

强风条件下 330 kV 输电线路雷击—风偏耦合风险评估

李帅超^{1,2}, 张海平³, 张欢³, 周哲^{1,2}, 甘凌楦^{1,2}, 黎鹏^{1,2}, 吴田^{1,2}

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北宜昌 443002; 2. 三峡大学湖北省输电线路工程技术研究中心, 湖北宜昌 443002;
3. 国网青海省电力公司黄化供电公司, 青海黄南藏族自治州 811200)

摘要: 受极端天气影响, 由风偏引发的雷击跳闸事故时有发生。为深入分析雷击风偏耦合风险, 提出了一种综合考虑雷击过电压下塔头间隙击穿的耦合风险评估方法。首先, 根据线路点云数据, 建立输电线路风偏有限元模型, 并拟合线路风偏位点的概率密度函数。其次, 构建空气间隙先导闪络判据模型, 计算各基杆塔雷击条件下空气间隙击穿的最小风速。最后, 结合蒙特卡罗模拟, 在笛卡尔二维坐标系中建立了考虑风偏影响的改进电气几何模型 (EGM)。研究表明: 风速为 13 m/s 时, 杆塔均存在绕击空气间隙击穿风险, 当风速达到 17 m/s 时, 杆塔均存在反击空气间隙击穿风险; 风速分别为 18 m/s 和 20 m/s 时, 杆塔绕击和反击风险均达到 D 级。

关键词: 雷击; 风偏; 输电线路; 最小空气间隙; 蒙特卡罗

Coupling Risk Assessment of Lightning Strikes and Wind Deflection for 330 kV transmission Lines Under Strong Wind Conditions

LI Shuaichao^{1,2}, ZHANG Haiping³, ZHANG Huan³, ZHOU Zhe^{1,2}, GAN Lingxuan^{1,2}, LI Peng^{1,2}, WU Tian^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 3. Huanghua Power Supply Company, State Grid Qinghai Electric Power Company, Qinghai Tibetan Autonomous Prefecture of Huangnan 811200, China)

Abstract: Affected by extreme weather, lightning trip-out accidents caused by wind deviation occur from time to time. In order to deeply analyze the coupling risk of lightning windage yaw, a coupling risk assessment method considering the breakdown of tower head gap under lightning overvoltage is proposed. Firstly, according to the point cloud data of the transmission line, the finite element model of the wind deviation of the transmission line is established, and the probability density function of the wind deviation site of the transmission line is fitted. Secondly, the criterion model of air gap pilot flashover is constructed, and the minimum wind speed of air gap breakdown under lightning strike condition of each tower is calculated. Finally, combined with Monte Carlo simulation, an improved electro-geometric model (EGM) considering the influence of wind deflection is established in the Cartesian two-dimensional coordinate system. The results show that when the wind speed is 13 m/s, the tower has the risk of shielding air gap breakdown. When the wind speed reaches 17 m/s, the tower has the risk of back striking air gap breakdown. When the wind speed is 18 m/s and 20 m/s respectively, the risk of tower shielding failure and counterattack reaches D level.

Key words: lightning strike; windage yaw; transmission line; minimum air space; Monte carlo

0 引言

近年来, 极端天气事件频繁发生, 导致输电线路遭受雷暴、强风并发的概率显著增加^[1], 如何精细化评估雷击—风偏耦合风险成为亟待解决的问题。通常在线路设计时, 缺乏高精度风速数据, 且雷击下线路带电部分和杆塔构件间最小空气间隙确定时所使用的风速通常依靠经验取

值^[2], 难以保证在不同地形和耦合气象条件下塔头空气间隙设计的合理性。此外, 输电线路风偏跳闸通常被认为是由于塔头空气间隙无法承受工频电压所致^[3], 较少考虑雷击过电压下塔头间隙击穿的情况。因此, 开展风偏线路的雷击风险定量评估研究, 对输电线路杆塔设计及其风险防护都具有重要意义^[4-5]。

关于雷击与风偏耦合风险评估研究,多数集中于简单计算导线和地线的相对位置变化对雷电绕击的影响^[6-7]。文[8]分析了某500 kV酒杯塔绕击跳闸率随风偏角变化的规律。文[9]将受风速影响发生风偏的情况与线路位于山顶或山坡时的情形等效,并提出了考虑地形和风速影响的改进EGM^[10]。文[11-12]指出了雷暴和强风具有强伴随效应,但主要分析了线路的风偏闪络风险,未涉及风偏对输电线路雷击风险的影响。文[13]基于香港雷暴和风速统计数据,拟合了雷电和风速的联合分布,并计算了超设计风速下(雷击工况)雷暴发生概率。文[14]强调雷暴和强风具有强并发性,指出大湾区40个强雷暴日中,6天超过了线路风偏设计风速(雷击工况)。文[15]描述了江西电网某500 kV杆塔闪络故障的主要原因是边相导线风偏的同时遭受雷击造成塔头间隙击穿所致。文[16]指出雷电冲击下杆塔空气间隙设计风速通常取10 m/s。结合已有研究和雷暴风速统计数据可知,强风条件下塔头间隙存在雷击放电的

风险,雷击与风偏耦合效应对输电线路安全运行具有较大影响。因此,有必要开展强风条件下雷击风偏耦合风险评估研究。

基于此,文中提出了一种强风条件下输电线路雷击风险评估方法。建立了输电线路风偏有限元模型和空气间隙先导闪络判据,计算了各基杆塔空气间隙击穿的最小风速值。结合蒙特卡罗算法改进的EGM,实现了雷击和风偏耦合风险的定量分析,并从工程实际出发,提出了雷击-风偏耦合气象灾害的应对措施。

