

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.10.030

基于雷电定位系统的山区地形地闪密度差异研究

胡 豪¹, 陶 鑫²

(1. 西南交通大学电气工程学院, 成都 611756; 2. 国网四川省供电公司检修公司, 成都 610041)

摘要: 山区地形不同位置的地闪密度差异较大。为了研究山区地形对地闪密度的影响,文中首先基于雷电定位系统数据利用 Google Earth 和 ArcGIS 软件分析了山体不同部位的地闪密度差异,然后分析了某条 500 kV 输电线路的雷电绕击跳闸率计算结果。研究发现:改进网格法筛选范围小于 400 m 时地闪密度明显大于实际情况,大于 1 600 m 时山顶、山坡、平地的地闪密度趋于一致,抵消了地形的差异性;山区地形的地闪密度随着山体海拔高度的变化而变化,整体呈现出山顶地闪密度>山坡>山谷的规律,且山体的形状会明显影响山区地形地闪密度分布差异;某线路绕击跳闸率计算结果较高区段与线路实际发生雷击故障区段吻合,文中的研究可为差异化防雷提供一定参考。

关键词: 雷电定位系统; 山区地形; 地闪密度; 差异化防雷; Google Earth; ArcGIS

Study on Difference of Ground Flashover Density in Mountain Terrain Based on Lightning Location System

HU Hao¹, TAO Xin²

(1. College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 2. State Grid Sichuan Provincial Overhaul Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: The ground flashover density varies greatly in different locations of mountainous terrain. In order to study the influence of mountain terrain on ground flashover density, this paper firstly analyzed the difference of ground flashover density in different parts of mountain by using Google Earth and ArcGIS software based on the data of lightning location system, and then analyzed the calculation results of lightning shielding failure trip rate of a 500 kV transmission line. It is found that the density of ground flash is obviously larger than the actual situation when the screening range of improved grid method is less than 400 m, and the difference of terrain is offset when the screening range of improved grid method is larger than 1 600 m and meanwhile, the ground flashover density of mountain top, hillside and flat land tends to be the same. The lightning density of mountainous terrain varies with the altitude of the mountain, showing the rule of peak-to-ground lightning density > hillside > valley as a whole, and the shape of mountain body will obviously affect the distribution difference of the lightning density of mountainous terrain. The calculated results of shielding trip rate of a certain line are in good agreement with the actual lightning fault section of the line, and this study can provide some reference for differential lightning protection.

Key words: lightning location system; mountain terrain; ground flashover density; differentiated lightning protection; Google Earth; ArcGIS

0 引言

近年来,随着国民经济的快速发展,电力行业的发展迅速,输电线路架设覆盖范围越来越广。中国是一个多山的国家,山地的面积占全国陆地面积

的 1/3 以上^[1]。山区地段防雷工作一直是输电线路建设及维护中关注的重点,一方面防雷措施不足会导致线路雷击跳闸事故增多;另一方面过度的防雷措施会大大增加建设成本。然而山区地形中山体不同部位的地闪密度本身有一定的差异,如果按

某个区域的年平均地闪密度计算山区输电线路雷击跳闸率等参数,势必造成结果的不准确。

对于某个地区的落雷密度研究上,国内方面,文[2-5]中均基于传统网格法对某个省区域的落雷分布进行了相关研究;国外方面,文[6-10]中根据北美、哥伦比亚等地区多年雷电数据,分析了雷电流参数的变化规律、影响因素,并通过网格法统计了地面落雷密度。

对于某些微观地形的雷击过程研究中,专家学者提出了电气几何法和先导法^[11-12]来研究地形对于地面落雷密度的影响。如文[13]中利用 MATLAB 计算了杆塔周围不同微观地形下的暴露面积,计算了不同微观地形下的输电线路雷击跳闸率;如文[14-15]中利用先导发展模型对复杂地形下架空输电线路雷电绕击的情况进行了分析。

宏观地形的地闪密度不能反映山区具体地形的区别以及山顶对山谷地闪的屏蔽作用,如山坡、山谷、斜坡等不同山区地形的地闪密度差别;微观地形采用的地闪密度仍是宏观地形下统计分析的结果,没有考虑地形差异造成的地闪密度差异。地形因素对地闪密度的影响,关系到山区线路雷击跳闸率的准确计算以及山区输电线路差异化防雷工作,因此对山体不同部位对地闪密度的影响情况的研究对于差异化防雷有重要意义。

