网技术,2021,45(4):1596-1604.
LI Peng, XIAO Pan, SHEN Hong, et al. Influence of cloud-to-ground lightning with long continuous current on fault restart characteristic of 500 kV DC transmission line[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1596-1604.
- [6] 潘浩,马仪,马御棠,等.云南输电线路邻近典型地形区域的雷电地闪活动聚类分析[J]. 南方电网技术,2022,16(3):116-125.
PAN Hao, MA Yi, MA Yutang, et al. Cluster analysis of lightning ground flash activity in typical terrain near transmission lines in Yunnan province[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(3): 116-125.
- [7] 唐波,刘子怡,彭友仙,等.考虑多参数影响的输电线路绕击跳闸率求解算法[J]. 电瓷避雷器,2020(6):151-158.
TANG Bo, LIU Ziyi, PENG Youxian, et al. Algorithm for solving transmission line shielding failure trip-out rate considering multi-parameter influence[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(6): 151-158.
- [8] 冯瑞发,蔡汉生,廖民传,等.基于改进跳闸率计算方法的输电线路雷击风险评估及防雷配置研究[J]. 电瓷避雷器,2022(1): 75-81.
FENG Ruifa, CAI Hansheng, LIAO Minchuan, et al. Risk assessment and lightning protection measures configuration of transmission line based on the improved calculation method of trip rate[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(1): 75-81.
- [9] 王鹏宇,元乙贺,李博,等.计及雷电入射角输电线路绕击跳闸率的计算[J]. 电瓷避雷器,2020(3):92-97.
WANG Pengyu, YUAN Yihe, LI Bo, et al. Calculation of shielding failure trip rate of transmission lines considering lightning incidence angle[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(3): 92-97.
- [10] 吴敏,赵淳,谷山强,等.精细化地形地貌影响因子下杆塔绕击跳闸率计算及治理方案决策[J]. 电瓷避雷器,2015(3):84-88.
WU Min, ZHAO Chun, GU Shanqiang, et al. Shielding failure trip-out rate calculation and lightning protection strategy making based on more-refined topography influence factor[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(3): 84-88.
- [11] 梁振,曾玲丽,戴何笠,等.基于改进电气几何模型的某500 kV山区输电线路差异化防雷改造[J]. 电瓷避雷器,2019(1):145-151.
LIANG Zhen, ZENG Lingli, DAI Heli, et al. Differential lightning protection reconstruction of a 500 kV mountainous transmission line based on improved electrical geometry model[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(1): 145-151.
- [12] CHENG Y, SUN S, MU S, et al. Analysis on lightning protection performance of shielding failure for 1 000 kV AC transmission line and ±500 kV DC transmission line hybrid-erected on same tower [J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 144-148.
- [13] 孙泽中,蓝磊,王羽,等.基于EGM的引雷塔对邻近110 kV线路的屏蔽保护效应[J]. 水电能源科学,2020,38(5):173-177.
SUN Zezhong, LAN Lei, WANG Yu, et al. Study on lightning shielding characteristic of lightning tower for adjacent 110 kV transmission line based on EGM[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(5): 173-177.
- [14] 张子建,孟庆大,戴雪光,等.并行树木对配电线路防雷影响分析[J]. 电瓷避雷器,2018(3):91-95.
ZHANG Zijian, MENG Qingda, DAI Xueguang, et al. Analysis on the influence of parallel trees on the lightning protection of distribution lines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(3): 91-95.
- [15] 李瑞芳,吴广宁,曹晓斌,等.输电线路雷绕击率的三维计算方法[J]. 电工技术学报,2009,24(10):134-138.
LI Ruifang, WU Guangning, CAO Xiaobin, et al. Three-dimensional calculation method on shielding failure rate of transmission lines [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 134-138.
- [16] 王鹏宇,鲁志伟,王永利,等.多回输电线路绕击特性的三维分析方法[J]. 电瓷避雷器,2019(6):37-42.
ANG Pengyu, LU Zhiwei, WANG Yongli, et al. Three-dimensional analysis method for shielding failure characteristics of multi circuit transmission lines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(6): 37-42.
- [17] 司马文霞,郑皓元,杨庆,等.复杂地形下输电线路绕击跳闸次数3维计算方法[J]. 高电压技术,2014,40(3):662-668.

