

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.08.025

重要输电通道连续雷击评估方法研究

王 佩^{1,2}, 吴 敏^{1,2}, 赵 淳^{1,2}, 王 韬^{1,2}, 郭钧天^{1,2}, 罗 飞³, 潘佳鑫³

(1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 南京 211106; 2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074;
3. 武汉大学计算机学院, 武汉 430072)

摘要: 雷击是输电线路跳闸的主要原因。现有工作基于地闪密度等参数研究了不同线路雷击故障风险的情况。但是这些方法没有分析输电网络中多条线路汇集的小范围内连续多次雷击的情形。为此,文中提出了一种针对输电通道的连续雷击事件计量方法。首先提出递归算法从大规模输电网络中自动找出代表输电通道的输电线路汇集区,然后提出了无条件和有条件同跳事件的概念,通过统计这两种事件的数量,可以反映出连续雷击对重要输电通道的风险大小。以湖北省25条输电线路构成的输电网络及2013年雷电数据为实验,该方法得到了输电线路中的各型输电通道,并对通道内雷击同跳事件进行了统计。并对典型事例进行了深入分析,得到数据结论。该方法提供了输电网络防雷工作中新的关注对象及计量方法,为防雷害提供了依据。

关键词: 同跳; 输电通道; 地闪; 事件

Method for Calculating Continuous Lightning Strikes on Important Transmission Paths

WANG Pei^{1,2}, WU Min^{1,2}, ZHAO Chun^{1,2}, WANG Tao^{1,2}, GUO Juntian^{1,2}, LUO Fei³, PAN Jiaxin³

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China; 2. State Grid Electric Power Research Institute Wuhan NARI Technology Development Co., Ltd., Wuhan 430074, China; 3. Computer School, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Lightning is a main threat to transmission line safety. The existing works have studied the lightning risks leading to transmission line failures based on the factors like cloud-to-ground lightning density and so on. However, these methods do not consider the case that continuous lightning strikes the small area where many transmission lines converge. In this paper, a method is proposed for this situation. Firstly, a recursive algorithm is proposed to automatically identify the converging area from a large-scale transmission line network, which represents the transmission path. Then, the concept of unconditional or conditional multi-tripping event is defined. The number of each kind of events can reflect the tripping risk of the important transmission paths caused by continuous lightning. Taking the network made up of 25 transmission lines in Hubei Province and the data of lighting in 2013 for experiment, the proposed method is applied to get the transmission paths and the statistics of multi-tripping events of the transmission paths. Several typical cases are analyzed in detail for demonstration of the method. This study provides a new object and a calculating method for lightning damage prevention of power transmission grids.

Key words: multi-tripping; transmission path; cloud-to-ground lightning; events

收稿日期:2019-01-21; 修回日期:2019-03-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51777037);国家电网公司科技指南项目(524625180018)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51777037), the Science and Technology Project of SGCC (524625180018).

0 引言

雷电是雷雨云中的正负③电荷积累到电位差大于击穿空气介质需要的电场强度时产生的一种放电现象^[1]。雷电发生时在极短时间内可以产生强大的电流,强电流是雷电产生破坏作用的主要原因。高温,猛烈冲击波以及电流所带来的电磁场和电磁辐射也是非常强烈的破坏力^[2]。雷电灾害是输电网络最为主要的外力灾害形式,近年来在灾害总占比中一直保持在大约为50%^[3]。输电线路主要预防的是感应雷和直击雷。直击雷击于杆塔顶部称为反击雷;绕过避雷线击于导线的称绕击雷^[4]。绕击雷的比例较反击雷要高。目前对雷电的研究,主要集中在机理机制探索^[5-7]、输电线路的雷击预防^[8-10]、雷电时空分布特性分析^[11-13]等。已经有很多工作根据每年的地闪密度分布、雷电流强度等雷电参数,结合线路结构和地形地貌等信息,分析研究了线路雷击故障特性。这些工作逐步构建起中国较为完善的电网雷区分布图^[14]。但还存在很多不足之处,第一,以往的研究主要集中在覆盖面积较大的宏观区域上。近年来,高压、特高压线路建设不断加快,有的位置密集布置多条超、特高压线路,在极端气候条件下可能出现多回线路同时跳闸,一旦这些面积很小的关键节点上出现雷击跳闸故障,会造成大面积停电的严重影响^[15];第二,雷电活动存在复杂性,在局部强烈的雷暴过程中,也经常发生连续、多次小电流绕击导致同塔线路雷击同时跳闸的情况,例如,2010年广东唯一500 kV同塔双回线路雷击同时跳闸故障就是由连续多次雷电流绕击造成的^[16]。

综上,除了了解广域区雷电分布特征外,掌握代表输电通道的输电线路汇集区的雷电状况也是十分必要的。文中根据输电线路自身的位置走向,结合更为详细精确的雷电定位历史数据,提出了依据线路间隔距离关系自动搜索重要输电通道的算法:①特高压交直流线路通道;②由两回或两回以上重要输电线路组成,相邻线路中心距离不超过600 m的输电通道;③在飚线风、大范围冰害、台风、大面积雷暴、山火等自然灾害所波及的范围内,由两回及以上重要输电线路组成,通道故障时可能造成4级及以上电网事件的输电通道。