1 基于雷电定位系统数据的地闪密度统计方法

雷电定位系统能实时获取记录监测区域内每次地闪的时间、经纬度、雷电流幅值、极性、回击次数等参数^[16]。目前,基于雷电定位系统数据的地闪密度统计方法主要是网格法及改进网格法。

网格法的示意图见图1。采用网格法统计地闪密度的过程中需要将研究区域等间距划分为连续的网格,划分得到的每一个网格代表一个统计单元,网格划分的精细程度直接关系到地闪密度统计值的大小。随着网格划分间距的减小,研究区域的最大地闪密度值会明显增大,当网格划分过细时,研究区域最大地闪密度值会显著超过正常地闪密度值的统计范围。

为了改善网格法统计地闪密度的不足,文[17-18]中提出了改进网格法。改进网格法示意图见图2。

改进网格法通过将网格法中的一个网格进行更精细的划分,并以小网格中心点为圆心,筛选范

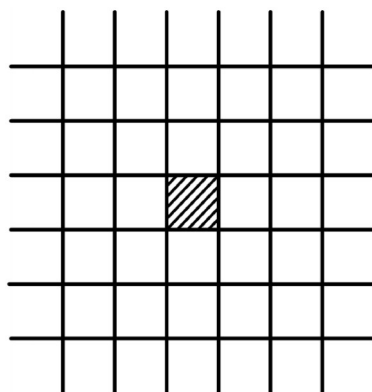


图1 传统网格法示意图

Fig. 1 Diagram of traditional grid method

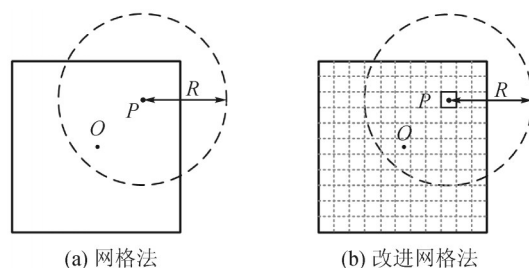


图2 改进网格法示意图

Fig. 2 Improving the grid method diagram

围 R 为半径的圆作为统计单元,通过适当地设置筛选范围 R 可以使得统计得到的各小网格地闪密度值符合实际情况。相比于网格法,改进网格法更加适用于需要对研究区域进行更精细划分的小面积区域的地闪密度统计分析。

2 不同筛选半径对地闪密度统计结果的影响

2.1 筛选半径对地闪密度的影响

山区地形复杂多变,在较小的范围内山区海拔高度会有比较明显的变化,为了研究山区典型地形地闪密度分布的差异,需要对研究区域进行更加细致的划分。根据目前的研究成果可知,改进网格法更加适用于山区典型地形地闪密度统计分析。改进网格法中比较关键的一个环节是筛选范围 R 的确定,为了研究不同的筛选范围对地闪密度统计值的影响,确定后续山区典型地形地闪密度分布差异研究中的筛选范围 R ,将在某省选择一个区域做不同筛选范围 R 下的地闪密度统计分析。

Google Earth 软件提供的地理影像数据分辨率较高,部分地区可达 0.6 m ^[19-21],且其能直观地显示任意点的经纬度及海拔高度。文中筛选区域选自雷活动程度较强的惠州市,其经纬度范围分别是 $E114.62^\circ \sim 114.64^\circ$ 、 $N23.07^\circ \sim 23.09^\circ$ 。其地形俯视图及正视图分别见图3。



(a) 地形俯视图

(b) 地形正视图

图3 筛选区域地形示意图

Fig. 3 Filtering area terrain diagram

ArcGIS 软件的密度分析工具可以实现改进网格法统计分析雷电定位系统数据的功能^[22]。为保证研究结果不受小网格变化的影响,在不同筛选范围下改进网格法中的小网格范围均设置为 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 。图3所示区域在不同筛选范围 R 下的地闪密度最大值和最

表1 不同筛选范围 R 下研究区域10年地闪密度最大值与最小值Table 1 Maximum and minimum flash density of 10 years in study area under different screening range R

