

避雷器在输电线路防雷中的应用探析

岳光华

(河南平高电气股份有限公司 河南 平顶山 467001)

摘要:随着自动化设备的广泛使用,对架空输电线路的可靠性提出了比以往更高的要求。雷击是导致架空线路中断的最常见原因之一。电力中断干扰设备的正常运行,对社会生活产生很大影响。为了降低关键线路的反闪络率,必须采用特殊的防雷系统。本文分析了输电线路避雷器在架空输电线路上的应用。通过数值分析得出线路避雷器可以提供高水平的线路雷电保护。

关键词:避雷器;输电线路;避雷

【DOI】10.12293/j.issn.1671-2226.2022.19.007

引言

闪电是许多国家架空输配电线路跳闸的最常见原因。这种跳闸会对提供给客户的电能质量产生重大影响。电能不足会在工业、交通、旅游、通信等领域引起许多问题。因此,本文的目标是对架空输电线路实现防雷应用的探究。架空线路有很多不同的特殊防雷系统。目前广泛使用的防雷系统是避雷器。在应用线路避雷器时,找到其最佳的配置非常重要。这意味着通过使用少量的线路避雷器来实现高防雷效率。第二种保护系统是基于地下电线的应用。它的使用并不广泛,但可以提供高水平的防雷保护。

一、避雷器类型与工作原理

避雷器设计为额定工作电压的绝缘体,当线路电压超过设计规格时,最多传导几毫安的电流和良导体,以将雷击的能量传递到地面。有几种不同类型的避雷器可用(例如有间隙的碳化硅、有间隙或无间隙的金属氧化物),它们都有着相似的方式工作:在正常工作电压下用作高阻抗,在浪涌条件下变为低阻抗。尽管大量使用碳化硅(SiC)电阻器的带间隙避雷器仍在使用之中,但如今安装的避雷器几乎都是无间隙的金属氧化物避雷器,这意味着目前新安装的带有电阻器的避雷器都是由金属氧化物组成。金属氧化物避雷器的显著特点是其极是非线性的V-I特性,无需通过串联火花间隙将电阻器从线路断开,就像在带有SiC电阻器的避雷器的工作原理类似。

本文讨论的避雷器的类型选择有两种:一种是将避雷器与导体直接连接(无间隙式避雷器),另一种是通过气隙间接连接(有间隙式避雷器)^[1]。无间隙式避雷器是站场避雷器技术的延伸,具有可靠的浪涌吸收、无延迟放电和多站并联对雷击电流的高分流效应等优点。另一方面,缺口类型可以被视为一种具有防雷功能的弧角,加上氧化锌的元素和小而无间隙的外绝缘类

型,因为只有雷击导致气隙放电时才使用工频电压通电。除了对避雷器的要求外,从表1中列出的有间隙型和无间隙型之间的比较可以得出结论,最大限度地利用气隙特性的有间隙式避雷器从劣化、故障安全性能等的角度来看,在实际环境中最为实用。

二、避雷器的设计理念

1.避雷器的材料和结构的选择

根据前面描述的要求,对材料和结构进行了检查。首先,将氧化锌(ZnO)元素加入到高强度纤维增强复合材料(FRP)圆柱体中,该圆柱体是用乙烯-丙烯(EP)橡胶模制而成的。由于避雷器单元通常是不带电的,因此橡胶棚的电气老化情况似乎比较少。EP橡胶用于获得轻巧的单元。其次,没有使用为电站避雷器提供的泄压导向装置,因为故障电流引起的内部压力通过玻璃钢筒体上的特殊孔释放到外部。然后电弧在很短的时间内转移到避雷器两端的弧环。第三,串联间隙的电极结构设计使串联间隙长度保持在规定的公差范围内,即使串联间隙的尺寸会因为环境风力等外部因素而发生改变,仍然可以获得可靠地运行。

