

山区配电线路塔位地形雷击风险分类

匡福志¹, 李霞¹, 钟湘平¹, 徐泽宇², 周力行²

(1. 国网湖南省电力有限公司邵阳供电分公司, 湖南 邵阳 422400; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:根据雷电先导理论,分析配电线路走廊杆塔地形地貌对线路雷击风险的影响。首先,采用线路杆塔高程、地面倾角、土壤电阻率等特征量来表征塔位地形地貌,并建立特征量的量化赋值规则。随后,构造BP人工神经网络分类器对山区配电线路杆塔地形地貌进行分类,所提分类可以满足配电线路杆塔雷击风险识别的实用要求,案例应用结果与实际情况相符。该文所提方法可为山区配电线路的差异化防雷提供新的思路。

关键词:配电线路;地形地貌;神经网络;雷击风险

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.04.009 中图分类号:TM726.3 文章编号:1673-9140(2021)04-0066-07

Classification of lightning strike risk for distribution line tower terrain in mountainous area

KUANG Fuzhi¹, LI Xia¹, ZHONG Xiangping¹, XU Zeyu², ZHOU Lixing²

(1. Shaoyang Power Supply Bureau, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Shaoyang 422400, China; 2. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: According to the theory of lightning leader, the influence of tower topography on the lightning risk of distribution lines is analyzed in this paper. Firstly, the tower elevation, ground inclination, soil resistivity and other parameters are applied to characterize the tower topography, and then the quantitative value assignment rules of provided parameters are established. Secondly, the BP artificial neural network classifier is constructed to classify the topography of distribution line towers in mountainous areas, which can meet the practical requirements of lightning risk identification of distribution line towers. The case application results are consistent with the actual situation. The proposed method provides a new idea for differential lightning protection of distribution lines in mountainous areas.

Key words: distribution line; topography; neural network; lightning risk

10 kV 配电线路绝缘相对薄弱,整体防雷水平较低^[1]。特别是在南方丘陵山地,线路走廊地形地貌复杂多变,在一些特殊地形下雷电频繁,线路雷击跳闸率居高不下,有的甚至造成绝缘子损毁、避雷器爆炸等严重雷害事故^[2-3]。为此,近年来广泛开展了配网差异化防雷研究,在雷击频繁的线路段加装避

雷器、并联间隙及架设耦合地线等措施来降低线路雷击跳闸率^[4-5]。但差异化防雷有赖于对具体线路雷害特点的了解,以及线路雷击概率的准确划分。

调研表明:配电线路雷击与其杆塔所处的地形地貌有着密切联系,在山顶、跨越河流及山谷等地段线路容易遭受雷击^[6-7]。为此,国内外开展了大量的

研究,利用数值模拟方法研究了山区复杂地形对雷击电磁场和感应过电压的影响,得出山体地形有增大雷击电场幅值作用,感应过电压随山体坡度升高而增大,随山体土壤电阻率增大而增大;基于雷电先导理论分析了山顶、大跨越、山谷等典型地貌雷击概率高的原因,得到了地面倾角与线路雷击跳闸率以及山区线路感应雷与土壤类型的关系^[8-13]。在考虑实际地形和雷电活动的差异性基础上,提出了复杂地形防雷评估思路及典型地形的线路雷击跳闸率计算方法^[14-15]。但配电线路不同雷击风险的地形地貌划分与识别方面的研究很少。

为开展山区配电线路差异化防雷,以南方某山区牧场配电线路为研究对象,通过实地调研获得线路和地形地貌数据,分析地形地貌和配电线路雷击概率之间的关系,依据雷击概率高低,对山区线路走廊的地形地貌进行分类。根据实地调研数据建立典型杆塔地形地貌样本,并构建 BP 人工神经网络分类器,以实现山区配电线路塔位地貌的雷击风险分类识别,为山区配电线路的差异化防雷提供技术支持。