筛选范围 R/m	200	400	600	800	1 000	1 200	1 400	1 600	1 800
地闪密度最大值 $[(\text{次} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{年})^{-1})]$	42.97	32.43	26.70	25.07	23.68	22.99	21.94	21.44	21.28
地闪密度最小值 $[(\text{次} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{年})^{-1})]$	7.16	10.94	13.53	14.97	16.14	17.09	17.73	18.30	18.38
最大值与最小值差值 $[(\text{次} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{年})^{-1})]$	35.81	21.49	13.17	10.10	7.54	5.90	4.21	3.14	2.90

2.2 山区地形合适的筛选半径

为了选择满足山区地闪密度分布差异研究要求的筛选范围 R ,下面将对同一区域内不同地形条件下筛选范围 R 变化时地闪密度的变化情况。提取见图3中浅色点所示的研究区域内不同地形处的地闪密度值做对比分析,图3中3个点分别位于平地、山坡和山顶。

不同地形下地闪密度随筛选范围 R 变化情况见图4。对比结果中,随着 R 的增大,山顶和山坡处的地闪密度值出现了先上升后减小的趋势, R 为 1 km 时曲线出现转折。平地处的地闪密度值出现了先减小后上升再减小的趋势,平地处的地闪密度曲线同样在 R 为 1 km 时转折。 R 较小(图4中小于 400 m)时,平地处的地闪密度大于山顶和山坡,较小的筛选范围夸大了数据随机性。 R 较大(图4中大于 $1\,600\text{ m}$)时,山顶、山坡和平地的地闪密度趋于一致,较大的筛选范围抵消了地形的差异性。综上所述, R 的取值在 $400 \sim 1\,600\text{ m}$ 内满足山区地形地闪密度差异研究的需求。考虑到雷电定位系统的精度可达 1 km ,故此,文中后续研究中选取 1 km 为筛选范围来分析山区地形地闪密度差异。

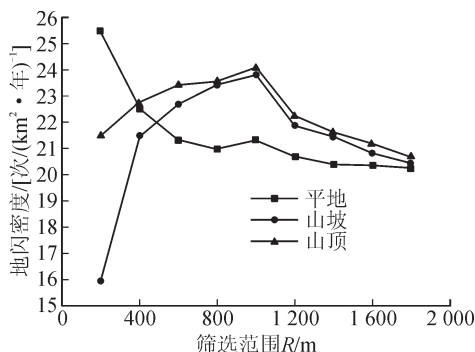
3 山区地形地闪密度分布差异

3.1 地形对地闪密度的影响

研究山区地形地面落雷分布差异情况见图5,

小值见表1。

通过表1数据可知,当筛选范围 R 从 200 m 增大到 $1\,800\text{ m}$ 时,研究区域内的地闪密度最大值从 $42.97\text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{年})$ 减小至 $21.28\text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{年})$,地闪密度最小值从 $7.16\text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{年})$ 增大至 $18.38\text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{年})$,地闪密度最大值与最小值之间的差值从 200 m 时的 $35.81\text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{年})$ 减小到 $1\,800\text{ m}$ 时的 $2.9\text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{年})$ 。上述结果说明,筛选范围的增大削弱了地形的影响,地闪密度逐渐表现出平均性,因此较大的 R 不能满足对山区地闪密度分布差异研究的要求。 R 为 200 m 时,地闪密度最大值为 $42.97\text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{年})$,该值明显地超出了实际的地闪密度值,因此较小的 R 也不能满足对山区地闪密度分布差异研究的要求。

图4 不同地形下地闪密度随筛选范围 R 变化情况Fig. 4 Variation of surface flash density with filter range R in different terrain

利用 Google Earth 软件在某省范围内筛选图5(a)内红框所示的包含山顶、山谷、山坡等典型山区地形的区域。筛选区域的经纬度范围分别是 $E111.05^\circ \sim E111.15^\circ$ 、 $N21.85^\circ \sim N21.95^\circ$ 。改进网格法中的矩形小网格区域同样设置为 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$,筛选范围 R 为 1 km 。同样利用 ArcGIS 软件得到该区域10年地闪密度均值分布图见图5(b)。图5(a)、(b)两图均为俯视效果图,图5(b)反映的是与图5(a)中实际地形一一对应的地闪密度分布结果。

