

输电线路雷电防护措施研究综述^①

王巨丰^{②*} 毕洁廷^{③*}

(* 广西大学电气工程学院 南宁 530004)

(** 广西输电网防雷技术中心 南宁 530004)

摘 要 本文对现有的输电线路防雷措施依据其工作原理,整合原有的分类方法,进行重新分类,把已有的防雷措施分为阻塞型、疏导型、工频电弧诱导灭弧型、雷电弧诱导灭弧型 4 大类,综合评估了每个防雷措施的工作原理、特点、防雷效果及存在的不足。通过对 4 类防雷措施的对比分析,明确指出“雷电弧诱导灭弧”型防雷措施是未来需要大力发展的有效措施之一。通过本文综述,为每一种输电线路雷电防护措施在工程实践中的应用和研发提供前瞻性的指导性依据,避免走弯路。

关键词 灭弧;阻塞型;疏导型;工频电弧诱导;雷电弧诱导

0 引言

尽管现在的高压输电线路具有较为完善的防雷体系,国内外对输电线路的防雷措施也开展了非常广泛的研究,但是从总体来讲,在复杂性、大强度雷击面前,雷电灾害依然处于高发状态。已有的每一种防雷措施在取得一定防雷效果的同时,均存在明显的防雷漏洞,片面强调某一种措施的防雷效果是造成目前雷害多发的原因之一。

目前学术界把雷电防护措施主要分为“阻塞型”和“疏导型”两类^[1,2],本文针对国内外高压输电线路的各种防雷措施开展综合性分类研究,创新性发展了防雷措施分类方法,目的是探讨高压输电线路雷害防护新的发展方向,为防雷措施的应用性研发提供依据。

1 阻塞型防雷措施

1.1 安装避雷线

架设避雷线目的是通过拦截雷电,减少导致输

电线路直接遭受雷击的可能性,在实际运行中,收到了较好的防雷效果,因此架设避雷线也成为主要的防雷措施之一。在中国,35 kV 以上输电线路均要求架设避雷线。但是由于输电线与雷电先导之间存在着库伦力作用,使得在很多情况下输电线对雷电先导的吸引力远大于避雷线,从而大大降低了避雷线的拦截效率^[3]。另外,高压输电线路无法突破地形、地貌以及大峡谷档距中央(如图 1 所示)等不可控外力的影响,在实际运行中,经常存在着大概率反击和大概率绕击现象,并且随着电压等级的提高,绕

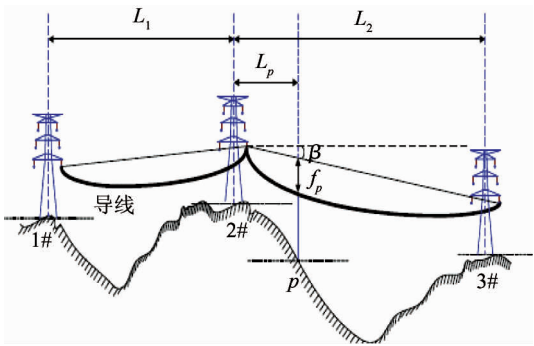


图 1 大峡谷地区输电线路布置示意图

① 广西创新驱动发展专项(2018AA03001Y)资助项目。
② 男,1956 年生,博士,教授;研究方向:现代防雷技术。
③ 通信作者,E-mail: bijieting@163.com
(收稿日期:2018-12-10)

击概率逐渐增大^[4] (如图 2 所示)。避雷线存在着严重的雷电拦截技术瓶颈,形成巨大的雷电拦截漏洞,大峡谷的绕击强度、绕击概率远高于平原地区,极易造成输电线路档距中央闪络或绝缘子闪络。绕击是高压输电线路雷击跳闸的主要原因之一^[4-6],但从总体讲,避雷线作为防雷的第一道屏障,已经并将继续发挥着重要的作用。

