

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.09.004

配网线路防雷措施分析与研究

薛 蓉¹, 付 慧², 马 勇³, 陈 光³

(1. 国网江苏省电力公司南京供电公司, 南京 210000; 2. 国网江苏省电力公司, 南京 210000;
3. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 南京 211103)

摘要: 绝缘导线较好地解决了裸导线所解决不了的走廊和安全问题。雷击断线和绝缘子击穿是造成配网线路故障的重要原因之一。对某地配网雷击跳闸情况数据进行了统计,分别从雷电性质、环境影响、导线位置等因素进行分析,得出了配网雷击故障的分布规律。从疏导型和堵塞型两方面介绍了配网防雷措施,通过模拟试验研究了 4 类防雷措施的效果,并分析了各类措施的技术差异,最后提出配网防雷措施建议,以提高设备运行可靠性。

关键词: 配网; 防雷措施; 过电压保护器; 模拟试验

Analysis on Current Lightning Protection Methods for Distribution Networks

XUE Rong¹, FU Hui², MA Yong³, CHEN Guang³

(1. State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210000, China ;
2. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210000, China;
3. State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: The data of lightning trips of a certain distribution network are analyzed in terms of the factors, such as the nature of lightning, the influence of environment and the position of conductor, to obtain the distribution of lightning failures. Current lightning protection methods for distribution networks are introduced according to two aspects of dredging and blocking. Simulation tests are conducted to understand the effectiveness of four kinds of lightning protection methods, and their technical differences are analyzed. In addition, some suggestions on lightning protection of distribution network are offered to improve the operational reliability of the equipment.

Key words: distribution network; lightning protection; overvoltage protector; simulation test

0 引言

架空绝缘导线较好的解决了裸导线所解决不了的走廊和安全问题,与电缆相比,投资省、建设快,优点十分明显^[1-4]。但是架空绝缘线路发生雷击断线和绝缘子击穿事故时有发生,是威胁配电线路安全运行的主要原因之一^[4-8]。架空导线应用时应提前考虑并制定合适的防雷措施,提高电网运行安全可靠。

1 雷击跳闸故障概况

某年 6 月至 8 月,某地配电网线路(10、20 kV)

共发生雷击跳闸 844 次,主要为 10 kV 线路,共 836 次,占 99.05%,其余为 20 kV 线路。情况见表 1、图 1。

表 1 6-8 月某地配电网线路雷击故障分布

Table 1 Lightning fault distribution in a distribution network from June to August					次
地区总计	6 月	7 月	8 月	合计	
10 kV	203	314	319	836	
20 kV	1	3	4	8	
总计	204	317	323	844	

2 雷击跳闸统计分析

2.1 线路保护动作情况统计分析

6-8 月 844 次配电网线路雷击跳闸数据中,重

收稿日期:2017-03-20; 修回日期:2017-05-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51407026)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51407026).

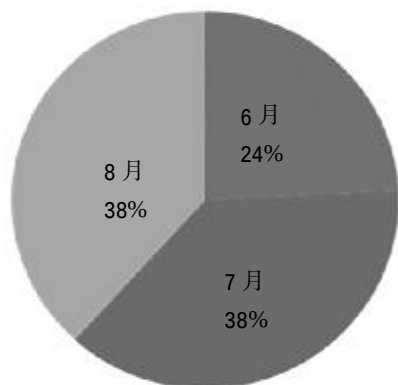


图 1 6-8 月配电网线路雷击跳闸统计分布图

Fig. 1 Statistical distribution diagram of lightning trip out of distribution network from June to August

合闸成功的 603 次,重合不成功的 78 次,接地的 37 次,线路重合闸成功率 71.45%。具体情况见表 2、图 2。

表 2 线路重合闸情况统计

Table 2 Circuit reclosing statistics					次
月份及合计	接地	无重合闸	重合不成	重合成功	
6 月	10	1	25	168	
7 月	32	1	57	227	
8 月	37	0	78	208	
合计	79	2	160	603	