对比图5中(a)、(b)两图可知,从山顶地区向下沿山坡地区直至山谷地区地闪密度值逐渐减小。为了后续表述方便,将山顶地区、山坡地区、山谷地区的地闪密度分别简记为 $N_{g\text{山顶}}$ 、 $N_{g\text{山坡}}$ 、 $N_{g\text{山谷}}$ 。图5(b)中 $N_{g\text{山顶}}$ 、 $N_{g\text{山坡}}$ 、 $N_{g\text{山谷}}$ 的取值范围分别是 $19.40 \sim 21.93\text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{年})$ 、

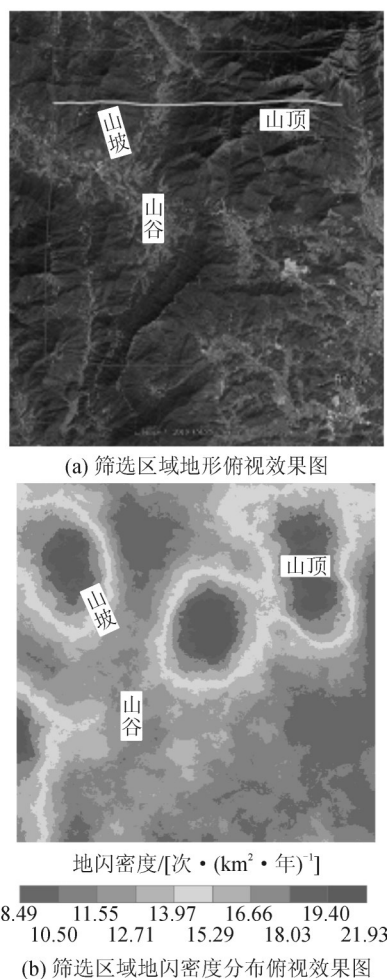


图5 筛选区域地形与地闪密度分布俯视效果图

Fig. 5 Screening area topography and ground flash density distribution overlooking renderings

12.71~19.40次/(km²·年)、8.49~12.71次/(km²·年)。

3.2 海拔对地闪密度的影响

为了更加明显地展现该区域内不同地形时地闪密度值的差异,在区域内选取图5(a)中白色线条所示的一行小网格,提取每个小网格的地闪密度值和平均海拔高度,筛选出的该行小网格中心点纬度是N21.932°,提取结果见图6。

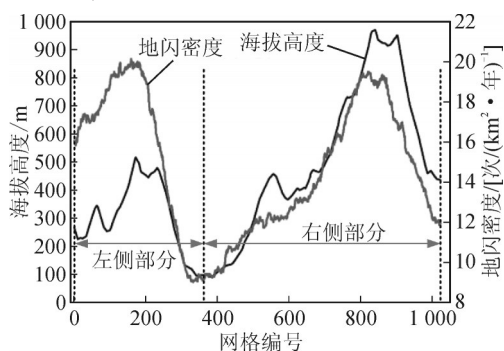


图6 海拔高度与地闪密度对比图

Fig. 6 Comparison of altitude and ground flash density

将整个提取区域以海拔高度最低点处的垂线

为界将提取区域分为左右两部分,分界线见图6中虚线所示。左侧部分海拔高度从515.43 m降低至90.67 m,对应的地闪密度值从20.12次/(km²·年)减小到9.01次/(km²·年)。右侧部分随着海拔高度从90.67 m增加到969.27 m,对应的地闪密度值从9.01次/(km²·年)增大到19.48次/(km²·年)。由图6可知,提取区域内地闪密度值随海拔高度变化而变化,地闪密度和海拔高度两曲线的走势基本保持一致。

对比地闪密度曲线和海拔高度曲线可知,左侧部分山体海拔高度最大值为515.43 m,仅为右侧部分山体海拔高度最大值969.27 m的53.2%,但是左右两部分的地闪密度差异并不明显,左侧最大值为20.12次/(km²·年),右侧最大值为19.48次/(km²·年),差值仅为0.64次/(km²·年),对比两部分海拔高度曲线可知,两部分山体形状基本一致,因此可知山区地闪密度不仅与海拔高度有关还与山区地形有密切的关系。

