

地闪密度按杆塔画圆差异化统计分析

刘欢^{1,2}, 阮江军¹, 李振柱³, 甘艳³, 杜志叶¹, 张思寒⁴, 吴焯军⁴

(1. 武汉大学电气工程学院, 武汉 430072; 2. 国网娄底供电公司, 湖南 娄底 417000;

3. 华中电网有限公司, 武汉 430077; 4. 佛山供电局, 广东 佛山 528000)

摘要: 国网武汉高压研究院在2007年提出用网格法对地闪密度进行统计, 这种方法可形成直观的、高精度的密度空间分布图。但是在进行防雷计算的过程中, 当某一杆塔处于地闪密度变化剧烈的网格分界处时, 不易于确定地闪密度的值。笔者提出地闪密度按每基杆塔为中心画圆的方法进行统计, 可以更直观和精确的反映出杆塔所处地的综合地闪密度值。并以500 kV葛岗线为例, 用按杆塔画圆方法得到的地闪密度值对线路耐雷水平进行计算, 并进行了风险评估, 计算结果显示, 文中方法能够较好地反映线路地闪密度变化对耐雷水平的影响。

关键词: 地闪密度; 防雷; 输电线路; 耐雷水平

中图分类号: TM726 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2014)06-0075-06

Statistical Method of CG Lightning Density by Circling Tower

LIU Huan^{1,2}, RUAN Jiangjun¹, LI Zhenzhu³, GAN Yan³,

DU Zhiye¹, ZHANG Sihan⁴, WU Zhuojun⁴

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Loudi Power Supply Company of State Grid, Hunan Loudi 417000, China; 3. Central China Grid Company Limited, Wuhan 430077, China;

4. Foshan Power Supply Bureau, Guangdong Foshan 528000, China)

Abstract: Wuhan High Voltage Research Institute of SGCC proposed a statistical method of CG lightning density, named grid method, which can form a intuitive and high-precision spatial distribution map of CG lightning density. However, the lightning protection calculation becomes in difficulty because the CG lightning density around a tower is not easy to be determined when the tower is located at the boundary of grid with sharp variation of CG lightning density. The authors propose a statistical method of CG lightning density by circling the tower to intuitively and precisely reflect the comprehensive value of CG lightning density around the tower. Taking Ge-Gang 500 kV transmission line for example, its lightning withstand level is calculated and the risk assessment is performed by using the proposed method, and the results illustrate the relation between lightning withstand level of the line and CG lightning density.

Key words: CG lightning density; lightning protection; transmission line; lightning withstand level

0 引言

输电线路分布很广, 地处旷野, 地形复杂, 纵横交错, 易受雷击。据统计, 线路的雷害在电力系统总的雷害事故中占很大的比重。输电线路防雷已成为众多电力工作者研究的重要部分, 输电线路防雷性能的重要指标是耐雷水平和雷击跳闸率^[1-4]。耐雷水

平是指雷击时, 线路绝缘不发生冲击闪络的最大雷电流幅值(kA)。雷击跳闸率是指取标准雷暴日数为40时, 每年每100 km线路的雷击跳闸次数^[5-9]。

1 地闪密度

据长期统计表明, 雷击是引起输电线路跳闸的最主要原因之一, 雷电参数已成为许多电力工作者研究的目标。地闪密度(又称落雷密度), 即统计区域

里单位年度内每平方公里的地面雷击次数,单位为次/(km²·a),是评估雷电活动强弱,计算雷击风险,进行防雷设计的重要参数^[10-11]。目前国内对雷电活动强弱的评估主要以雷电日为基础,依据雷电日大小将全国划分为少雷区(雷电日<15 d)、中雷区(雷电日为 15~40 d)、多雷区(雷电日为 40~90 d)、雷电活动频繁区(雷电日>90 d)^[12-14],地闪密度过去一直无法直接测量,刘继等人在 60 年代通过对我国 35~220 kV 架空线路雷害事故统计,得出地面年落雷密度与雷电日的关系为