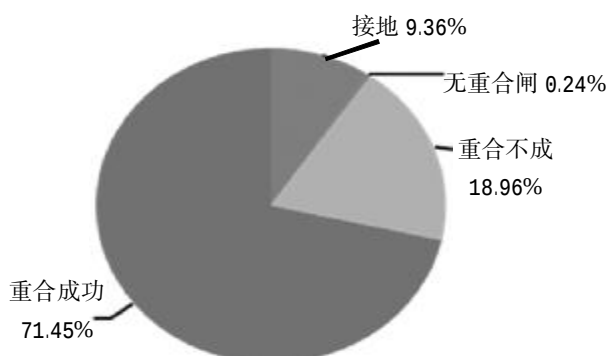


图 2 线路重合闸情况统计分布图

Fig. 2 Statistical distribution diagram of line reclosing

2.2 雷击设备统计分析

配电网雷击故障中,受雷击设备主要是裸导线、绝缘导线、绝缘子、避雷器等,具体各类设备统计见表 3、图 3。

表 3 受雷击设备统计

Table 3 Lightning equipment statistics						
设备	裸导线	绝缘导线	绝缘子	避雷器	杆上开关	柱上变
雷击次数	474	175	31	27	24	19
设备	令克	配电变压器	杆塔	环网柜	其他设备	设备不明
雷击次数	10	2	1	1	12	68

2.3 雷击断线统计分析

配电网线路雷击故障中,雷击断线带来的影响

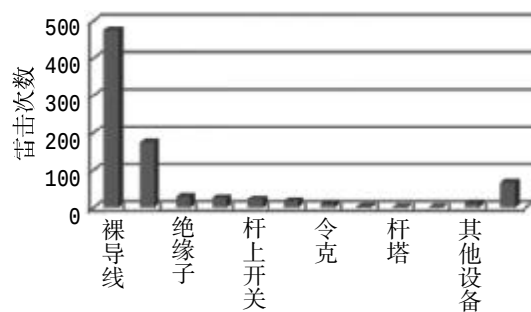


图 3 受雷击设备统计图

Fig. 3 Lightning stroke equipment statistical drawing

最为严重。6-8 月配电网线路雷击故障中,发生断线的共 185 起,占 21.92%。配电线路断线中,绝缘导线雷击断线占 76.76%。雷击断线主要与雷电性质、周围环境、地形地貌等有关,以下针对雷击断线的数据进行统计分析。

2.3.1 雷电性质

架空线路上产生雷电过电压有两种,一种是雷直击线路引起的直击雷过电压,另一种是雷击线路附近由于电磁感应所引起的感应雷过电压。

6-8 月发生的 185 起配电网雷击断线中,直击雷引起的 106 起,感应雷引起的 79 起,感应雷占 43%,雷电性质统计见图 4。

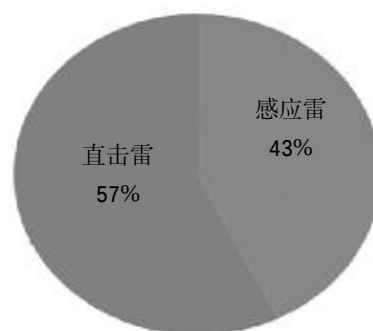


图 4 雷电性质统计

Fig. 4 Lightning property statistics

配电线路绝缘水平低,即便装设避雷线也会反击,防止直击雷的作用不大。造成绝缘线路雷击断线的主要原因是雷电闪络后工频续流烧断导线引起的,因此配电线路主要是防止感应雷过电压。

2.3.2 周围环境因素影响分体

对 6-8 月发生的 185 起配电网雷击断线点地域和周围环境进行统计,断线点发生在农村的最多,有 148 起,占 80%,其他发生在城镇和市区,各类统计结果见表 4、图 5;雷击断线点多发生在周围空旷的地方,周围环境统计结果见表 5、图 6。

从统计结果可知:

1)市区、城镇由于楼房等高层建筑物的屏蔽作用,发生雷击断线概率较低;