2.避雷器基本设计及间隙设计

避雷器设计的研究可分为两类:一个是避雷器单元,另一个是串联间隙。避雷器单元的尺寸主要由设计电压、放电电流、截止电流和防爆要求来确定,串联间隙主要取决于临界脉冲、开关脉冲闪络电压和截止电流的

表1 传输线用间隙式/无间隙式避雷器比较

项目类型	有间隙式避雷器	无间隙式避雷器
劣化程度	只有串联间隙放电时,才以60Hz电压通电,劣化程度较低	正常电压为60Hz
剩余电压	低于无间隙式剩余电压	高于间隙式剩余电压
故障安全	不需要特殊的设备	必须有一种特殊的装置将避雷器与导体隔离开来
其他	(1)放电延时原理 (2)可以在长度上进行紧凑的设计	放电没有时间延迟

科学研究

特性。但是,最重要的一点是避雷器必须安装在现有的铁塔上。因此,避雷器的尺寸应根据这些要求确定。

(1) 避雷器的单元长度

由于避雷器单元的工作电压通常比无间隙型少得多,因此基本上不需要考虑避雷器单元的电气老化的情况,例如锌元素的热失控和橡胶的起痕或腐蚀等由于电压应力而脱落。但是,为了在故障的情况下也能正常运行和切断故障电流,研究学者设定了电压标准。根据这一设定的电压标准,确定所需的ZnO元件长度和外部绝缘(沿橡胶伞裙的泄漏距离)。

通常,氧化锌元素的热稳定性被认为是电站避雷器设计中的重要因素之一,外加电压比(AVR)通常设置为0.6左右。但是,串联间隙避雷器的锌元素长度可以设计在AVR的值约为1.0的情况下,因为避雷器单元的工作电压施加的时间很短,不到一个周期。

此外,即使在受污染和潮湿的条件下,避雷器也有望表现良好。由于运行时间短,避雷器单元在污染和潮湿条件下的闪络电压变高。因此,避雷器单元所需的漏电距离约为普通设计的60%左右。

(2) 系列间隙的长度

即使避雷器单元因雷电流超过设计值或内部绝缘降低而失效,输电线路也必须保证能够继续运行。因此,需要串联间隙来承受开关浪涌。另一方面,串联间隙必须能够抵抗雷击浪涌,但线路绝缘子组件不应发生闪络。值得注意的是,串联间隙的闪络电压(FOV)远高于棒间隙的FOV。这是由于ZnO元件的电压-电流特性和电容决定的;当单元的避雷器功能丧失时,例如,由于ZnO元件的劣化,串联间隙的FOV减小。考虑到特征,系列间隙的长度可以确定如下:

1.对于开关浪涌,所需的最小长度由带有故障避雷器单元的串联间隙的FOV确定。

2.对于雷击浪涌,应用于避雷器时,绝缘子组件的引弧喇叭不需要避雷保护,但仍需要电力电弧保护。因此,串接间隙和串联间隙之间的绝缘体组件电弧喇叭具有高度可靠的绝缘配合显得尤为重要。最有效的措施是在保持绝缘子串长度不变的情况下,将喇叭的间距扩大到电力电弧保护的极限。

(3) ZnO元件的直径

表2 雷击频率计算参数

项目	条件
电源线雷击距离,单位:米(m)	$6.72 I^{0.8}$
地线雷击距离修正系数	1.0
地面雷击距离修正系数	1.0
雷击角度分布	$\cos^3 \theta$
对地雷击频率密度,雷击/ $\text{km}^2 \cdot \text{年}$	4

确定ZnO元件的尺寸,首先确定通过避雷器的放电电流的大小,考虑到对雷电浪涌的能量。为此,需要根据避雷理论分析输电线路雷击的发生概率,和那些由于屏蔽失效时使用电磁瞬态程序计算。表2给出了线路雷击频率分布的计算条件。