$$N_g = 0.023 T_d^{1.3} \text{ 次/(km}^2 \cdot \text{a)} \quad (1)$$

式(1)中: N_g 为年落雷密度; T_d 为雷电日。

国内从 20 世纪 80 年代初开始研制雷电定位监测技术,雷电定位监测技术^[15-16]的发展为雷电参数的获取提供了很大的帮助,到 2011 年为止,全国已有 30 多个网省电力公司建立了雷电定位系统,国家电网所属国家电科院已在全国建设了 486 个雷电探测站,37 个数据中心站^[17],根据目前雷电探测定位系统的技术水平,已经能够准确识别“云闪”与“地闪”,这是因为云闪与地闪的频率相差较明显,通常条件下,雷电探测站能够准确测量雷击点的时间和经纬度以及雷电流的大小。过去在防雷研究中存在的地闪密度数据不完整的问题,可望在逐渐完善的雷电探测系统中得到解决。目前各个网省公司也形成了自己所辖区域的雷电探测和定位数据库,对这些数据进行统计分析,找到其中的趋势,形成比较可信的数据基础。国网武汉高压研究院根据多年累积下来的雷电数据,提出了地闪密度按网格法统计^[9]。网格法就是将目标对象划分成若干个连续的面积近似的虚拟网格,统计各个网格中的地闪次数;用每个网格中的年地闪次数除以相应的网格面积,即得到该网格的地闪密度。网格大小依据统计对象面积和所需要的精度在 1 km×(1~20) km×20 km 范围内选取。不同大小网格反映地闪密度时,地理图形化显示时的分辨率不同^[18]。

2 地闪密度按杆塔进行差异化统计

在国内外,用雷击跳闸率来评价线路的防雷措施,对于线路的雷击跳闸率采用归算为杆塔的雷击跳闸率的方法,在使用雷电参数地闪密度进行计算时,使用网格法的地闪密度统计方式会出现某一杆塔处于网格交界处,地闪密度不易判断,或者相邻很近的两杆塔的地闪密度差异性很大,不符合客观的规律的问题。为解决相近杆塔的地闪密度跳跃性较大的问题,笔者提出了地闪密度按杆塔画圆进行差

异化统计的方法,使在评价线路的防雷措施时使用地闪密度值更加准确。

2.1 地闪密度统计方法

地闪密度按杆塔画圆进行差异化统计方法即以各杆塔为圆心, S 公里为半径画圆,统计落在圆区域内的雷,该圆域内所有的地闪次数与圆域面积的比值即可得到该杆塔附近区域的地闪密度,单位为次/(km²·a)。

从雷电电位系统可以得到杆塔 M 的经纬度坐标(X, Y)以及各雷击点 M_n 的经纬度坐标(X_n, Y_n),通过计算可得雷击点和杆塔之间的距离 L 为

$$L = 6370 \times \arccos[\sin Y \times \sin Y_n + \cos Y \times \cos Y_n \times \cos(X_n - X)] \quad (2)$$

计算 $N(N=1, 2, 3, \dots)$ 年内的地闪密度,若第 $i(i=1, 2, 3, \dots)$ 年内共有 $n(n=1, 2, 3, \dots)$ 个雷击点 M_n 到杆塔 M 点的距离小于等于 S , 则该杆塔第 i 年的地闪密度为

$$N_{g,i} = \frac{n}{\pi S^2} \quad (3)$$

N 年的年地闪密度为

$$N_g = \left(\sum_{i=1}^N N_{g,i} \right) / N \quad (4)$$

由上面的计算可知,在取不同的圆域半径 S 时,所得到的地闪密度不同,半径选取过小时会导致所统计的圆域面积过小,误差增大,使得相邻杆塔的地闪密度跳跃性增大;而半径选取过大时会使得所统计的圆域面积过大,杆塔地闪密度差异化统计不明显,不能突出位于地闪密度较大地区的杆塔。选取合适的圆半径 S 对于地闪密度按杆塔画圆进行差异化统计方法统计的结果起着至关重要的作用。