1 考虑风偏的雷击风险评估方法

1.1 输电线路风偏有限元模型

文中基于线路点云数据,建立了输电线路与绝缘子串有限元模型,用于计算绝缘子串风偏角和线路各局部点的风偏位移变化,具体见图1(a)。

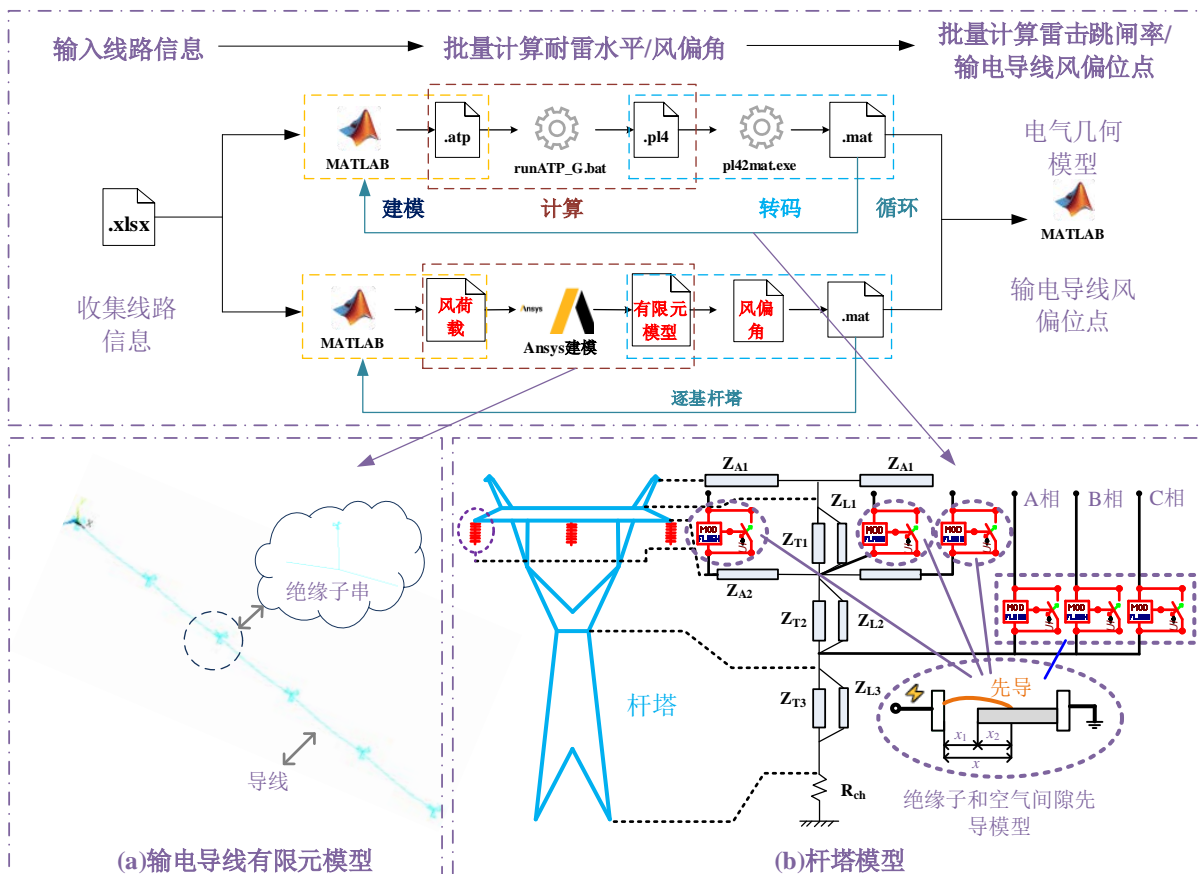


图1 联合仿真计算模型

Fig. 1 Joint simulation calculation mode

在建模过程中,绝缘子串顶端设为固定铰接,并采用Link8单元模拟绝缘子串^[17], Link10单

元模拟输电线路;输电导线的初始形变通过悬链线方程描述^[18],悬链线方程的计算方法为

$$z = \frac{H}{q} \left[\cosh \alpha - \cosh \left(\frac{2\beta x}{L} - \alpha \right) \right]$$

$$\begin{cases} \alpha = \sinh^{-1} \left[\frac{\beta(c/L)}{\sinh \beta} \right] + \beta \\ \beta = \frac{qL}{2H} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: z 为弧垂, m ; L 为档距, m ; c 为档距挂点位点差值, m ; H 为水平运行张力, N ; x 为起始点到各点单位长度的距离, m 。

1.2 绝缘子串闪络和空气间隙击穿判据模型

CIGRE 提出的先导法能较好地体现长间隙放电的物理过程, 并且克服了 $U_{50\%}$ 法和相交法的缺点, 具有较高的准确性^[19]。因此, 选取先导法作为绝缘子串和空气间隙闪络判据。

先导发展速度与电压值, 先导发展长度有关^[20], CIGRE 推荐的前导发展速度计算式为^[21]

$$v_z = kU(t) \left(\frac{U(t)}{L-s} - E_0 \right) \quad (2)$$

式(2)中: k 为先导发展系数; $U(t)$ 为绝缘子串和空气间隙的瞬时电压值; s 为先导已发展的长度, m ; L 为绝缘子串和塔头空气间隙最小距离, m ; E_0 为先导起始场强阈值^[22]。