计算放电电流的频率分布研究中可以发现35kA的预期放电电流对于77-kV线路为每年每100km平均0.1次故障,对于275-kV线路每年每100km平均0.01次故障。考虑到这些频率,放电电流确定为35kA。为了提高放电电流,选择锌元件的直径时,要在工作负载上留有一定的余量。

(4) 防爆特性

假设当功能故障出现,例如过大的雷电流击中引起时,由于故障电流导致避雷器单元内部的压力增加,避雷器单元可能会发生爆炸。为了避免避雷器单元的爆炸,有必要抑制这种压力上升。作为研究结果之一,发现泄压最有效的方法是通过FRP圆筒上的几个孔进行泄压,这些孔最初是用EP橡胶填充的,但有些随着压力的升高,EP橡胶轻微破裂而增加了孔的数量。这意味着电弧自动地从内部移动到外部。然后,电源电弧继续安装在避雷器两端的一对环之间,直到断路器运行。

有两个因素控制着泄压性能。它们是玻璃钢圆柱体抵抗内部压力的强度以及玻璃钢圆柱体孔的几何形状、面积配置。

(5) 续流截止

通常,如果施加电压比或设计电压较低,则需要较短的串联间隙长度。此外,如果使用较小的施加电压比或者较长的串联间隙,则可以缩短截止时间。但在实际操作中,应在断路器运行前完成切断。因此,在77kV的2个周期内和275kV的0.5个周期内,以足够的裕度确定目标截止时间。

三、避雷器的应用

1. 避雷器在小规模配电网的应用

安装避雷器的目的是为了减少雷电故障和操作电压导致的绝缘子闪络,因此需要根据实际情况来选择合适的安装位置,以发挥其作用^[2]。根据调查的资料显示某电力公司配电网分布在雷电活动频繁的丘陵地区。据2000年至2009年的统计,35kV线路遭受雷击100多次,其中绝缘子和内部电子设备直接损坏约40次。因此,线路避雷器在正确选择易遭雷击的杆塔后,通过安装线路避雷器,有效地避免了雷击造成的跳闸事故的发生,从而有效地提高了输电线路的耐雷电水平。2007年以后大观线、东丹线雷击次数减少与线路避雷器安装密切相关,同时应结合该地区雷电活动特点和地形,灵活调整避雷器安装位置,并使避雷器的应用效果最

大化。

2. 避雷器在500kV直流电中的应用

随着我国城市建设和工业生产的快速发展,我国电网加快了特高压直流输电工程建设步伐。自2003年三峡输电工程以来,我国已建成12条 $\pm 500\text{kV}$ 、1条 $\pm 660\text{kV}$ 、6条 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电线路。此外,多个超高压/特高压直流输电项目已进入规划或建设阶段。超高压、特高压直流系统凭借距离更远、容量更大、损耗更小的优势,已成为跨区域、跨境输电的重要手段,在全球能源互联网中发挥着举足轻重的作用。

$\pm 500\text{kV}$ 直流线路绝缘等级高,调整速度快,沿线电压分布平稳,对其安全运行的威胁主要来自外部因素。我国 $\pm 500\text{kV}$ 直流输电线路大多经过雷暴日数高、土壤电阻率高、地形复杂的地区,防雷形势尤为严峻^[3]。此外,高塔和线路工作相位极性不变也增加了雷击概率,尤其是雷电屏蔽失效概率。据国家电网公司(SGCC)2011-2015年统计数据, $\pm 500\text{kV}$ 直流线路雷击闪络次数约占总闪络次数的56%。