2.2 葛岗线地闪密度统计分析

文中以葛岗线 100-300 号杆塔为例,用地闪密度按杆塔画圆统计的方法来计算各杆塔的地闪密度,由雷电定位系统可得到 2006—2011 年内所有的雷击故障的雷击点的经纬度坐标,圆域半径 S 在 1~10 km 范围内选取不同的半径进行地闪密度按杆塔进行统计,各杆塔在不同的半径下统计结果见图 1。由以图 1 可以看出,随着取值半径的增大,各杆塔地闪密度跳跃性减小,曲线趋于平缓,差异性减小。

选取各个半径统计方式下的单杆圆域最大和最小地闪密度的杆塔(100、101、145、147、195、210、211、212、217、220 号)作为典型塔,得到典型杆塔单杆圆域地闪密度随取值半径的变化曲线见图 2。

由图 2 可以看出,在典型杆塔统计圆域半径 S 超过 3 km 时,按杆塔统计的地闪密度处于稳定,误差较小。同时,由于选取半径越大,各杆塔地闪密度

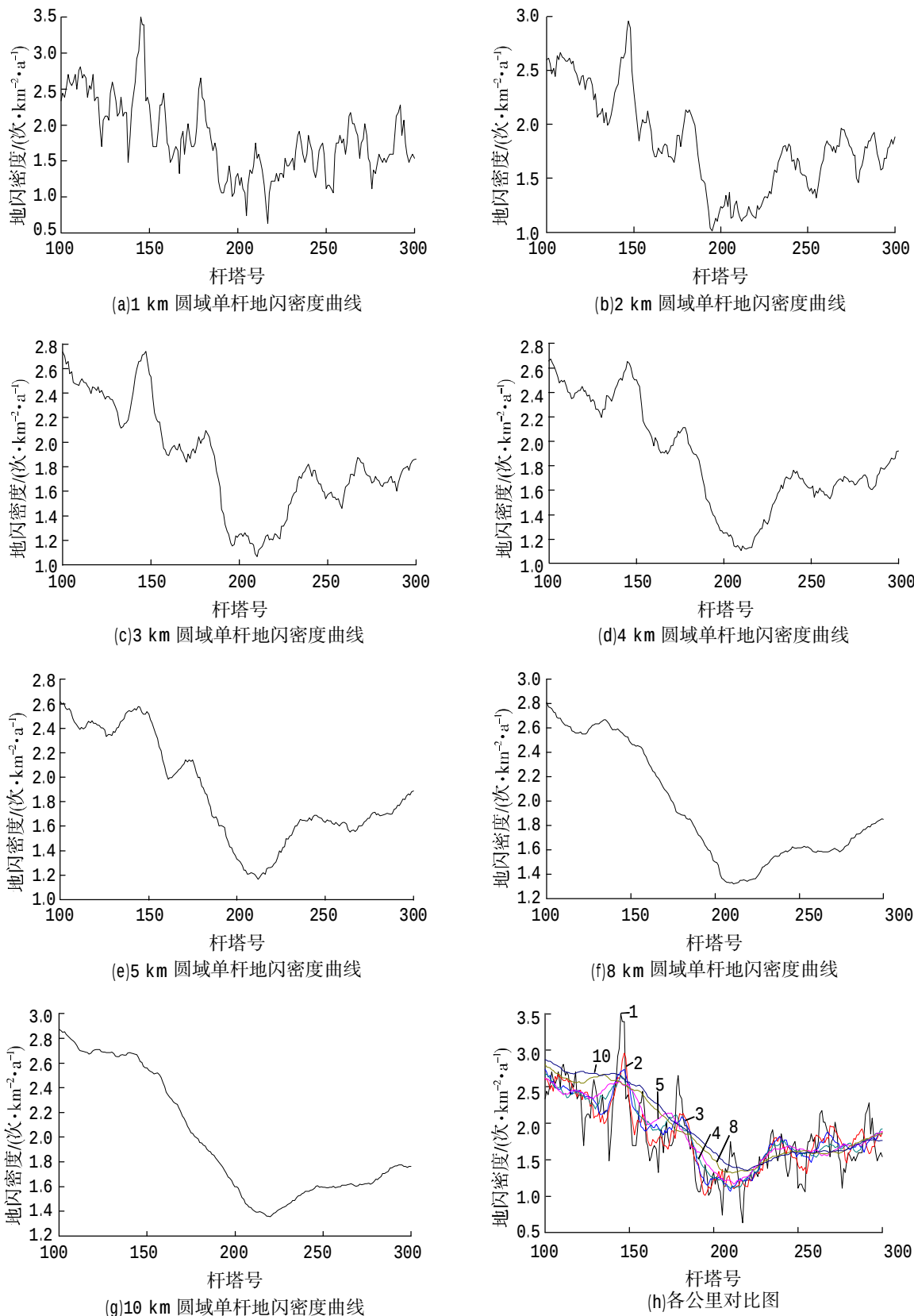


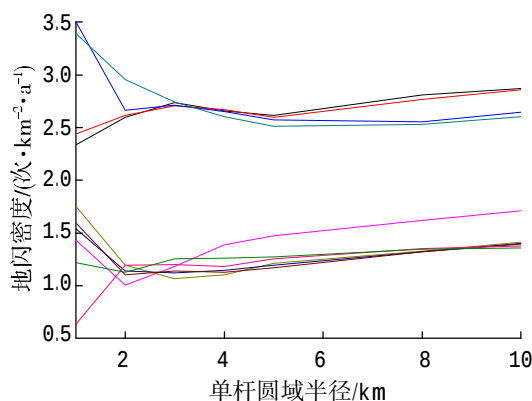
图1 葛岗线100-300号地闪密度按圆域半径S km统计

Fig. 1 Statistics of CG lightning density according to the circular domain radius S kilometers of the tower from No.100 to No.300 of Gegang line

差异化越不明显,因此为了保证差异化程度,选定以3 km为半径对葛岗线进行地闪密度按杆塔差异化统计最为合理。

3 计算实例

以500 kV 葛岗线为分析对象。该线路投运于



