

输电线路雨雪冰冻灾害防治研究

吴军

中电投陵川新能源发电有限责任公司, 山西 晋城 048300

摘 要： 输电线路作为电力系统中的重要组成部分，在维持电网安全稳定运行中起着重要的作用。受恶劣天气影响，输电线路经常发生雨雪冰冻灾害，严重威胁电网安全运行。为此，本文结合近年来输电线路雨雪冰冻灾害事故调查，分析了雨雪冰冻灾害的成因、特点及影响，对雨雪冰冻灾害防治提出了建议。

关 键 词： 输电线路；冰冻灾害；防治

Study on Prevention and Control of Transmission Line Freezing Disaster

Wu Jun

CLP Investment Lingchuan New Energy Power Generation Co., Ltd. Jincheng, Shanxi 048300

Abstract： As an important component of the power system, transmission lines play a crucial role in maintaining the safe and stable operation of the power grid. Affected by adverse weather conditions, transmission lines often suffer from rain, snow, and freezing disasters, posing a serious threat to the safe operation of the power grid. Therefore, this article combines the investigation of rain, snow, and freezing disasters on transmission lines in recent years, analyzes the causes, characteristics, and impacts of rain, snow, and freezing disasters, and puts forward suggestions for the prevention and control of rain, snow, and freezing disasters.

Keywords： transmission lines; frozen disasters; prevention and control

引言

在入冬和初春之际，当前部分山区风电场集电线路存在覆冰的情况。如何才能根据当地的环境因素通过合理的设计来重新优化线路设计，如何在日常运行过程中通过技改和提前维护等手段，更要在发生集电线路覆冰后现场如何采取各种手段，提前消除覆冰产生的条件是解决线路覆冰的重要方法。更要结合风电场发生覆冰后所存在的电网并网问题制定有效的管理标准，可以全面的提升水平，从而可以更好的促进我国线路覆冰的发展。

一、正文

（一）雨雪冰冻灾害的特点

1. 低温、雨雪、冰冻灾害多

我国是一个低温、雨雪、冰冻灾害频繁发生的国家，从20世纪80年代初至今，低温、冰冻灾害共造成了近5000万人的伤亡。我国冬季的平均气温为 $-20^{\circ}\text{C} \sim -5^{\circ}\text{C}$ ，最低气温可达 -30°C 。南方电网输电线路经过的地区均属于低温、雨雪、冰冻灾害易发地区，在低温、冰冻灾害期间，由于气温低，使得冰层增厚，冰雪融化后与覆冰的导线相碰而引发跳闸甚至倒塔事故；在低温，由于气温低，覆冰较薄，冰层随风飘落在导线上或沿线路架设的绝缘子串上引起闪络或造成大面积的覆冰；由于导线温度低而结冰时，导线与覆冰间的接触电阻变小，甚至不能导通。同时由于覆冰引起的导线弯曲变形和过电压使导线产生断线而断线。由于覆冰引起线路通道堵塞使输电线路无法正常运行，

严重时会导致线路跳闸或大面积停电事故。^[1]

2. 线路档距大，绝缘子串易覆冰

输电线路导线之间的距离和档距越大，覆冰的可能性就越大。当导线档距大于绝缘子串长度时，导线覆冰将不会发生在绝缘子串上。在大档距情况下，由于导线与绝缘子之间的距离较大，会出现很高的导线覆冰，绝缘子覆冰时，由于风压较高，会使绝缘子表面产生很大的静力冻胀力，绝缘子表面形成严重的凝霜，使得绝缘子发生闪络。当覆冰厚度达到一定程度时，会使绝缘子发生倒塔，甚至导致输电线路倒塔事故。另外在风载荷的作用下，绝缘子表面形成一层冰层，它对其自身产生很大的推力，导致绝缘子串抗张力下降、闪络。因此在实际运行中应对不同档距及不同绝缘子型式的线路进行覆冰监测。^[2]

