

输电线路地线直流融冰 技术与应用

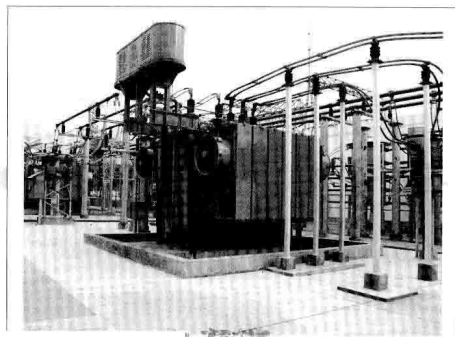
■ 徐望圣 严国志 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社

输电线路地线直流融冰 技术与应用

徐望圣 严国志 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

输电线路地线直流融冰技术与应用/徐望圣,严国志编著. —武汉:武汉大学出版社,2015.5

ISBN 978-7-307-15365-3

I. 输… II. ①徐… ②严… III. 输电线路—冰害—灾害防治
IV. TM726

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 042465 号

责任编辑:李汉保 责任校对:李孟潇 版式设计:马 佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:武汉中远印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:10.5 字数:242千字 插页:1

版次:2015年5月第1版 2015年5月第1次印刷

ISBN 978-7-307-15365-3 定价:39.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

编撰委员会

主任 徐望圣 严国志

编委 杨泽明 尚 涛 周文俊

田应富 陆 岩 李 三

内 容 简 介

本书依托中国南方电网有限责任公司超高压输电公司输电线路直流融冰运行实践及相关科研项目成果，通过对国内外现有融冰技术的原理和装置及应用情况的全面调研以及分析研究的基础上编写而成。全书主要介绍了输电线路覆冰的危害、分类、等级；电流融冰原理及数学模型；临界融冰电流，融冰时间，最大融冰电流，最大融冰长度，融冰影响因素；直流融冰装置及其融冰方法，利用换流站装置的直流融冰方法，交流、直流融冰方法比较；地线融冰的特殊性，地线全绝缘对线路的影响，融冰时地线绝缘间隙的选择，地线融冰接线方式；地线融冰自动接线及装置；OPGW 地线融冰，OPGW 温度特性，融冰通流温升对 OPGW 的影响；地线融冰实例等。本书内容翔实、图文并茂，理论分析、实验研究及工程应用全面深入，反映了输电线路地线直流融冰最新技术成果，具有很强的实用性和指导性。

本书可以作为高等学校相关专业本科生、研究生的教材，也可以供高等学校教师以及从事输电线路融冰技术研究、设计、运行、维护等方面的专业技术人员和管理人员阅读参考。

前 言

改革开放以来,我国电力工业一直保持着快速发展。目前,我国已形成由东北、西北、华北、华东、华中和南方电网互联的大区域电网,基本实现“西电东送、南北互供、全国联网”的发展格局。

电力系统是国家建设的基础,是国民经济的命脉。然而,近年来各类灾害气候如冰灾、地震、洪水、山火等频繁发生,给电力系统安全稳定运行造成了巨大威胁。在电力系统遭受的各种自然灾害中,冰灾是电力系统最为严重的灾害之一。与其他事故相比较,冰灾给电网造成的损失往往更为严重。受大气候、微地形、微气象条件的影响,又因为发生冰灾事故时往往天气恶劣、冰雪封山、交通受阻、通信中断、抢救十分困难,往往造成系统长时间停电,给工农业生产及人民生活造成严重影响,经济损失惨重。电力系统在工程运行中如何应对电网覆冰带来的危害,成为一项重要的课题。

为抵御低温雨雪冰冻灾害,自2008年以来,中国南方电网超高压输电公司开展了多项融冰技术项目研究,多次开展地线直流融冰,对重冰区的线路及地线进行了加固、改造。同时为了满足地线在覆冰条件下的融冰需求,开展了地线绝缘改造,利用绝缘子和间隙将地线与杆塔绝缘隔离。完成了500kV线路地线(OPGW)全绝缘节能降耗与融冰技术研究与实施,地线融冰自动接线装置研制等课题。输电线路相导线融冰技术的研究和应用已较为普遍,但对于地线融冰技术的研究和应用还相对滞后。为促进输电线路融冰最新技术成果的推广应用,本书对中国南方电网超高压输电公司输电线路直流融冰相关科研项目成果进行总结,结合国内外现有融冰技术的原理和装置及应用情况进行全面调研及分析研究,力求反映输电线路地线直流融冰最新技术成果。