$\pm 500\text{kV}$ 直流线路因其绝缘等级高、故障重启功能快等特点,在中国和其他国家一般不考虑特殊的防雷措施。为了提高线路的防雷性能,通常会采取一些常规措施,如减小地线的保护角和铁塔的接地电阻,安装塔头避雷针等。但实际运行经验表明,这些措施并未针对沿线地形、雷电密度和土壤阻力等因素提供足够的保护。然而,对于类似的高压和特高压交流输电线路,国际上大量的运行经验表明,线路避雷器是最有效的防雷手段之一。1982年美国电力公司开发并在138kV输电线路应用线路避雷器。日本电力公司于1986年将线路避雷器应用于强雷电活动区的77kV架空线路中,并于1988年和1992年开发了275kV和500kV串联气隙线路避雷器。由于其卓越的性能,截至2009年,日本电力系统已安装了351000个串联气隙从77kV到500kV的线路避雷器。我国于1996年研制成功了串联气隙交流线路避雷器,并应用于110kV、220kV和500kV输电线路。截至目前,中国电网已安装线路避雷器3万多台,取得了良好的防雷效果。

然而,尽管交流线路避雷器得到广泛应用,但在2013年之前,世界上还没有用于 $\pm 500\text{kV}$ 直流输电线路的线路避雷器的先例。由于使用条件更严酷,技术要求更高,直流线路避雷器与交流线路避雷器在结构、工作原理、安装方式、保护特性等方面存在显著差异。因此交流避雷器的经验并不直接适用于直流线路避雷器的结构设计。因此,需要进行新的研究和开发。从2011年国家电网电力研究院(SGEPRI)开始在国内开展 $\pm 500\text{kV}$ 直流线路避雷器的研究,并于2012年在国际上率

先研制成功。自2013年以来,已在中国8个省份的7条 $\pm 500\text{kV}$ 直流输电线路安装和使用500多台直流线路避雷器。2013年后,7条 $\pm 500\text{kV}$ 直流线路发生雷击闪络27次,但均发生在未安装避雷器的铁塔上。同时,避雷器计数器有效记录避雷器动作50次以上,避雷器保护的绝缘子未发生雷击闪络。显然避雷器的防雷效果非常显著。直至多年后的今天,安装避雷器的导体从未发生过雷击。

总而言之,为解决我国 $\pm 500\text{kV}$ 直流输电线路经常发生雷击闪络的问题,国家电网公司对直流线路避雷器的保护原理、技术参数、结构安装、性能试验等进行了研究,研制成功了直流线路避雷器。第一个 $\pm 500\text{kV}$ 直流线路避雷器。研究和型式试验表明,研制的避雷器性能参数优良,能有效抵抗雷电冲击,切断直流续流。数百台已安装避雷器4年左右的运行经验表明,避雷器可以长期安全可靠的工作,并有效降低了 $\pm 500\text{kV}$ 直流线路的雷击闪络率。该型避雷器的研制成功,不仅为我国 $\pm 500\text{kV}$ 直流线路提供了有效的防雷措施,也为 ± 800 等其他电压等级直流线路避雷器的研制提供了良好的经验。

四、总结

雷击是架空输电线路停电的主要原因。使用输电线路避雷器来提高输电线路的防雷性能正变得越来越普遍。相对于其他防雷措施,避雷器对输电线路的防雷效果已得到普遍认可。特别是在地形复杂、土壤电阻率高的地区,避雷器可以显著减少输电线路的雷击事故。目前配电网发展迅速,每年都有大量线路投入运行,线路规模的扩大增加了雷击跳闸的概率,也给防雷工作带来了更大的难度。从技术经济角度来看,并不是所有的杆塔都能安装避雷器,因此应结合线路受雷击频率和地形特征等选择安装避雷器。本文对避雷器的研究以期推动该行业的发展。

参考文献

- [1]林志明.避雷器在输电线路防雷中的应用探析[J].机电信息,2018(03):50-51.
- [2]姜华.避雷器在输电线路防雷中的应用探析[J].中国新技术新产品,2013(01):116-117.
- [3]万帅,张伟,陈家宏,谷山强,吕军,王剑,曹伟.特高压 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电线路用避雷器的研制[J].高压电器,2017,53(05):48-55+62.

作者简介

岳光华(1981.1—)男,汉,本科,工程师,河南漯河,主要从事的工作或研究:互感器和避雷器产品研发。