表 4 雷击断线地域分布统计

Table 4 Statistics of regional distribution of lightning breaking

地域	城镇	农村	市区
雷击次数	31	148	6

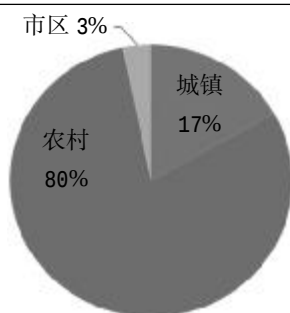


图 5 雷击断线地域分布图

Fig. 5 Geographical distribution map of lightning broken line

表 5 雷击断线点周围环境统计

Table 5 Environmental statistics of lightning broken point

周围环境	空旷	周围建筑物较多	树林较多	其他
雷击次数	154	10	15	6

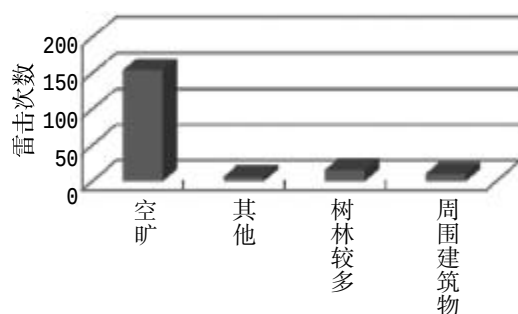


图 6 雷击短线点周围环境统计图

Fig. 6 Statistical diagram of environment around lightning short point

2)农村等空旷地区地势平坦,相对而言更易引雷,发生断线的概率较高。

2.3.3 导线分布位置影响

架空配电线路的导线排列方式一般采用三角排列、垂直排列和水平排列,3 种类型见图 7 和表 6。图 7(a)中上方为三角排列,下方为水平排列,图 7(b)中左右为垂直排列,图 7(c)中左右为三角排列。

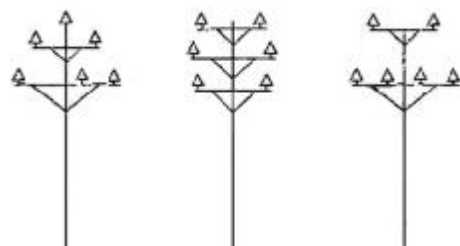
从统计结果可知:

雷击断线统计中,三角形排列方式的最多,占 57.07%,与 10 kV 线路中,采用三角形排列的比例较大有关。

3 配电网架空导线雷击断线防护措施

3.1 架空导线雷击断线防护措施简介

根据雷击断线机理,导致架空绝缘线路断线的



(a)排列方式 1 (b)排列方式 2 (c)排列方式 3

图 7 架空导线排列方式

Fig. 7 Overhead conductor arrangement

表 6 雷击断线中各类导线排列方式统计

Table 6 Statistics of arrangement of various conductors in lightning breaking

排列方式	垂直	三角形	水平
雷击次数	16	105	64

根本因素是雷击闪络后的工频续流电弧,因此,防护绝缘线路雷击断线的具体方法归纳如下。

3.1.1 疏导式方法

疏导式方法的思路是允许架空绝缘线路有一定的雷击闪络概率,但要设法把雷击闪络后产生的工频续流电弧进行疏导,达到保护导线免于电弧烧伤断线的目的。这种方法主要包括防弧金具、放电箝位绝缘子等。通常情况下,疏导式方法实施简单,成本较低,不能降低线路的雷击跳闸次数,但能提高重合闸成功概率^[6-9]。

3.1.2 堵塞式方法

堵塞式方法的思路是通过采取措施尽可能降低线路雷击闪络概率,或者采取措施阻止雷击闪络后工频续流起弧,达到防止绝缘导线烧伤断线的目的。这种方法主要包括加强线路绝缘、避雷线、氧化锌避雷器等。通常情况下,堵塞式方法可以降低线路雷击跳闸率、阻止线路产生工频续流电弧,防雷击断线的综合效果更好,缺点为实施相对复杂,成本较高^[10-12]。

根据国家电网企业标准《配电网架空绝缘线路雷击断线防护导则》,各种方式的范围如下:

1)靠近变电站的出线线路段,宜选择堵塞式方法阻止线路跳闸,推荐选用穿刺电极串联间隙金属氧化物避雷器防护产品;

2)敷设在雷电活动比较强烈的地区或者向重要负荷供电的线路段,宜选择堵塞式方法降低雷击跳闸率、提高供电可靠性,推荐选用穿刺电极串联间隙金属氧化物避雷器防护产品;