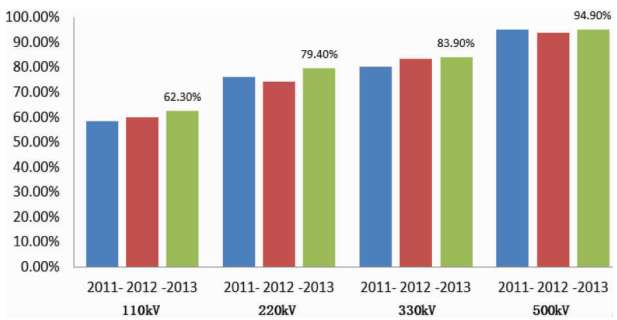


图 2 不同电压等级的绕击概率统计

1.2 增加绝缘子串长度,采用绝缘杆塔和绝缘横担

通过增加绝缘子串长度、采用绝缘杆塔和绝缘横担来提高输电线路的绝缘水平,进而加强线路的耐雷电水平。根据输电工程运行实践,这在一定程度上,提高了耐雷电冲击闪络强度,降低了建弧率。我国就曾增加过输电线路绝缘子串的片数,如把 110 kV 输电线路绝缘子串从原来的 7 片增加到现在的 8 片,把 500 kV 输电线路绝缘子串从原来的 25 片增加到 27、28 片左右。这有利于减少污闪,在客观上也起到增强线路防雷性能的作用^[7,8]。但是,绝缘子对地电容、绝缘子对导线电容,这两个电容形成一个电容链,在工频下,这个电容链的影响可忽略不计;如果雷电来袭,会形成一个很大且不均匀的分布电容,接着影响到冲击电流的分布,进而影响到绝缘子上的压降,最终产生饱和特性。绝缘强度并不随着绝缘子片数的增加而无限增大。

1.3 埋设电缆

通过埋设地下电缆进行输电来降低电缆被雷电直接击中的风险,另外电缆屏蔽层的防护作用进一步降低电缆被雷电直接击中的概率,但是由于地下电缆散热不良,其输送容量远低于同电压等级架空线路,另外雷电流仍然能够通过击中电缆周围导体

产生感应过电压,威胁电缆芯的安全。同时地下电缆造价高,经济性差,其检修和后期维护的工作量远高于同电压等级的架空输电线路,因此目前电缆输电多数用于距离较短的低压配网线路^[9]。

2 纯疏导型防雷措施

2.1 降低杆塔接地电阻

杆塔的反击耐雷水平如式(1)所示,改造地网是为了降低杆塔冲击接地电阻 R ,从而提高反击耐雷水平。但实际上,地网电阻如式(2)所示,冲击接地电阻 R 主要受土壤电阻率 ρ 的影响,而土壤电阻率主要与周围的地质条件和气候环境相关,利用局部换土和使用降阻剂等措施降低电阻率难度极大,因此所有通过降低土壤电阻率的方法进而实现降低杆塔接地电阻的目标,其结果都是难度大、代价高,达标率低;另一方面,冲击接地电阻受雷电冲击电流波形影响也大,其阻值降低存在饱和现象,因此改造地网效果并不明显^[10]。

反击耐雷水平公式为

$$I_1 = \frac{U_{50\%}}{[\beta(R_{ch} + \frac{L_{gl}}{2.6}) + \frac{h_d}{2.6}](1 - k)} \tag{1}$$

地网电阻公式为

$$R \approx \frac{0.5\rho}{\sqrt{S}} \tag{2}$$

2.2 加装耦合地线

加装耦合地线,主要是耦合、分流雷电流以降低雷击过电压,如式(1)所示,通过提高耦合地线的耦合系数 k 来提高输电线路的耐雷水平。虽然在一定程度上能提高耐雷水平和有限地降低雷击跳闸率^[11],但是它不能像避雷线那样直接拦截直击雷,只能作为有限的补救措施,用在一些雷击事故频发的路段上。

2.3 避雷线水平侧针技术

避雷线水平侧针技术是通过在避雷线上安装水平短针以增强避雷线对弱雷的吸引能力,增加避雷线的保护范围^[12] (如图 3 所示),来达到降低输电线路绕击率的一种防雷措施。