注:纵坐标轴上线条从上到下依次为 145、147、101、100、210、211、212、195、220、217 号杆塔。

图 2 葛岗线典型杆塔地闪密度随取值半径的变化曲线

Fig. 2 Changing curve of CG lightning density according to the changing circular domain radius of typical towers of Gegang line

1988 年 6 月,是跨越湖北湖南两省的线路,全长 190.163 km,共有 486 基杆塔,其中,单回杆塔共有 486 基,双回杆塔共有 0 基,全线架设双地线。

3.1 线路雷击概况

根据运行单位提供的雷击闪络调查数据,葛岗线在 1988 年 6 月投运后共发生了 10 次雷击跳闸故障(2000 年前发生的 4 次雷击跳闸故障暂无巡线详细记录),其余 6 次雷击跳闸故障的详细统计情况见表 1,其中 4 次发生在湖北段境内,2 次发生在湖南段境内,发生在湖北段境内的 3 次雷击故障中有 4 次发生在宜昌境内。

表 1 葛岗线 2000 年以后雷击故障统计情况

Tab. 1 Statistics of lightning fault of Gegang line 2000 years later

故障时间	故障杆塔	塔形	跳闸形式
2010-07-20	43 号	ZB23-27	反击
2008-07-31	187 号	ZB21-33	反击
2006-07-07	248 号	ZB84-27	绕击
2005-02-07	32 号	ZB24-27	反击
2004-07-09	30 号	ZJ21-30	不详
2000-08-15	436 号	ZB23-48	不详

