高技术通讯 2021 年 第31 卷 第10 期:1101-1107

doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2021.10.011

气体灭弧防雷方法的发展与研究综述①

杨倩颖② 王巨丰 李心如 王国锋

(广西大学电气工程学院 南宁 530004)

摘 要 雷电是电力系统第一事故源,其引发的跳闸断线等事故高发,严重影响供电系统的可靠性和用户用电的稳定性及安全性。如今输电线路防雷存在着多重雷击、高土壤率地区反击、大峡谷绕击等防护瓶颈,传统防雷措施在大概率多重雷击防护方面的缺失是导致雷击事故高发的主要原因。气体灭弧防雷方法是一种全新的防雷模式,其工作原理是在绝缘子旁路的雷击过电压形成电弧后快速熄灭电弧,阻止后续工频续流,防雷效果不受雷击类型、强度、方式和部位的影响。实现了对多重雷击、高土壤率地区反击等雷击工况的防护,可有效管控雷击事故率。相信随着后续研究的深入开展,该防雷方法将会在更广阔的领域得到应用和发展。

关键词 气体灭弧;防雷方法;固相灭弧;压缩灭弧

0 引 言

雷电是电力系统的第一事故源。研究表明,我国 220 kV 以上的超高压输电线路有 40% ~70% 的事故都是雷击跳闸导致的。雷击输电线路或雷击杆塔会造成线路杆塔的绝缘子发生闪络事故,工频续流会沿闪络通道流入接地端,这种现象会严重威胁电网的安全运行。配网结构错综复杂,其绝缘水平和耐雷水平与输电网相比较低,易受直接雷击和感应雷击的影响,其雷击跳闸率及断线率居高不下[1-3]。

雷击事故成为电网供给需求侧严重的安全问题,因此输电线路对防雷有极高的要求。电网安全稳定分析指出,为保证电网稳定运行,发电机功角应在远小于 90 °的基础上运行,此种运行方式导致电网的输运效率严重不足,而每一次雷击闪络都会使系统出现一次强扰动,影响电压稳定,甚至出现大面积停电事故,造成的经济安全损失不可估量,因此防止雷击跳闸成为电网安全稳定运行的重大课题[4]。

国内外的研究学者在输电线路防雷问题上已经取得了一定的成果,并且已经广泛地应用于电网中,然而跳闸率没有得到明显改善,说明现有的防雷措施仍存在不足之处。本文将分析当前防雷面临的难题以及现有防雷措施存在的问题,并在已有防雷技术的基础上创新性地提出气体灭弧防雷方法,为输电线路防雷技术的发展提供新的思路。

1 复杂雷击工况下的防护空白

1.1 多重雷击引发跳闸

国际大电网委员会(CIGRE)2013 年报告表明,80% 的地面落雷为多重雷,对地闪络大部分为 3 ~5 次回击,平均间隔时间为 60 ms。文献[5,6]在分析某地 2006 –2008 年的 27 次典型自然负地闪先导-回击发展过程中发现,约 44% 的地闪会发生多次回击,最多回击数高达 13 次,大于 10 次的回击有 4 次。而基于 2006 –2011 年对雷电的综合观测(包括

① 国家自然科学基金(51467002)和广西壮族自治区科技厅科技项目(桂科 AB18126105)资助。
② 女,1994 年生,硕士生;研究方向:高电压与绝缘技术;联系人,E-mail:qianying71@vip.qq.com
(收稿日期:2020-09-07)

自然观测与人工测试)数据显示这一概率为 72%,回击间隔主要分布在 100 ms 以内,最大可达到 500 ms。

大概率的多重雷击和多次回击条件下,耐雷水平与雷击重复次数成反比,雷击跳闸率与雷击重复次数成正比。多重雷击和多次回击的热量叠加、能量叠加、电流叠加、电压叠加特性通过大概率引发绝缘闪络跳闸而严重威胁电网安全,尤其在高土壤电阻率地区,反击跳闸事故经常发生。而频繁重合闸会导致断路器频繁切断巨大工频短路电流,造成触头烧蚀熔化,冷却后焊死,发生后续雷击断路器拒动,引发爆炸,引起长时停电[7-8]。多重雷击下的击穿绝缘能力、引发长时停电能力、导致避雷器热击穿和爆炸形成硬短路的能力远大于单脉冲雷击,成为电力系统事故的“头号杀手”[9]。然而前国家标准及行业标准并未涉及叠加性雷击防雷保护设计,这也是造成目前的雷击防护效果不明显的重要因素之一,因此叠加性雷击原理及危害性应受到各界专家和学者的重视。