1.3 联合仿真模型

为提升计算效率和准确度, 文中分别建立了 MATLAB-ATP 和 MATLAB-Ansys 联合仿真模型, 用于计算雷击跳闸率和线路风偏位移, 计算流程见图 1。风偏计算时, 通过统计各区段风偏位点的变化情况, 拟合了线路风偏的概率密度函数, 并计算了绝缘子串风偏角; 在雷击风险计算方面, 根据实际线路参数^[23], 建立了包含绝缘子串和空气间隙闪络判据的 ATP-EMTP 程序可识别文件(atp); 并通过自动更改雷电流节点位置^[24], 采用二分法判定绝缘子串和空气间隙是否发生闪络, 从而计算全线的耐雷水平。最终, 根据计算结果和改进 EGM, 完成雷击跳闸率的逐基计算。其中, 图 1(b)为基于 atp 文件建立的杆塔模型及先导模型示意图。

1.4 跳闸率计算方法

反击跳闸率计算式为

$$P_f = N_1 \eta g P \quad (3)$$

式(3)中: N_1 为雷击次数; η 为建弧率; g 为雷电流直击杆塔的概率; P 为闪络发生的概率。

EGM 是计算绕击跳闸率的主要方法, 但经典 EGM 只分析了导线与地线的相对位置关系。为提高计算精度, 文中基于蒙特卡罗算法建立了改进 EGM 模型, 并同时考虑地面倾角和雷电入射角的影响, 来提高跳闸率的准确性, 改进 EGM 见图 2。

影响, 来提高跳闸率的准确性, 改进 EGM 见图 2。

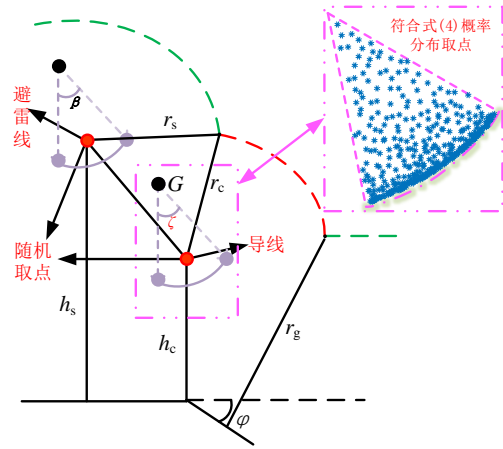


图 2 改进电气几何模型

Fig. 2 Improved EGM

绕击跳闸率的计算流程主要分为两部分: 基于蒙特卡罗算法计算导线和地线坐标值, 以及绕击跳闸率计算。首先, 根据图 2 中导线和地线的摆动幅值范围, 利用蒙特卡罗算法结合概率密度函数进行随机取点, 以确定导线和地线在笛卡尔二维坐标系中的坐标值。其次, 结合改进 EGM, 进行多次循环计算绕击跳闸率, 直到循环次数 k 满足总循环次数 k_s 后, 求解跳闸率的平均值。最后, 基于上述流程, 逐基杆塔计算雷击跳闸率, 具体计算过程见图 3。

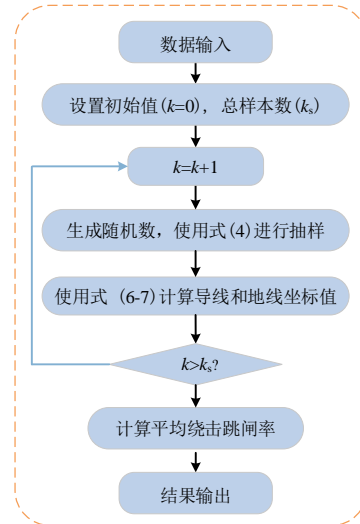


图 3 绕击跳闸率计算流程

Fig. 3 Calculation process of shielding failure trip-out rate

根据已有研究^[25-26]和有限元仿真可知, 在仿真时限设置 600 s 时, 档距内线路风偏舞动轨迹呈月牙形状, 具体位移变化见图 4。根据线路风偏位点的统计结果, 并考虑线路局部舞动的影响, 提出了线路风偏位点的概率密度公式, 来提升雷击风偏耦

合风险计算效率。

$$f(x) = \frac{1}{(e^{-10(x-k)} - b)} - c \quad x \in (0,1) \quad (4)$$

式(4)中: x 是(0, 1)范围内的随机数; k , b 和 c 为相关系数。

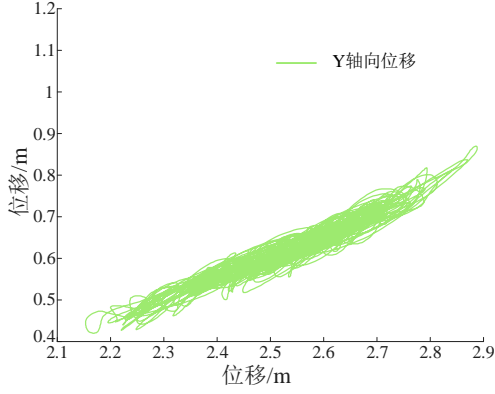


图4 线路风偏位移值示意图

Fig. 4 Line wind deflection displacement value diagram

考虑风偏影响后, 绝缘子串底部与导线连接点的空间位置可由式(5)计算

$$\begin{cases} G_x = L_c + l \sin \varphi_i \\ G_y = h_c - l \cos \varphi_i \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: G_x 、 G_y 为绝缘子串底部 G 点的 x 、 y 坐标值, m; L_c 为横担长度, m; h_c 为导线高度, m; φ_i 为悬垂绝缘子串风偏角, $^\circ$ 。

基于蒙特卡罗算法, 可通过式(6)、(7)计算笛卡尔坐标系上各点导线和地线的坐标值:

$$\begin{cases} X_c = G_x + f_c \cdot f(x) \cdot \sin(\xi_i) \\ Y_c = G_y - f_c \cdot f(x) \cdot \cos(\xi_i) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} X_s = L_s + f_s \cdot f(x) \cdot \sin(\gamma_i) \\ Y_s = H_s - f_s \cdot f(x) \cdot \cos(\gamma_i) \end{cases} \quad (7)$$

