

## 江苏电网近年雷电活动及输电线路雷击跳闸分析

徐 伟, 路永玲, 唐梦颖, 钟 丹, 胡成博

(国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:**近年来,雷电活动引起的输电线路跳闸事故频繁发生,因此针对输电线路防雷技术开展相应研究工作。在统计江苏雷电活动的基础上,分别从杆塔塔型、高度、回数及档距等多个方面分析了跳闸原因和雷击特性。完成2012至2016年江苏电网输电线路雷击跳闸统计,并结合电网生产实际,从输电线路差异化评估、运维、新技术等方面提出合理化防雷措施和建议。

**关键词:**输电线路;雷电活动;线路跳闸;落雷密度;防雷策略

**中图分类号:** TM862

**文献标志码:** B

**文章编号:** 2096-3203(2017)06-0106-05

### 0 引言

截至2016年12月,江苏电网220 kV在输电线路长度达29 636.56 km,500 kV线路长度达15 150.8 km,输电线路防雷工作面临严峻考验。根据故障统计数据,江苏电网每年因雷击引起的跳闸约占线路跳闸总数的1/4以上<sup>[1]</sup>,输电线路的雷击跳闸严重影响了整个电网的安全稳定运行<sup>[2]</sup>。

文中在统计江苏省雷电活动情况的基础上,分析了2012—2016年江苏电网输电线路雷击跳闸故障及其原因,对现有防雷措施运行进行总结,可为线路设计、电网运行提供有效的参考<sup>[3]</sup>。

### 1 2012—2016年全省雷电活动情况

#### 1.1 雷电活动总体情况

图1为江苏电网雷电定位系统统计的2012—2016年全省落雷情况。从年度时间来看,2012年雷电活动最为强烈,落雷数达960 222个;2014年最弱;2013年、2015年及2016年雷电活动较弱。从落雷极性来看,负极性落雷个数明显大于正极性落雷个数,2016年负极性雷数量较2015年有所减少。整体而言,除了2012年,近年来江苏整体雷电活动较弱。

#### 1.2 各地区地闪密度比较

基于江苏电网雷电定位系统<sup>[4-6]</sup>,不同地区近5年来地闪密度见表1。

从表1可得:(1)2016年落雷集中分布在宿迁、南通、无锡等地,其中宿迁的地闪密度最大,达3.817次/(km<sup>2</sup>·a);2015年落雷集中分布在淮安、扬州、无锡等地,其中淮安的地闪密度最大,达4.105次/(km<sup>2</sup>·a);2013—2016年各地区落雷水平明显低

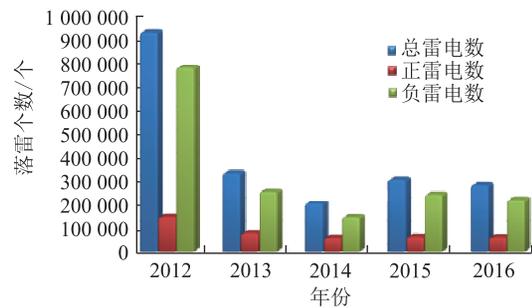


图1 2012—2016年江苏落雷情况

Fig. 1 Ground lightning situations of each year from 2012 to 2016 in Jiangsu

表1 江苏各地区近5年落雷密度

Table 1 Ground lighting density distribution in different areas in recent 5 years

地区	次/(km <sup>2</sup> ·a)				
	2012	2013	2014	2015	2016
南京	9.385	2.664	2.988	2.804	2.872
南通	8.290	4.253	3.103	2.898	3.782
宿迁	10.885	3.108	1.765	2.977	3.817
常州	9.189	1.846	3.848	2.949	3.298
徐州	6.621	4.121	1.059	2.359	2.422
扬州	13.128	2.664	2.025	3.536	2.370
无锡	11.833	4.380	3.880	3.512	3.634
泰州	12.513	2.567	1.539	2.864	2.797
淮安	11.608	2.073	1.514	4.105	2.092
盐城	6.650	3.037	0.731	2.990	2.210
苏州	10.194	4.937	3.547	2.974	3.301
连云港	5.531	4.983	1.606	3.251	2.839
镇江	14.053	1.694	2.976	3.142	2.492