1.2　雷击避雷线档距中央引发闪络

山区地理位置特殊,气候环境复杂,雷电频发,其落雷密度要大于平原地区,其中超高压、特高压输电线路在山区峡谷所架设的杆塔高度较大、距离较长,导致雷击事故严重。有资料显示,我国 110 ~ 220 kV 输电线路雷击事件中,超过 50 % 为绕击事件。研究数据表示雷击档距中央的可能性大概只有 10%,但是该位置导线与避雷线间隙被击穿可能性最大,主要原因是雷击避雷线档距中央时,雷电负反射波通过接地端反射回来所需时长少于雷电波波峰时长,导线和避雷线间电压值最大。因此当档距过长,其负反射波越慢,反生闪络事故的概率越大[10-12],且对于多重雷击的情况,该峰值大幅提高,间隙击穿成为全概率事件。

2　当前防雷方法及防雷能力

2.1　阻塞型防雷方法

“阻塞型”方法是以阻止绝缘子闪络为目的,其基本原理是避免旁路绝缘子两侧出现雷电过电压,实现方式为提高耐雷水平,当雷电强度在耐雷水平之下,能达到防护效果,主要方法如下文所述。

加强绝缘是通过添加绝缘子片数来加大其闪络电压,这种方式通常在大跨距高杆塔和耐张大转角型杆塔上采用,但其效果仍然与雷电流幅值有关。降阻是为了降低雷击反击时在绝缘子杆塔侧过电压,但是杆塔接地电阻大多都会偏高,实际值严重小于理论值,难以满足规程的现象[13],且昂贵的投资环节、较高概率的地网电阻损坏和维护,导致防雷成本大幅提升。

避雷线虽然能起到部分的保护作用,但是仍然存在缺陷,杆塔结构、电压等级、地形、地貌及风偏角等自然因素会使避雷线屏蔽范围缩减,进而影响到其避雷作用的发挥,导线会失去避雷线的作用而发生绕击[14]。

安装线路避雷器,可以利用固体氧化物阀片的非线性特点来实现雷电疏导和工频阻塞,但存在以下问题:疏导雷电流时产生的热量需要及时排出,而内部防潮必然要求密封性结构,又不利于散热;加之工艺问题,使得避雷器爆炸事故成为大概率事件;当发生避雷器爆炸事故,原本的灭弧通道将转为短路通道,构成事故源,造成跳闸[15]。非线性电阻的时滞效应,使得多次回击条件下残压叠加升高。阀片对散热的要求,使得避雷器对冲击电流密度的时间间隔至少为 50 ~ 60 s,但叠加性雷击脉冲的间隔远远小于该数值。

2.2　疏导型防雷方法

“疏导型”以普通并联间隙为代表,在旁路绝缘子上下两端并上一对金属电极,当雷电产生过电压时,空气主间隙优先击穿,闪络路径被引致招弧角,避免绝缘子串闪络或损毁。此外,并联间隙还具有结构简单、拆装便利、性价比高等优点,在输电线路上已被大量使用。

普通并联间隙为无熄弧能力,需要利用断路器自动重合闸来切断工频电弧,导致雷击跳闸事故频发,不利于电网安全可靠地供电。如计算机、电机群等特殊负荷重启时间长,即便重合闸成功,也将造成损失,对这些负荷而言,重合闸成功的意义不存在。且电弧长时间的持续燃烧,造成电极烧蚀、电极长度变短和绝缘配合比改变的问题,导致在多次动作后

装置可靠性降低[16]。

2.3 灭弧防雷方法

灭弧防雷方法为当前国内外面临的防雷难题提供了新的科学原理及技术支持。该方法将冲击疏导和工频阻塞相结合,提出了“闪络不建弧”模式,即利用灭弧装置与绝缘子的绝缘配合保证绝缘子不闪络,闪络路径控制在装置内部,然后利用装置自身的灭弧功能来灭弧,阻断后续工频电弧稳定灼烧,从而杜绝了雷击跳闸等相关事故的发生。但目前国内外专家学者对灭弧防雷技术的研究并不多。

