

# 10 kV 架空绝缘导线防雷击断线措施研究

朱世东, 黄飞龙

( 国网成都供电公司, 四川 成都 615000)

**摘 要:** 架空绝缘导线在配电网中应用广泛且已成为主流。但在其实际运行中, 雷击绝缘导线后断线概率较高, 因此, 探究行之有效的绝缘线防雷措施对促进配电网的健康发展具有非常重要的意义。通过对所在单位 2010—2013 年 10 kV 配电网线路雷击跳闸次数进行统计分析, 印证了采用绝缘子改造、变电站改用中性点经消弧线圈接地运行方式以及在绝缘导线上加装防雷金具三种方式对架空绝缘导线防雷的有效性, 所提措施具有有效的推广实用价值。

**关键词:** 绝缘导线; 耐雷水平; 建弧率; 灼烧路径; 防雷措施

**Abstract:** Overhead insulated conductors are widely applied in the distribution network and has become the mainstream. But in the actual operation, the breakage of insulated conductors caused by lightning stroke has a higher probability. Therefore, to explore the effective protection measures against lightning for insulated wires has a very important significance for promoting the healthy development of the distribution network. A statistical analysis is carried out for the times of lightning trip-out of 10 kV distribution network from 2010 to 2013. The effectiveness of three ways are confirmed for the lightning protection, that is, transforming the insulators, using neutral ground via arc extinguishing coil in substation and mounting lightning fittings in insulating conductors. The proposed protection measures against lightning for overhead insulated conductors have the effective practical value.

**Key words:** insulated conductor; lightning withstanding level; arc over rate; burning path; protection measures against lightning

中图分类号: TM863 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)06-0020-04

## 0 引 言

10 kV 架空绝缘导线与裸导线相比, 因绝缘性能提升, 线路相间安全距离缩短, 可通过增加同杆架设线路回路的方式有效提高线路走廊利用率。同时, 绝缘导线还可有效缓解城市绿化中的线树矛盾, 减少环境污秽对导线的直接影响, 降低线路接地故障率和运维人员工作量。与电缆相比, 又具有投资省、建设快的经济优势, 因此在配电网建设中广泛使用架空绝缘导线已成为主要发展方向<sup>[1]</sup>。但在实际运行中, 绝缘导线遭受雷击的可能性不比裸导线少, 且雷击绝缘导线后断线概率较高, 故障查找和恢复困难, 不利于供电可靠性的提升。同时, 绝缘导线断线后不一定会引起保护动作, 在此情况下掉落的导线极易造成人身触电伤害和公众财产损失。因此, 探究行之有效的绝缘线防雷措施对促进配电网的健康发展具有非常重要的意义。

## 1 绝缘导线雷击断线原因分析

当雷击导线或线路附近时, 直击雷或感应雷过电压作用于导线, 若该电压超过线路的耐雷水平, 将导致线路绝缘发生冲击闪络<sup>[2]</sup>。雷电过电压的持续时间很短, 通常情况下只有几十微秒, 此时若闪络电弧熄灭, 则线路绝缘恢复, 不会造成严重影响。但闪络发生后, 弧道内因有游离电子的存在, 通常情况下容易在工频电压作用下于闪络通道内持续流过短路电流, 即形成工频短路电弧, 该电弧的弧根温度达到数千摄氏度。对于裸导线, 电弧在电磁力的作用下, 弧根沿导线表面不断滑移, 在严重灼伤导线或绝缘子前, 断路器动作, 电弧被切断。而对于绝缘线, 因受周围绝缘的阻凝, 电弧只能在闪络位置处(对于绝缘导线该位置呈针孔状)持续燃烧, 能量集中于一点。铝材在高温下强度低、塑性差、易产生裂纹, 因此导线在自身拉力和电弧电磁力的多重作用

下将在极短的时间内发生断线。

## 2 绝缘导线防雷击断线措施分析

根据上述架空绝缘导线线路雷击断线机理分析可以看出,防雷击断线措施可考虑以下三方面:一是提升线路本身的耐雷水平,防止线路绝缘子等发生冲击闪络;二是降低冲击闪络发生后的建弧率,遏制工频短路电弧的产生;三是改变电弧的灼烧路径,使其至少不集中于一点灼烧导线。