于2012年。(2)从雷电活动分布趋势来看,2014年雷电活动主要呈现为北部弱,南部强;其余年份南北部地区雷电活动较为均匀。2012及2016年地闪密度分布分别见图2和图3。

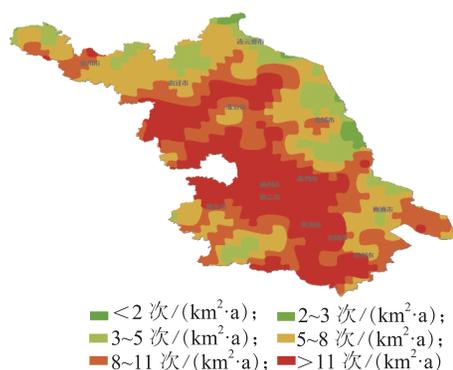


图2 2012年江苏地闪密度

Fig.2 Ground lightning density distribution in different areas in 2012

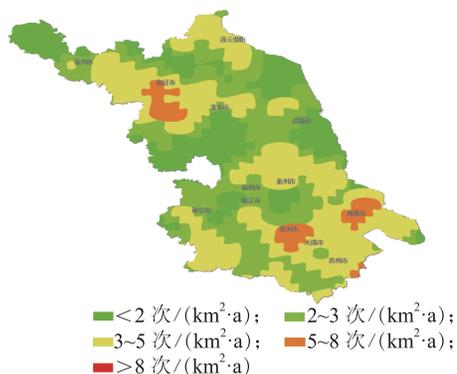


图3 2016年江苏地闪密度

Fig.3 Ground lightning density distribution in different areas in 2016

### 1.3 雷电流幅值

由表2可知,2012至2016年,各年平均电流幅值、正平均电流幅值和负平均电流幅值均在17~35 kA变化;2012到2014年负闪电流幅值大于正闪幅值,2015到2016年与之相反;2016年平均电流幅值为近5年最小值。

表2 2012—2016年平均雷电流幅值

Table 2 Lightning average amplitude of each year from 2012 to 2016

类别	平均雷电流幅值/kA				
	2012	2013	2014	2015	2016
正闪	27.462	17.009	18.937	22.873	22.307
负闪	34.482	26.640	26.238	21.481	19.775
年平均	33.362	24.357	24.144	21.769	20.336

分别以500 kV单回路、220 kV典型双回路鼓形塔及220 kV典型干字形杆塔为例,接地电阻取1.5 Ω,500 kV杆塔高度取50 m,220 kV取40 m。通过EMTP仿真软件计算得到500 kV单回路、220 kV双回路鼓形塔及220 kV单回路干字形杆塔的反击耐雷水平分别为134.37~152 kA、84.29~90 kA和

89.27~95 kA,结合雷电流幅值查询、仿真计算及现场巡视检测等结果,判断得到江苏地区雷击形式以绕击为主<sup>[7,8]</sup>。

## 2 220 kV及以上输电线路雷击跳闸情况分析

### 2.1 总体情况

2012—2016年全省220 kV及以上线路雷击跳闸共150次,其中:500 kV线路125次(96次重合成功,16次重合不成功,13次重合未投);220 kV线路25次(22次重合成功,3次重合未成功)。2016年500 kV线路雷击跳闸数较前两年有所增长,但较2012年及2013年有所降低。在线路长度逐年增长的情况下,220 kV线路雷击跳闸数仍为近5年最小值,这和近几年加强220 kV及以上线路防雷工作有密切关系。具体跳闸情况见表3。