式(6)、(7)中: f_c 为导线弧垂, m; ξ_i 为导线风偏角, $^\circ$; L_s 为地线横担长度, m; H_s 为地线高度, m; γ_i 为地线风偏角, $^\circ$ 。

击距是 EGM 的计算基础^[27], 击距计算式为

$$\begin{cases} r_s = r_c = 6.72I^{0.65} \\ r_g = \begin{cases} (3.6 + 0.17 \ln(43 - h))I^{0.65} & h \geq 40\text{m} \\ 5.5 \times I^{0.65} & h \leq 40\text{m} \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中: r_s 为导(地)线的击距, m; r_g 为对地击距, m。

在计算绕击率时, 涉及雷电流幅值取值范围的确定。由于文中要探究塔头空气间隙的雷击特性, 因此选择绝缘子串和空气间隙耐雷水平 I_c 的最小值作为计算绕击率积分的下限, 绕击率计算式为^[28]

$$P_\alpha = \int_0^{\pi/2} \cos(\phi) 2\pi^{-1} \int_{I_c}^{I_{max}} x f(I) dI d\phi \quad (9)$$

式(9)中: I_{max} 为引起绕击闪络的最大雷电流幅值, kA; x 为绕击发生概率; $f(I)$ 为雷电流幅值概率密度函数。

绕击跳闸率计算式为

$$P_r = N_1 \eta P_\alpha \quad (10)$$

1.5 雷击风险划分标准

根据反击和绕击跳闸率的计算结果, 对输电线路风险等级进行了划分, 具体的风险等级划分标准见表 1。其中, P_{r0} 和 P_{j0} 分别表示在不考虑风偏影响时的平均反击跳闸率和平均绕击跳闸率。

表 1 雷击风险等级划分标准

Table 1 Lightning risk classification criteria				
风险等级	A	B	C	D
绕击	$P_r < 0.5P_{r0}$	$0.5P_{r0} \leq P_r < P_{r0}$	$P_{r0} \leq P_r < 1.5P_{r0}$	$P_r \geq 1.5P_{r0}$
反击	$P_j < 0.5P_{j0}$	$0.5P_{j0} \leq P_j < P_{j0}$	$P_{j0} \leq P_j < 1.5P_{j0}$	$P_j \geq 1.5P_{j0}$

2 案例分析

以青海地区某 330 kV 输电线路为例, 分析雷击与风偏耦合对输电线路的影响。该线路多个杆塔区段受到雷击和风偏的共同威胁, 基于历史故障数据, 选择 300-320 号区段作为研究对象。该区段平均海拔为 4 500 m, 地闪密度分布见图 5。研究区段的直线塔和耐张塔型号分别为 ZBC 250 和 JG 150, 导线型号为 3×LGJ-240/30, 地线左右侧型号为 1×19-11.5-1270, OPGW-120, 绝缘子型号为 FXBW-330/160-1。

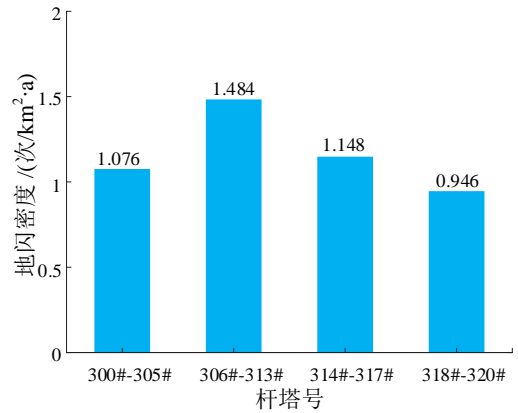


图5 300-320 号地闪密度分布

Fig. 5 No.300-No.320 ground flash density distribution
该区段风速的概率分布统计结果, 见图 6。随

着风速的增加，概率占比逐渐减小，最大风速值为 24 m/s。由于该区段的 302、311 号耐张塔已安装硬质引流线和防风绝缘子串，在最大风速情况下，跳线和塔身的空气间隙无击穿风险，因此下文仅以直线塔作为研究对象。

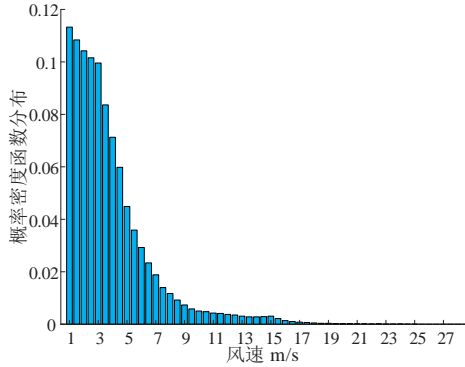


图 6 风速概率密度分布

Fig. 6 Probability density distribution of wind speed

通过对 300-320 号线路区段实地调研，测量了该区段各基杆塔的接地电阻值，并采集了线路及地形的点云数据。随后，对点云数据进行处理，提取了该区段所有杆塔、档距、弧垂等线路参数及地面倾角，确保线路和地形等输入数据的准确性。

2.1 耐雷水平分析

由于绝缘子串闪络电压不受风速的影响，随着风速的增加，塔头空气间隙会逐渐变小，耐压值也随之下降。因此当耐雷水平发生变化时，可认为是空气间隙被击穿。基于此，计算线路各基杆塔耐雷水平，并求取杆塔空气间隙发生击穿时的最小风速。绝缘子和空气间隙耐雷水平计算结果见图 7、8。