1 典型配电线路塔位地形雷电分析

1.1 雷击模型

山区地形变化对雷电流幅值概率分布和雷电地闪密度产生影响,线路走廊的地面倾角对雷击点的分布也有重要影响。采取电气几何模型分析线路雷击情况,并将雷电简化为垂直地面下落,单侧引雷范围模型如图 1 所示。根据雷电先导理论,雷电先到达线路击距内时即对线路放电。击距是与雷电流幅值和线路高度相关的函数,对于配电线路,采用 Eriksson 击距公式,导线击距为

$$r_{cv} = 0.67h_d^{0.6} I^{0.74} \quad (1)$$

式中 h_d 为导线对地高度, m; I 为雷电流幅值, kA。

雷电对地击距 r_g 与对导线击距 r_{cv} 间关系式为

$$r_g = \beta \cdot r_{cv} \quad (2)$$

式中 β 为击距系数, $\beta = 0.36 + 0.168 \ln(43 - h_d)$ 。

雷击大地的临界距离和临界电流^[16]分别为

$$s = \sqrt{r_{cv}^2 - (r_g - h_d)^2} \quad (3)$$

$$I_0 = \left(\frac{h_d^{0.4} \cos \theta}{0.67(\beta - \sin \theta)} \right)^{1/0.74} \quad (4)$$

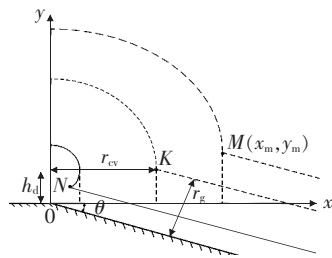


图 1 引雷范围模型

Figure 1 Lightning gange model

当雷电流幅值较小时,由式(1)、(2)确定的雷击距交于 N 点,线路的引雷范围由导线雷击距边界确定;当雷电流幅值增大到临界值 I_0 时,雷击距交于点 K , K 点坐标为 (S, h_d) ;当雷电流大于临界值时,雷击距交点 $M(x_m, y_m)$ 将高于导线。引入地面倾角 θ , K 点参数之间关系为

$$\frac{r_g}{\cos \theta} - r_{cv} \tan \theta = h_d \quad (5)$$

M 点参数关系式为

$$\begin{cases} x_m^2 + (y_m - h_d)^2 = r_{cv}^2 \\ y_m = \frac{r_{cv}}{\cos \theta} - x_m \tan \theta \end{cases} \quad (6)$$

1.2 山顶杆塔雷电分析

雷电易击于山顶上的杆塔。由于山区海拔较高,山区上的雷雨云离地高度比平原地区低,在大量电荷形成之前很容易达到空气的临界击穿强度,所以山区的落雷次数比平地的落雷次数多。杆塔位于山顶的几何模型如图 2 所示,由于山顶杆塔较高,线路两侧暴露弧增大,导致直击雷的引雷范围变大;随着地面倾角 θ 的增大,雷击点与导线的竖直距离增大,线路产生的感应过电压增大,2 种因素的共同作用使得山顶线路的雷击跳闸率增加。当配电线路杆塔位于山顶时,两侧地面倾角均大于 0,且两侧坡面对导线的屏蔽作用减弱,极易发生绕击^[13,17]。

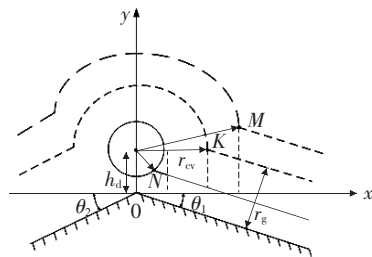


图 2 山顶雷击模型

Figure 2 Mountaintop lightning strike model

1.3 跨谷地形杆塔雷电分析

山区配电线路经过跨谷地形有2种情况:①线路沿谷底水平架设;②线路跨过山谷,杆塔分别位于相邻山丘顶部。位于山谷底部的线路杆塔,由于两侧山坡的屏蔽作用,杆塔遭受雷击的概率很低。线路杆塔位于相邻山丘顶部的情况可视作不同高度的山顶地形共同作用,使得两端杆塔均有较高的雷击风险。而两杆塔之间的线路,随着地面倾角和山谷深度的增加,地面与导线之间的距离加大,档距中央缺少大地屏蔽的保护,在雷害频繁的地区易出现雷击断线事故^[18-19]。