表3 2012—2016年雷击跳闸情况统计

Table 3 Lightning trip-out statistic of each year from 2012 to 2016

电压等级/kV	雷击跳闸次数/次				
	2012	2013	2014	2015	2016
500	6	8	3	4	5
220	22	22	31	30	19

### 2.2 雷击跳闸率及重合成功率

2012—2016年线路雷击跳闸率及重合成功率统计分别见表4和表5。各电压等级雷击跳闸率近5年趋势整体相同,总体呈上升趋势。2016年500 kV雷击跳闸率为 $0.063 \times 10^{-2}$ 次/(km·a),为近4年最小值;220 kV线路雷击跳闸率为 $0.032 \times 10^{-2}$ 次/(km·a),为近3年最大值。同时500 kV和220 kV线路重合成功率分别为100%和88.89%,与往年相比,220 kV线路重合成功率有所提高,有效减小了事故发生的概率,降低了雷击对电网产生的影响。

表4 2012—2016年雷击跳闸率情况统计

Table 4 Lightning trip-out rate statistic of each year from 2012 to 2016

电压等级/kV	雷击跳闸率 $\times 10^{-2}$ /[次·(km·a) <sup>-1</sup> ] (归算到40个雷暴日下)				
	2012	2013	2014	2015	2016
500	0.031	0.076	0.144	0.098	0.063
220	0.015	0.052	0.029 6	0.025	0.032

### 2.3 雷击跳闸回数及塔型情况

近5年故障杆塔单、双(四)回情况及塔型分别见表6和图4,可分析得:(1)2012—2016年雷击故障主要发生在双(四)回路杆塔上,5年内该类杆塔跳闸次数占总次数的82.67%;(2)雷击跳闸发生在

表5 2012—2016年雷击跳闸重合成功率情况统计

Table 5 Lightning trip-out coincidence rate statistics of each year from 2012 to 2016

电压等级 /kV	雷击跳闸重合成功率/%				
	2012	2013	2014	2015	2016
500	83.33	75.00	100.00	100.00	100.00
220	81.82	71.43	88.46	84.62	88.89

鼓形塔上的比例最大。这是由于同塔双(四)回路大都采用鼓形塔,鼓形塔中相导线的横担最长(保护角较大),且其与避雷线距离较远,故雷击闪络率大,中相导线一般采用纵向排列,导线数量多,引雷面积较大,绕击概率大。

表6 2012—2016年单、双(四)回路雷击跳闸统计

Table 6 Lightning trip-out rate statistic of single and double (four) circuit lines from 2012 to 2016

线路	雷击跳闸次数/次				
	2012	2013	2014	2015	2016
单回	4	11	2	3	6
双(四)回	24	19	32	31	18

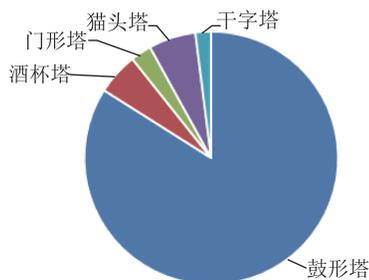


图4 2012—2016年雷击跳闸各类故障塔型占比

Fig.4 Percentage of the tripping tower styles by lightning from 2012 to 2016

故障塔型方面,在150次跳闸中,有126次发生在直线塔上,占总数的84%。这是由于(1)直线塔两端均压环短接了部分空间间隙,使复合绝缘子的耐雷水平较同样安装高度的玻璃绝缘子偏低<sup>[9]</sup>; (2)耐张塔因其数量少、绝缘水平高,雷击跳闸次数相对较少。具体统计数据见图5。

#### 2.4 雷击跳闸杆塔高度分布

通过表7分析,220 kV杆塔雷击跳闸主要集中在40~60 m,占总数的75.20%;500 kV杆塔雷击跳闸主要集中在60 m以上,占总数64.00%。以220 kV双回路SZ1型杆塔为例,采用电磁暂态仿真分析法(ATP)进行绕击耐雷性能计算,计算中雷电流波采用双指数波(1.2/50 μs),雷电通道波阻抗取400 Ω,杆塔模型采用固定波阻抗(横担300 Ω,塔身150 Ω),输电线路采用Jmarti模型,闪络判据采用相