3)其他线路段,考虑经济成本因素,可采用疏导式方法,推荐选用穿刺型防弧金具和剥线型放电箝位绝缘子防护产品。

3.2 防护措施试验分析

选取环形电极外间隙避雷器、带穿刺线夹的外

间隙避雷器、外间隙避雷器、单柱外间隙避雷器 4 个典型的过电压保护器,开展实验室模拟,研究过电压保护器在动作时是否能按照设计的放电路径泄放冲击电流,试验原理示意图见 8。

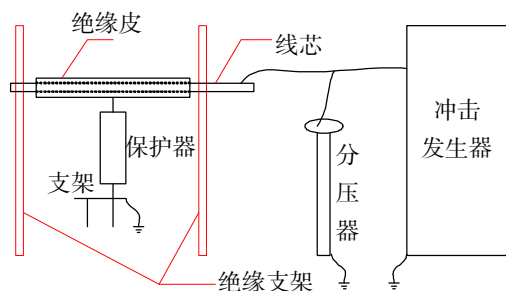


图 8 过电压保护器模拟试验示意图

Fig. 8 Sketch map of analog test of overvoltage protector

分别对 4 类过电压保护器开展了 10 次模拟试验,试验中 4 类过电压保护器理想放电路径见图 9。

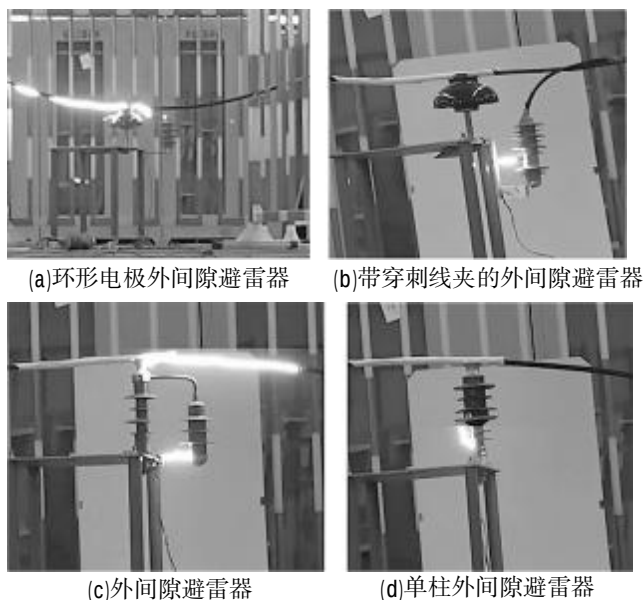


图 9 过电压保护器理想放电路径

Fig. 9 Ideal discharge path of overvoltage protector

试验结果如下：

1)除环形电极外间隙避雷器外,其他 3 类过电压保护器各次试验均按照设计的理想放电路径释放冲击电流,效果较好。

2)10 次模拟试验中,环形电极外间隙避雷器仅有 1 次击中了环形电极(从加压端的对侧),其他 9 次发现击穿位置较多位于避雷器上端的螺钉上。

通过现场查看过电压保护器的击穿痕迹,结合装置结构特点,对结果分析如下：

1)环形电极外间隙避雷器,理论上击穿位置应该较为随机地分布于环形电极上,由于环形电极较为独立,对安装布局要求较高,当对称均匀分布时,才能起到理想放电效果,螺钉则诱导放电路径改变。

2)其他 3 类过电压保护器放电电极与设备合为一个整体,电极空间位置相对固定,不受外部其他因素影响,实际放电路径基本与设计一致。

4 架空绝缘导线雷击断线防护措施技术比较

架空绝缘导线雷击断线防护措施多样,各种方法各具优缺点,如下所述。

4.1 防弧金具

优点:①加装防弧金具,施工方便快捷,地形条件允许时可进行带电作业;②加装防弧金具改造费用相对较低,可应用于老旧线路改造。

缺点:①安装工艺:防弧金具的结构决定了其安装工艺要求很高,部分防弧金具无力矩螺丝,完全依赖安装人员的手感,无法精准安装;部分防弧金具尽管具备力矩螺丝以控制握着力和穿刺度,但是故障断线后拆解该种金具,发现大多力矩螺丝螺帽均未拧断,安装工艺不到位。穿刺线夹型防弧金具难以做到不伤及导线的前提下实现完全穿刺。此外,安装的放电间隙距离不易控制,会影响防雷效果。②电气原因:穿刺线夹型防弧金具在系统发生单相接地故障时,工频电弧在防弧金具上燃烧,能有效保护导线免于烧伤;当发生两相短路、两相接地短路等故障时,尽管接续的工频电弧在防弧金具上燃烧,但短路电流值大,易导致绝缘导线熔断。③不能降低雷击跳闸率。