3. 线路故障点多，抢修难度大

电网正常运行时，线路的故障点主要集中在跨越建筑物、输电通道及其他特殊区段，而一旦线路出现故障，抢修人员要在最

作者简介：吴军（1987.04—）男，汉族，山西省长治市潞州区，本科，工程师。研究方向：新能源发电与并网。

短时间内对线路进行抢修,确保电网安全稳定运行。受地理环境影响,输电线路跨越城镇、村庄、学校、厂矿、公路等地方较多,这些地方一般都有大量的临时建筑物、施工工地、架空输电线路通道。一些重要的供电线路还穿越铁路,导致发生停电事故时铁路和沿线列车运行受阻,给抢修工作带来很大困难。由于在恶劣的天气条件下进行抢修,加之没有可供参考的相关技术资料 and 施工经验,线路抢修工作难度很大。特别是一些新建线路和部分地区的架空输电线路还处在施工阶段或尚未完成施工阶段,无法及时恢复供电,造成了较大损失。^[3]

（二）雨雪冰冻灾害对输电线路造成的影响

1. 气象条件

气象条件是影响输电线路覆冰的主要因素之一,包括温度、风速、气压、湿度、降水量等,其中风速和降水对覆冰的影响尤为突出。目前针对覆冰天气的研究主要是基于大气边界层理论和覆冰模型进行。

覆冰的形成是由于大气中冰层与大气之间的热交换引起空气湿度增大,空气中的水蒸气凝结成水滴或冰晶,然后在导线表面形成覆冰。由于输电线路覆冰过程是一个多物理场耦合的动态变化过程,气象条件复杂多变,因此当前主要以模型试验的方式研究气象条件对覆冰形成过程的影响。

研究表明,当大气边界层高度越高,大气相对湿度越大,越容易形成冰层;当空气中水汽含量较高时,则更容易形成覆冰。当风速达到一定程度时,气流与冰层之间的热交换减弱,此时冰层融化并逐渐增大;而当风速达到一定程度时,气流与冰层之间的热交换增强,此时冰层融化并逐渐减小。^[4]

2. 覆冰灾害

覆冰是指在温度较低的天气条件下,大气中的水分凝结在输电线路杆塔或绝缘子串上,并在一定条件下形成冰,导致杆塔或绝缘子串发生舞动、线路发生覆冰、绝缘子串间发生闪络、绝缘子串覆冰融化、导线断裂等现象。根据形成条件,覆冰可以分为自然覆冰和人工覆冰。自然覆冰指由风引起的覆冰,通常不会对线路造成严重破坏,但是容易引起绝缘子、金具等部件的损伤;人工覆冰是指由机械外力引起的覆冰,通常对线路造成较大破坏。随着我国经济的快速发展,输电线路承担着越来越大的输电负荷,特别是南方地区输电线路的建设和运行中遇到的最多的问题就是覆冰问题。^[5]

3. 冰闪

冰闪是指在覆冰后的导线或绝缘子串表面闪络,即导线或绝缘子表面产生电弧现象,也叫覆冰闪络。其形成原因是覆冰后的导线或绝缘子串覆有不均匀的冰层,冰层随风摆动或因覆冰导致局部过冷,从而形成局部过冷的区域。当冰层表面电压超过该区域绝缘强度时,就会出现电弧。当风吹过或者覆冰使导线或绝缘子串覆有不均匀的冰层时,导线或绝缘子表面就会出现局部电弧,即产生冰闪。

与常规闪络相比,冰闪具有以下几个特点:

- (1) 闪络过程短,只有几毫秒的时间;
- (2) 闪络过程中伴随着放电现象;

- (3) 闪络过程中具有瞬间放电的特性;
- (4) 闪络过程中产生较强的弧光。

4. 覆冰故障

输电线路覆冰主要是指线路上覆有冻结的冰雪,是一种常见的电力系统故障。其表现为导线表面覆冰,使导线与空气间的正常能量交换发生改变,从而产生短路、过电压、闪络等一系列电气故障。此外,当覆冰程度较大时,可能造成输电线路断线、倒塔、杆塔倒塌等严重后果。由于输电线路的特殊性,在实际运行中往往难以准确预测其覆冰情况。因此,有必要对输电线路的覆冰特性进行研究。

输电线路覆冰是指在气候条件下,在导线表面形成一层类似冰层的覆盖物。冰层由0℃左右的固态水冻结而成,其主要成分为水、氯化钙和二氧化硅等。覆冰以垂直和水平两种形式存在于输电线路。其中垂直覆冰指冰层沿线路方向垂直于导线表面分布;水平覆冰指冰层垂直于导线表面分布。若某一区域的覆冰密度大于该区域的最大覆冰密度,则该区域会出现覆冰现象。水平覆冰又分为沿导线表面水平分布的覆冰和沿导线高度方向均匀分布的覆冰两种形式。^[6]