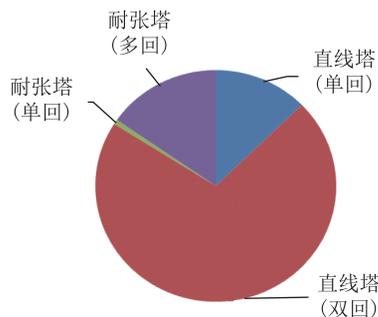


图5 2012—2016年雷击跳闸杆塔塔型统计

Fig.5 Lightning trip-out tower type statistics from 2012 to 2016

交法,计算结果如表8所示。可分析得:杆塔的高度增加,导线的引雷能力提高,同时地面对导线的屏蔽作用减少,能够绕击到导线上的雷电流幅值和概率也增大,杆塔绕击率随保护角增大而增大<sup>[10,11]</sup>。

表7 2012—2016年雷击跳闸杆塔高度统计

Table 7 Lightning trip-out statistics in different heights of each year from 2012 to 2016

杆塔高度 $h$ /m	500 kV 数量/次	220 kV 数量/次
$\geq 60$	16	9
$60 > h \geq 50$	3	38
$50 > h \geq 40$	4	56
$40 > h \geq 30$	2	22

表8 杆塔高度对绕击性能影响

Table 8 The impact of tower height on shielding failure

杆塔高度 $h$ /m	最大绕击雷电流 / kA	40雷电日双回路绕击跳闸率 $\times 10^{-4}$ / [次 $\cdot$ (km $\cdot$ a) $^{-1}$ ]
35	12.38	0.003
40	13.77	0.177
45	15.21	0.901
50	16.69	0.493
55	18.23	5.320

#### 2.5 雷击跳闸杆塔档距分布

2012—2016年雷击跳闸主要发生在档距500 m以下的线路上。其中500 kV雷击跳闸杆塔档距集中在400~500 m,占总数的42.31%;200 kV雷击跳闸杆塔档距主要集中在300~400 m,占总数的48.39%。分析可知,排除大档距杆塔所占比例较小的因素,整体上随着档距的增加,所跨越的地形更为复杂<sup>[12-14]</sup>,跳闸次数也随之上升。具体占比见图6。

### 3 建议及措施

通过总结雷电活动及输电线路雷击跳闸情况,对输电线路防雷工作提出以下建议:

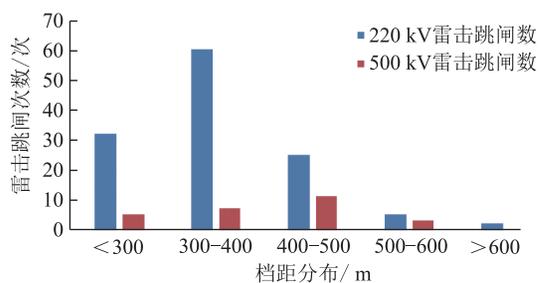


图6 2012—2016年雷击跳闸各类故障杆塔档距占比  
Fig.6 The spans of tripping tower styles by lightning from 2012 to 2016

(1) 输电线路防雷可对多雷区高风险杆塔开展差异化防雷改造。如选取加装可控避雷针、金属氧化物避雷器、绝缘子并联间隙、增强绝缘等,降低线路雷击事故率<sup>[15-17]</sup>。

(2) 在雷电活动密集地区,加强接地电阻测试,发现不合格接地电阻及时更换。同时应加强瓷质绝缘子劣化检测和劣化绝缘子更换工作,防止雷击断串掉线事故发生。

(3) 积极推广应用防雷新技术、新产品。如在苏北地区接地改造中使用石墨接地网,从而有效减小接地电阻值,降低后期维护费用。

(4) 持续做好重要输电线路的雷击故障分析工作。针对特高压输电线路的投运,进一步加强分布式故障定位系统应用,提升雷击故障反应速度。

## 4 结语

2012至2016年,全省雷电活动整体上处于较弱水平,雷电活动区域南北均匀,2012年是近5年雷电活动最强的一年;在不同电压等级下,杆塔的高度、回数、塔型及档距对输电线路雷击跳闸均有所影响;加强输电线路防雷运维工作,开展差异化防雷评估与改造工作,积极推广防雷新技术应用,可有效提高防雷水平。