3.3 山区地形地闪密度差异性验证

通过上述分析可将山区地形地闪密度分布差异总结为 $N_{g\text{山顶}} > N_{g\text{山坡}} > N_{g\text{山谷}}$,为了验证上述山区地形地闪密度差异分析结果是否具有普适性,在该省范围内选择雷电活动强弱程度不同的6个山地区域做同样的10年地闪密度均值统计分析,各区域地形与地闪密度分布俯视图见图7。其中区域1经纬度范围为E115.90°~116.00°、N24.60°~24.70°。区域2经纬度范围为E112.35°~112.45°、N23.35°~23.45°。区域3经纬度范围为E111.50°~111.60°、N21.85°~21.95°。区域4经纬度范围为E112.10°~112.20°、N22.65°~22.75°。区域5经纬度范围为E114.80°~114.90°、N22.90°~23.00°。区域6经纬度范围为E113.60°~113.70°、N24.30°~24.40°。选择的该6个区域,都是典型的山形地区,且山体的坡度变化程度都不一样。

对比图7中6个区域的地形图与地闪密度分布图可以发现,山区地形地闪密度分布差异规律($N_{g\text{山顶}} > N_{g\text{山坡}} > N_{g\text{山谷}}$)在图7中均有明显的体现,证明了该规律在不同地区具有普适性。同时,地闪密度分布图中的山坡地区出现了多条等值线,这说明整个山坡地区的地闪密度值随着海拔高度的变化也存在明显的差异。

文中通过对比地形图与地闪密度分布图研究了山区典型地形地闪密度分布差异,为了在数值上更加明显的展现这种差异,在这6个地区中选择典型的山顶、山坡、山谷3种不同地形,分别统计这3种地形的地闪密度值,结果见图8。