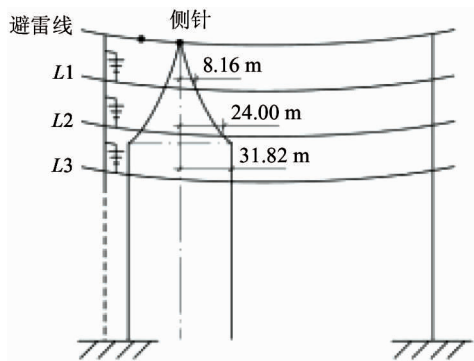


图3 水平侧针保护范围示意图

目前国内已有一定数量的避雷线上安装了水平侧针,这在一定程度上增加了避雷线的引雷效率,同时也增加了输电线路的雷击闪络率,总体效果并不明显,这也是水平侧针没有成为主要的防雷措施之一的根本原因。

2.4 安装并联保护间隙

安装并联间隙的目的是限制绝缘子串两端电位差,提高耐雷水平,输电线路在遭受雷击时,超过动作电压,间隙被击穿,雷电流被疏导入地(如图4所示)。



图4 并联间隙现场图片

但是多数情况下,会引发工频电弧的持续燃烧(如图5所示),造成雷击跳闸事故。因此,安装并联间隙虽起到一定避雷的作用,但存在着明显的缺陷^[13],主要缺陷如下:

- (1)引发极高的跳闸率事故率。
- (2)上下电极触头遭受工频电弧持续烧蚀后,和绝缘子串配合迅速失效,产生拒动(如图6所示)。

(3)频繁短路后,会严重损坏变压器绕组,进而威胁整个输电系统安全。

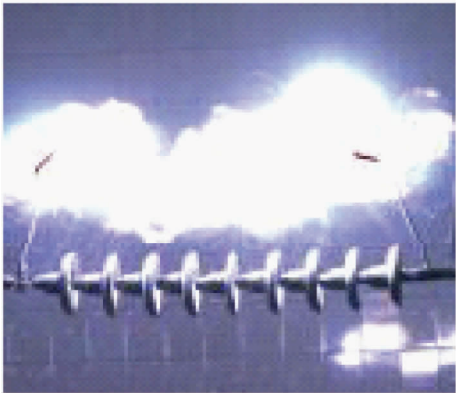


图5 并联间隙工频电弧的持续燃烧



图6 间隙电极被烧灼后缩短3~4 cm

3 工频电弧诱导灭弧型防雷措施

根据以上所述,由于并联间隙缺少灭弧功能,输电线路在遭受强雷击时,极易导致雷害事故的发生,因此为了更有效地防雷,必须增加灭弧功能。工频电弧诱导灭弧型防雷方法的工作原理是,当输电线路遭受强雷击时,防雷装置疏导雷电能量入地,然后在工频电弧持续期间熄灭电弧。目前的传统避雷器主要采用这种工作原理,即在疏导环节之后增加了灭弧环节。

3.1 管式灭弧避雷器

管式避雷器实质上是具有灭弧功能的保护间隙,主要由装在消弧管内的内火花间隙和串接在管外的外火花间隙等基本元件组成,管式灭弧避雷器在雷电压的作用下,内外间隙均被击穿,紧接着工频续流电弧产生高温,触发管道内产气材料产生气体,当管内气压足够高时,形成灭弧气流,气体从环形电

极的开口处猛烈喷出,发展为灭弧气流,形成对弧柱的强烈纵吹,实现在工频续流 3 个周波内的某一过零点处熄灭工频电弧。

这种灭弧方式的管式避雷器在使用过程中存在以下缺点:

(1)消弧管内的产气材料的灵敏度和耐腐蚀性无法保证。

(2)经济性差^[14],维护麻烦,运行不可靠,故障率高,容易形成炸管事故,从而使管式避雷器本身成为事故源。

(3)工频电弧重燃率高,易造成雷击跳闸事故。

虽然管式避雷器在开始运行阶段有极强的灭弧能力,因为以上的问题无法得到克服,所以管式避雷器的应用逐渐减少,但在全球范围内依然存在市场销售^[15]。

3.2 磁吹避雷器

磁吹避雷器是利用磁场对电弧的电动力,迫使电弧加速运动、旋转、拉长,从而完成灭弧。但是该装置在运行实践中也存在很多问题,首先在灭弧过程中,高温电弧电流集中在阀片表面,容易导致阀片破损。其次电弧在高温下持续燃烧,汽化形成高压水蒸气,容易导致爆炸事故发生。再次,密封工艺水平难以达到要求,很难满足标准规定的要求,导致其在工程实践运行中经常出现受潮、劣化等现象^[16],形成无法预测的故障隐患。

3.3 螺旋式多间隙避雷器

中国某大学高压团队近期研制了一种新型多间隙螺旋式避雷器(CN201610382210),如图 7 所示。该装置含有较高的金属占比,金属球相互连接在每个间隙之间,由于周围没有裙边相互阻挡,金属球之间的距离比较近。但是该装置存在争议的地方是,当从金属球间隙喷出电弧时,依次会触碰到相邻的金属球,形成沿面放电闪络现象,在很多情况下,电弧不会按照预先设定的方向发展,将电弧拉长,最终影响电弧的熄灭效果。另外,由于该装置的特殊表面螺旋结构,更多是“路”的结构,容易造成表面污秽积累,演变成污秽性短路,导致防护雷电失败。

3.4 氧化锌避雷器

氧化锌避雷器具有一系列的优点,诸如良好的

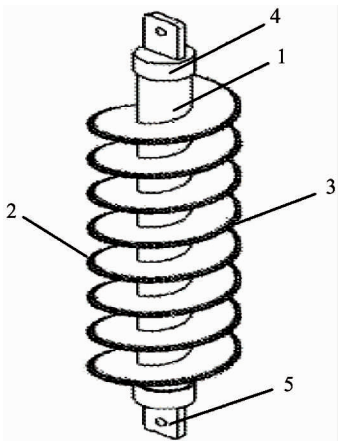


图 7 螺旋形多间隙避雷器

保护特性,能实施重复动作保护,容量大,耐污性能好,寿命长等^[17],因此它在高压输电线路获得了广泛的应用,为雷电防护作出了巨大贡献。

依照《GB 11032-2010 交流无间隙金属氧化物避雷器》标准生产的避雷器的散热间隔时间约为 60 s(详见标准 8.4 章节),而实际雷击工况的放电间隔约为几十毫秒,在叠加性雷击、巨型雷击等复杂雷击面前,避雷器有时会出现防护不到位的情况。

3.5 国外工频电弧诱导灭弧型间隙装置

国外对于灭弧防雷间隙的研究和应用主要集中在利用工频电弧作为触发和灭弧能量,作用于工频电弧并将其熄灭,几种代表类型如下。

日本的 Chino 等人^[18]曾研发了一种灭弧管道位于间隙接地电极末端的间隙结构,管道内壁由聚氯乙烯特殊有机材料构成,当遭受强雷击后,间隙闪络,将产生高温工频电弧,管道内壁有机材料将产生大量气体,在细长的灭弧管内变成高速气流,最终切断工频电弧。但是这种间隙结构无法熄灭更高幅值的电弧电流,只能熄灭的接地电弧电流幅值范围大致为 445 ~ 2 000 A,且内壁管道上的有机产气材料,在动作大约十次后就会失去产气功效,因此在工程实际应用中具有很大局限性。

在此之后,Iwata 等人^[19]经过改进,又研发出一种新型间隙结构,上下电极均装有产气材料的灭弧管道,从而使灭弧气流作用效果更加强烈,提高了熄灭接地电弧的幅值范围,但依然无法切断更强的短路电弧,且无法克服内壁产气材料的易损耗及动作次数有限等缺陷,因此其实用性依然不理想。

俄罗斯的 Podporkin 等人^[20]也研发了一种特殊灭弧间隙,和上述的灭弧间隙相比有较大的改进(如图 8 所示),这种灭弧间隙结构被称作 MCIA。众多特定长度的小孔灭弧室紧密排列在整个灭弧管道上,当相邻小电极间被击穿,将产生小电弧,由于热量膨胀,将电弧吹出,形成整个灭弧管道的同步灭弧场景。