文中研究对象重点为聚集在狭长地带、间距小于600 m的多条输电线路区段。因为重要输电通道内输电线路的密集性,这些区域一旦遭受雷电灾害,会给整个输电线路网络造成更大的危

害。并进一步考虑重要输电通道内雷电发生的间隔时间以及雷电流强度,得到对重要输电通道更加准确的雷电活动特征。

1 方法

1.1 重要输电通道

输电网络中,每条输电线路可由杆塔和连接导线表示。每基杆塔 p 的位置可以通过其经纬度坐标来表示。线路走向通过连续依序多基杆塔构成,即对于线路 k ,可以用 $l_k=\{p_1, p_2, \dots, p_q\}$ 来表示,其中 q 是该线路包含的杆塔数。雷电破坏力的范围与雷击类型以及雷电自身电流强度有关^[17],感应雷可以在距离线路尚有一段距离的情形下,对线路造成影响;雷电流强度越大,影响的范围也越大。因此,在定义重要输电通道时,考虑线路之间的间隔距离。

定义一(重要输电通道):给定一个输电网络,其中若干条线路的一部分区段构成集合 $L=\{l_{kmn}|l_{kmn}$ 表示线号, m, n 为两基杆塔序号。 l_{kmn} 表示第 k 线的 m 基杆塔到 n 基杆塔之间的输电线段 $\}$ 。 $|L|$ 表示 L 中不同线的条数。

L 构成重要输电通道,当且仅当 L 同时满足以下两个条件:

1)对于任意 $l_{imn}, l_{jm'n'}, l_{imn}$ 每基杆塔与 $l_{jm'n'}$ 的最短距离小于两个距离参数(B 为缓冲区距离,由可能影响输电线路的雷击与其距离决定, D 为间隔距离,由输电线路受到雷击灾害后对可能受其影响的区域范围决定)之和($B+D$),同时 $l_{jm'n'}$ 每基杆塔与输电线路 l_{imn} 的最短距离也小于($B+D$);

2)对于满足条件1)的任意 L 和 L' 。当 $|L|<|L'|$ 时,均有 L 不是 L' 的真子集。该条件约束任意低一级重要输电通道都不能被高一级重要输电通道包含。

重要通道 L 的等级由 $|L|$ 决定。当 $|L|>2$ 时, L 为高级通道。当 $|L|=1$ 时, L 为低级通道。通道的等级越高,则通道内线路越密集,受到雷击灾害时可能引发的后果越严重。

重要输电通道的两线距离关系图例见图1,两条输电线路分别横向延伸($B+D$)的范围。虚线区域代表两条线路构成的重要输电通道,在通道内发生的雷电时间会对两条线路产生影响,需要进行进一步的统计分析。如深色雷云图案代表的两处雷击地点处于通道内,可以同时影响这两条线路,故两处雷击可用于之后的同跳事件分析。而浅色雷云代表的雷击地点处于通道外,对同跳事件分析无作用。

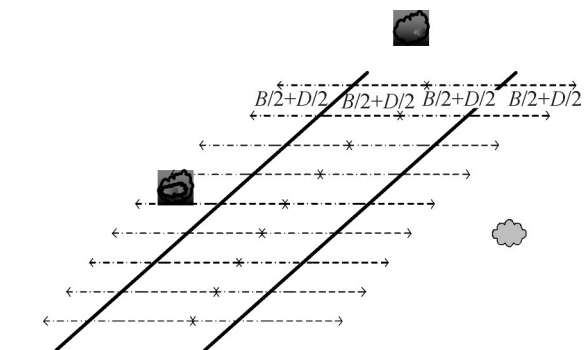


图1 重要输电通道的两线距离关系图例

Fig. 1 The distance relationship of two lines in an important transmission path

1.2 搜索算法

为了在给定的一组线路集合构成的输电网络中,找出由定义一描述的重要输电通道,需要相应的算法完成自动搜索的功能。

通过定义一,等级为 $|L|=H$ 的 L 是重要通道的充分必要条件是,从构成该通道的 H 条线路中,任意取 $H-1$ 条线出来,都构成 $H-1$ 级的重要通道。

因此,可以利用归纳方法的思想搜索:

1)最简单的情形是由两条线构成的2级通道。可以以每条线路为中心,以 $B+D$ 为宽度,创建缓冲区,与其余所有线路进行重叠检查,所有重叠区段将放入后选集合 C 中。将所有线按上述遍历完毕后,取 C 中的任意一组线段作配对检查,如果相互分布在对方的 $B+D$ 为宽度缓冲区中,则该对线段为2级通道候选集项加入集合 C_2 。该对线段还不能立即判定为2级通道,因为它们可能构成更高级别的通道,只有在生成更高一级通道的候选集时,才能确定本级通道。