3.2 雷电流幅值

根据统计数据,葛岗线沿线 2006—2011 年雷电流幅值累积概率分布曲线拟合表达式为

$$P(>I) = \frac{1}{(1+I/43.8)^{3.3}} \quad (5)$$

式(5)中,电流值为 43.8 kA。

3.3 雷击跳闸率计算

根据线路的实际情况可知,葛岗线在 2006 年至 2011 期间共发生 3 次雷击故障跳闸,实际的雷击跳闸率为 0.065 7 次/(百 km·a)。

对葛岗线进行雷击跳闸率时,地闪密度用按杆塔画圆统计地闪密度方法进行统计,考虑杆塔本身参数、地形地貌、地面倾角、雷电参数等参数^[19-20],反击采用规程法进行计算,绕击采用电气几何模型的方法进行计算,可以得到线路平均雷击跳闸率为 0.066 343 次/(km²·a),若地闪密度采用网格法统计地闪密度所得到的线路平均雷击跳闸率为 0.758 57 次/(km²·a),从上面的计算表格可以看出,采用按圆统计地闪密度的方法计算所得的线路跳闸率比按网格法统计地闪密度的方法计算所得线路跳闸率更接近实际地闪密度,提高了计算结果的准确度。

4 雷击闪络风险评估

根据对线路进行跳闸率的计算可知,考虑防雷措施后葛岗线全线的平均绕击跳闸率为 0.039 次/(km²·a),平均反击跳闸率为 0.027 次/(km²·a),平均雷击跳闸率为 0.066 次/(km²·a),文中基于上述 3 个指标对葛岗线所有杆塔进行风险等级划分,以 0.5 倍、2 倍指标值作为风险划分的分界线,将葛岗线所有杆塔划分为 A、B、C、D 4 个等级。500 kV 葛岗线风险评估等级划分分级指标见表 2。

表 2 500 kV 葛岗线风险评估等级划分分级指标

Tab. 2 Hierarchical classification of risk assessment indicators of 500 kV Gegang line

绕击 跳闸率	等级	反击 跳闸率	等级	雷击 跳闸率	等级
$P_r < 0.0195$	A	$P_r < 0.0135$	A	$P < 0.0330$	A
$0.0195 \leq P_r < 0.0390$	B	$0.0135 \leq P_r < 0.0270$	B	$0.0330 \leq P < 0.0660$	B
$0.0390 \leq P_r < 0.0780$	C	$0.0270 \leq P_r < 0.0540$	C	$0.0660 \leq P < 0.1320$	C
$P_r \geq 0.0780$	D	$P_r \geq 0.0540$	D	$P \geq 0.1320$	D

对各基杆塔的雷击闪络风险划分为 A、B、C、D 的目的是将各杆塔绕击、反击防雷性能的相对强弱更为直观的表达出来。

葛岗线整条线路进行风险评估后,各个风险等级杆塔数量分布见图 3。

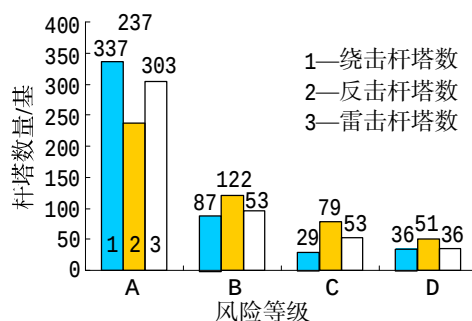


图 3 葛岗线跳闸率数量分布图

Fig. 3 Quantitative distribution of trip rate of Gegang line

由葛岗线杆塔跳闸率数量分布图可以看出安装了避雷措施之后的杆塔处于 A、B 级的杆塔居多,整条线路处于比较好的状态。对线路进行防雷改造可以根据风险等级来确定,对于处于 C、D 级的杆塔可以采取具有针对性的防雷改造,如安装避雷器、可控放电避雷针等。

5 结语

笔者通过对统计雷电监测系统所监测到的雷击的经纬度以及雷电流的大小等具体准确的信息,提出了对地闪密度采用按杆塔画圆统计的方法,与国网武汉高压研究院提出的地闪密度用网格法统计的方法相比,能解决在计算过程中易出现的网格边缘地闪密度跳跃性的问题,使在对线路进行防雷评估的计算结果能够更合理和准确。

通过对输电线路沿线参数进行统计分析,计算杆塔的雷击跳闸率,并对每基杆塔进行雷击风险评估,确定其风险等级,有针对性、目的性的对风险等级较高的杆塔进行防雷措施的改造。随着雷电监测系统不断的完善,数据积累不断丰富,所得雷电信息更加准确、样本数据越来越多的情况下,在精细化分析的基础上,对杆塔防雷性能进行差异化改造,可实现经济性和安全性的统一,可望在各电网公司得到了广泛的推广。