本书由中国南方电网有限责任公司超高压输电公司贵阳局和武汉大学电气工程学院联合编写,参加本书编写的人员为从事输电线路及融冰技术电网运行管理及研究方面的专业技术人员。本书由徐望圣、严国志主编,杨泽明、尚涛、周文俊、田应富、陆岩、李三参加编写。本书使用了众多的项目研究报告和相关的参考文献,他们的成果为本书的编写提供了丰富的资料。武汉大学出版社为本书的出版做了大量的工作。他们的辛勤付出得以使本书顺利出版。在此一并表示衷心的感谢!

输电线路地线直流融冰技术及应用涉及众多学科及领域,还有许多问题有待完善和解决,书中涉及的许多技术及应用方面的问题还可以有不同的解决方法及手段,限于作者水平及工作的局限,难免有不妥及错误,敬请读者批评指正。

作 者

2014年8月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 覆冰的危害	2
1.2 覆冰的分类	6
1.3 输电线路覆冰等级	7
参考文献	9
第 2 章 电流融冰数学模型	11
2.1 电流融冰的计算模型	11
2.2 融冰电流的主要影响因素	17
参考文献	20
第 3 章 直流融冰装置和融冰方法	21
3.1 直流融冰装置	21
3.2 直流融冰装置的融冰方法	27
3.3 利用换流站装置的直流融冰方法	30
3.4 交流直流融冰方法比较	32
参考文献	34
第 4 章 地线融冰	36
4.1 地线融冰的特殊性	36
4.2 地线全绝缘对线路的影响	39
4.3 地线绝缘间隙的选择	49
4.4 地线融冰接线方式	60
参考文献	65
第 5 章 地线融冰自动接线装置	67
5.1 地线融冰自动接线	67
5.2 地线融冰自动接线装置方案	68
5.3 地线融冰自动接线装置的设计	71
5.4 地线融冰自动接线装置主要部件	73
5.5 装置安装	85

5.6 操作步骤.....	86
5.7 装置应急预案.....	89
5.8 装置试验.....	90
参考文献	92
第 6 章 OPGW 地线融冰	93
6.1 OPGW 温度特性.....	93
6.2 融冰通流温升对 OPGW 的影响	106
参考文献.....	115
第 7 章 地线融冰实例.....	117
7.1 500kV 青山乙线地线融冰实例(纯普通地线)	117
7.2 ± 500 kV 高肇直流地线融冰实例(纯普通地线)	126
7.3 500kV 青山甲线架空地线融冰实例(OPGW+普通地线)	134
7.4 ± 500 kV 溪洛渡右岸电站送电广东地线融冰实例(OPGW+普通地线)	145
参考文献.....	157

第1章 概述

改革开放以来，为适应经济快速发展，我国电力工业一直保持着快速发展，1987 年我国发电装机容量突破 1 亿千瓦，1995 年装机容量突破 2 亿千瓦，2005 年跨越了 5 亿千瓦大关，到 2010 年，我国装机总容量接近 10 亿千瓦。目前，我国已形成由东北、西北、华北、华东、华中和南方电网互联的大区域电网。

电力系统是国家建设的基础，是国民经济的命脉，随着国家经济的快速发展、居民生活水平的提高，现代社会要求电网提供优质可靠的电力供应。然而，近年来各类灾害气候（如冰灾、地震、洪水、山火等）的频繁发生，给电力系统的安全稳定运行带来了严重影响，在电力系统遭受的各种自然灾害中，冰灾是电力系统最为严重的灾害之一。与其他事故相比较，冰灾给电网造成的损失往往更为严重，轻则发生冰闪，重则造成倒塔（杆）、断线，甚至使电网瘫痪。电力系统在工程运行中如何应对电网覆冰带来的危害，成为一项重要的课题。

我国是世界上覆冰最为严重的国家之一，历史上曾经多次发生大规模的冰灾事故，覆冰对我国电力系统造成了非常严重的破坏，如图 1.1 所示。从 2008 年我国遭受严重冰雪灾害袭击之后，南方电网公司、国家电网公司及部分省市气象局加强了电网覆冰领域的研究力度，并取得了诸多成果，为电网防冰、减灾工作做出了巨大贡献。随着我国电网建设规模的不断扩大，输电线路将不断增加，面临冰雪灾害的挑战将会越来越严峻。因此，迫切需要不断加强对电网覆冰及防冰、融冰技术的深入研究，以确保电力系统在冰灾期间能够稳定运行，保证电力可靠供应。