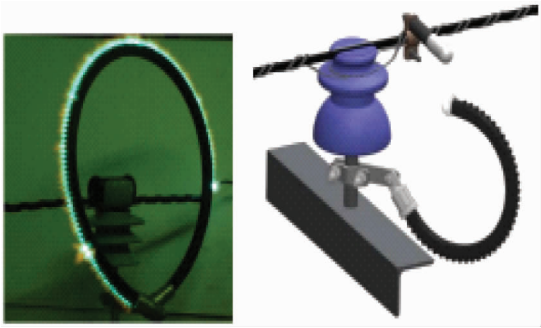


图 8 MCIA 结构及不同种类的装置

MCIA 与前文所述的灭弧结构相比有一定优势,在俄罗斯数条 20 kV 及 35 kV 配电线路上试运行后,也收到了较好的防雷效果,增加了灭弧可靠性。但是,这种灭弧防雷间隙仍然无法克服以下瓶颈:

- (1)MCIA 的灭弧间隙管道的工艺性要求高、经济性偏差。
- (2)小孔灭弧室的结构在高温工频电弧作用下,不断地被烧蚀,在经历一段时间数次动作后,灭弧效能会逐渐降低。
- (3)工频电弧持续时间长,容易引发雷击跳闸事故。

由此可以看出,上述几种灭弧间隙结构均有自身无法克服的缺陷,其根本原因在于,灭弧间隙结构均是把高温工频电弧作为灭弧气流的触发源和能量源,属于工频电弧诱导灭弧型的防雷装置。如果灭弧时处于工频电弧发展初期,温度较低,虽然容易灭弧,但是灭弧气流能量小,灭弧效果及可靠性均不高;如果灭弧处于温度较高的工频电弧发展充分期,虽然灭弧气流能量积累充足,但灭弧难度更高,且极易重燃,进而引发断路器跳闸及停电事故。

综上所述,工频电弧诱导灭弧型防雷装置,是在工频电弧持续期间熄灭电弧,因工频电弧持续燃烧后破坏力巨大,多数情况下,无法在继电保护动作之

前切断电弧,是造成直到今天整个输电线路上的雷害事故总体上依然处于高发状态的原因之一。

4 雷电弧诱导灭弧型防雷措施

过往具有间隙结构性质的防雷装置的使用情况表明,如果续流工频电弧不能被及时熄灭,任其持续烧蚀,会严重损坏间隙极板,使间隙和绝缘子配合失效。让具有优异性能的能成功抑制工频建弧和电弧重燃的防雷间隙代替普通防雷间隙,甚至是代替输电线路其他避雷装置,且保持结构相对简单、易维护、成本较低,是目前防雷间隙装置的重要研究方向,也是研究难点所在。

针对上述问题,广西大学高压团队提出了“雷电弧诱导灭弧”型防雷方法,典型装置是固相灭弧防雷装置^[21-25],是以雷击电流作为灭弧触发源(如图 9 所示),首先通过雷电感应脉冲触发灭弧装置,并疏导雷电能量入地,通过喷射具有电负特性的高速气流在工频电弧出现早期熄灭电弧,最后再次实现工频阻塞,在继电保护动作前阻塞工频续流,并防止重燃^[23],避免雷击跳闸。

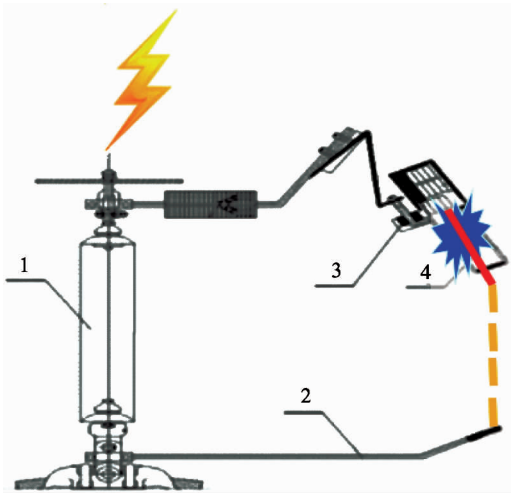


图 9 雷电诱导固相灭弧原理示意图

4.1 固相灭弧防雷装置的应用

固相灭弧装置目前主要应用在 110 kV 和 220 kV 输电线路,该装置是以深度抑制工频建弧为目的,能将几乎不可防的超强的雷电流成功导入大地,同时具有在 4 ms 时间^[25]内(远小于 20 ms 左右的继电