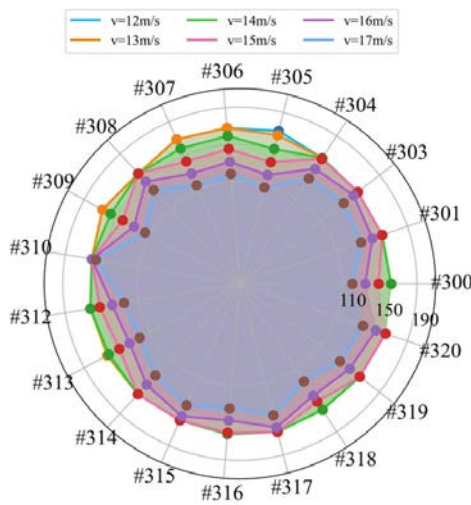


图 7 反击耐雷水平

Fig. 7 Counterattack lightning withstand level

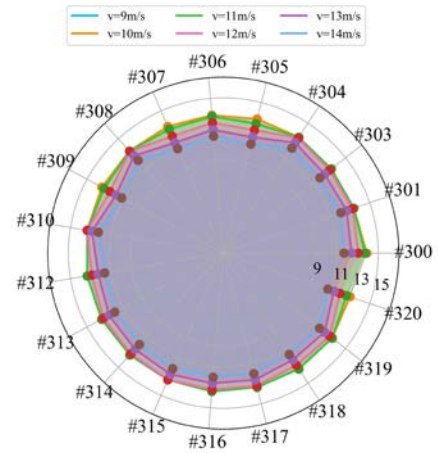


图 8 绕击耐雷水平

Fig. 8 Shielding failure lightning withstand level

由图 7 可知，当风速小于 12 m/s 时，杆塔反击耐雷水平保持不变。但随着风速增加，部分杆塔的耐雷水平开始下降，当风速达到 17 m/s 时，所有杆塔反击耐雷水平都发生了不同程度的下降。同理，由图 8 可知，当风速小于 11 m/s 时，绕击耐雷水平并未发生变化，当风速达到 13 m/s 时，所有杆塔绕击耐雷水平均有所降低。

由于塔头空气间隙耐压值随着风速增加而下降，因此通过对比各基杆塔反击和绕击耐雷水平变化，即可确定雷击过电压下塔头空气间隙击穿的最小风速值，具体最小风速值见表 2。

表 2 空气间隙击穿时最小风速值

Table 2 Wind speed value of air gap breakdown

杆塔号	风速/(m·s ⁻¹)	
	反击	绕击
300	15	11
301	16	12
303	16	12
304	15	12
305	13	11
306	14	11
307	14	11
308	16	12
309	14	11
310	17	13
312	14	12
313	14	12
314	16	12
315	16	13
316	15	12
317	16	12
318	15	12
319	16	12
320	16	11

2.2 跳闸率分析

对不同风速条件下绝缘子串和空气间隙雷击

风险分别进行分析：①在绝缘子串闪络情况下，研究了不同风速下绕击跳闸率的变化规律；②在空气间隙击穿情况下，研究了仅考虑空气间隙变化对绕击跳闸率的影响，并探讨了空气间隙击穿时绕击与反击跳闸率的变化规律。

2.2.1 绝缘子串闪络跳闸率分析

当仅考虑绝缘子串闪络时，风速只通过影响绕击率来增加线路雷击风险，因此仅对雷电绕击展开分析。根据表 2 可知，当风速小于 11 m/s 时，该线路区段不会发生塔头空气间隙击穿。故选择风速为 0、5、10 m/s 时，探究风速对绕击跳闸率的影响，计算结果见图 9。

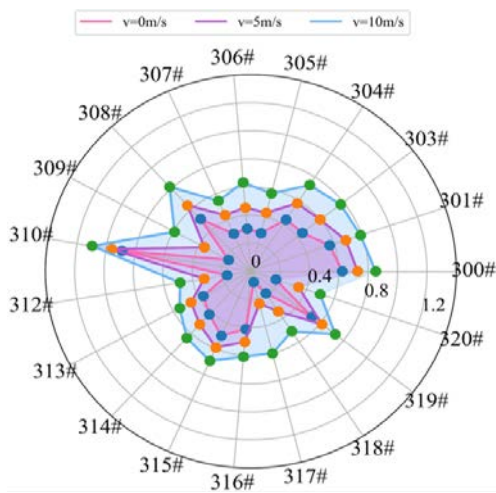


图 9 绕击跳闸率

Fig. 9 Shielding failure trip-out rate

由图 9 可知，绕击跳闸率随风速的增加而增大。当风速 5 m/s 时，该区段绕击跳闸率平均升高 0.13 次/(100 km·a)；当风速达到 10 m/s 时，平均升高 0.28 次/(100 km·a)。其中，317 号杆塔大号侧绕击跳闸率变化最为明显，在风速为 10 m/s 时，增加了 0.52 次/(100 km·a)。结合该区段线路参数可推断，由于该档距导线弧垂相差较大，考虑风偏影响后，暴露弧长度增加，从而导致绕击跳闸率显著上升。

2.2.2 空气间隙击穿跳闸率分析

为探究仅考虑空气间隙击穿对绕击跳闸率的影响，首先假设风偏不影响绕击率变化，仅探究空气间隙长度变化对绕击跳闸率的影响，计算结果见图 10。

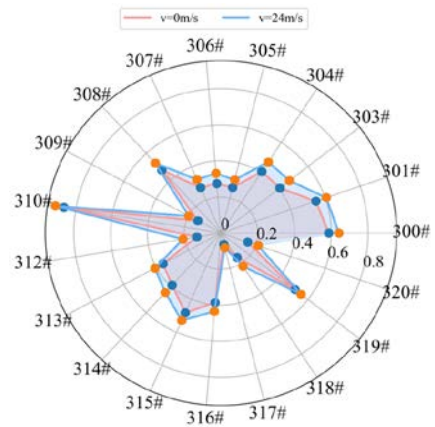


图 10 绕击跳闸率(假设绕击率不变)