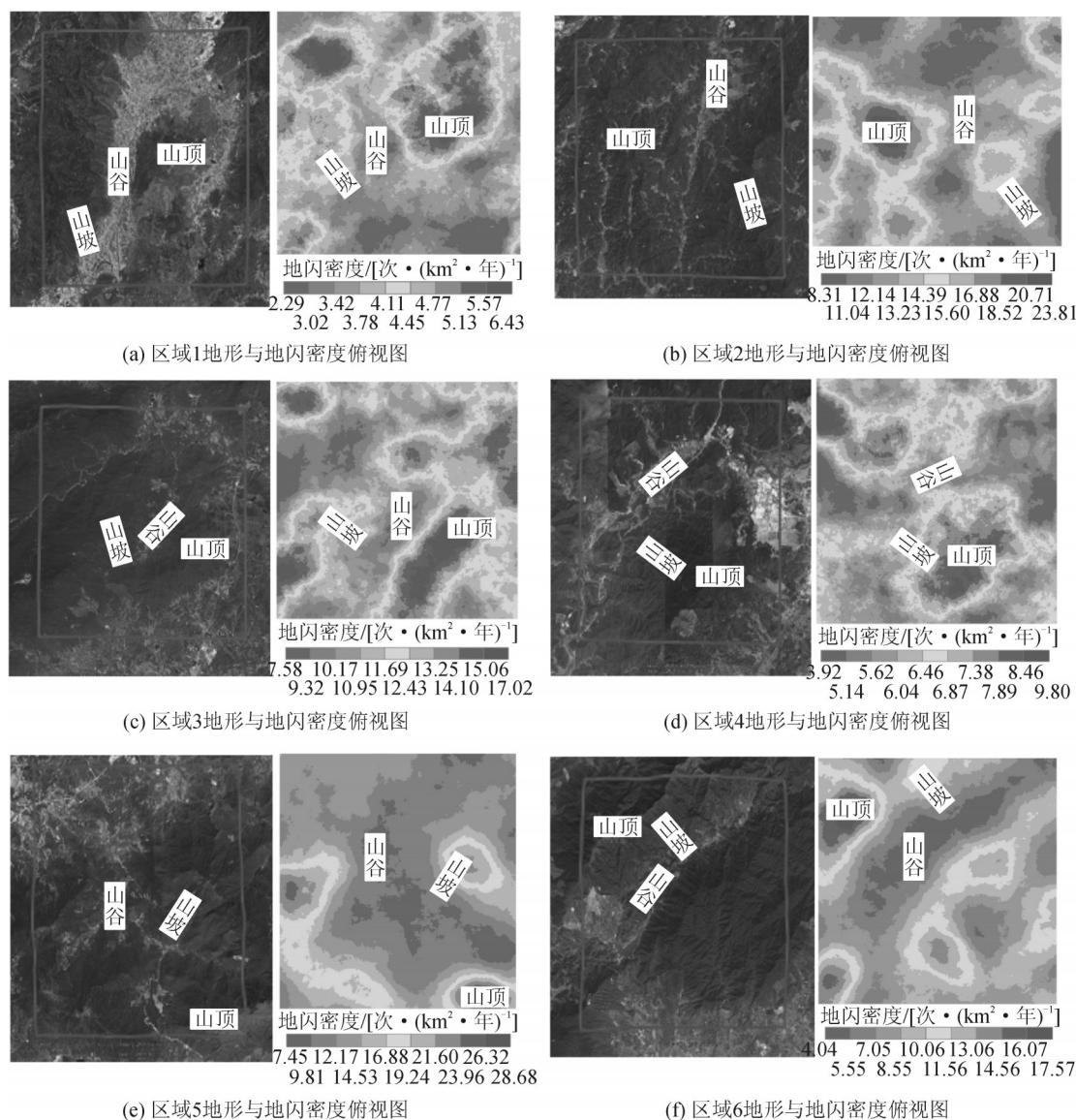


图7 不同地区地形俯视图与地闪密度分布俯视图

Fig. 7 Topographic overlooking map and ground flash density distribution overlooking the map in different region

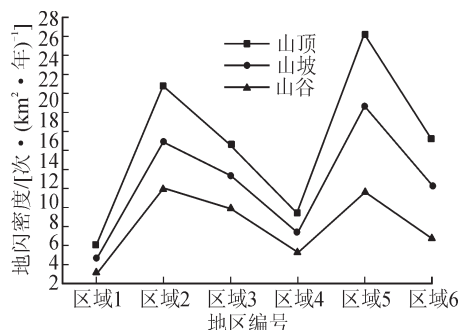


Fig. 8 Comparison diagram of typical terrain flash density in different regions

分析图8结果可知,在同一片山区区域内不同地形的地闪密度值存在明显差异,其基本规律表现为山顶地区地闪密度大于山坡地区地闪密度,山坡地区地闪密度大于山谷地区地闪密度,这种规律和文中统计结果保持一致。同时,即使都是山顶部

分,但是在不同区域的地闪密度也存在明显差异,这种差异主要是由于不同区域雷电活动强弱和海拔高度不同引起的。不同山区地形的地闪密度差值也存在明显的差异,这是由于不同山区其山体形状存在差异引起的。

4 实例分析

文中选取某500 kV线路作为研究对象分别计算各杆塔的绕击跳闸率,杆塔雷电绕击跳闸率的计算方法采用目前工程中常用的电气几何模型法。IEEE Std 1234—1997推荐的地闪密度与雷暴日之间关系的经验表达式见式1,某500 kV线路所处区域的雷暴日天数为65天。利用文中方法统计得出的某500 kV线路各杆塔处的地闪密度值见图9。计算得到的某500 kV线路各杆塔处的绕击跳闸率见图10。

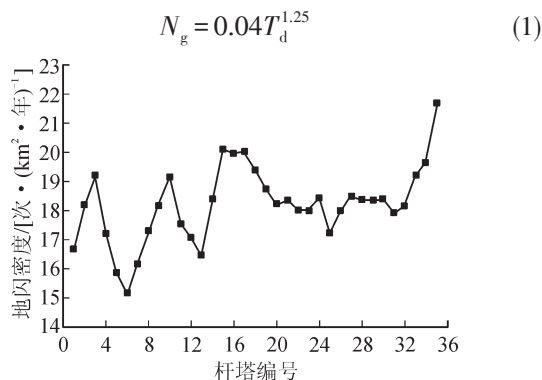


图9 某500 kV线路各杆塔处地闪密度统计值

Fig. 9 Statistical value of ground flashover density at each tower of a 500 kV transmission line

图9中的各杆塔的地闪密度是通过提取改进网格法统计得到的地闪密度图中杆塔所在网格的地闪密度值得到的。整条线路各杆塔处的地闪密度有明显的差异,计算绕击跳闸率时各杆塔采用一个值会造成明显的误差。

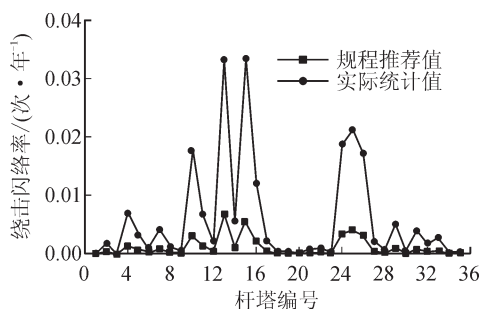


图10 某500 kV线路各杆塔处雷电绕击跳闸率

Fig. 10 Lightning shielding failure trip ratio at each tower of a 500 kV transmission line