某地区 3 年内近百起绝缘导线雷击断线故障中,接近 40%均安装有防弧金具。防弧金具未能完全起到抑制雷击断线的作用。

4.2 屏蔽线

优点:架空屏蔽线施工相对较为简单,经济性较好,不破坏导线的密封性与绝缘性能,有较好的防雷效果,能有效降低线路雷电感应过电压,减少雷击跳闸率和断线率。

缺点:若雷电流幅值较大,距离架空绝缘导线较近时,屏蔽线的防雷效果有限;针对老旧线路雷击断线防护改造工程,在杆塔上方加装屏蔽线施工难度较大,需要全线停电,对供电可靠性造成影响,同时会增加杆塔高度,容易引来更过的雷;若屏蔽线安装于杆塔的下方,施工较为方便,但防雷效果相对较差;容易对线路形成反击。

4.3 氧化锌避雷器

优点:①加装氧化锌避雷器,施工方便快捷,地形条件允许可进行带电作业;②防雷效果好,能有效降低雷击跳闸率。

缺点:①氧化锌避雷器保护范围较小(50 m 左

右),理论上应每级杆塔上均要安装避雷器,才能起到全线保护,安装密度高,投资成本增大;②避雷器电阻片长期承担系统运行电压,存在老化损坏的问题,因此需要定期进行维护检测;③当避雷器发生损坏时,会造成线路短路故障;④当线路遭受直击雷时,雷电流大多超过 20 kA,对避雷器的通流能力要求高。

4.4 过电压保护器

优点:①安装方便,不需更换绝缘子,也不需更改原有线路设计;②不需破开导线绝缘层,无需解决导线密封防水问题,不会影响导线机械拉伸性能和使用寿命;③串联间隙承担了绝大部分工作电压,氧化锌阀片不承受工频电压,避雷器本体电阻片不存在长期荷载老化问题,全寿命期间可免维护,使用寿命长。

缺点:①线路过电压保护器要求间隙圆环与绝缘子为同心圆状态,往往很难达到,对安装工艺要求较高;②过电压保护器自身的稳定性较差,长期运行过程中,受自然环境影响,间隙圆环易发生偏斜,对防雷效果产生影响;③过电压保护器保护范围有限,故需要加大安装的密度。

4.5 防雷支柱绝缘子

优点:安装方便,基本不需要维护;支柱绝缘子和防弧金具合二为一,不受环网供电负荷侧(背离电源侧)影响,使线路简洁美观并降低了造价;新型复合型材料,绝缘性能好,抗污秽强。

缺点:防雷支柱绝缘子其原理结构与防弧金具一致,同样具有防弧金具所具有的缺点;因为这种防雷方式,必须使雷击闪络通道放电值小于绝缘子本身的绝缘水平,即降低了线路的整体绝缘水平,在相同感应电压作用下,线路的雷击短线故障率降低,但雷击跳闸率增加^[12-13]。

4.6 带外串联间隙金属氧化物避雷器(限流消弧角)

优点:避雷器本体高压电极表面呈弧形,两端沿导线垂直方向延长,可以保证在自然力使导线摆动的情况下,闪络路径依然发生在裸导线与避雷器本体的高压电极之间,增强避雷器的防雷效果;雷电放电时,即使避雷器本体损坏,依然可以有效保护导线免于烧伤断线;降低了线路跳闸率。

缺点:带外串联间隙金属氧化物避雷器使用量较少,使用时间较短,还没有成熟的运行经验,仍需要进一步观察应用效果;保护范围有限,故需要加大安装的密度;价格较高^[14]。