对于不同类型的输电线路,其覆冰率不同,且不同地区的覆冰率也存在一定差异。线路覆冰主要有以下几种类型:(1)直线档和耐张档冰凌间的串联间隙;(2)耐张档冰凌间串并联间隙;(3)耐张档冰凌间串并联间隙;(4)耐张档冰凌间串并联间隙;(5)耐张档冰凌间串串联间隙。

（三）输电线路雨雪冰冻灾害防治措施

1. 防冰措施

在输电线路防冰措施中,除采用现有的防冰型式外,还应根据输电线路实际运行情况,因地制宜地选择合理的防冰措施。目前,我国线路防冰主要采用“被动防冰法”和“主动防冰法”两种方法。“被动防冰法”主要是在线路设计、建设、运行过程中,采用各种防冰措施来防止和减轻线路覆冰。例如,在线路设计时尽量采用大跨越和大档距的导线,使导线表面不接触或少接触覆冰;在杆塔设计时尽可能采用高塔大档距、高跨比,以减少导线的覆冰厚度。另外,还可在线路设计中采用一些防冰措施,如增加档距、更换大直径导线、加装舞动补偿器等。“主动防冰法”主要是通过改变输电线路的运行条件来达到防止或减轻覆冰的目的。例如,当风速大于5m/s时,输电线路必须采取除冰措施;当覆冰厚度大于15 mm时,必须采取除冰措施。另外,在输电线路运行过程中还可采取一些其他措施来防止或减轻覆冰。例如,在导线表面喷涂防污闪涂料(一般是指环氧树脂、聚氨酯、氯丁胶等);在导线上加装机械防冰器(如双闪线、V型挂线等);采用复合绝缘子串(即两片或多片绝缘子)等。此外,在输电线路的设计和运行中还应尽可能提高输电线路的抗覆冰性和融冰性。当线路运行过程中出现覆冰或断股现象时,要及时分析原因并采取措措施加以消除;当某一区段发生覆冰或断股时,要尽量缩短该区段的持续时间或提高该区段的持续运行电压。^[7]

2. 线路设计

根据线路运行环境和线路功能的不同,输电线路设计可分为

常规设计、特殊设计和综合设计。常规设计是根据现场情况对杆塔结构、线径和档距进行简单计算，通常不考虑覆冰条件下的弧垂和振动等因素，例如常规设计中的直线塔、耐张塔、转角塔、终端塔等。特殊设计是根据现场实际情况，对线路的结构进行优化，从而改善导线覆冰情况下的运行特性，例如采用耐张塔防弧垂优化、导线截面优化、增加金具数量等。针对输电线路覆冰情况下的运行特性，有必要对输电线路的结构进行全面的优化。结合不同的线路功能和沿线环境，需要进行输电线路结构、线径、档距、弧垂和振动等因素的综合分析。根据相关规范要求，综合考虑运行安全、检修维护方便和经济性等因素，可以采用以下两种方法对输电线路结构进行全面优化：（1）以现有工程为基础，参考类似工程经验，结合当地覆冰情况进行合理设计；（2）根据现场实际情况对现有工程进行改造完善。^[8]

3. 线路运维

输电线路运行中，除了做好防冰措施外，还需要对输电线路进行不定期巡检。输电线路运维的目的是确保输电线路能够安全稳定地运行。具体的运维工作包括：（1）在输电线路发生故障时，要根据故障情况对线路进行倒闸操作，并对故障线路进行详细记录；（2）定期对输电线路进行巡视，巡视内容主要包括：对杆塔的倾斜情况进行检查；对塔身变形情况进行检查；对防振锤和拉线销是否锈蚀情况进行检查；对于易覆冰杆塔的导线是否存在断股情况进行检查；（3）根据线路实际运行情况，制定合理的应急预案，一旦出现了故障，能够及时组织人员抢修。另外，还要对停电作业进行详细记录和说明；（4）定期对输电线路的绝缘子状态进行分析，确保绝缘子无损伤、无破损和无闪络现象。^[9]