由图10可知,采用不同地闪密度值计算得到的绕击跳闸率变化趋势是大致相同的,这是由于在计算绕击跳闸率时,除了地闪密度有差异之外,其余参数均保持一致。同时,采用规程法推荐值计算得到的结果明显低于实际统计结果,这与目前线路实际跳闸率高于理论计算结果的实际情况相吻合。线路实际运行中,第15基杆塔发生过雷电绕击事故,这与绕击跳闸率计算结果中15基杆塔高于其他杆塔相吻合。通过上述分析可知,采用改进网格法对山区地形的地闪密度做统计分析,然后利用得到的地闪密度计算绕击跳闸率会更加符合线路的实际情况,得到的结果更准确,可以为差异化防雷提供工程参考。

5 结论

文中根据雷电定位系统的数据,统计分析了某省多个山区的雷电数据,得到了研究区域的地闪密度分布图。通过对比实际地形与地闪密度分布图,

研究了山区地形地面落雷分布差异,结论如下:

1)筛选范围 R 对地闪密度统计结果影响明显, R 在400 m以下时地闪密度值明显大于实际情况,较小的 R 夸大了数据随机性。 R 大于1 600 m时山顶、山坡、平地地形的地闪密度趋于一致,较大的 R 抵消了地形的差异性。考虑到雷电定位系统精度为1 km以下,选取1 km的筛选范围较合适。

2)山区地形的地闪密度随着海拔高度的变化而变化,整体呈现出 $N_{g\text{山顶}} > N_{g\text{山坡}} > N_{g\text{山谷}}$ 的规律。同时,山体的形状即山体坡度和地形宽度两个因素会明显影响山区地形地闪密度分布差异。

3)某500 kV线路绕击跳闸率计算结果表明在工程实际中采用改进网格法得到的地闪密度值,可以得到更精确的结果。

参考文献:

- [1] 姚尧,李健,李涵,等. 基于山区雷电先导发展的改进电气几何模型仿真研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1050-1052.
YAO Yao, LI Jian, LI Han, et al. Simulation research of improved electro-geometric model based on lightning leader development in mountainous terrain[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1050-1052.
- [2] 赵伟,童杭伟,张俊,等. 浙江省雷电时空分布特征及影响因素分析[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1425-1431.
ZHAO Wei, TONG Hangwei, ZHANG Jun, et al. Spatial-temporal distribution characteristics and influencing factors of lightning in Zhejiang Province[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1425-1431.
- [3] 王学良,张科杰,余田野,等. 湖北地区云地闪电频次及雷电流幅值时间分布特征[J]. 电瓷避雷器, 2017(3): 1-9.
WANG Xueliang, ZHANG Kejie, YU Tianye, et al. Time distribution characteristics of cloud-ground lightning frequency and lightning current amplitude in Hubei area[J]. Insulators and surge Arresters, 2017(3): 1-9.
- [4] 陆国俊,熊俊,陈家宏,等. 广州地域1999—2008年地闪密度图及雷电参数分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 2930-2936.
LU Guojun, XIONG Jun, CHEN Jiahong, et al. Ground flash density map and lightning parameter analysis of Guangzhou region 1999—2008[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 2930-2936.
- [5] 李家启,王劲松,廖瑞金,等. 重庆库区地貌1999—2008雷电流幅值频率分布特征[J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1123-1128.
LI Jiaqi, WANG Jinsong, LIAO Ruijin, et al. Characteristics of lightning current amplitude and frequency distribution in Chongqing reservoir area from 1999—2008[J]. High