Fig. 10 Shielding failure trip-out rate (shielding failure rate remains unchanged)

由图 10 可知，在最大风速条件下，绕击跳闸率平均提高了 0.06 次/(100 km·a)。可见，尽管风偏时空气间隙的耐雷水平显著降低，但该条件下雷电流的概率密度较小，导致仅考虑空气间隙变化对绕击跳闸率的影响有限。

在此基础上，进一步探讨了不同风速条件下，空气间隙击穿时绕击与反击跳闸率的变化规律。根据表 2 可知，当风速大于 17 m/s 时，若杆塔发生反击，塔头空气间隙存在被击穿的风险。因此选择风速 18、20、22、24 m/s 对反击跳闸率进行计算，并选择风速 0 m/s 作为对照组，具体结果见图 11。

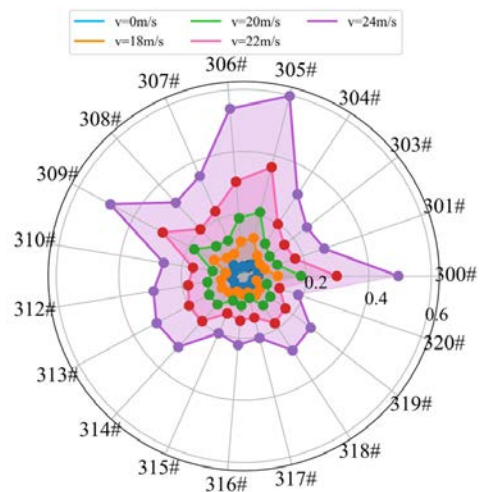


图 11 反击跳闸率(空气间隙击穿)

Fig. 11 Counterattack trip-out rate (air gap breakdown)

由图 11 可知，风速越大，反击导致塔头间隙击穿的跳闸率越高，其本质是由于空气间隙减小，造成塔头空气间隙耐压值变小所致。

同理，当风速超过 13 m/s 时，若线路发生绕击，塔头空气间隙也存在被击穿的风险。故选取风速

14、16、18、20、22、24 m/s 对绕击跳闸率进行计算，同时以 0 m/s 作为对照组，探讨风速对跳闸率的影响。具体结果见图 12，由图 12 可知，随着风速的增加，塔头空气间隙逐渐减小，绕击率持续上升，是导致绕击跳闸率增加的根本原因。

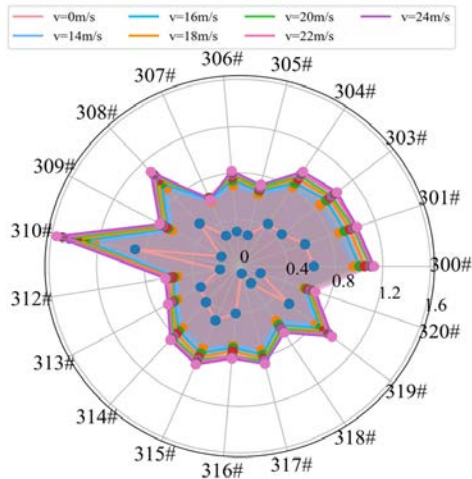


图 12 绕击跳闸率(空气间隙击穿)

Fig. 12 Shielding failure trip-out rate (air gap breakdown)

2.3 雷击风险等级

根据不同风速下雷击跳闸率计算结果，结合风险等级划分标准，对各基杆塔的反击和绕击风险等级进行了评估，结果见图 13、14。

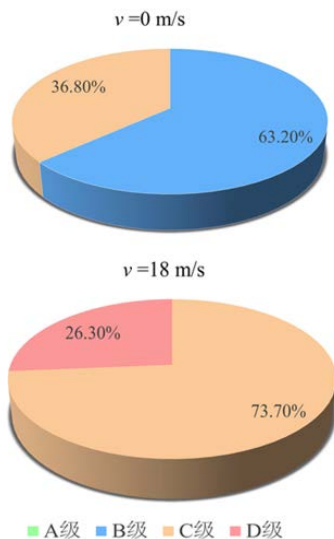


图 13 反击风险等级

Fig. 13 Counterattack risk level

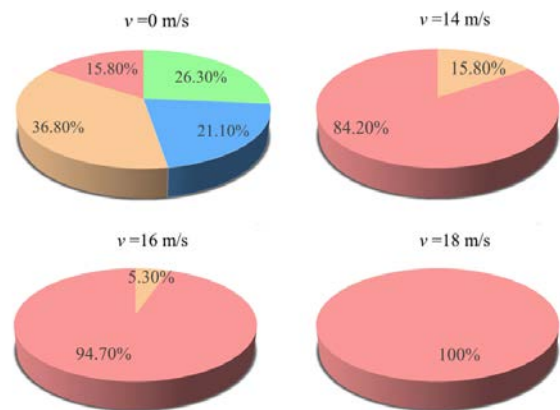


图 14 绕击风险等级

Fig. 14 Risk level of shielding failure

由图 13 可知，当风速为 18 m/s 时，多基杆塔的风险等级明显升高，这是由于该风速条件下部分杆塔已达到空气间隙击穿的最小风速。此外，经计算风速达到 20 m/s 时，所有杆塔反击风险等级均达到 D 级。同理，由图 14 可知，风速为 14 m/s 时，D 级风险杆塔数增加至 13 基，而在风速为 18 m/s 时，所有杆塔绕击风险均达到 D 级。