1.4 土壤电阻率突变地区杆塔雷电分析

雷击线路附近地面,雷电流产生的电场垂直分量和水平分量在线路上激发的感应过电压分量的极性相反,且电场垂直分量起主导作用。由于大地损耗,土壤电阻率的增加会降低水平电场分量,这使得雷击点附近的线路感应过电压幅值增大。因此,线路上产生的感应过电压的值随着土壤电阻率的增大而增大。感应过电压的简化计算为

$$U = 25I_m \cdot h_d \cdot (\delta + \gamma/S) \quad (7)$$

式中 h_d 为配电线路高度; S 为雷击点与线路间的垂直距离, m ; $\delta = 0.0057 \ln(\rho + 819.8) - 0.036$, ρ 为土壤电阻率, $\Omega \cdot m$; $\gamma = 0.38 \ln(\rho + 169.3) - 0.803$ 。其适用范围: $65 < S < 500$, $\rho < 2000$ 。

在雷电下行先导发展过程中,随着先导的下降,土壤中的电荷沿着电阻率较小的路径流动,土壤电阻率较小的地面更易积聚大量与下行先导极性相反的电荷,形成强电场而易被雷电击中。在土壤电阻率突变的山区,尤其是位于潮湿土壤和岩土交界的杆塔更易遭受雷击,雷击地面物体在线路上形成的感应过电压也较高,使线路绝缘子闪络^[6,20]。

1.5 树木(高耸物)附近杆塔雷电分析

10 kV 配电线路的塔高约 10 m,树木对线路雷击闪络的影响与其高度、距离和雷电流幅值密切相关。考虑树木高于线路的情况,并将树木做金属处理,利用击距理论分析,其电气几何模型如图3所示, h_1 为树的高度, h_d 为配电线路高度, S 为导线与树木之间的水平距离, r_1 、 r_{cv} 和 r_g 分别为树、导线和地面的击距, D_c 为导线的暴露宽度,在雷电流幅值 I 下各击距的计算公式^[21]为

$$r_1 = 0.84h_1^{0.6} I^{0.74} \quad (8)$$

$$r_{cv} = 0.84h_d^{0.6} I^{0.74} \quad (9)$$

$$r_g = \beta r_{cv}, \beta = (1.08 - h_d/59) \quad (10)$$

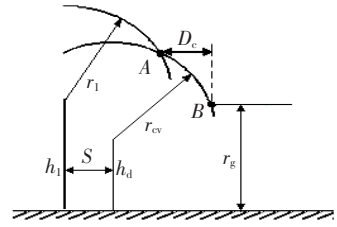


图3 树和导线的电气几何模型

Figure 3 Electrical geometry model of trees and wires

当雷电下行先导进入线路暴露宽度范围时,雷电绕过树木击中线路。随着 I 的增大,击距相应增大,导线暴露宽度 D_c 减小,雷电直击线路概率减小。当 I 增大到 I_m , D_c 减小到零时,雷电不绕击线路。因此,在树木与线路的高度及距离一定时,雷电流幅值增大,雷电绕击线路概率减小,树木对线路的屏蔽效应增强。由式(9)、(10)得最大绕击电流 I_m 与地面雷电击距 r_{gm} 的关系为

$$I_m = \left(\frac{r_{gm}}{0.84h_d^{0.6}\beta} \right)^{1/0.74} \quad (11)$$

当线路位于树木的屏蔽范围内时,雷击树木有可能反击线路^[22],但线路雷击闪络概率一般较小。随着 S 增大,导线暴露宽度 D_c 逐渐增大,树木对线路的屏蔽作用减弱,雷电绕击线路的概率增加;其临界绕击距离 S_{min} 可按避雷针保护范围估算^[23]。

在雷电流幅值一定时,雷击树木在线路上产生的感应雷过电压为

$$U_g = kI \ln \left[\frac{h_d}{S} + \sqrt{1 + \left(\frac{h_d}{S} \right)^2} \right] \quad (12)$$