- SIMA Wenxia, ZHENG Haoyuan, YANG Qing, et al. Three-dimensional method of calculating shielding failure flashover times of transmission line in complex terrain area[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3):662-668.
- [18] HUANG Li, LIU Peng, HUANG Junjie, et al. Algorithm for solving trip-out rate due to shielding failure of bent transmission line[J]. Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2022, 17(12):1738-1747.
- [19] 余 军, 蓝 磊, 孙泽中, 等. 考虑地面倾角下 ± 1 100 kV重要输电通道内邻近线路间雷电屏蔽效应仿真计算[J]. 电网技术, 2018, 42(2):366-373.
- YU Jun, LAN Lei, SUN Zezhong, et al. Simulation of lightning shielding between adjacent lines considering ground slope angle in important ± 1 100 kV DC transmission channel[J]. Power System Technology, 2018, 42(2):366-373.
- [20] 王鹏宇. 220 kV同塔多回输电线路绕击特性的研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2019.
- WANG Pengyu. Study on shielding failure characteristics of 220 kV multi-circuit transmission lines on the same tower[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2019.
- [21] 龚 磊, 郭 恒. 一种计及雷电入射角的改进电气几何模型[J]. 电瓷避雷器, 2017(6):92-96.
- GONG Lei, GUO Heng. An improved electrical geometry model considering lightning strike angle[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(6):92-96.
- [22] 杨明浩, 安韵竹, 胡元潮, 等. 改进EGM模型对特高压输电线路的适用性与验证[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1):93-100.
- YANG Minghao, AN Yunzhu, HU Yuanchao, et al. Applicability and verification of an improved EGM model for UHV transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1):93-100.
- [23] 范 冕, 李振强, 魏 明, 等. 750 kV同塔四回路输电线路雷电性能分析[J]. 电瓷避雷器, 2022(6):1-7.
- FAN Mian, LI Zhenqiang, WEI Ming, et al. Lightning performance of 750 kV quadruple-circuit transmission line on the same Tower [J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(6):1-7.
- [24] 吕 政, 郑皓元, 杨 庆, 等. 复杂地形下紧凑型输电线路绕击跳闸率计算方法[J]. 高压电器, 2013, 49(11):117-122.
- LYU Zheng, ZHENG Haoyuan, YANG Qing, et al. Calculation method of shielding failure flashover rate of compact transmission line in complex terrain area[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(11):117-122.
- [25] 路永玲, 周志成, 刘 洋, 等. 典型500 kV双回路直线转角塔雷击故障分析与思考[J]. 高压电器, 2016, 52(9):179-183.
- LU Yongling, ZHOU Zhicheng, LIU Yang, et al. Analysis on typical lightning failure of 500 kV double-circuit straight angle tower[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(9):179-183.
- [26] 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范: GB/T 50064—2014[S]. 2014.
- Code for design of overvoltage protection and insulation coordination for AC electrical installations: GB/T 50064—2014[S]. 2014.
- [27] 跨越电力线路架线施工规程: DLT 5106—2017[S]. 2017.
- Operation code of cross power transmission line in installing the conductor: DLT 5106—2017[S]. 2017.
- 周春天(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事高电压与绝缘技术研究(通信作者)(E-mail:617592593@qq.com)。

(上接第143页)

- characteristics of lightning activities in Yunnan Guizhou plateau [J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(2):74-79.
- [26] 吴 清, 梁亚峰, 黄 松. 海南省雷电分布特征分析[J]. 电力科学与工程, 2015, 31(s1):1-7.
- WU Qing, LIANG Yafeng, HUANG Song. Analysis of lightning distribution characteristics in Hainan province[J]. Electric Power Science and Engineering, 2015, 31(s1):1-7.
- [27] MOTOYAMA H, SHINJO K, MATSUMOTO Y, et al. Observation and analysis of multiphase back flashover on the Okushishiku test transmission line caused by winter lightning[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4):1391-1398.
- 马御棠(1986—), 男, 高工, 研究方向为电网防灾减灾(E-mail:1277396850@qq.com)。
- 朱钱鑫(1992—), 男, 工程师, 研究方向为输电运维检修、防灾减灾(通信作者)(E-mail:508378321@qq.com)。