### 2.1 提升线路耐雷水平

当雷电过电压超过线路绝缘子 50% 放电电压时,绝缘子将发生闪络。而架空导线上的雷电过电压与线路高度、雷击点与线路的距离、雷电参数、杆塔型式、高度和接地电阻等有关。提升线路耐雷水平,一是可采取增加绝缘子片数、更换绝缘子型号(如将瓷绝缘子更换为硅橡胶复合绝缘子等)、改善绝缘子性能等方式提升绝缘子 50% 放电电压,并可通过将裸导线更换成为绝缘导线、在导线与绝缘子之间增加绝缘皮、将铁横担更换为绝缘横担等方式增加线路的绝缘水平;二是可以通过架设避雷线、加装避雷器、降低杆塔高度、改善杆塔接地电阻等方式降低导线上的雷电过电压,避免绝缘子发生闪络。

架设避雷线和加装避雷器均是希望借助避雷线和避雷器的对雷电流的分流作用,降低杆塔与导线之间的电位差,确保其小于绝缘子 50% 放电电压而保护绝缘子不发生闪络。避雷线对导线有屏蔽和耦合作用,可以有效降低导线的感应过电压<sup>[3]</sup>。但因 10 kV 线路本身绝缘水平设计较低,架设避雷线后线路感应过电压仍易导致绝缘子闪络,防护效果没有高电压等级的线路防护效果好,因此除在直击雷频繁的区域可选择架设避雷线外,一般原则上不采用。

相对来讲,安装避雷器是比较好的防雷措施。线路避雷器并联在绝缘子附近,当线路上的过电压超过避雷器的放电电压时,避雷器先行放电,加在绝缘子上的电压始终被限制在避雷器的残压范围,可有效防止绝缘子发生闪络,雷电流过后避雷器还能限制工频短路电弧的产生,因此其具有优越的保护性能。但避雷器的保护范围仅为装设避雷器的当基杆塔,全线使用建设成本较高,且避雷器本体长期工作在运行电压下,加上雷击时的过电压冲击,容易发

生老化并且不易被察觉,运行维护难度较高。为弥补上述不足,出现了带外间隙的氧化锌避雷器,亦称线路过电压保护器(如图 1 所示)。

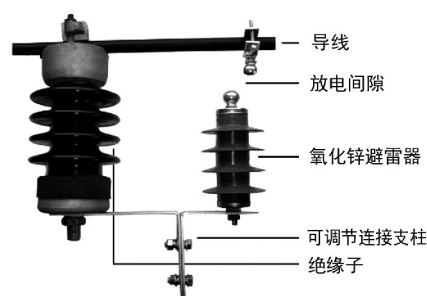


图 1 线路过电压保护器示意图

避雷器只有在一定幅值的雷电过电压作用下串联间隙击穿后才处于工作状态,正常运行时不承受工频电压,且因并联了放电间隙,其绝缘外套的爬电距离可以有所减小,即可减少避雷器的阀片数量,降低造价。因串联间隙的隔离作用,即使避雷器电阻片劣化,也不至于影响线路的正常运行,工作可靠性较高。但在实际应用中,因避雷器需要接地良好,敷设接地体不仅增加额外成本而且在很多场合难于实现,限制了线路过电压保护器的应用范围。

此外,适当考虑降低杆塔高度亦是降低雷电过电压的有效方式。根据规程 DL/T 620 - 1997<sup>[4]</sup>,在距架空线路 > 65 m 处,雷云对地放电时,线路上产生的感应过电压最大值可按下列式计算。

$$U_i \approx 25 \frac{I h_c}{s}$$

式中,  $U_i$  为雷击大地时感应过电压最大值, kV;  $I$  为雷电流幅值, kA;  $h_c$  导线平均高度, m;  $s$  为雷击点与线路的距离, m。

可见,导线的感应过电压与杆塔高度密切相关,有学者研究表明,在同等条件下,12 m 的杆塔雷击跳闸率较 15 m 的杆塔相比可以下降 11%<sup>[5]</sup>。

### 2.2 降低绝缘子闪络后的建弧率

线路绝缘发生冲击闪络后形成的工频短路电弧是导致架空绝缘导线雷击断线的根本原因。工频短路电弧的产生与系统运行方式和闪络路径密切相关。

工频短路电弧的建立很大程度上依赖于系统电容电流的大小。当线路绝缘子在雷击闪络后,若系统的电容电流大于绝缘子的自然熄弧值,则会形成持续的工频短路电弧。工频短路电弧的持续燃烧不仅会造成绝缘导线断线,还因其对周围空气存在电