### 参考文献:

- [1] 高 嵩,周志成,陶风波,等. 江苏电网220 kV及以上输电线路雷击跳闸分析[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(4): 17-20.  
GAO Song, ZHOU Zhicheng, TAO Fengbo, et al. Analysis of lightning fault on 220 kV and above transmission lines in Jiangsu Power Grid [J]. Jiangsu Electric Engineering, 2014, 33(4): 17-20.
- [2] 刘贞瑶,顾 林,叶 辉. 江苏电网2004~2006年架空输电线路雷击跳闸分析[J]. 江苏电机工程, 2008, 27(2): 42-45.  
LIU Zhenyao, GU Lin, YE Hui. Analysis of lightning flashover for overhead transmission lines from 2004 to 2006 in Jiangsu Power Grid [J]. Jiangsu Electric Engineering, 2008, 27(2):

42-45.

- [3] 路永玲,刘 洋,高 嵩,等. 江苏电网2005至2013年架空输电线路雷击跳闸分析及防护[J]. 电磁避雷器, 2015, 263(1): 49-53.  
LU Yonglin, LIU Yang, GAO Song, et al. Analysis of lightning trip and protection measures of overhead transmission lines in Jiangsu Power Grid from 2005 to 2013 [J]. Insulators and Surge Arresters, 2015, 263(1): 49-53.
- [4] 徐鸣一,王振会,樊 荣,等. 江苏省地闪密度及雷电流幅值分布[J]. 南京信息工程大学(自然科学版), 2010, 2(6): 557-561.  
XU Mingyi, WANG Zhenhui, FAN Rong, et al. Distribution of lightning density and lightning current amplitude in Jiangsu Province [J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 2(6): 557-561.
- [5] 陈家宏,童雪芳,谷山强,等. 雷电定位系统测量的雷电流幅值分布特征[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1983-1987.  
CHEN Jiahong, TONG Xuefang, GU Shanqiang, et al. Distribution characteristics of lightning current magnitude measured by lightning location system [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(9): 1983-1987.
- [6] 冯民学,焦 雪,韦海荣,等. 江苏省雷电分布特征分析[J]. 气象科学, 2009, 29(2): 246-251.  
FENG Mingxue, JIAO Xue, WEI Hairong, et al. An analysis of the lightning distribution features in Jiangsu Province [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2009, 29(2): 246-251.
- [7] 王 赞,邓国峰,王淑一. 地闪密度及雷电流幅值概率特征讨论[J]. 高压电器, 2015, 51(10): 199-204.  
WANG Yun, DENG Guofeng, WANG Shuyi. Discussion about ground lightning density and cumulative probability of lightning current amplitudes [J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(10): 199-204.
- [8] 姜 勇,李 鹏. 云南地区雷电流幅值初步探究[J]. 电磁避雷器, 2014, 262(6): 61-71.  
JIANG Yong, LI Peng. Discussion of distribution characteristics of lightning current amplitude measured in Yunnan [J]. Insulators and Surge Arresters, 2014, 262(6): 61-71.
- [9] 张文峰,彭向阳,豆 朋,等. 广东雷电活动规律及输电线路雷击跳闸分析[J]. 广东电力, 2014, 27(3): 102-107.  
ZHANG Wenfeng, Peng Xiangyang, DOU Peng, et al. Analysis of thunder and lightning activity routines and lightning trip-out of power transmission lines in Guangdong [J]. Guangdong Electric Power, 2014, 27(3): 102-107.
- [10] 赵昌新. 输电线路雷击跳闸原因分析及防雷措施[J]. 江苏电机工程, 2009, 28(6): 9-12.  
ZHAO Changxin. Analysis and prevention of lightning trip-out of transmission lines [J]. Jiangsu Electric Engineering, 2009, 28(6): 9-12.
- [11] 高伟锋,陈荣锋,许海林. 不同塔型对输电线路雷击特性差异影响分析[J]. 电瓷避雷器, 2013, 256(6): 77-80.  
GAO Weifeng, CHEN Rongfeng, XU Hailin. An analysis on