4.7 复合柱式氧化锌防雷绝缘子

优点:正常运行时,防雷绝缘子内部电阻片不承

受系统电压,提高了可靠性,减少了维护成本;与普通放电间隙相比,将空气间隙内置到防雷绝缘子内部通过间隙组放电,保证了放电电压的稳定性;安装方便,针对绝缘导线不需要剥皮或采用穿刺线夹,不会损坏导线绝缘层^[15]。

缺点:使用量较少,使用时间较短,还没有成熟的运行经验,仍需要进一步观察应用效果。

4.8 绝缘塔头

优点:绝缘塔头实现形式简单,免维护,尤其对于有高大构筑物遮蔽的城市架空绝缘线路,以遭受雷电感应过电压侵害为主,采用绝缘塔头的效果较为明显。若在电杆生产过程中将绝缘支柱与电杆整合为一体,或者电杆顶端预设绝缘塔头固定接口,可大大简化现场安装程序。

缺点:绝缘塔头机械性能、经济性较差,使用量较少。

5 结论

相对裸导线而言,配电网采用绝缘导线避免了大量线路短路故障的发生,雷击断线是绝缘导线特有的、新的问题,应引起足够重视并采取相应措施。通过对某地区架空绝缘导线雷击断线故障的统计与分析,并综合考虑现有雷击断线防护措施的技术性与经济性,形成以下结论和建议:

1)架空绝缘导线绝缘性能好、耐腐蚀性能强、运行过程中受树木等外在因素的影响小,其使用大大减少了配电线路的维修工作量,并显著提高了供电可靠性。

2)雷击断线是架空绝缘导线的特有问题的,安装雷击断线防护措施尽管前期投入较多,但总体降低了线路故障率、提高了供电可靠性、减少了抢修成本,经济效益与社会效益突出。

3)架空绝缘导线雷击断线防护措施多样,各种措施各具优缺点。针对疏导式方法,如防弧金具、防雷支柱绝缘子等,实施简单、成本相对较低,但不能降低线路的雷击跳闸次数,且安装工艺要求较高;针对堵塞式方法,如氧化锌避雷器、过电压保护器、限流消弧角等,实施相对复杂,成本较高,但可以降低线路雷击跳闸率。

4)从技术上来看,各类架空绝缘导线雷击断线防护措施各有优劣;从经济上来看,防雷屏蔽线安装在线路下方时费用相对较低,维护相对简单。

5)因绝缘导线数量各地不一致,地闪落雷密度各地区也存在差异,且各地架空绝缘导线雷击断线防护措施不尽相同,各种防护措施技术性各有优劣,

建议集中开展各类防护措施技术、经济性比较,寻求适合当地架空绝缘导线雷击断线防护措施。

参考文献:

- [1] 路永玲. 10~20 kV 架空配电线路跳闸故障及其防治对策分析[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(1): 84-86.
LU Yongling. Analysis of trip faults and protection measures on 10 kV and 20 kV overhead distribution lines[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(1): 84-86.
- [2] 韩晋平, 王晓丰, 马心良, 等. 10 kV 架空绝缘导线雷击过电压与防雷综合措施研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(11): 2395-2399.
HAN Jinping, WANG Xiaofeng, MA Xinliang, et al. Research on comprehensive protections of 10 kV overhead insulated distribution lines from lightning[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(11): 2395-2399.
- [3] 黄清社, 徐 奔, 彭利强, 等. 10 kV 架空绝缘导线防雷保护的措施研究[J]. 高压电器, 2010, 46(12): 32-40.
HUANG Qingshe, XU Ben, PENG Liqiang, et al. Research on lightning protection of 10 kV overhead insulated distribution lines[J]. High Voltage Apparatu, 2010, 46(12): 32-40.
- [4] 吴元华. 配网雷击事故分析及防雷改进措施[J]. 高电压技术, 2004, 30(12): 63-64.
WU Yuanhua. Analysis and protection measurement for lightning strike on 10 kV distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(12): 63-64.
- [5] 胡建川, 刘渝根, 冷 迪, 等. 南川地区 10 kV 配网线路防雷分析[J]. 高压电器, 2013, 49(3): 53-58.
HU Jianchuan, LIU Yugen, LENG Di, et al. Lightning protection analysis of the 10 kV transmission line in Nanchuan region based on lightning parameters[J]. High Voltage Apparatu, 2013, 49(3): 53-58.
- [6] 陆干文, 李炳雄. 配网架空绝缘导线防雷技术研究[J]. 电气自动化, 2013, 35(3): 78-79.
LU Ganwen, LI Bingxiong. Research on lightning protection technology of insulated overhead conductor in power distribution network[J]. Electrical Automation, 2013, 35(3): 78-79.
- [7] 葛军凯. 架空绝缘配电线路综合防雷措施的应用[J]. 华东电力, 2005, 33(12): 79-81.
GE Junkai. Application of comprehensive safety against lightning to insulated overhead distribution lines[J]. Electrical Automation, 2013, 35(3): 78-79.
- [8] 张 鑫, 邓 鹏, 徐 鹏, 等. 10 kV 架空绝缘导线雷击断线原因机理分析及防护措施[J]. 电瓷避雷器, 2012(1): 65-68.
ZHANG Xin, DENG Peng, XU Peng, et al. Mechanism analysis and protective measures on the lightning break reason of 10 kV overhead insulation conductor[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(1): 65-68.
- [9] 陈茂荣, 卢泽军, 方孖计, 等. 广东东莞 10 kV 架空线路防雷治理技术研究[J]. 电瓷避雷器, 2013(3): 86-90.
CHEN Maorong, LU Zejun, FANG Ziji, et al. Research on the technology of 10 kV overhead line lightning protection treatment in Dongguan Guangdong[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(3): 86-90.
- [10] 刘毅彬, 邓鹤鸣, 叶 征, 等. 东莞地区 10 kV 配网断线事故分析及应对措施[J]. 电瓷避雷器, 2012(3): 91-94.
LIU Yibin, DENG Heming, YE Zheng, et al. Disconnection fault analysis on 10 kV distribution lines in dongguan and its countermeasures[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(3): 91-94.
- [11] 陈 洁, 姜建勋. 10 kV 配电线路雷害事故分析及防雷措施仿真研究[J]. 电瓷避雷器, 2011(4): 73-76.
CHEN Jie, JIANG Jianxun. Analysis of lightning-strike fault of 10 kV distribution lines and simulation study on lightning protection measures[J]. Insulators and Surge Arresters, 2011(4): 73-76.
- [12] 姜 舟, 何金良. 采用避雷器防止绝缘导线配电线路的断线事故分析[J]. 电瓷避雷器, 2001(5): 32-35.
JIANG Zhou, HE Jinliang. Application of surge arrester against outage of distribution lines due to breakages of insulating conductors[J]. Insulators and Surge Arresters, 2001(5): 32-35.
- [13] 宋先勇. 农村配网 10 kV 架空绝缘线路雷击断线原因分析及防护措施[J]. 湖北科技学院学报, 2012, 32(12): 18-19.
SONG Xianyong. Application of surge arrester against outage of distribution lines due to breakages of insulating conductors[J]. Journal of Hubei University of Science, 2012, 32(12): 18-19.
- [14] 郑 宇, 白雪松, 马鑫晟. 架空绝缘导线在网改工程中出现的問題及对策[J]. 华北电力技术, 2013(6): 50-51.
ZHEN Yu, BAI Xuesong, MA Xinsheng. Problems from overhead insulated conductor and countermeasure in power grid improvement project[J]. North China Electric Power, 2013(6): 50-51.
- [15] 屠荣平, 刘永丰. 10 kV 架空绝缘导线雷击原因及防雷措施[J]. 中国电机(技术版), 2013(6): 50-51.
TU Rongping, LIU Yongfeng. 10 kV air bracket insulated lead lightning strike reason and lightning protection measure[J]. China Electric Power (Technology Edition), 2013(6): 50-51.

薛 蓉(1987—), 女, 工程师, 从事输配电一次设计、电力专业培训管理工作。

付 慧(1979—), 女, 高级工程师, 从事配网一次设备运检管理工作。

马 勇(1986—), 男, 高级工程师, 从事输变电启动调试、过电压及四小器专业研究管理工作。

陈 光(1986—), 男, 工程师, 从事配网一次设备检测、评价、监督研究及管理工作。