保护动作响应时间^[26,27]) 熄灭工频电弧的优异性能,能大幅度降低雷击事故率、雷击跳闸率^[28]和雷击断线率(如图10所示固相灭弧装置的挂网运行

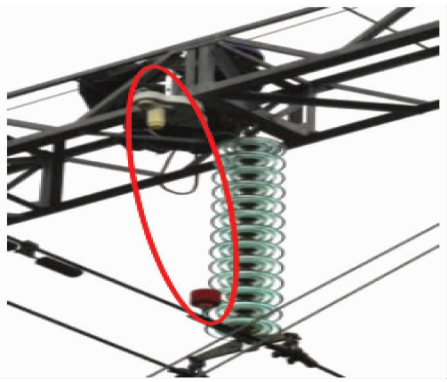


图 10 SDPD-220 雷电诱导固相灭弧装置挂网运行图

图),因此针对固相灭弧防雷装置的研究和应用普及具有现实意义。

表 1 显示的是,2014 年 7 月 9 日 05:23:48.2382,雷电袭击某沿海 110 kV 线路(该线路全线安装固相灭弧防雷装置)68#杆塔,雷电流幅值显示为 -167.9 kA,同时发生 7 次回击,B 相外能式灭弧型间隙动作并灭弧成功,线路始终未发生跳闸现象。2014 年 7 月 9 日 05:23:48.3666,雷电袭击该 110 kV 线路 69#杆塔,雷电流幅值显示为 -71.1 kA,C 相灭弧间隙动作并灭弧成功,线路始终未发生跳闸现象。

综上所述及用户报告(表 2)表明该装置在输电工程实践中能有效降低雷击事故率、雷击跳闸率,能大幅度降低雷电损失。在未来固相灭弧防雷装置一定会得到更广泛的应用。

表 1 某沿海 110 kV 线雷电监测数据

雷电监测信息查询结果报表					
对象范围			某沿海 110 kV 线路		
时间范围			雷电:2014-07-09 05:18:00 ~ 2014-07-09 05:28:00		
序号	时间	电流(kA)	回击数	杆塔编号	防护效果
1	2014-07-09 05:23:48.7237	22.5	0	60	防护成功
2	2014-07-09 05:23:48.2382	-167.9	7	68	B 相灭弧成功
3	2014-07-09 05:23:48.3207	-27.3	0	71	防护成功
4	2014-07-09 05:23:48.3666	-71.1	0	69 ~ 70	C 相灭弧成功
5	2014-07-09 05:23:48.8740	-68.0	3	68	防护成功

表 2 用户报告

线路名称	广西电网某 110 kV 线路	油田专供线 110 kV
间隙装置类型	雷电弧诱导灭弧装置	雷电弧诱导灭弧装置
改造前(雷击现状及损失情况)	叠加性雷、强雷击高发地区,雷击跳闸年均 40 余次,损失巨大	造成雷击跳闸约 8 次,停电时间约 6 h/次,损失巨大
改造后(雷击现状)	未出现雷击跳闸事故,防护成功。安装 3 个月后装置动作 6 次	雷击跳闸率约降低 95%。安装 3 个月后装置动作 3 次