2)以 C_2 作为新的线段集合,依据1)所述,在 C_2 中判断有没有3级的候选集 C_3 。对于 C_2 中不能形成3级候选集的,就一定是2级的重要通道。若能形成3级的,还要继续考察是否能形成更高级别的通道,如果不能则是3级重要通道,依此类推。直至不能生成更高级别的通道候选集,算法结束。

以图2所示3条输电线路为例,根据上述思想找出重要通道的步骤为:

1)以左边线为参照进行重叠检测,选出线段 b 、 c 加入集合 C ;

2)同理,以中间线为参照选出 a 、 c 、 d 加入集合 C ;

3)同理,以右边线为参照选出 a 、 b 、 e 加入集合 C ;

4)遍历完所有的线路后,对 C 进行唯一化处理,得 a 、 b 、 c 、 d 、 e 可构成通道所有的线段;

5)按算法可以得 (a,b) 、 (a,c) 、 (b,c) 、 (d,e) 为二级通道备选集 C_2 ;

6)考察三级通道时, (a,b) 、 (b,c) 、 (a,c) 构成 (a,b,c) 加入 C_3 ,则从 C_2 去掉 (a,b) 、 (b,c) 、 (a,c) 。二级通道确定为 (d,e) ;

7)没有四线型, (a,b,c) 为确定三级通道,算法停止。

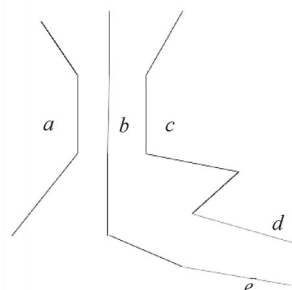


图2 算法搜索实例

Fig. 2 The searching example of algorithm

1.3 连续雷击统计

输电通道由于距离的紧邻,从空间上为雷电连续雷击提供了前提,但同时还需要对雷电发生的连续性和强度进行进一步分析。

输电线路均安装了避雷设备,因此对雷电具有一定的耐雷水平^[18],因此,在前述搜索确定重要输电通道的基础上,可以根据设备的耐雷水平,以及雷电连续发生的密集程度,来统计连续雷击事件。连续雷击事件为短时间(ΔT)内输电电路遭受多次雷击的事件^[19]。其中 ΔT 为输电线路雷击后可能受到影响并进一步产生雷击故障的时间,由输电线路耐雷水平、雷击电流强度决定^[20]。连续雷击事件更易引发线路的多次雷击绕流故障^[21]。考虑雷击的连续程度,以及输电线路耐雷水平对雷电流强度的承受能力,

文中研究两种类型的连续雷击事件。

定义二(无条件雷击同跳事件):对通道 L 一段时间(例如一年)内 t_1, t_2 时间落下的两次雷击 s_1, s_2 ,若 $|t_1 - t_2| \leq \Delta T$,则集合 $\{s_1, s_2\}$ 构成一次无条件雷击同跳事件。

定义三(有条件雷击同跳事件):对通道 L 一段时间(例如一年)内所有发生的雷击记为集合 S ,对 $s_i \in S$,记 s_i 雷击电流强度为 m_i ,发生时间为 t_i 。设超出某基杆塔承受能力的雷击电流强度区间为 M ,若 $s_j \in S$,有 $m_j \in M$ (即 s_j 电流强度超出了与其距离最近的杆塔可以承受的雷击电流强度区间),而且存在一个集合 $S' = \{s_k | s_k \in S, t_j < t_k \leq t_j + \Delta T\}$,则称由 s_j 可引起一次有条件雷击同跳事件, s_j 也称为事件引雷, S' 中地闪称为后续雷。

2 实例分析

湖北省处于中国中部地区,是中国雷电多发地

区之一。文中选取湖北省 25 条线路进行实验。线路名称, 每条线路的杆塔数以及每条线的长度见表 1。以下提及的线路编号, 均指向该表。

表 1 湖北省线路基本情况

Table 1 The summary of transmission lines in Hubei

序号	线名	杆塔数	线长/m	线路编号
1	复奉	17	6 975.779	1
2	复奉送变电	28	15 195.65	2
3	葛安一回	146	69 067.14	3
4	葛安二回	149	71 129.68	4
5	锦苏	203	101 933.10	5
6	南荆一线	219	99 946.33	6
7	峡都一回	124	56 313.22	7
8	南荆一回	139	64 640.66	8
9	盘龙一回	337	162 377.80	9
10	盘龙二回	317	158 632.40	10
11	三江一回	85	42 332.84	11
12	三江二回	73	39 228.56	12
13	三江三回	77	40 551.58	13
14	三龙一回	124	63 101.44	14
15	三龙二回	133	67 788.26	15
16	三龙三回	127	61 727.44	16
17	峡都二回	126	56 353.42	17
18	峡都三回	136	57 584.94	18
19	峡葛一回	61	27 280.39	19
20	峡葛二回	65	28 504.26	20
21	峡葛三回	80	34 436.95	21
22	峡葛四回	76	33 271.60	22
23	峡林一回	193	89 945.80	23
24	峡林二回	185	91 665.15	24
25	峡林三回	185	91 665.15	25