管式避雷器利用电弧烘烤装置内特殊材料使之汽化,利用短时间在封闭的空间内膨胀产生的高压气体,达到灭弧的目的。但冲击电弧本身持续时间极短,灭弧能量的产生更多是利用后续的工频大电弧,线路上出现工频故障电流。该思路本身不利于跳闸率的管控,且对安装地点要求较高,过大的短路电流会导致避雷器爆炸,过小则可能没法有效灭弧[17]。产气材料的损耗使得其灭弧能力越来越弱,灭弧效果也具有随机性、不稳定性和不可控性。

磁吹避雷器利用电磁力拉长电弧,迫使其加速去游离,结合阀片电阻熄灭电弧。但其缺陷有:磁吹避雷器内部仍然有非线性电阻阀片,因此也存在热击穿、热累积效应;此外,磁吹避雷器需要非常先进的密封技术才能保证装置具有出色的性能,目前的技术还达不到这一要求,因此设备经过一段时间的运营后,难免出现受潮、退化的现象,带来严重的隐患[18-19]。

Chino 等人[20]研发了一种招弧角,招弧角分为两个电极,即接地电极和导线电线,并接于旁路绝缘子两端,可避免雷击引发闪络。此外,用有机材料聚氯乙烯制成管道将接地电极一侧包裹住,接地电极穿过管道,形成了熄弧部分。当雷击事故发生时,电极间的电弧将触发有机材料产生高速气流熄灭电弧[20-21]。该装置通常只能切断幅值范围为 445 ~ 2000 A的故障电流,并且由于产气材料是通过灼烧管道产生的,导致熄弧部分在经过数次动作后出现腐蚀,装置耐用性大大降低,这极大地限制了其在实践中的推广和使用。

3 气体灭弧防雷方法

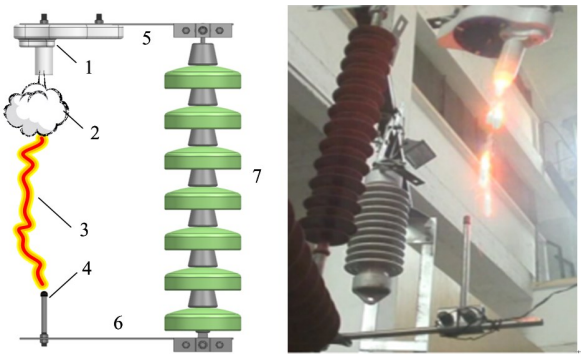
针对现有防雷能力不足的情况,继续对灭弧防雷技术进行研究,发现如果能在工频电弧尚未稳定的发展初期熄弧,其熄弧难度将会大大降低。国内广西大学高压实验团队[22]针对这个问题提出了气体灭弧防雷方法,是一种“冲击疏导-快速灭弧-工频阻塞”组合的防雷新模式,可取代现有的传统单一防雷模式。在传统并联间隙中加入雷电本身激活截弧机制,实现在建弧初期便能彻底截断电弧。该模式将灭弧防雷方法细分为 3 个部分:“冲击疏导”是指控制雷电冲击电弧闪络,避免了旁路绝缘子受到冲击电弧的烧蚀,使得雷击过电压趋于 0;“快速灭弧”是指在雷电冲击电弧阶段就启动灭弧环节,实现在建弧过程的起点附近全概率中断建弧过程,最终彻底消除工频过电流;“工频阻塞”通过快速置换介质强度,达到阻断工频电弧和抑制重燃的目的。

基于上述理念,该团队研发出两种装置:外能式固相气体灭弧防雷间隙和内能式压缩气体灭弧防雷间隙,下文将对两项技术做具体介绍。

3.1 固相气体灭弧防雷间隙

2010 年广西大学高压实验室研制出固相气体灭弧防雷间隙[23-24],是一种灭弧能量来源于灭弧气丸的外能式灭弧防雷器。由于其能量巨大,因此适用于 110 kV 及以上电压等级较高输电线路。装置采用半封闭空间下全空气介质,主设备通过金具与杆塔电极连接,设备灭弧筒通过空气主间隙与石墨电极处在同一轴线上。雷击产生时雷电脉冲传至旁路绝缘子两侧,防雷设备空气主间隙优先击穿,疏导雷电能量并将雷电流引入大地,设备内部通过电磁感应定理同步触发灭弧气丸,利用电磁感应触发装置内部的灭弧气丸,出现超压高密度强气流。如图 1所示,强烈的发光现象表示装置已经动作,电弧在高压高速的气流作用下,快速置换空气介质,恢复间隙绝缘强度,促使电弧迅速地变细、变长、散热、截断、熄灭,灭弧起始点在冲击电弧阶段,将电弧发展扼杀在“摇篮”中。该装置通过实验测试可熄灭 40 kA工频电弧电流,电弧熄灭时长(约为 0.3 ~