3 结论

文中提出了一种强风条件下输电线路雷击风险评估方法，考虑了雷击过电压下塔头间隙击穿的风险，同时采用蒙特卡罗算法对 EGM 进行了改进，并考虑地面倾角和雷电入射角的影响，提高了雷击风险计算的准确性，获得的主要结论如下：

1) 当风速为 13 m/s 时，部分杆塔存在反击空气间隙击穿风险，当风速达到 17 m/s 时，杆塔均达到了反击空气间隙击穿最小风速；同理，当风速为 11 m/s 时，超 6 基杆塔存在绕击空气间隙击穿风险，风速为 13 m/s 时，杆塔均达到了绕击空气间隙击穿最小风速。

2) 风偏条件下，仅考虑绝缘子串闪络时，当风速为 10 m/s 时，绕击跳闸率增加 0.28 次/(100 km·a)；当绕击率不变，仅考虑空气间隙距离变化时，风速为 24 m/s 时，绕击跳闸率增加 0.06 次/(100 km·a)。

3) 风速为 18 m/s 时，杆塔绕击闪络风险均达到 D 级，73.7% 的杆塔反击闪络风险达到 D 级；当风速达到 20 m/s 时，杆塔反击风险均达到 D 级。

4) 对于雷击和风偏威胁较为严重的线路区段，建议安装 V 型绝缘子串，以最大程度地减少绝缘子串的风偏位移。在档距中央，建议安装相间间隔棒，以减小导线和地线的风偏位移，实现防风偏的同时，降低雷电绕击率。

参考文献：

[1] 王 建，邓鹤鸣，刘劲松，等. 风害区域 750 kV 变电站

- 构架避雷针变形分析及应对措施[J]. 电瓷避雷器, 2017(2): 14-18.
- WANG Jian, DENG Heming, LIU Jinsong, et al. The deformation analysis and countermeasures on the frame lightning rod of 750 kV substation in the wind damage areas[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2017(2): 14-18.
- [2] 邓鹤鸣, 李勇杰, 蔡 炜, 等. 沙漠区域输电问题研究现状及展望[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 3850-3861.
- DENG Heming, LI Yongjie, CAI Wei, et al. Status and prospect on technical research of power transmission in desert areas[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(12): 3850-3861.
- [3] 黄道春, 范建斌, 王 平, 等. 极端环境条件下输变电设备空气间隙绝缘特性研究现状及展望[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 1892-1906.
- HUANG Daochun, FAN Jianbin, WANG Ping, et al. Current status and future prospects of transmission and transformation equipment air gap insulation characteristics under extreme natural environmental conditions[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(5): 1892-1906.
- [4] 邱志斌, 阮江军, 黄道春, 等. 基于支持向量机的棒-板空气间隙击穿电压预测方法及其应用[J]. 电工技术学报, 2017, 32(19): 220-228.
- QIU Zhibin, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Breakdown voltage prediction method of rod-plane air gaps based on support vector machine and its applications[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(19): 220-228.
- [5] 柳 双, 杜志叶, 王 俊, 等. 基于熵权法的华中 500 kV 高压输电线路雷击跳闸情况分析[J]. 现代电力, 2021, 38(3): 332-338.
- LIU Shuang, DU Zhiye, WANG Jun, et al. Entropy weight method based analysis on lightning trip in central China 500 kV transmission lines[J]. *Modern Electric Power*, 2021, 38(3): 332-338.
- [6] 陈国庆, 孙才新, 张志劲, 等. 计及风速影响的 500 kV 同杆双回线路绕击耐雷性能计算模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 108-111.
- CHEN Guoqing, SUN Caixin, ZHANG Zhijin, et al. Study on the calculation model of lightning protection performance of shielding failure for 500 kV double circuit transmission line[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(5): 108-111.
- [7] 周 堃, 韩 号, 夏泽举. 计及综合因素的改进电气几何模型对特高压输电线路绕击耐雷性能评估[J]. 电瓷避雷器, 2018(6): 69-73.
- ZHOU Kun, HAN Hao, XIA Zeju. The improved electric geometry model of multi factor analysis of the lightning performance evaluation of UHV transmission lines based on[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2018(6): 69-73.
- [8] 谷山强, 李 健, 吴 敏, 等. 计及邻近线路架设方向和屏蔽影响的密集输电通道防雷性能仿真分析[J]. 电网技术, 2024, 48(7): 3075-3083.
- GU Shanqiang, LI Jian, WU Min, et al. Simulation of lightning protection effects in dense transmission channels considering erection directions and shielding effects of adjacent lines[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(7): 3075-3083.
- [9] 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.
- [10] 袁海燕, 傅正财, 魏本刚, 等. 综合考虑风偏、地形和工作电压的特高压交流线路雷电绕击性能[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 148-153.
- YUAN Haiyan, FU Zhengcai, WEI Bengang, et al. Lightning shielding failure analysis of UHVAC transmission lines based on improved EGM[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2009, 24(5): 148-153.
- [11] 楼文娟, 王嘉伟, 吕中宾, 等. 运动雷暴冲击风作用下输电线路风偏的计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4539-4547.
- LOU Wenjuan, WANG Jiawei, LV Zhongbin, et al. Calculation method of wind-induced oscillation of transmission line under moving downburst[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(17): 4539-4547.
- [12] 刘春城, 侯 萌. 下击暴流作用下输电线路导线风偏响应特性研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(22): 60-69.
- LIU Chuncheng, HOU Meng. Wind deflection response characteristics of transmission lines under downburst[J].

- Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(22): 60-69.
- [13] 苏 盛, 陈 浩, 陈晓国, 等. 香港地区雷电风速联合分布[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2346-2352.
SU Sheng, CHEN Hao, CHEN Xiaoguo, et al. Joint probability distribution of lightning & wind speed in Hong Kong[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2346-2352.
- [14] 陈盛燃, 邵向潮, 夏云峰, 等. 粤港澳大湾区雷电移动轨迹统计规律与潜在应用[J]. 南方电网技术, 2021, 15(1): 107-113.
CHEN Shengran, SHAO Xiangchao, XIA Yunfeng, et al. Statistics of lightning trajectory in dawan district of pearl river delta and potential application[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(1): 107-113.
- [15] 饶斌斌, 胡 京, 李阳林, 等. 一起 500 kV 输电线路风偏故障的分析研究[J]. 江西电力, 2015(3): 74-77.
RAO Binbin, HU Jing, LI Yanglin, et al. Analysis and research on a wind deflection fault of 500 kV transmission line[J]. Jiangxi Electric Power, 2015(3): 74-77.
- [16] 高压试验技术第一部分: 一般试验要求: GB/T 16927.1—2011[S].2011.
High voltage test techniques-Part 1: General test requirements: GB/T 16927.1—2011[S].2011.
- [17] 侯 慧, 俞菊芳, 黄 勇, 等. 台风侵袭下输电线路风偏跳闸风险评估[J]. 高电压技术, 2019, 45(12): 3907-3915.
HOU Hui, YU Jufang, HUANG Yong, et al. Risk assessment of transmission line trip caused by windage yaw under typhoon[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 3907-3915.
- [18] 汪 峰, 雷凌志, 宋传兴. 山区峡谷风袭击下绝缘子串风偏特性研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2023, 45(6): 83-91.
WANG Feng, LEI Lingzhi, SONG Chuanxing. Study on the wind deflection characteristics of insulator strings under the attack of mountain canyon wind[J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences), 2023, 45(6): 83-91.
- [19] 曾 嵘, 庄池杰, 余占清, 等. 长空气间隙放电研究的挑战与进展[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 2945-2955.
ZENG Rong, ZHUANG Chijie, YU Zhanqing, et al. Challenges and achievement in long air gap discharge research[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 2945-2955.
- [20] 李金亮, 杜志叶, 阮江军, 等. 特高压直流同塔混压输电线路反击耐雷性能计算方法研究[J]. 电瓷避雷器, 2015(2): 87-93.
LI Jinliang, DU Zhiye, RUAN Jiangjun, et al. Research on calculations for lightning performance of Back-Flashover for Double-Circuit UHV DC transmission line with dual voltage 800 kV/500 kV on the same Tower[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(2): 87-93.
- [21] CIGRE Working Group 01 of SC 33. Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines[J]. CIGRE Brochure, 1991(138): 171.
- [22] 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.
- [23] 林 敢, 鲍明正, 何一川, 等. 10 kV 配电线路差异化防雷策略及综合评估[J]. 南方电网技术, 2023, 17(10): 32-41.
LIN Gan, BAO Mingzheng, HE Yichuan, et al. Differential lightning protection strategy and comprehensive evaluation of 10 kV distribution lines[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(10): 32-41.
- [24] 柴 辰, 何一川, 林 敢, 等. 分布式光伏系统接入配电线路感应过电压特性分析[J]. 电瓷避雷器, 2023(6): 20-27.
CHAI Chen, HE Yichuan, LIN Gan, et al. Induced overvoltage characteristics for distributed photovoltaic systems connected to distribution lines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(6): 20-27.
- [25] 赵珊鹏, 陈智涛, 张友鹏, 等. 大风区接触网线路参数对附加导线舞动的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(5): 74-83.
ZHAO Shanpeng, CHEN Zhitao, ZHANG Youpeng, et al. Influence of overhead contact system line parameters on additional conductors galloping in strong wind region[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(5): 74-83.

74-83.

[26]张友鹏, 张永丰, 赵珊鹏, 等. 大风区接触网低压正馈线设计及防舞有效性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(12): 3494-3504.

ZHANG Youpeng, ZHANG Yongfeng, ZHAO Shanpeng, et al. Design and analysis on anti-galloping effectiveness of low wind pressure AF wire of overhead catenary system in gale zone[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(12): 3494-3504.

[27] 周春天, 张文锋, 林 敢, 等. 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[J/OL]. 高压电器: 1-9[2025-03-05].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1127.TM.20240229.1109.002.html>.

ZHOU Chuntian, ZHANG Wenfeng, LIN Gan, et al. Calculation method of shielding failure trip-out rate of dali dense transmission channels considering multiple factors[J]. High Voltage Apparatus : 1-9[2025-03-05].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1127.TM.20240229.1109.002.html>.

[28]司马文霞, 杨 庆, 李永福, 等. 输电线路雷电绕击评估方法分析及展望[J]. 高电压技术, 2015, 41(8):

2500-2513.

SIMA Wenxia, YANG Qing, LI Yongfu, et al. Analysis and prospect of lightning shielding failure evaluation methods of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2500-2513.

李帅超(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail: 859541891@qq.com)。

张海平(1989—), 男, 助理工程师, 研究方向为输电线路运维。

张 欢(1989—), 男, 助理工程师, 研究方向为输电线路运维。

周 哲(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高电压与绝缘技术。

甘凌植(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高电压与绝缘技术。

黎 鹏(1989—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电工装备电磁多物理场分析、输变电设备外绝缘等(通信作者)(E-mail: lipeng_ctgu@163.com)。

吴 田(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为带电作业、输电线路外绝缘等。