式中 k 为修正系数。在 I 较大、 S 较小时, U_g 大于线路临界闪络电压 $U_{50\%}$, 线路闪络。随着线路与树木水平距离 S 的增加,感应雷 U_g 降低。当 U_g 降到线路绝缘临界闪络电压 $U_{50\%}$ 时,线路不发生闪络。由式(12)可得出相应的临界闪络距离 S_{max} 。

因此,树木或高耸物体对配电线路雷电的影响可由其距离 S 来表征,分别为屏蔽区 ($S < S_{min}$)、闪络区 ($S_{min} < S < S_{max}$) 和非闪络区 ($S > S_{max}$),对应的雷电风险分别为低、高、一般。

2 配电线路杆塔地形地貌特征向量

配电线路的雷击风险与线路走廊地形地貌密切

相关,不同的地形因素产生的迎面先导决定了雷云下行先导的发展路径,对雷击点的位置有着十分重要的影响。调研表明:容易遭受雷击的配电线路塔位地形主要有跨越山谷、河流及道路的线路杆塔;处于山谷风道或迎风坡上杆塔;位于河流、水库或地下水出水口附近,或四周是山丘的潮湿盆地等土壤电阻率突变地区的杆塔;山脊上线路且两侧暴露的杆塔;山坡和水田接壤处等不同土壤电阻率交界地区的杆塔;山坡上金属突出物、大树等附近的杆塔;丛山中的潮湿土壤或多孔隙岩石等地的杆塔;处于局部良导电地带的杆塔;水平开阔地面,附近有树木等高耸物体的线路杆塔;人口密集的村庄及电子设备密集的建筑物附近杆塔等。

通过对典型“易击”地形地貌特征的统计分析,选取配电线路塔位的高程(H),地面倾角或山坡坡度(θ),附近河流、水库等“水系”(W),附近树木或高耸物体(G),土壤电阻率(ρ),风速及风向(F),杆塔与“水系”、树木等附近特征的距离(S)等 7 个特征构成塔位地形地貌特征向量,即 $\mathbf{X}=(H, \theta, W, G, \rho, F, S)$,各特征量赋值规则如下。

1)塔位高程 H 。山顶或山脊上 H 取值为 $0.7 \sim 1.0$, $H \in (1.0, 0.8)$;山坡上 $H \in (0.8, 0.3)$;山脚下 $H \in (0.3, 0.1)$;开阔平地 $H \in (0.1, 0)$;山谷低洼盆地 $H=0$ 。

2)地面倾角或山坡坡度 θ 。山脊坡陡 $\theta \in (1.0, 0.7)$;坡度较陡 $\theta \in (0.7, 0.3)$;山坡平缓 $\theta \in (0.3, 0.1)$;不相关地形 θ 则为 0。

3)杆塔附近“水系”情况 W 。河流、水库、池塘 $W \in (1.0, 0.7)$;湿地、沼泽、稻田、林地 $W \in (0.7, 0.4)$;旱地 $W \in (0.4, 0.1)$;不相关地形 W 则为 0。

4)树木等高耸物体 G 。金属突出物、风机、烟囱等 $G \in (1.0, 0.7)$;高耸建筑物、树木等 $G \in (0.7, 0.4)$;民居及电子设备密集区 $G \in (0.4, 0.1)$;不相关地形 G 则为 0。

5)土壤电阻率 ρ 。 $\rho < 100 \Omega \cdot \text{m}$, $\rho \in (1.0, 0.7)$; $100 < \rho < 1000 \Omega \cdot \text{m}$, $\rho \in (0.7, 0.3)$; $\rho > 1000 \Omega \cdot \text{m}$, $\rho \in (0.3, 0.1)$;不考虑该特征 ρ 则为 0。

6)风速风向 F 。杆塔位于迎风坡面、风道或风口, $F \in (1.0, 0.7)$;风特征不明显, $F \in (0.3, 0.1)$;不相关地形 F 则为 0。

7)杆塔与树木等高耸物距离 S 。当 $S_{\min} < S < d_{\max}$ 时, $S \in (1.0, 0.6)$;当 $S > S_{\max}$ 时, $S \in (0.6, 0.3)$;当 $S < S_{\min}$ 杆塔被屏蔽时, $S \in (0.3, 0.1)$ 。在表征杆塔与“水系”距离时,杆塔离“水系”近, $S \in (1.0, 0.7)$;杆塔离“水系”较远, $S \in (0.3, 0.1)$ 。不相关地形 S 则为 0。