25 条输电线路在湖北省的走向分布见图 3。其中大部分为东西走向, 少量为南北走向。



图 3 25 条线路在湖北省的分布与走向

Fig. 3 The distribution and direction of 25 transmission lines in Hubei

2.1 湖北省通道数据

设置参数 $B=600\text{ m}$, $D=1\ 000\text{ m}$ 。根据上节提出的重要通道搜索算法, 最终在 25 条线路(即 25 个 1 级通道)上找到了 59 个高级重要通道。各级通道的统计结果见表 2。各级通道的通道数, 随着等级的增加而减小, 但是最高达到 7 级, 表明存在线路非常聚集的部分。

表 2 各级通道数量统计表

Table 2 The quantities of transmission paths at different levels

通道等级	1	2	3	4	5	6	7
通道数量	25	22	14	10	9	3	1

从 2-7 级通道中各挑选出的一个实例见图 4。图片上方数字代表通道编号。

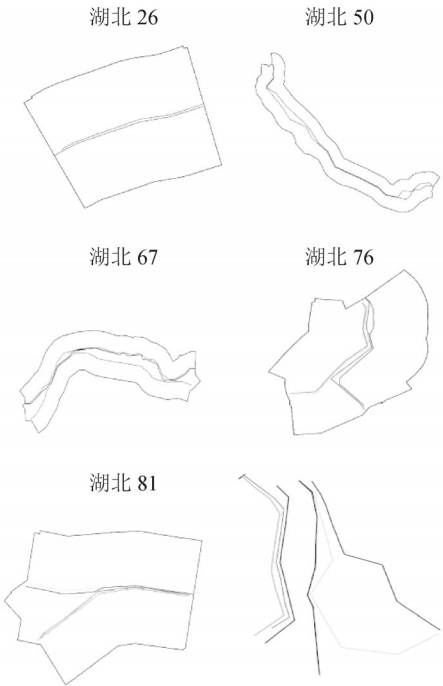


图 4 2-7 级通道实例

Fig. 4 The examples of 2-7 level's transmission paths

通过算法定位重要输电通道后, 进一步统计落在通道内的地闪信息。使用 2013 年的地闪数据, 设置参数 M 为 $\pm(20 \sim 50)\text{ kA}$ 及 $\pm(120 \sim +\infty)\text{ kA}$, $\Delta T=200\text{ ms}$, 统计可得上述 2-7 级通道实例详细信息见表 3。

2.2 整体连续雷击统计

以 2013 年湖北省全年雷电资料为原始数据, 统计 25 个 1 级通道及 59 个高级通道的全年地闪数量及地闪密度, 可得图 5、6。

表3 通道实例2013年地闪信息

Table 3 The details of 2~7 level's transmission paths

通道实例等级	通道面积/ km ²	地闪次数 (次)/密度 (次·km ⁻²)	无条件同跳 事件次数/密 度/(次·km ⁻²)	有条件同跳 事件次数/密 度/(次·km ⁻²)
2	36.35	202/5.56	232/6.38	33/0.91
3	349.83	4 754/13.59	5 268/15.06	1 186/3.39
4	234.37	3 189/13.61	4 216/17.99	960/4.09
5	49.11	699/14.23	573/11.67	194/3.95
6	51.87	1 055/20.34	1 420/27.38	262/5.05
7	42.32	651/15.38	475/11.22	156/3.69

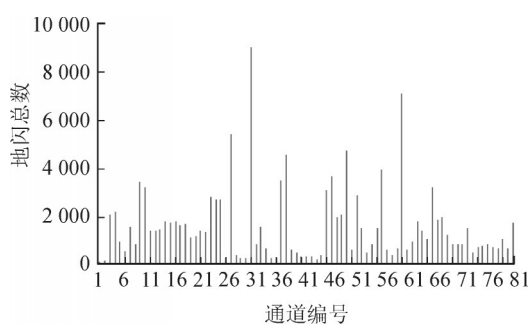


图5 2013年各通道地闪总数

Fig. 5 Lightning number of every transmission path in 2013

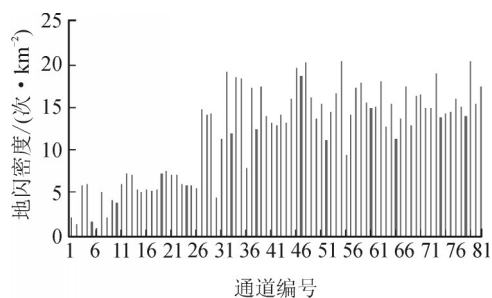


图6 2013年各通道的地闪密度

Fig. 6 Lightning occurrence frequency of every transmission path in 2013

从图5、6可以看出,若考虑通道面积,各通道地闪密度的差异远小于地闪总数的差异。

2.2.1 无条件雷击同跳事件

设置 $\Delta T=200$ ms,进一步统计各通道无条件雷击同跳次数、同跳事件密度见图7、8。

2.2.2 有条件雷击同跳事件

设置过保护雷电流强度区间 M 为 $\pm(20 \sim 50)$ kA及 $\pm(120 \sim +\infty)$ kA,和 $\Delta T=200$ ms,统计可以得各通道有条件同跳事件数分布见图9,各通道有条件同跳事件密度见图10。