参考文献:

- [1] 李荣,王才伟.甘肃雷暴云电荷分布和闪电特征的个体差异[J]. 高电压技术,2001,27(2):74-75.
LI Rong, WANG Caiwei. Disparity of charge structure and lightning characteristics in different thunderclouds in Gansu area[J]. High Voltage Engineering, 2001,27(2): 74-75.
- [2] 冯桂力,陈文选,刘诗军,等.山东地区闪电的特征分析[J]. 应用气象学报,2002,13(3):347-354.
FENG Guili, CHEN Wenxuan, LIU Shijun, et al. Preliminary analysis of lightning characteristics in Shandong[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2002, 13(3): 347-354.
- [3] 李照荣,陈添宇,康凤琴,等.兰州周边地闪分布特征[J]. 干旱气象,2004,22(2):45-51.
LI Zhaorong, CHEN Tianyu, KANG Fengqin, et al. Lightning distribution characteristics around Lanzhou[J]. Arid Meteorology, 2004, 22(2): 45-51.
- [4] 刘玮,刘源,王伟平,等.韶关变电站二次系统防雷研究[J]. 电瓷避雷器,2011(5):94-99.
LIU Wei, LIU Yuan, WANG Weiping, et al. Research of lightning protection for secondary system of Shaoguan sub-station[J]. Insulators and Surge Arresters, 2011(5):94-99.
- [5] 陈家宏,冯万兴,王海涛.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. Analysis of lightning parameters and weak sections for 1 000 kV UHV transmission line corridor[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 45-48.
- [6] 罗成德,罗利群.四川的自然灾害与可持续发展[J]. 地域研究与开发,2003,22(2):70-74.
LUO Chengde, LUO Liqu. A study on disaster and sustainable development of Sichuan province[J]. Areal Research and Development, 2003,22(2):70-74.
- [7] RUST W D, GORMAN D R, ARNOLD R T. Positive cloud-to-ground lightning flashes in severe storms[J]. Geophysical Research Letters, 1981(8):791-794.
- [8] 周筠珺,孙凌,杨静,等.中国西南及其周边地区雷电活动的特征分析[J]. 高电压技术,2009,35(6):1309-1315.
ZHOU Yunjun, SUN Ling, YANG Jing, et al. Characteristics of lightning activities over southwest and its circum-jacent areas in China [J]. High Voltage Engineering, 2009,35(6):1309-1315.
- [9] 郅秀书,余晔,王怀斌,等.中国内陆高原地闪特征的统计分析[J]. 高原气象,2001,20(4):395-400.
QIE Xiushu, YU Ye, WANG Huaibin, et al. Analysis on some features of ground flashes in Chinese inland plateau [J]. Plateau Meteorology, 2001, 20(4):395-400.
- [10] 张宇,杨坚,万军彪,等.考虑输电线路走廊地闪密度的防雷措施效果评估[J]. 电网技术,2012,36(70):172-175.
ZHANG Yu, YANG Jian, WAN Junbiao, et al. A method to evaluate effects of lightning protection measures considering [J]. Power System Technology, 2012,36(70): 172-175.
- [11] 赵淳,阮江军,李晓岚.输电线路综合防雷措施技术经济性评估[J]. 高电压技术,2011,37(2):290-297.
ZHAO Chun, RUAN Jiangjun, LI Xiaolan. Technology and economy evaluation of comprehensive transmission line lightning protection measures[J]. High Voltage Engineering, 2011,37(2):290-297.
- [12] 刘畅,赵鹏国,周筠珺,等.复杂地貌区域内的地闪特征分析[J]. 高压电器,2011,47(1):22-28.
LIU Chang, ZHAO Pengguo, ZHOU Yunjun, et al. Characteristics of CG lightning over complex landform areas[J]. High Voltage Apparatus, 2011,47(1):22-28.
- [13] 盛裴轩,毛节秦,李建国,等.大气物理学[M]. 北京:北京大学出版社,2003.
SHENG Peixuan, MAO Jietai, LI Jianguo, et al. Atmospheric physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2003.
- [14] 刘刚,唐军,张鸣.根据雷电定位数据对输电线路雷击跳闸率计算方法修正的探讨[J]. 电瓷避雷器,2011(6):95-102.