整理山区配电线路调研数据,获得 41 个典型的雷电“易击”杆塔地形地貌样本,部分样本如表 1 所示。

表 1 部分典型杆塔地形地貌样本

Table 1 Part of typical tower topography samples

编号	杆塔地形地貌	特征量向量 \mathbf{X}	雷击概率
		($H, \theta, W, G, \rho, F, S$)	
X ₁	山包顶部	0.9,0.7,0,0,0.2,0.0	高
X ₂	跨越山谷河流	0.7,0.5,0.9,0,0,0.9,0.8	高
X ₃	向阳迎风坡上	0.5,0.3,0,0,0,0.9,0	高
X ₄	平地烟囱附近	0.1,0,0,0.9,0.8,0,0.9	高
X ₅	水库边	0.1,0,0.9,0,0.9,0,0.9	高
X ₆	山坡上大树旁	0.5,0.3,0,0.9,0,0,0.8	高
X ₇	沿坡走向且有坡度	0.5,0.5,0.8,0,0.3,0,0	较高
X ₈	山凹中的湿地	0.5,0.1,0.7,0,0.8,0,0	较高
X ₉	平地土壤电阻率较低	0.1,0.1,0,0,0.9,0,0	一般
X ₁₀	山坡和稻田接壤处	0.1,0.3,0.6,0,0.8,0,0.9	高

3 基于 BP 神经网络分类器的杆塔地形地貌分类

山区地形地貌复杂多变,但相似的地形地貌,其发生雷击的可能性也是相似的,可采用分类器对线路走廊杆塔的地形地貌进行分类,并识别出雷击概率高、较高、一般及较低的杆塔,再分别采取差异化防雷措施。在选择分类器时,需要考虑以下因素:①杆塔地形样本数据复杂,需要有良好的非线性映射能力;②输入属性变量之间存在相互联系,不能单独作用;③随着应用的深入,地形地貌的样本数据将逐渐增加,需具有处理大规模样本数据的能力。

在常见分类器中,朴素贝叶斯分类器算法流程少,逻辑简单,但该算法基于属性独立假设,在考虑实际地形因素的情况下较难成立。支持向量机在小样本下具有较高的识别分类精度,具有良好的泛化能力,但在处理大规模样本数据时受限于二分类涉及的矩阵计算难度,不利于处理大量地形数据。BP

神经网络分类器有较强的自学能力可避免人为主观分类,对于非线性特征向量有较强的映射能力,在处理大规模样本数据和多分类需求的情况下,具有良好的识别率^[24-25]。

利用41个样本数据分别用支持向量机和BP神经网络进行识别分类,其中向量机的准确率为93.3%,BP神经网络的准确率为86.7%。可见在小样本分类中支持向量机更加精准,但是考虑到应用中获得的地形样本数据逐渐增多,分类器需要处理大规模样本数据,因此,该文采取BP神经网络分类器。

3.1 BP神经网络分类器

提取的地形地貌特征有杆塔高程、地面倾角等7个,按照雷击风险程度将线路杆塔的地形地貌分为3类:雷击概率高、雷击概率一般、雷击概率低。

根据Kolmogorov定理,构造一个BP神经网络分类器,实现对杆塔的地形地貌的分类识别,该BP网络由输入层、输出层和一个隐含层组成。根据要求,输入层有7个输入单元,分别输入杆塔地形地貌的7个特征量;输出层有3个输出单元,其输出结果(1,0,0)、(0,1,0)、(0,0,1)分别代表雷击概率高、雷击概率一般、雷击概率低3种类型。