通过以上统计图可以观察到:

1)通过图5、7可以发现,在全年地闪数量与无条件事件数量上,1级通道与高级通道之间没有明

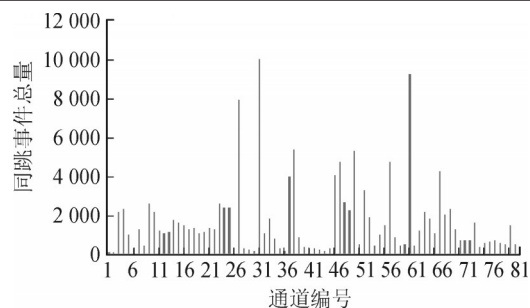


图7 2013年各通道无条件雷击同跳事件总量

Fig. 7 Unconditional multi-tripping events number of every transmission path in 2013

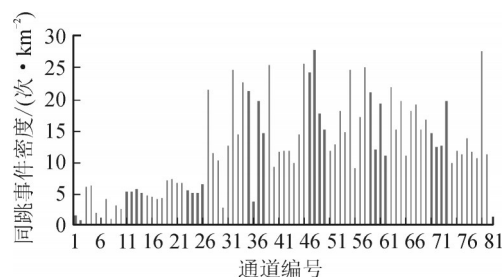


图8 2013年各通道无条件雷击同跳事件密度

Fig. 8 Unconditional multi-tripping events occurrence density of every transmission path in 2013

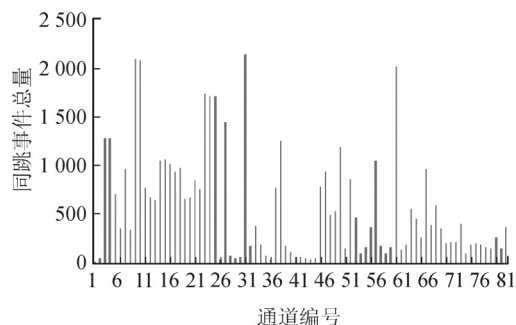


图9 2013年各通道有条件同跳事件总量

Fig. 9 Conditional multi-tripping events number of every transmission path in 2013

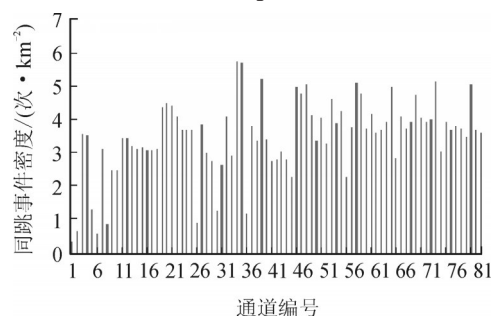


图10 2013年各通道有条件同跳事件密度

Fig. 10 Conditional multi-tripping events occurrence density of every transmission path in 2013

显差异。

2)通过图6、8可以发现,在全年地闪密度与无条件事件密度上,高级通道密度明显高于1级通道,说明在空间上,高级通道的地闪强度较高,地闪网络的风险更大。

3)图7、9可以发现,对大部分通道,无条件雷击同跳事件发生次数远高于有条件雷击同跳事件次数,有条件同跳事件发生率较低。

4)通过图10可以发现,有条件雷击同跳事件密度在1级和高级通道上没有明显差异。

2.3 有条件同跳事件杆塔分布

从图9中,可以清楚地观察各个通道有条件同跳事件的数量分布。进一步可以追踪到对某一具体通道,通道中哪一基杆塔会遭受更多的雷击。以通道3为例,通道3是1级通道,只有一条线路,有条件雷击事件在所有杆塔上的分布见图11。

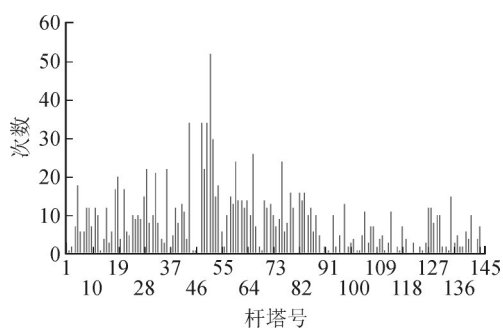


图11 通道3有条件同跳事件各杆塔次数分布

Fig. 11 Conditional multi-tripping events' number distribution over poles for path 3

从图11中可以得出,3号通道中51号杆塔有最高频率的同跳事件引雷位置,共计52次同跳事件。统计52次同跳事件中,引雷引发的后续雷击的杆塔分布位置,可以得到这52个同跳事件引起的后续雷击在各杆塔上的分布,见图12。