0.4 ms)远小于继保动作时长(一般大于 10 ms),爆炸冲击波在灭弧筒内传播过程中其气压值远大于大气压强,根据介质恢复强度理论可知,空气介质恢复强度正比与压强,反比于温度[22-25]。据如上分析,介质强度将快速恢复,使得电弧在工频电压下被有效抑制,具有抗重燃性,因此能够可靠地阻止雷击跳闸事故的发生。



1. 主体;2. 固相气流;3. 电弧;4. 接闪电极;5. 高压端;6. 接地端;7. 绝缘子串

图 1　装置动作图

气体灭弧的残压是电弧压降,受到弧柱电阻负阻特性的影响,在多重雷击电流电压叠加效应下残压反而极低。灭弧能量在多次重复冲击建弧过程中可多次被触发,利用引发闪络的多重雷(毫秒级多重雷击和微秒级多次回击)的多个脉冲连续诱导激活多重强气流,气流压力可高达 50 MPa,工频电弧在 0.8 ms 内便能被截断,对空气间隙中的单次雷击或多次雷击建弧过程实现早期强力干预,在建弧起点附近便能消灭工频续流[26],有效抑制了多重雷击下重复建弧过程。其防护示意图如图 2 所示。

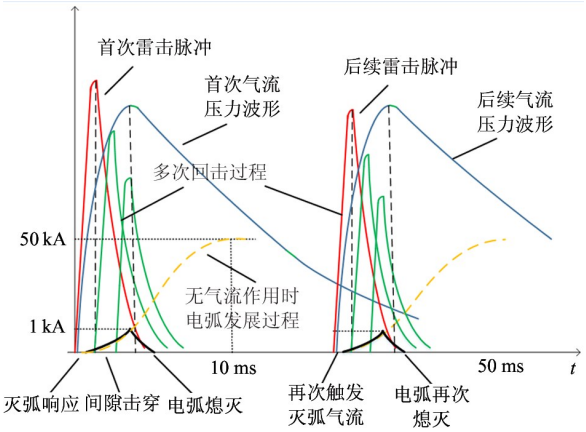


图 2　多重雷击防护示意图

装置内部还设有延时模块,确保多重雷作用下多个雷电脉冲间隔时间较短的情况下,灭弧气丸不会多次触发,单个气丸的产气强度便足够消除多个电弧脉冲(装置灭弧响应时间为 5 μs,工频电弧峰值时间约为 10 ms,爆炸气流能量能持续约 50 ms),可避免灭弧能量浪费。

固相气体灭弧防雷性能如表 1 表示。

表 1　固相气体灭弧防雷性能对比

	固相气体灭弧	传统避雷器
工作原理	雷击闪络诱导触发高速气体同步快速释放,作用于早期冲击电弧阶段,快速有效熄灭电弧,限制雷击过电压阻塞工频续流	利用阀片非线性电阻特性,正常工频电压下保持高阻特性阻断工频能量,雷电过电压使电阻阀片开通,限制雷击过电压
防雷特性	利用电弧负阻性残压特性,雷击越强残压越小	多重雷击产生的叠加效应使残压升高
	成功防护巨型雷、多重雷,达到全工况防护水平	只对单次弱雷击有效(占所有雷击 25% 以下)
自身安全	全空气开放式结构,介质可恢复,电弧通道无吸能环节,无潜在短路可能性,有较高的安全性	防潮层受潮影响散热,集肤效应、时滞效应引发残压超标从而引发阀片击穿,热击穿避雷器导致永久性短路故障问题

固相气体灭弧防雷间隙经过多年不断改进和升级换代,已有较为成熟的理论体系和标准的生产化流程,一系列产品已应用于广西南宁、新疆塔城、山东济宁等地区 110 kV ~ 220 kV 输电线路。用户报告反馈及雷击装置动作时的雷电流监测报告显示,该装置能有效防护巨大雷击,并且对多次回击下的叠加性雷击均起到防护效果,避免安装地的输电线路受到雷害的影响,提升了安装地区输电线路抵御雷击的综合能力和整体实力。