采用经验公式计算隐含层单元数为5,考虑到训练样本数不大,经过调整,取隐含层单元数为7。传递函数采用Logsig(x)。

为使初始权值在输入累加时每个神经元的状态值接近于零,初始权值取(-1,1)间较小的随机数。为保证学习过程的收敛性及系统的稳定性,选取学习速率为0.05。

训练样本按类别集中输入,并在训练前做归一化处理,将输入样本集构成矩阵 X ,每一行对应一个样本,列则对应样本的各元素;计算样本矩阵各列的最大值和最小值。 $X_{\max}(j)$ 、 $X_{\min}(j)$ 为第 j 列的最大值和最小值,处理后的样本矩阵元素 $X'(i,j)$ 为

$$X'(i,j) = \frac{\text{Max}(j) - X(i,j)}{\text{Max}(j) - \text{Min}(j)} \quad (13)$$

为了提高收敛速度和防止振荡,采用变步长和修改权值等方法优化BP算法。

3.2 杆塔地形地貌分类

将BP神经网络分类器用于识别杆塔地形地貌

的雷击风险程度,模型实现的基本流程:搜集序列样本→数据预处理→确定输入输出神经元→构造BP神经网络→训练BP神经网络→BP神经网络测试。

以41个典型配电线路杆塔地形地貌特征向量为训练样本,对所建立的网络进行训练。经过25次循环迭代,训练集的收敛度达 10^{-3} ,训练终止,获得BP神经网络参数。

为检验所建立的网络模型,选取10个典型地形地貌样本作为“未知”的待测样本,如表2所示。应用该BP神经网络分类器对它们分类识别,测试30次,有27次的输出结果正确,与实际情况一致,如表3所示。有3次输出结果样本6或样本9识别错误,这是训练样本不够多的原因造成的。随着样本数的增多,该神经网络分类器的精度将提高。实用时可以通过多次运算取其大概率结果,能满足配电线路杆塔地形地貌的分类识别要求。

表2 测试样本
Table 2 Test samples

序号	杆塔地形地貌	特征向量 X	雷击风险
		($H, \theta, W, G, \rho, F, S$)	
1	山脊上	1.0,0.8,0.0,0.3,0.7,0	高
2	山脚水塘边	0.1,0.3,1.0,0.8,0.0,0.9	高
3	开阔地大树边	0.1,0.1,0.0,0.9,0.8,0,1	高
4	跨越小河	0.6,0.7,0.9,0.0,0.7,0,0.8	高
5	坡底稻田附近	0.3,0.5,0.7,0.0,0.3,0,0.5	一般
6	控制楼附近	0.1,0.0,0.2,0.5,0.0,0.5	一般
7	缓坡大树较远	0.5,0.3,0.0,0.9,0.0,0.1	低
8	山谷水平走向	0.0,0.3,0.0,0.5,0,0	低
9	地下水出口	0.3,0.0,0.9,0.0,0.8,0,0.9	高
10	陡峻山坡风大	0.8,0.9,0.0,0.2,0.8,0	高

表3 样本分类结果

Table 3 Sample classification results

序号	神经元输出			类型说明
	第1个	第2个	第3个	
1	0.999 9	0.000 0	0.000 0	高风险
2	0.999 9	0.000 0	0.000 0	高风险
3	0.999 9	0.000 0	0.000 0	高风险
4	0.999 9	0.000 0	0.000 0	高风险
5	0.000 0	0.991 2	0.000 1	一般风险
6	0.000 0	0.999 9	0.000 0	一般风险
7	0.000 0	0.000 0	0.999 9	低风险
8	0.000 0	0.000 0	0.999 9	低风险
9	0.999 9	0.000 0	0.000 0	高风险
10	0.999 9	0.000 0	0.000 0	高风险

3.3 案例应用

南山 10 kV 南滩线全长约为 18 km, 428 基杆塔, 配电变总台数为 24 台。由于地处山区牧场, 近年来雷害事故较多。通过调研获取了线路走廊杆塔地形地貌特征向量, 应用该文构建的 BP 神经网络分类器对每基杆塔所处地形进行分类识别, 得到了坪山支线 #28~#31、坪山支线 #88、龙须坪分支 #11、寨南分支 #07 等 35 基杆塔为高雷击风险区段。近几年该线路的雷击杆塔段均在识别出来的高雷击风险区段内, 识别结果与该线历史雷电发生情况相符, 可为该线差异化防雷提供参考。