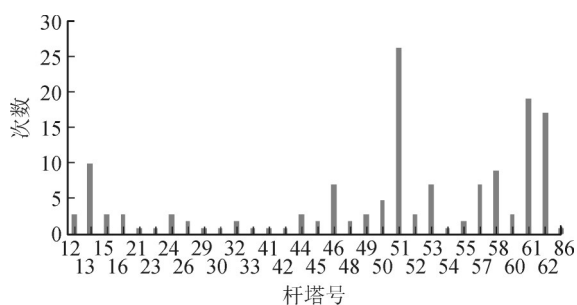


图12 51号杆塔引雷的后续地闪在通道3上各杆塔的分布

Fig. 12 Pole 51's following lightning number distribution over poles for path 3

从图15可以看出,后续雷击大部分仍然在51号杆塔附近。此例中,后续雷击多发生在引跳闸雷附近。经过统计,大部分有条件同跳事件,引雷和后续雷距离间隔较近。

但也存在例外,如对1级通道9,分析每一个杆塔地闪分布见图13。

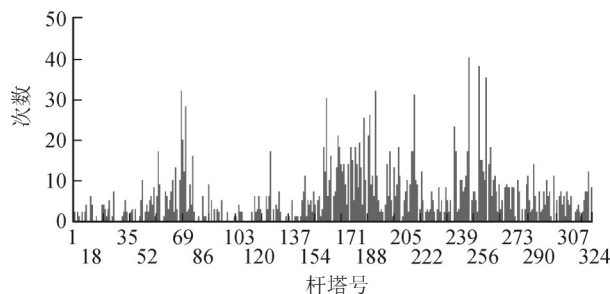


图13 通道9有条件同跳事件引雷在各杆塔分布

Fig. 13 Conditional multi-tripping events' lightning number distribution over poles for path 9

从图13可以发现,253号杆塔参与的有条件同跳事件最多,为40次,进一步考察后续雷击杆塔的分布,见图14。

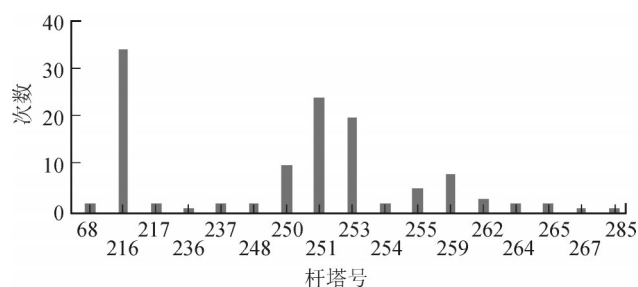


图14 253号杆塔的后续地闪在通道9各杆塔的数量分布图

Fig. 14 Pole 253's following lightning number distribution over poles for path 9

从图14可以看出,253号杆塔引起的后续雷击发生在216号杆塔的数量最多。该例较为特殊,反映有条件同跳事件可以发生在两个距离较远的杆塔间,例如253号及216号杆塔,两者相距144 km,对此将进一步确认。如有较多此类情形,将十分有价值。

同样,在高级通道中,也可以依据同样的方法分析有条件同跳事件。如选择2级通道46,得到通道内各杆塔有条件同跳事件分布情况见图15。

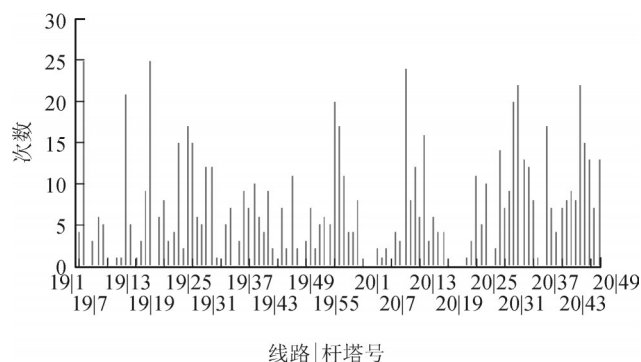


图15 二级通道46有条件同跳事件各杆塔雷击次数统计

Fig. 15 Conditional multi-tripping events' lightning number distribution over poles for 2-level path 46

从图15可以看出,46号通道是由19号线和20号线构成,其中19号线的3号杆和17号杆有最多雷击,均为25次。分析19号线3号杆、17号杆的后续

雷击分布,见图16、17,其中横轴代表线路杆塔号。

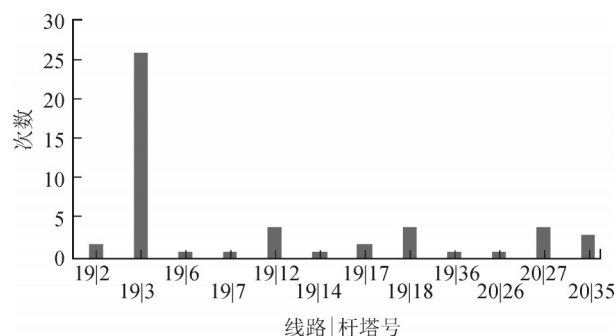


图16 19号线3号杆的后续地闪在通道46各杆塔的数量分布图

Fig. 16 Line 19 pole 3's following lightning number distribution over poles for path 46