3.2　压缩气体灭弧防雷间隙

2013 年广西大学高压团队创新性地研制出压缩气体灭弧防雷间隙[27-28],是一种无需借助外力的自能式灭弧防雷器,适用于 35 kV 及以下电压等级较低的配电网和高铁接触网线路。

该装置头部装有石墨电极,能吸引雷电弧,设备

内部含有由特殊材料组成的灭弧管道,管道的直径和长度较短,并且管道按照一定的排列方式嵌套于设备中,每两个管道之间会形成喷口,此喷口处不仅是产生灭弧能量源区,也是电弧分段点[27-29]。当空气间隙被击穿后,电弧沿灭弧管道泄放雷电流,电弧在灭弧管道内部被冷却压缩使得弧柱直径减小,且沿轴向上直径减小程度增大。如图 3 所示,根据电弧等离子体相关理论,当电弧变细后,弧柱的电流密度将会增大,由于电弧沿径向的洛伦兹力和气体压力相平衡,导致通道电弧沿轴向形成压力梯度。当管道电弧的温度积累达一定值后,由于灭弧管道的绝热性,使得电弧不会再进行对流、传导、辐射散热,管道内与喷口处形成了温度梯度。在温升压爆效应作用下灭弧室内产生高速冲击气体,被极度压缩的电弧从相邻管道喷口处喷出,造成电弧能量的分段,电弧能量快速丧失,如图 4 所示。并且电弧链式的多点射流导致了电弧能量的粉碎性截断,有利于电弧的熄灭。

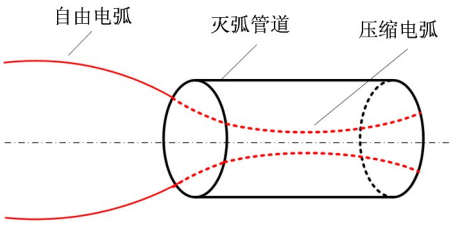


图 3　灭弧管道内电弧的示意图

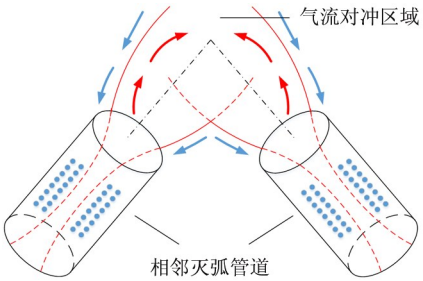
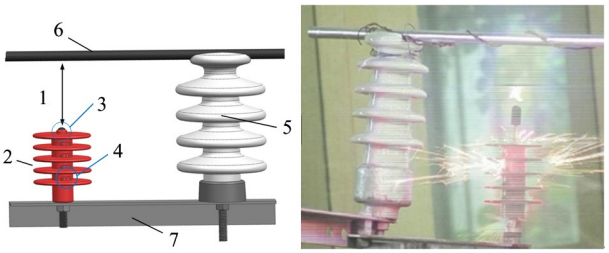


图 4　相邻管道气流对冲示意图

灭弧实验采用 2 kA 的工频电流,熄弧时长约为 0.3 ms,实验过程中根据高速摄像机显示,装置动作后,电弧通过装置内部设定的路径发展,电弧的建立发展过程与电弧的压缩过程同步实现,被压缩的电弧最终向灭弧管道断口喷出,从图 5 可以清楚地看到,电弧在经过特殊结构的灭弧通道后形成多个断点,有火花四溅的现象。电弧逐步被弱化,最终实现灭弧,并且在工频电压下并未发生电弧重燃现象。



1. 外空气间隙;2. 主体;3. 石墨电极;4. 喷射口;5. 绝缘子;6. 导线;7. 接地金具

图 5　装置动作图

压缩气体灭弧防雷间隙不受耐雷水平、雷击类型等因素制约,也无需考虑地网降阻的可行性,只需要保证地网完整性,即可消除高土壤率地区反击带来的危害。目前已应用于广西凭祥、梧州等地10 kV 输电线路和福建、云南风电场等 35 kV 输电线路,这些线路大多处于沿海强雷多雷地区、山区高土壤电阻率地区。根据用户报告显示,该技术防雷效果优异,提升了配网抵御雷击的综合能力和整体实力。