离作用,降低空气间隙的绝缘强度,容易使故障发展为相间短路和多回线短路,造成线路跳闸。因此在配电网中采用中性点经消弧线圈接地运行方式,对电网电容电流进行实时检测和调整补偿,使补偿后的电容电流小于绝缘子的自然熄弧值,将是控制配电网雷击绝缘子闪络后建弧率的良好方式<sup>[6]</sup>。

另一方面,通过增长闪络后的电弧放弧路径也是降低工频短路电弧建弧率的有效措施。俄罗斯国家电力公司就提出可以在横担上安装一 U 形绝缘棒。在 U 形绝缘棒头部将绝缘剥开,使 U 形绝缘棒头部与导线之间空气间隙的冲击放电电压比绝缘子 50% 放电电压低,当线路上出现雷电过电压时,此间隙先于绝缘子击穿闪络,闪络路径由此段间隙与绝缘棒构成,当闪络路径长度增至足够长时,就可阻止工频续流建弧。但此种方式存在间隙选择即绝缘配合难度大且不利于同杆多回线路的架设,因此应用范围有限。

### 2.3 改变电弧的灼烧路径

绝缘导线断线的原因主要是短路电弧只能集中于一点持续灼烧,因此如果能够改变电弧的灼烧路径,则绝缘导线的断线概率将大大降低。基于此,出现了用于改变电弧路径的放电线夹,亦称防弧(雷)金具,其安装示意图如图 2 所示。

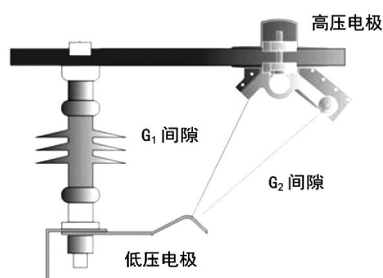


图 2 防雷金具安装示意图

其工作原理为高压电极与低压电极构成  $G_1$ 、 $G_2$  两个间隙,其中  $G_1$  为雷电放电间隙, $G_2$  为工频电弧燃烧间隙。在雷电冲击过电压的作用下, $G_1$  间隙首先放电,冲击放电后形成的工频短路电弧在电磁力的作用下由  $G_1$  迅速移动至  $G_2$  间隙上燃烧,从而保护了绝缘导线免于断线<sup>[7]</sup>。从放电线夹的工作原理可以看出,其只能防止绝缘导线断线而对于降低雷击跳闸率,作用不明显。放电线夹还分为穿刺型和裸露型,穿刺型线夹因安装时无须剥离绝缘导线绝缘层,避免了可能引起的绝缘导线线芯进水,防止

了导线弧垂处电化学腐蚀断线事故,因此实用价值比裸露型要高。基于相同的工作原理,日本东京电力公司开发了放电钳位绝缘子(防雷绝缘子),芬兰研发了闪络保护悬垂线夹。其工作原理均为在绝缘导线固定处剥离绝缘层,并加装特殊设计的金属线夹。当雷电过电压闪络引发工频短路电弧后,电弧在金属线夹两极之间燃烧直至线路跳闸,保护了导体免受损伤<sup>[1]</sup>。

## 3 实际应用情况分析

本单位自 2009 年以来开始对所辖配电网进行大规模的绝缘化改造,之后的新建配电网工程基本全部采用架空绝缘线与电缆混合架设方式。随着配电网架空绝缘线路及电缆的增多,架空绝缘导线雷击断线的矛盾日益突出。为确保线路的安全稳定运行及防止因雷击断线导致的伤害事故,本单位根据现有技术条件,采取了一系列措施,对配电网线路进行了防雷整治。

一是公司在对 10 kV 配电网线路进行绝缘化改造的同时,除将架空裸导线更换为绝缘导线外,还将原瓷横担绝缘子更换为复合绝缘子,增加了绝缘子的爬电距离,提升了线路的耐雷水平。二是对 110 kV 桂湖变电站等进行了消弧线圈改造,将原有的 10 kV 中性点不接地系统改为经消弧线圈接地,实现了对大电容电流的补偿,降低了闪络后的建弧率。三是在重要道路跨越处两侧,分段开关、配电变压器电源侧及电缆引下线处加装了避雷器,同时在绝缘导线每基杆塔进行了防雷金具安装。实际运行情况表明,上述措施有效降低了配电网雷击故障跳闸率及断线概率。

表 1 为某单位近 4 年 10 kV 配电网线路雷击跳闸次数统计值。

表 1 新都 10 kV 配电网线路雷击跳闸次数统计表

年份	2010	2011	2012	2013
配电网线路条数	131	142	171	177
总雷电数*	2 928	4 879	739	2 580
雷击跳闸次数	74	92	18	31
断线次数	9	11	0	6