4 结语

应用雷电击距理论分析输电线路杆塔地形地貌对线路雷击的影响, 提取线路杆塔高程、地面倾角、土壤电阻率等 7 个特征量来表征杆塔地形地貌; 并依据分析结果建立杆塔地形地貌特征量的量化赋值规则, 能较好地描述山区地形地貌及其与线路雷击风险的关系。构造 BP 神经网络分类器对山区配电线路杆塔地形地貌进行分类识别, 由于训练样本数不多, 识别精度有待提高; 但随着样本数的增多, BP 神经网络分类器完全能满足配电线路杆塔雷击风险识别的实用要求, 案例应用的识别结果与实际情况相符。该文所提方法可为山区配电线路的差异化防雷提供技术支持。

参考文献:

- [1] 陈勇. 山区 10 kV 架空配电线路防雷措施的研究与改进[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [2] 孙晓东, 李瑞芳, 曹晓斌, 等. 金属氧化物避雷器对地铁高架桥段接触轨线路防雷的影响[J]. 高压电器, 2019, 55(3): 127-133.
- SUN Xiaodong, LI Ruifang, CAO Xiaobin, et al. Influence of MOA on lightning protection of contact rail of metro viaduct section[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(3): 127-133.
- [3] 夏澍, 姚明, 韩浩江, 等. 基于全方位诊断的 10 kV 线路越级跳闸事故辨识方法[J]. 供用电, 2020, 37(6): 60-65.
- XIA Shu, YAO Ming, HAN Haojiang, et al. The fault identification method for override trip accident of 10 kV line based on comprehensive diagnosis[J]. Distribution

& Utilization, 2020, 37(6): 60-65.

- [4] 赵国伟, 白洁, 李承, 等. 微地形环境下 10 kV 配网雷害分析及防护措施优化配置[J]. 智慧电力, 2020, 48(4): 112-118.
- ZHAO Guowei, BAI Jie, LI Cheng, et al. Analysis of lightning disasters in 10 kV distribution network and optimal configuration of protective measures under microterrain environment[J]. Smart Power, 2020, 48(4): 112-118.
- [5] 许彬, 陈荣彪, 刘刚, 等. 基于 PSCAD 耦合地线提高输电线路耐雷水平的仿真研究[J]. 华东电力, 2013, 41(1): 106-109.
- XU Bin, CHEN Rongbiao, LIU Gang, et al. The simulation research of the coupling ground wire improving lightning withstanding level of transmission line based on PSCAD[J]. East China Electric Power, 2013, 41(1): 106-109.
- [6] 王建军, 唐谟懿, 周力行. 地形地貌对配电线路雷害影响分析[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(1): 151-156.
- WANG Jianjun, TANG Moyi, ZHOU Lixing. Topography impact analysis for distribution line lightning damage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(1): 151-156.
- [7] 席燕辉, 胡康, 王康. 基于自适应卡尔曼滤波残差分析的雷击故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(23): 30-39.
- XI Yanhui, HU Kang, WANG Kang. Lightning strike fault location based on adaptive Kalman filter residual analysis[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(23): 30-39.
- [8] 李悠然, 安韵竹, 胡元潮, 等. 10 kV 配电线路雷电感应过电压分布特性计算研究[J]. 电瓷避雷器, 2019(4): 22-28.
- LI Youran, AN Yunzhu, HU Yuanchao, et al. Research on characteristics of lightning induced over-voltage along 10kV distribution line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(4): 22-28.
- [9] 张金波, 彭晓宇, 王磊, 等. 复杂地形下架空线雷电感应过电压特性仿真研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3708-3714.
- ZHANG Jinbo, PENG Xiaoyu, WANG Lei, et al. Simulation study of lightning induced voltages characteristics on overhead lines over complex mountainous terrain[J]. 2019, 45(11): 3708-3714.
- [10] Li D, Azadifar M, Rachidi F, et al. On lightning electromagnetic field propagation along an irregular terrain