压缩气体灭弧防雷性能如表 2 所示。

表 2　压缩气体灭弧防雷性能对比

	压缩气体灭弧	普通灭弧防雷器
工作原理	控制雷电冲击电弧通过多个灭弧管道,被压缩后从断口处喷出,粉碎建弧通道	利用工频电弧烘烤装置内特殊的产气材料,使其热膨胀产生高压气体来灭弧
防雷特性	利用冲击电弧能量本身产生灭弧能量,建弧和灭弧过程同时发生;无需借助外力来产气,无材料损耗,结构稳定,适用于频繁动作	作用于工频电弧稳定阶段,熄弧能力受工频续流影响,难以控制;存在产气材料损耗问题,动作次数有限

4　气体灭弧防雷方法的优势及不足

气体灭弧防雷方法创新性地利用“冲击疏导-快速灭弧-工频阻塞”优势组合模式,实现对雷击跳闸的有效管控,达到无过雷击电压和无工频过电流的

“双无”目的。可以摆脱多重雷击、地网电阻、大档距中央绕击等不可控因素的制约;填补了传统防雷方法下防护效果受到雷击强度、部位(输电线、杆塔、避雷线)、方式(绕击和反击)、类型(单次雷击和多重雷击)、接地电阻等因素限制的能力缺陷;解决了由于防雷技术能力的缺陷与不足造成的防雷器自身及输变用电设备的诸多安全性问题。

目前由于实验条件、实验方法、实验经费受限,该技术灭弧响应时间、灭弧气流速度无法达到高精度的测量,导致了可能与真实情况存在一定的误差,还需进一步改进并将更多的环境因素融入到实验过程中。目前已研制完成的一系列装置适用范围受到电压等级的限制,适用于 500 kV 及更高电压等级的“固相-压缩”、“固相-固相”等组合装置已初步完成灭弧实验(图 6),但还需做进一步的调试与研究。此外气体主动灭弧是一种新型的防雷装置,相对于传统的防雷措施应用率还不够高,还需要进一步追踪和观察其性能的稳定性。

(a) 固相-固相　　(b) 固相-压缩

图 6　500 kV 组合式灭弧实验测试图

5　结　论

如今传统的防雷方法在输配电线路上虽然大量使用并对雷击有一定的防护效果,但面临着多重雷击、高土壤率地区反击和大峡谷绕击等防雷空白,并受到雷击方式、强度、类型和部位不可控性的影响,导致防雷效果也不可控。

气体灭弧防雷方法在传统防雷措施的基础上提出了“冲击疏导-快速灭弧-工频阻塞”相结合的理念,是一种全新的防雷模式。其工作原理是在绝缘子旁路的雷击过电压形成电弧后快速熄灭电弧,阻止了后续的工频续流,从而有效防护了工频短路电流及雷击跳闸对电力供给需求侧的影响。通过科学原理的先进性、防雷装置的安全性、运行效果的可控性 3 个维度排除了防雷的难点、瓶颈和不可控因素影响。虽然现阶段该技术仍存在一些问题亟待解决,但目前已有相对成熟的理论基础而且该防雷装置已在全国各地的防雷工程中逐步投入运行,并取得良好的效果,为今后的防雷研究工作提供了新的思路。随着后继研究的开展,该防雷方法将会更加成熟并在更广泛的领域得到应用和发展。

参考文献

[1] 高彬, 刘林芳, 冯衡, 等. ±1100 kV 特高压直流输电线路舞动理论计算研究[J]. 电力科学与工程, 2020, 36(1): 50-54

[2] 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

[3] 王巨丰, 毕洁廷. 输电线路雷电防护措施研究综述[J]. 高技术通讯, 2019,29(10): 1025-1032

[4] 王少博, 张文朝, 党杰, 等. 暂态功角失稳和电压失稳的模糊综合评判方法[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(3): 77-83

[5] Eloch, M. Performance of surge arrestors under single and multiple lightning impulses[C]//International Symposium on Lightning Protection, Natal, Brazil, 2017: 176-182

[6] Darveniza M, Tumma L R, Richte B, et al. Multipulse lightning currents and metal-oxide arresters[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1997, 12(3): 1168-1175

[7] 项恩新, 徐肖伟, 彭晶, 等. 220 kV 断路器多重雷击故障分析及试验研究[J]. 电工技术, 2016(3): 47-48

[8] 钱海, 邱慧敏, 别睿, 等. 500 kV 断路器多重雷击事故分析[J]. 南方电网技术, 2014,8(5): 20-23

[9] 廖民传, 蔡汉生, 吴小可, 等. 多重雷击对线路避雷器的冲击影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2019(3): 153-158

[10] Borghetti A, Napolitano F, Nucci C A, et al. Influence of the return stroke current waveform on the lightning performance of distribution lines[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 32(4): 1800-1808

[11] 周志成, 马勇, 陶风波, 等. 雷击地线档距中央的反击性能分析[J]. 江苏电机工程, 2012,31(6): 11-14, 18

[12] 孙万忠. 雷击档距中央避雷线耐雷水平的探讨[J].