- Voltage Engineering, 2011, 37 (5): 1123-1128.
- [6] ORVILLE R E, HUFFINES G R, BURROWS W R. The north american lightning detection network(NALDN)-analysis of flash data: 2001 - 09[J]. Monthly Weather Review, 2011, 139(5):1305-1322.
- [7] HERRERA J, YOUNES C, PORRAS L. Cloud-to-ground lightning activity in Colombia: A 14-year study using lightning location system data[J]. Atmospheric Research, 2018 (203):164-174.
- [8] JOSE L M M, FERNANDO, C D, JOSER R P. Statistical characterization of cloud-to-ground lightning data and meteorological modelling of cloud-to-ground lightning days for the warm season in the province of León (northwest Spain) [J]. Meteorological Applications, 2016, 23(4): 671-682.
- [9] FAN W, DALIN Z. SAFIR-3 000 lightning statistics over the beijing metropolitan region during 2005-07[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2016, 55(12): 2613-2633.
- [10] TAKATOSHI S, HIDEKI M, TORU M, et al. Lightning occurrence data observed with lightning location systems of electric power companies in Japan:2009—2013[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2016, 11(s2):23-28.
- [11] ERIKSSON A J. The incidence of lightning strikes to power line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1987, 2(3): 871-886.
- [12] RIZK F A M. Modeling of transmission line exposure to direct lightning strokes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(4):1983-1997.
- [13] 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三维计算方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 662-668.
- SIMA Wenxia, ZHENG Haoyuan, YANG Qing, et al. Three - dimensional calculation method for shielding trip times of transmission lines under complex terrain[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40 (3): 662-668.
- [14] 魏本刚,傅正财,袁海燕,等. 改进先导传播模型法 500 kV 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 of 500 kV overhead lines by improved pilot propagation model method[J]. China Journal of Electrical Engineering, 2008, 28 (25): 25-29.
- [15] 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.
- LÜ Zheng, ZHENG Haoyuan, YANG Qing, et al. Calculation method of shielding failure tripping rate of compact transmission lines under complex terrain[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(11): 117-122.
- [16] 高文胜,张博文,周瑞旭,等. 基于雷电定位系统监测数据的雷暴云趋势预测[J]. 电网技术, 2015, 39(2):334-339.
- GAO Wensheng, ZHANG Bowen, ZHOU Ruixu, et al. Thunderstorm cloud trend prediction based on monitoring data of lightning location system[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 334-339.
- [17] 司马文霞,李永福,杨庆,等. 改进网格法及其在雷电参数统计中的应用[J]. 高电压技术, 2012, 38(8): 1834-1841.
- SIMA Wenxia, LI Yongfu, YANG Qing, et al. Improved grid method and its application in lightning parameter statistics[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8): 1834-1841.
- [18] 石湘波,张其林,丁焯毅,等. 优化网格法在小面积区域雷暴特征分析中的应用[J]. 气象科学, 2015, 35(3):523-529.
- SHI Xiangbo, ZHANG Qilin, DING Yeyi, et al. Application of optimized grid method in analysis of thunderstorm characteristics in small area[J]. Meteorological Science, 2015, 35(3):523-529.
- [19] 曹晓斌,马御棠,吴广宁,等. 利用地形参数计算超高压输电线路绕击跳闸率[J]. 高电压技术, 2010, 36(5):157-162.
- CAO Xiaobin, MA Yutang, WU Guangning, et al. Calculating shielding trip rate of UHV transmission lines by using topographic parameters[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36 (5): 157-162.
- [20] 周华良,宋斌,安林,等. 特高压输电线路分布式故障诊断系统研制及其关键技术[J]. 电力系统保护, 2019, 47(24):115-122.
- ZHOU Hualiang, SONG Bin, AN Lin, et al. Key technologies and development of distributed fault diagnosis system for EHV transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24):115-122.
- [21] 齐国强,王增平,裴愉涛,等. 基于信号复杂度衰减的特高压直流输电线路雷电暂态识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17):1-8.
- QI Guoqiang, WANG Zengping, QIU Yutao, et al. Transient identification method of lightning strokes based on the attenuation of signal complexity for UHVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 1-8.
- [22] 盛梅,冯志伟. 基于 ArcGIS 空间分析的闪电密度图绘制方法[J]. 电脑知识与技术, 2009, 5(8): 1982-1985.
- SHENG Mei, FENG Zhiwei. A lightning density mapping method based on ArcGIS spatial analysis[J]. Computer Knowledge and Technology, 2009, 5(8): 1982-1985.
- 胡豪(1994—),男,硕士研究生,从事高电压与绝缘技术研究(通讯作者)(E-mail:1017406315@99.com)。
- 陶鑫(1991—),男,硕士,从事电网防雷与接地技术研究。