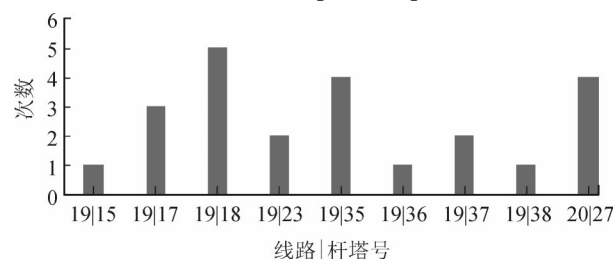


图17 19号线17号杆的后续地闪在通道46各杆塔的数量分布图

Fig. 17 Line 19 pole 17's following lightning number distribution over poles for path 46

由图16可以看出,19号线3号杆后续雷击大部分仍分布在3号杆附近。由图17可以看出,19号线17号杆后续雷击大部分分布在19号线18号杆附近。此例中,大部分后续雷击分布在引跳闸雷附近。

3 结论

1)针对输电网络中多条线路汇集的情形,文中提出了重要输电通道的概念,以重要输电通道表示线路密集区域,并给出结合输电线路耐雷水平,线路当地雷击电流强度等参数,基于线路之间距离的重要输电通道递归搜索算法。

2)针对输电通道内连续多次雷击的情形,考虑雷击的连续程度,以及输电线路耐雷水平对雷电流强度的承受能力,文中提出了无条件雷击同跳事件和有条件雷击同跳事件的概念。

3)通过定位有条件雷击同跳事件的发生杆塔及后续雷击杆塔,可以进一步得到各通道有条件同跳事件中,引雷与后续雷击的位置关系。

参考文献:

[1] 杨银华,李家川. 雷电形成原理及雷电灾害防御措施[J]. 农业灾害研究,2014,4(12):47-49.

YANG Yinhua, LI Jiachuan. Lightning forming principle and defense measures of lightning disaster[J]. Agricultural Disaster Research, 2014, 4(12): 47-49.

[2] 孙秀斌. 五通道闪电定位系统[C]//中国气象学会雷电委员会成立大会暨学术报告会论文集. [S. l.]:中国气象学会雷电委员会、深圳市气象局,2011:1.

SUN Xiubin. Five channel's lightning location system[C]//The Symposium of China Meteorological Society's lightning Committee. [S. l.]: China Meteorological Society lightning Committee, Shenzhen Meteorological Bureau, 2011:1.

[3] 胡毅,刘凯,吴田,等. 输电线路运行安全影响因素分析及防治措施[J]. 高电压技术,2014,40(11):3491-3499.

HU Yi, LIU Kai, WU Tian, et al. Analysis of influential factors on operation safety of transmission line and countermeasures[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11):3491-3499.

[4] 杜林,陈寰,陈少卿,等. 架空输电线路雷电绕击与反击的识别[J]. 高电压技术,2014,40(9):2885-2893.

DU Lin, CHEN Huan, CHEN Shaoqing, et al. Identification method of shielding failure and back striking for overhead transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9):2885-2893.

[5] 刘俊. 雷电灾害的类型及其致灾机理浅析[J]. 安全, 2011, 32(5):5-8.

LIU Jun. Analysis of the types of lightning disasters and the mechanism of disaster forming[J]. Safety, 2011, 32(5):5-8.

[6] SILVA C L, PASKO V P. Physical mechanism of initial breakdown pulses and narrow bipolar events in lightning discharges[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(10):4989-5009.

[7] DWYER J R, UMAN M A. The physics of lightning[J]. Physics Reports-Review Section of Physics Letters, 2014, 534(4): 147-241.

[8] 曾嵘,周旋,王泽众,等. 国际防雷研究进展及前沿述评[J]. 高电压技术,2015,41(1):1-13.

ZENG Rong, ZHOU Xuan, WANG Zezhong, et al. Review of research advances and fronts on international lightning and protection[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1):1-13.

[9] 袁立新. 雷电的生成、运行和避雷[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版),2011,32(4):132-136.

YUAN Lixin. Lightning generation, operation and protection[J]. Jilin Normal University Journal(Natural Science Edition), 2011, 32(4): 132-136.

[10] YOKOYAMA S. Lightning protection of wind turbine blades[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 94(s):3-9.

[11] 李家启,申双和. 采用闪电定位系统的丘陵山区雷电特征分析[J]. 高电压技术,2011,37(9):2218-2224.

LI Jiaqi, SHEN Shuanghe. Characteristics analysis on lightning in hilly and mountainous areas using lightning location system[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9): 2218-2224.