- the effect of different tower type on lightning performance different of transmission lines considering [J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2013, 256(6): 77-80.
- [12] 刘刚, 唐军, 孙雷雷, 等. 不同地形地貌的雷电流幅值概率分布对输电线路雷击跳闸的影响[J]. *高电压技术*, 2013, 39(1): 17-23.
- LIU Gang, TANG Jun, SUN Leilei, et al. Influence of the distribution of lightning current amplitude in different landforms on the transmission-line's tripping operation[J]. *High Voltage Engineering*, 2013, 39(1): 17-23.
- [13] 刘靖, 刘明光, 屈志坚, 等. 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 Minguang, QU Zhijian, et al. Comprehensive analysis of lightning performance of overhead power distribution line with varied ground obliquity [J]. *High Voltage Engineering*, 2011, 37(1): 848-853.
- [14] 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 Jingsong, LIAO Ruijin, et al. Distribution characteristics of the lightning current amplitude and frequency in Chongqing reservoir landform during 1999—2008[J]. *High Voltage Engineering*, 2011, 37(5): 1123-1128.
- [15] 梁志峰. 2011—2013 年国家电网公司输电线路故障跳闸统计分析[J]. *华东电力*, 2014, 42(11): 2265-2270.
- LIANG Zhifeng. Statistical analysis of transmission line fault tripping in state grid corporation of china in 2011—2013[J]. *East China Electric Power*, 2014, 42(11): 2265-2270.
- [16] 祖勇, 赵昌新, 唐忠. 江苏省输电线路雷击跳闸原因分析及防雷击措施[J]. *上海电力学院学报*, 2010, 26(5): 429-433.
- ZU Yong, ZHAO Changxin, TANG Zhong. Cause analysis of thunder outage and thunder protection measures of transmission lines[J]. *Journal of Shanghai University of Electric Power*, 2010, 26(5): 429-433.
- [17] 路永玲, 周志成, 陶风波, 等. 江苏电网 2014 年输电线路雷击跳闸分析[J]. *江苏电机工程*, 2015, 34(5): 9-11.
- LU Yonglin, ZHOU Zhicheng, TAO Fengbo, et al. Analysis on the transmission line lightning trips in the Jiangsu Power Grid in 2014 [J]. *Jiangsu Electric Engineering*, 2015, 34(5): 9-11.

#### 作者简介:



徐伟

徐伟(1987—),男,江苏南京人,助理工程师,从事电网主设备在线监测数据巡视和分析工作(E-mail:18752080744@163.com);

路永玲(1988—),女,甘肃白银人,工程师,从事设备状态监测评价、故障分析及技术监督工作(E-mail:15105182955@163.com);

唐梦颖(1988—),女,江苏南京人,助理工程师,从事电网主设备在线监测数据巡视和分析工作(E-mail:13505194199@163.com);

钟丹(1988—),男,江苏南京人,助理工程师,从事电网主设备在线监测数据巡视和分析工作(E-mail:13770943708@163.com);

胡成博(1984—),男,江西赣榆人,工程师,从事开关类设备状态评价、设备状态监测系统分析管理及专业系统设计工作(E-mail:15105168989@163.com)。

## Analysis of Lightning Activities and Transmission Line Lightning Strike Tripping in Jiangsu Power Grid in Recent Years

XU Wei, LU Yonglin, TANG Mengying, ZHONG Dan, HU Chengbo

(State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** In recent years, the transmission line tripping accidents caused by lightning activity occur frequently. The corresponding research work is carried out aiming at the transmission line lightning protection technology. Based on the analysis of the lightning activity in Jiangsu, the tripping reasons and lightning characteristics are analyzed in many aspects including the style, height, circuit number and span of tower. The statistics of tripping times of Jiangsu power grid transmission lines from 2012 to 2016 are completed. Then, in combination with the actual production of power grid, the rationalization of lightning protection measures and suggestions are proposed from the aspects of transmission line differential evaluation, operation and maintenance and new technology.

**Key words:** transmission line; lightning activity; line tripping; flash density; lightning protection strategy

(编辑 方晶)