4. 提高现有输电线路的抗冰雪能力

在输电线路设计时，考虑了线路的抗冰性能，但由于我国特殊的气候条件，覆冰厚度和导线舞动的问题是输电线路设计时的一个难点。目前我国电网中大部分输电线路为直线塔，但由于受地形影响，部分导线档距较大的直线塔不能满足抗冰要求。部分输电线路架设在山区中，输电线路走廊狭窄，杆塔对地距离较小，且受地形影响较大。这些因素都导致了直线塔抗冰能力较差。对于部分特殊地段（如山区、高海拔地区），直线塔抗冰能力难以满足要求，需要架设耐张塔以增加线路抗冰雪能力。在实

际输电线路设计时，可采用增加档距、加强绝缘、改造杆塔等方式提高输电线路抗冰雪能力。其中，改造杆塔主要是利用现有输电线路杆塔进行改造，可根据实际情况将现有输电线路杆塔改造为耐张塔来增加输电线路的抗冰雪能力。^[10]

5. 开展覆冰监测工作

输电线路覆冰的危害主要是由于在低温作用下，输电线路产生了结冰现象，从而导致输电线路的绝缘子串发生闪络或者是覆冰断裂等情况。因此，开展输电线路覆冰监测工作是防治输电线路雨雪冰冻灾害的有效手段之一。通过对输电线路进行现场勘察来进行覆冰的监测。由于不同地区的地形、气候等因素不同，所以在进行输电线路覆冰监测时必须根据实际情况选择合适的方式，如：使用红外线测温仪、光学测量仪等。如果对输电线路进行覆冰监测时不能利用以上方式，那么可以使用人工巡视方式对输电线路进行覆冰监测。在对输电线路进行覆冰监测时可以利用在线监测系统来对其进行覆冰监测。如：在某地区设计了一套基于 LCDS 系统的在线覆冰监测系统，该系统主要包括覆冰量计算模块、覆冰预警模块、信息发布模块和覆冰测站模块等。其中，信息发布模块中的通信接口与电力部门的网络连接，可以通过通信接口向其他部门发送相关数据。在开展输电线路覆冰预测工作时可以根据历史数据来对其进行分析和预测。如：在某地区设计了一套基于 GIS 的输电线路覆冰预测系统，该系统主要由数据处理中心、GIS 仿真平台以及软件三个部分组成。通过对该系统中的数据进行分析 and 处理可以实现对覆冰的预测和分析。

二、结论或结语

从宏观上讲，受气候变化和人类活动等因素影响，雨雪冰冻灾害对电网造成的影响具有一定的随机性和不确定性。从微观上讲，覆冰会严重影响输电线路的安全稳定运行，增加输电线路故障率。从后果上看，覆冰后线路跳闸、故障停电等情况不仅会影响电网的安全运行，还会引发供电中断、用户停电等连锁反应。因此，深入开展冰雪灾害对输电线路的影响研究，建立科学合理的冰雪灾害评价指标体系和评估模型，是当前迫切需要解决的问题。

参考文献

- [1] 刘俊博, 金鹏, 李守学, 等. 高寒地区雨雪冰冻灾害分析及友好型电网防灾措施 [J]. 吉林电力, 2022, 50(5):9-12.
- [2] 樊灵孟, 龚博, 高锡明, 等. 低温雨雪冰冻灾害监测预警技术与业务实践 [J]. 中国减灾, 2022(23):4.
- [3] 张展. 应急管理部启动低温雨雪冰冻灾害四级应急响应 [J]. 现代职业安全, 2023(2):1.
- [4] 陈鹤, 朱旭东, 辛业春. 覆冰输电线路除冰技术研究综述 [J]. 吉林电力, 2022, 50(6):30-34.
- [5] 马国平. 防覆冰涂料在输电线路上的应用探析 [J]. 智慧中国, 2022(10):2.
- [6] 林洁. 战雨雪 迎新春 保安全——我省早谋划严部署应对低温雨雪冰冻恶劣天气 [J]. 湖南安全与防灾, 2022(2):2.
- [7] 王金生. 低温雨雪冰冻灾害的应急通信保障对策 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 自然科学, 2022(5):3.
- [8] 向楠, 巩远发, 李卓敏. 青藏高原东部和西南地区低温冰冻雨雪事件的时空变化特征 [J]. 高原气象, 2023, 42(1):12.
- [9] 舒征宇, 沈佑源, 李黄强, 等. 基于航拍图像的输电线路覆冰厚度辨识研究 [J]. 中国测试, 2023, 49(4):21-25.
- [10] 贺敏恒, 方博, 汤杰, 等. 输电线路无人机智能巡检 [J]. 电脑乐园, 2021(8):0219-0220.