\* 数据采自“四川电网雷电智能监测系统”

从表 1 中可以看出,2013 年新都地区总雷电数

与 2010 年基本相当,但雷击跳闸次数和断线次数在  
线路总条数增加 35% 的情况下分别下降了 58.1%  
和 33.3%。

在 2013 年发生的断线事故中,未安装防雷金具  
的占两起,断线处防雷金具安装质量不合格的占三  
起。从统计数据可以看出,防雷金具作为防止绝缘  
导线雷击断线的最后一道屏障,应用效果还是比较  
明显的。绝缘导线安装了防雷金具后仍然发生雷击  
断线事故,主要还是因为防雷金具的安装工艺不满  
足要求引起。在防雷金具安装质量不合格的三起断  
线事故中,一起是因为防雷金具安装在了绝缘子的  
电源侧,而另两起存在防雷金具安装时穿刺线夹未  
完全刺透绝缘层,高压电极与导线接触不充分以及  
防雷金具高低压电极之间的间隙距离过大等问题。

回到防雷金具的工作原理可以看出,其安装过  
程中需要注意的技术关键点至少包括以下 3 点:一  
是高低压电极之间的距离即  $G_1$  间隙要与绝缘子的  
闪络电压良好配合,既要保证其先于绝缘子放电又  
不能在正常过电压作用下发生闪络,厂家附带的产  
品说明书中会根据绝缘子型号对该间隙给出推荐数  
值,一般为 125 ~ 180 mm。二是  $G_1$ 、 $G_2$  间隙的排列  
方向应为电源侧到负荷侧的方向(即防雷金具应安  
装于线路绝缘子的负荷侧),因为电弧在电动力作  
用下,是由电源侧向负荷侧移动,若安装方向相反,  
电弧在电动力作用下依然会集中灼烧导线。三是对于  
穿刺型防雷金具,安装时一定要对称拧紧压力螺  
母(对有备紧螺母的还应拧紧备紧螺母以防止压力  
螺母松动),使穿刺线夹刺透绝缘层后与高压导线  
形成良好接触,达到足够的导流截面,才能对电弧起  
到良好的疏导作用。

## 4 结 论

综上所述,从实际运行角度出发,10 kV 架空绝

缘导线防雷击断线措施:一是进行绝缘子改造,选用  
具有高放电电压的绝缘子,提升线路本身耐雷水平,  
降低线路遭受雷击后的绝缘子闪络概率;二是在电  
缆线路较多,系统电容电流较大的变电站改用中性  
点经消弧线圈接地运行方式,降低绝缘子闪络后的  
工频短路电弧建弧率;三是除在特殊重点部位进行  
避雷器安装外,在绝缘导线其余杆塔上应逐基加装  
防雷金具,并且在安装过程中严格执行工艺要求,确  
保防雷金具发挥应有作用。

## 参考文献

- [1] 章伟. 10 kV 架空配电线路防雷措施研究与应用[D].  
上海:上海交通大学,2012.
- [2] 邵学俭,周浩. 10 kV 架空绝缘导线防雷击技术研究  
[J]. 浙江电力,2006(4):22-25.
- [3] 陈俊,施中郎. 10 kV 架空绝缘导线防雷措施[J]. 电力  
设备,2007,8(8):51-55.
- [4] 中华人民共和国电力工业部. 交流电气装置绝缘的过  
电压保护和绝缘配合[S]. 北京:中国电力出版社,  
1997.
- [5] 10 kV 架空配电线路防雷水平分析及提高方法的研究  
[D]. 成都:西南交通大学,2009.
- [6] 陈维江,孙昭英,周小波,等. 防止 10 kV 架空绝缘导线  
雷击断线用穿刺型防弧金具的研制[J]. 电网技术,  
2005,29(20):82-84.
- [7] 李景禄. 配电网自动跟踪补偿消弧装置[J]. 高压电  
器,1999,35(5):42-44.

作者简介:

朱世东(1965),国网四川省电力公司成都市新都供电  
分公司总经理,研究方向为配网运维管理及故障诊断;

黄飞龙(1986),国网四川省电力公司成都市新都供电  
分公司安全专责,研究方向为配网防雷技术及运维管理。

(收稿日期:2014-04-08)

# 促节能减排和低碳发展 改善环境保护生态