4.2 灭弧防雷技术优势与不足

固相灭弧防雷装置和传统避雷器对比具有明显的优势(如表 3 所示)。

总之,固相灭弧防雷装置提高了防护能力和防护水平,防雷指标优异,可实现雷击不跳闸^[28]。固相灭弧防雷装置的整个灭弧过程发生在继电保护动

作前,能有效防止雷击跳闸事故的发生。因为自始至终均不允许出现工频建弧现象,从而规避了工频电弧这一引发雷击跳闸、断线、事故的根源。

其不足之处是一次性投资相对偏高,两种装置在电网中的应用率依然很低,性能的长期稳定性仍需持续跟踪观察。

表 3 固相灭弧和传统避雷器对比

类别	雷电诱导固相灭弧机制	传统避雷器阀片机制
工作机理	“雷电弧诱导灭弧”模式 雷电诱导产生喷射气流,作用于工频电弧的起始脆弱期	“工频电弧诱导灭弧”模式 雷电通过电阻阀片开通,限制雷击过电压
残压构成	负阻性残压	电阻性残压
保护功能	巨型雷、叠加雷等各种雷击强度、方式、类型和部位的所有雷击工况有效防护全覆盖	性能稳定 应对叠加性雷击、巨型雷击吃力
结构特点	开放式“场”的结构 不存在自身安全问题	“路”的结构

5 结 论

国内外现有的阻塞型、疏导型、工频电弧诱导灭弧型防雷措施,目前仍然发挥着作用,但同时面临叠加性雷击、巨型雷绕击的防护空白,耐雷水平的进一步提升极其困难,受到平时运行维护的工作量巨大、性价比低等发展瓶颈的制约。

从理论上讲,以固相灭弧防雷装置为代表的雷电弧诱导灭弧型防雷措施对雷击类型、雷击强度、耐雷水平及地网电阻等抑制闪络因素均不作考虑,只要求接地装置的完整性即满足要求,性价比高,结构相对简单,易维护,因此它具有推广应用价值。但是,这种新型防雷装置技术复杂,一次性投资相对偏高,要彻底在市场上站稳脚跟,打破传统防雷格局,还有很多工作要做。

通过本文综述可见雷电弧诱导灭弧型防雷技术确实拥有原理优势,但也有不足之处。因此笔者并不建议甚至是反对将现有的防雷措施全部更换为这种防雷措施,而是结合雷击工况和输电实际,包括经济条件,进行综合考虑,建议在雷击多发地区之内的重要输电线路增加这种防雷措施,在以后的新建高压输电线路适当增加这种防雷措施。目前,在一般的输电线路,笔者建议优先选用传统防雷措施。

本文重点体现在方法创新性方面,所有国内外的防雷措施都可以归为 4 种防雷措施中的一种,都

有各自明显的优势和不足。通过这种方法创新,最大程度上表述了每一种防雷措施的特点,为防雷措施在工程实践中的应用和研发提供前瞻性的指导性依据。

参考文献

[1] 何金良,曾嵘,陈水明. 输电线路雷电防护技术研究(三):防护措施[J]. 高电压技术,2009,35(12):2917-2923

[2] 陈维江,沈海滨,陈秀娟,等. 10 kV 配电网架空绝缘导线雷击断线防护[J]. 电网技术,2007,31(22):34-37,68

[3] 李瑞芳,吴广宁,曹晓斌,等. 山区输电线路雷电绕击跳闸率的计算[J]. 电网技术,2010,34(12):142-146

[4] 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

[5] Yang Q, Tao J Y, Sima W X. Analysis of shielding failure in transmission lines considering complex terrain[C] // Proceedings of the 2017 International Symposium on Lightning Protection, Natal, Brazil, 2017: 116-120

[6] Mo W, Luo J, Liu H, et al. Simulation of shielding failure flash-over of transmission line based on leader progression model // Proceedings of the 2016 International Conference on Advances in Electrical, Electronic and System Engineering, Putrajaya, Malaysia, 2016: 510-515

[7] 于昕哲,周军,刘博,等. ± 1100 kV 线路长串盘形绝缘子污闪特性研究[J]. 电网技术,2018,42(2):393-399

[8] 高嵩,张佰庆,崔艳东,等. 长棒形瓷绝缘子交流污闪特性与污闪电压提高措施[J]. 高电压技术,2018,44(6),1891-1897

[9] Petrache E, Rachidi F, Paolone M, et al. Lightning-induced voltages on buried cables, Part I: Theory[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2005, 47(3): 498-508