[12] RASMUSSEN K L, ZULUAGA M D, HOUZE R A. Severe

- convection and lightning in subtropical South America[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(20): 7359-7366.
- [13] 李国梁, 朱传林, 李俊, 等. 武汉至广州高速铁路湖北段沿线雷电活动分析[J]. 暴雨灾害, 2013, 32(4): 374-378.
LI Guoliang, ZHU Chuanlin, LI Jun, et al. Analysis of lightning activity along the Wuhan-Guangzhou high-speed rail line in the section of Hubei province[J]. Torrential Rain and Disasters, 2013, 32(4): 374-378.
- [14] 林建, 曲晓波. 中国雷电事件的时空分布特征[J]. 气象, 2008, 34(11): 22-30.
LIN Jian, QU Xiaobo. Spatial and temporal characteristics of thunderstorm in China[J]. Meteorological Monthly, 2008, 34(11): 22-30.
- [15] 张思寒. 同塔多回输电线路雷击同时跳闸特征研究[J]. 电瓷避雷器, 2015(4): 65-69.
ZHANG Sihan. Research on the simultaneous lightning tripping character of multi-circuit transmission line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(4): 65-69.
- [16] 彭向阳, 詹清华, 周华敏. 广东电网同塔多回路雷击跳闸影响因素及故障分析[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 81-87.
PENG Xiangyang, ZHAN Qinghua, ZHOU Huamin. Influencing factors of lightning outage in multi-circuit transmission lines on same tower in Guangdong power grid and fault analysis[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 81-87.
- [17] 陈勇伟, 王琦, 王汉堃, 等. 玉门风电机组雷电致灾机理与接地探讨[J]. 陕西电力, 2014, 42(9): 88-92.
CHEN Yongwei, WANG Qi, WANG Hankun, et al. Probe into lightning stroke mechanism and grounding way of wind turbines in Yumen[J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(9): 88-92.
- [18] 张廷瑞. 浅析架空输电线路防雷措施[J]. 机电信息, 2013(12): 20-21.
ZHANG Tingrui. Analysis of lightning protection measures for overhead transmission lines[J]. Mechanical and Electrical Information, 2013(12): 20-21.
- [19] 李阳林, 徐宁, 李帆, 等. 特高压直流输电线路雷击故障原因分析与防范[J]. 中国电力, 2017(1): 1-7.
LI Yanglin, XU Ning, LI Fan, et al. Analysis and prevention of the lightning fault of UHV DC transmission lines[J]. Electric Power, 2017(1): 1-7.
- [20] 陈家宏, 赵淳, 谷山强, 等. 我国电网雷电监测与防护技术现状及发展趋势[J]. 高电压技术, 2016, 42(11): 3361-3375.
CHEN Jiahong, ZHAO Chun, GU Shanqiang, et al. Present status and development trend of lightning detection and protection technology of power grid in China[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11): 3361-3375.
- [21] 郝建成, 张军阳, 田勇. 线路遭受连续雷击造成断路器事故分析[J]. 高压电器, 2010, 46(10): 105-108.
HAO Jiancheng, ZHANG Junyang, TIAN Yong. Faults analysis of circuit-breaker caused by continuous lightning strike on lines[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(10): 105-108.
- 王佩(1986—), 女, 工学硕士, 工程师, 研究方向为雷电参数统计分析。

(上接第 177 页)

- transmission line[J]. Proc. National Convention Rec., 2004, 7(7): 138.
- [16] PODPORKIN G V, PILSHIKOV V E, SIVAEV A D. Development of long flashover arresters with multi-electrode system for lightning over-voltage and conductor-burn protection of 6 to 35 kV overhead lines[C]//In Proc. 28th Int. Conf. Lightning Protection. [S. l.]: [s. n.], 2006: 980-984.
- [17] 王巨丰, 闫仁宝, 李世民, 等. 灭弧防雷装置对电弧发展抑制的研究[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1614-1618.
WANG Jufeng, YAN Renbao, LI Shimin, et al. Research on suppressing arc development by air-blast arc-quenching device[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1614-1618.
- [18] 王巨丰, 李国栋, 蒲亭洁, 等. 爆轰气流作用下的电弧熄灭特性[J]. 高电压技术, 2016, 42(3): 893-899.
WANG Jufeng, LI Guodong, PU Tingjie, et al. Arc extinguishing characteristics under action of explosion airflow[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3): 893-899.
- [19] 王巨丰, 梁雪, 郭伟, 等. 基于 Navier-Stokes 方程的新型喷射气流灭弧防雷间隙有效性论证[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 28-34.
WANG Jufeng, LIANG Xue, GUO Wei, et al. Effectiveness verification of novel air-blast arc-quenching device based on Navier-Stokes equations[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 28-34.
- [20] WANG J F, FENG W X, WANG Y L. Research on the influence of the arc extinguishing time of arc extinguishing lightning protection gap (AELPG) for lightning trip-out rate [C]//2012 Second International Conference on Digital Intelligent System Design and Engineering Application (ISDEA). Sanya, Hainan, China: IEEE, 2012: 1475-1479.
- [21] 过增元, 赵文华. 电弧和热等离子体[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 51-57.
GUO Zengyuan, ZHAO Wenhua. The arc and thermal plasma[M]. Beijing: Science Press, 1986: 51-57.
- [22] 刘其良, 邵攀屹. 冲击电弧自截断机理及对建弧率影响[J]. 电气开关, 2016(3): 77-79.
LIU Qiliang, SHAO Panyi. Mechanism on shock arc self-truncation and impact on arc-establishing rate[J]. Electric Switcher, 2016(3): 77-79.
- 王巨丰(1956—), 男, 博士, 二级教授, 博导, 研究方向为现代防雷技术。
- 丰德(1991—), 男, 硕士, 研究方向为高电压与绝缘技术(通信作者)。
- 王学彬(1988—), 男, 硕士, 研究方向为高电压与绝缘技术。