- LIU Gang, TANG Jun, ZHANG Ming. Discussion on correction of transmission line lightning trip-out rate based on lightning location data[J]. Insulators and Surge Arresters, 2011(6):95-102.
- [15] 张 怡, 张 锋. 雷电定位系统在电力系统中的应用[J]. 浙江电力, 2005(2):26-29.
- ZHANG Yi, ZHANG Feng. Application of lightning location system in electric power system [J]. Zhejiang Electric Power, 2005(2): 26-29.
- [16] 陈家宏. 雷电定位技术及其我国电网雷电监测网[C]//2007 年中国电机工程学会高电压专委会论文集. 北京:清华大学出版社, 2007:314-318.
- CHEN Jiahong. Lightning location technology and China grid lightning detection network [C]//Proceedings in 2007 of High Voltage Subcommittee of Chinese Society for Electrical Engineering. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 314-318.
- [17] 王海涛, 童杭伟, 冯万兴, 等. 浙江省地闪密度图的绘制方法及其有效性验证[J]. 高电压技术, 2008, 34(11): 2488-2491.
- WANG Haitao, TONG Hangwei, FENG Wanxing, et al. Drawing methods and validity for cloud-to-ground flash density map of Zhejiang Province [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(11):2488-2491.
- [18] 国网武汉高压研究院. 采用网格法确定雷电参数的统计方法: 中国专利, CN1936880[P]. 2007-03-28.
- Wuhan High Voltage Research Institute of SGCC. Statistical method for determining lightning parameters using grid method: China Patent, CN1936880[P]. 2007-03-28.
- [19] 赵 淳, 陈家宏, 王 剑, 等. 电网雷害风险评估技术研究[J]. 高电压技术, 2011, 37(12):3012-3021.
- ZHAO Chun, CHEN Jiahong, WANG Jian, et al. Research on technology of lightning disaster risk assessment for power system [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(12): 3012-3021.
- [20] 汤 明, 李成榕. 输电线路雷击闪络电流传感器的研制[J]. 电网与清洁能源, 2008, 24(8):22-25.
- TANG Ming, LI Chengrong. Development of a lightning flashover current sensor on transmission lines [J]. Power System and Clean Energy, 2008, 24(8):22-25.
- 刘 欢(1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向为输电线路防雷、风险评估。
- 阮江军(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电磁场数值计算及其工程应用、高压电器、电磁兼容。
- 李振柱(1961—), 男, 高级工程师, 研究方向为超高压输电线路灾害评估防治技术。
- (上接第 74 页)
- YU Yufei, HU Qihong, SHI Wenyao. Calculation & analysis for opening(closing) speed of SF₆ circuit breakers with spring liquid pressure mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(5): 329-332.
- [10] 李 超, 孔祥飞, 陈晓飞, 等. 光栅位移传感器在高压开关机构位移测量中的应用 [J]. 仪表技术与传感器, 2011(12):81-95.
- LI Chao, KONG Xiangfei, CHEN Xiaofei, et al. Crating displacement sensor application in high voltage switch displacement measurement [J]. Instrument Technique and sensor, 2011(12):81-95.
- [11] GB/T 1800.2—2009 产品几何技术规范(GPS)极限与配合第二部分: 标准公差等级和孔轴极限偏差表[S]. 2009.
- GB/T 1800.2—2009 GPS—Limits and fits—Part2: Tables of standard tolerance grades and limits deviations for holes and shafts [S]. 2009.
- [12] 张美芸, 陈棱佳, 陈 磊. 公差配合与测量[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010.
- ZHANG Meiyun, CHEN Lengjia, CHEN Lei. Tolerance fit and measuring[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2010.
- 郭瑞艳(1967—), 女, 工程师, 主要从事中压开关设计及技术管理工作。