[10] Tu Y P, He J L, Zeng R. Lightning impulse performances of grounding devices covered with low resistivity materials[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, 21(3): 1706-1713

[11] 张思寒. 耦合地线架设方式对 220 kV 同塔双回输电线路反击防雷效果的研究[J]. 电瓷避雷器,2016,269(1):105-111

[12] 张坤. 山区架空输电线路防雷技术研究[J]. 广东电力,2012,25(10):117-121

[13] Horinouchi K, Nakayama Y, Hidaka M, et al. A method

of simulating magnetically driven arcs[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1997, 12(1): 213-218

[14] Niemeyer L. Evaporation dominated high current arcs in narrow channels[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1978, 97(3): 950-958

[15] 中商产业研究院. 2016-2020 年中国管式避雷器行业市场调查与投资前景研究报告, ICI 190129[R] 深圳: 中商产业研究院, 2015

[16] 孔令明, 刘娟, 贾亚军. 应用红外测温仪分析磁吹雷器内部缺陷[J]. *高电压技术*, 2005, 31(11): 90-91

[17] 赵智大. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013

[18] Chino T, Iwata M, Imto S, et al. Development of arcing horn device for interrupting ground-fault current of 77 kV overhead lines[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, 20(4): 2570-2575

[19] Iwata M, Chino T, Nakayama M. Development of arcing horns for interrupting short circuit current of 66/77 kV transmission line[J]. *Proceedings of National Convention Record Institute Electrical Engineer Japan*, 2004, 7(7): 138

[20] 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] // Proceedings of the 28th International Conference on Lightning Protection, Kanazawa, Japan, 2006. 980-984

[21] 王巨丰, 李国栋, 等. 高速气流作用下灭防雷间隙灭弧效果的研究[J]. *高电压技术*, 2016, 42(2): 598-604

[22] 王巨丰, 李国栋, 蒲亭洁. 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

[23] 王巨丰, 刘津濂, 刘其良, 等. 基于抑制建弧率的新型喷射气流灭弧防雷间隙机理研究[J]. *高电压技术*, 2014, 40(9): 2862-2870

[24] 王巨丰, 王燕蕾. 雷电诱导型固相灭弧防雷器[P]. 中国专利, CN201610747255. 3, 2017-02-22

[25] 王巨丰, 郭伟, 梁雪, 等. 爆炸气流灭弧试验与灭弧温度仿真分析[J]. *高电压技术*, 2015, 41(5): 1505-1511

[26] 杨建翔, 王英莉. 抗晃电的快速保护方案研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(17): 87-92

[27] 陈星田, 熊小伏, 齐晓光, 等. 一种用于继电保护状态评价的大数据精简方法[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(3): 538-548

[28] Wang J F, Liu J L, Wu G Q, et al. Research and application of jet stream arc-quenching lightning protection gap (JSALPG) for transmission lines[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015, 22(2): 782-788

Research review of lightning protection measures for transmission lines

Wang Jufeng^{***}, Bi Jieting^{***}

(* School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004)

(** Guangxi Transmission and Distribution Network Lightning Protection Engineering Technology Research Center, Nanning 530004)

Abstract

The lightning protection measures for existing transmission lines are reclassified. Referring to existing classification methods this paper divides all lightning protection measures into four categories, i. e. blocking up type, channeling type, power frequency arc induced arc-extinguishing type and lightning arc induced arc-extinguishing type. The working principle, characteristics, lightning protection effects and shortage of each lightning protection measure are analysed. By doing deep analysis of the four types of lightning protection methods, it is concluded that the lightning arc induced arc-extinguishing method is one of the most effective measures to solve lightning problems in the future and needs further research and attention. Through providing a progressive guidance for the application in engineering practice, it helps to avoid more deviations towards research and development of lightning protection measures on transmission lines.

Key words: arc-extinguishing, blocking up type, channeling type, power frequency arc induced, lightning arc induced