- [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2016, 58(1): 161-171.
- [11] Khosravi R, Sadeghi S H H, Moini R. Electromagnetic field due to lightning strike to a tall tower sitting on a mountainous terrain[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2016, 58(4): 1090-1099.
- [12] Soto E, Perez E, Herrera J. Electromagnetic field due to lightning striking on top of a cone-shaped mountain using the FDTD[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014, 56(5): 1112-1120.
- [13] 张金波, 王磊, 梁仕斌, 等. 锥形山体坡度及其电导率分层对雷击感应过电压的影响[J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 2936-2944.
ZHANG Jinbo, WANG Lei, LIANG Shibin, et al. Influence of mountain topographic slope and stratified conductivity structure on lightning induced voltages[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2936-2944.
- [14] 赵淳, 陈家宏, 谷山强, 等. 山区复杂地形条件下输电线路雷击跳闸故障分析方法[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 136-141.
ZHAO Chun, CHEN Jiahong, GU Shanqiang, et al. Analysis on the lightning trip-out failure of transmission line under conditions of complex landscape in a mountainous area[J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 136-141.
- [15] 刘浩, 韩永霞, 陈长富, 等. 配电线路雷击跳闸率计算及差异化防雷方法研究[J]. 电瓷避雷器, 2020(4): 7-12.
LIU Hao, HAN Yongxia, CHEN Changfu, et al. Research on lightning trip rate calculation and differentiated lightning protection of distribution line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(4): 7-12.
- [16] 刘靖, 刘明光, 屈志坚. 不同地形条件下架空配电线路的防雷分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 848-853.
LIU Jing, LIU Mingguang, QU Zhijian, et al. Comprehensive analysis of lightning performance of overhead power distribution line with varied ground obliquity[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 848-853.
- [17] 李瑞芳, 陶鑫, 杨雪, 等. 山区典型地形雷击地闪密度分布差异研究[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 107-113.
LI Ruifang, TAO Xin, YANG Xue, et al. Study on distribution difference of lightning ground flash density in typical mountainous terrain[J]. High Voltage Electrical Apparatus, 2020, 56(5): 107-113.
- [18] 耿屹楠, 曾嵘, 李雨, 等. 输电线路防雷性能评估中的复杂地形地区模型[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1501-1505.
GENG Yinan, ZENG Rong, LI Yu, et al. Complex terrain area model for lightning performance evaluation of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1501-1505.
- [19] 陈思明, 唐军, 陈小平. 根据电气几何模型对 10 kV 配电线路雷击跳闸率的计算分析[J]. 电瓷避雷器, 2013(4): 111-116.
CHEN Siming, TANG Jun, CHEN Xiaoping. Calculation analysis on lightning strike trip-out rate of 10 kV distribution line with electric geometry method[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(4): 111-116.
- [20] 雷潇, 刘强, 刘守豹, 等. 土壤电阻率对 10 kV 架空线路雷害风险的影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2016(6): 116-119+125.
LEI Xiao, LIU Qiang, LIU Shoubao, et al. Research on the influence of soil resistivity on lightning risk of 10 kV overhead lines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2016(6): 116-119+125.
- [21] 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.
- [22] 吴泳聪, 陈远东, 罗汉武, 等. 树木对 10 kV 配电线路防雷性能的影响[J]. 中国电力, 2014, 47(6): 31-37.
WU Yongcong, CHEN Yuandong, LUO Hanwu, et al. Study on the impact of trees on the lightning performance of 10 kV distribution lines[J]. Electric Power, 2014, 47(6): 31-37.
- [23] 安韵竹, 李悠然, 胡元潮, 等. 雷击树木放电反击配电线路过电压及防护研究[J]. 电瓷避雷器, 2020(6): 8-13.
AN Yunzhu, LI Youran, HU Yuanchao, et al. Research on distribution line overvoltage caused by tree-line gap breakdown when lightning strikes nearby trees and protection measures[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(6): 8-13.
- [24] 朱文峰. 基于支持向量机与神经网络的文本分类算法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.
- [25] 刘子英, 张靖, 邓芳明. 基于 BP 神经网络的高压隔离开关分合闸监测识别[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 134-140.
LIU Ziyang, ZHANG Jing, DENG Fangming. Monitoring and identification of state of opening or closing isolation switch based on BP neural network[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 134-140.