高电压技术, 1987(1): 80-82
[13] 黄欢, 郭洁, 何可夫, 等. 雷电冲击下杆塔接地阻抗特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2017(3): 117-122
[14] 蓝磊, 张韬, 文习山, 等. ±1100 kV 输电线路雷电屏蔽特性的模型试验及观测[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 105-113
[15] 余喆, 蓝道林, 董树礼, 等. 一起避雷器泄漏电流异常增大特殊案例分析[J]. 浙江电力, 2018, 37(5): 38-43
[16] 吴东, 王巨丰. 对吹式爆炸气流灭弧防雷装置熄弧效果研究[J]. 电瓷避雷器, 2018(1): 25-29
[17] 德海尔. 粉煤灰的试验研究及其工程应用[M]. 北京:人民交通出版社, 1992
[18] 张守义. 关于磁吹避雷器灭弧间隙的基本研究[J]. 西安交通大学学报,1962(1): 98-114
[19] 汪武生. FCZ 系列磁吹避雷器常见故障及诊断[J]. 电瓷避雷器, 2001(3): 37-38
[20] Chino T, Iwata M, Imto S, et al. Development of arcing horn device for interrupting ground-fault current of 77kV overhead lines[J]. *IEEE Transactions Power Delivery*, 2005, 20(4):2570-2575
[21] Ohtak T, Iwata M, Tanaka S, et al. Development of an EMTP simulation model of arcing horns interrupting fault current[J]. *IEEE Transactions Power Delivery*, 2010, 25(3): 2017-2014
[22] Wang J F, Liu J L, Wu G Q, et al. Research and application of jet stream arc-quenching lighting protection gap (JSALAG) for transmission lines[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulatio*, 2015, 22(2), 782-788
[23] 王巨丰, 吴东, 李国栋, 等. 爆轰气流耦合电弧的仿真与试验[J]. 高电压技术, 2016,42(11): 3399-3403
[24] 王巨丰, 张华驿, 李籽剑, 等. 高速气流灭弧防雷方法熄灭直流电弧的有效性[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2472-2478
[25] 过增元, 赵文华. 电弧和热等离子体[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 77-83
[26] 戴琦, 王巨丰. 基于叠加性雷击防护的灭弧方法仿真分析[J]. 电瓷避雷器, 2018(1): 8-14
[27] 王巨丰, 吴东, 梁雪, 等. 10 kV 多间隙强气流灭弧防雷装置的仿真分析与试验研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(5): 1497-1502
[28] 王巨丰, 李世荣, 郭克竹, 等. 多断口自膨胀气流灭弧防雷间隙的灭弧机理[J]. 高电压技术, 2018, 44(12): 3896-3902
[29] 戴琦, 王巨丰, 郑传啸, 等. 配电网雷击防护压缩效应切分电弧游离特性[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2401-2406

Development and research on gas arc-extinguishing lightning protection methods

Yang Qianying, Wang Jufeng, Li Xinru, Wang Guofeng
(College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004)

Abstract

Lightning is the first accident source of the power system, which causes a high accident rate of tripping and broken line, seriously affecting the reliability of system power supply and user's power stability and safety. Nowadays, there are several bottlenecks in transmission line lightning protection such as multiple lightning stroke, back flashover in high soil resistivity area and shielding failure in canyon. Particularly, high probability multiple lightning stroke is the main reason causing the high rate and long-term stability of lightning accidents. Technology of gas arc-extinguishing lightning protection is a new lightning protection model, whose working principle is that the arc is extinguished quickly after the lightning strike overvoltage of the insulator bypass forms an arc, which prevents the subsequent power frequency continuation. The protecion effect is not affected by lightning strike type, intensity, pattern, and position, which realizes effective control of lightning accident rate. It is believed that the lightning protection method will be applied and developed in a wider field with the further research.

Key words: gas arc-extinguishing, lightning protection method, solid phase arc-extinguishing, compression arc-extinguishing