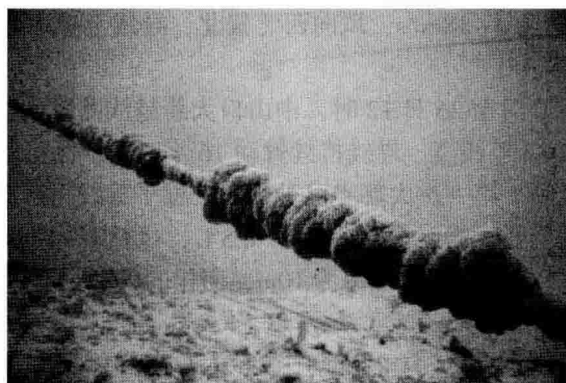


图 1.1 输电线路覆冰

1.1 覆冰的危害

输电线路的覆冰涉及的学科众多,如大气科学、大气探测、地质学、水文学、信息科学、统计学和材料学等,需从大气候、地形地貌、微地形和微气象等角度对电网覆冰问题进行研究。虽然国内外对短期气象预报准确性已经有了很大提高,但仍没有可靠的理论和技术对长期的气象预报提供支撑,因而难以完成对电网覆冰规律的长期预测和中期预测。我国对输电线路覆冰的研究始于20世纪50年代,最早有记录的输电线路冰害事故出现在1954年。近年来,覆冰事故的频繁发生,已经严重危及了我国电力系统的安全运行。以下是1961年至今我国发生的几次严重冰害事故。

云南省1961—1989年间在35~220kV输电线路共发生了101次各种覆冰事故,其中断线事故50次,倒塔事故16次,永久接地短路事故19次。1961年1月至2月,滇东北地区4条35~110kV输电线路因严重覆冰造成的线路故障跳闸和设备损坏共计22次。1974年2月8日至13日,110kV曲富线由于雨淞覆冰严重(达80mm),使120~127号杆塔线路倒塔2基,爆破压接管拉脱6处。

从1984年1月18日至2月18日的32天中,由于覆冰,贵州全省架空输电线路跳闸事故不断,最严重的一次覆冰使贵州电网解裂分为四块,即贵阳、都凯、六盘水、遵义地区,全省有27.37%的线路跳闸,共131条次,平均每天跳闸4次,系统内倒塔(杆)44基,断导线横担23处,断地线横担30处,断导线150处,断架空地线101处,导线断股141处,杆塔产生严重形变、裂纹28基,导线地线在线夹处断股或抽出11处,U形拉环损坏3处,共损坏线路74条、226.5km,直接经济损失522万元,农村用户线路倒杆7613基,断横担522套,损坏线路272条、667km,直接经济损失达432万元。

1987年2月19日至21日,鄂西钟祥境内中山口大跨越导线发生了第一次强烈的覆冰舞动,大跨越过江塔塔身可感摇晃,横担顺线摆动,金具响声很大。“姚孟电厂—双河变电站”、“双河变电站—凤凰山变电站”2回500kV线路六相全部舞动,相导线舞动最大峰峰值达10m,舞动造成大量金具、护线条损伤。相子导线中有三根碾压磨损。导线舞动时气温为 $-19\sim-3^{\circ}\text{C}$,风速为 $4\sim 18\text{m/s}$,风向西北偏北,导线上覆冰呈月牙形,最厚处冰为15mm,冰型为雨淞覆冰。

1988年12月25日0时至26日12时,中山口大跨越线路发生了第二次强烈的覆冰舞动,导线舞动情况与1987年相当。导线持续舞动16小时后,原已受损的上相子导线断落江中,造成相间短路跳闸。第一次大舞动已受损的三根子导线再次磨损,导致一根子导线断裂,两根子导线严重受伤。当时气温 $-19\sim-4.5^{\circ}\text{C}$,风速 $8\sim 18\text{m/s}$,风向为北风偏西,月牙形冰最厚处18mm,导线舞幅峰峰值为10m,变化的舞动频率分别为9.15次/min、24次/min、42次/min。

1990年1月29日14时至31日2时,中山口大跨越导线发生了第三次大的覆冰舞动事故。这次事故中,由于预先采取了防舞动措施,安装了集中防振锤的外相没有舞动,但其余五相均发生舞动,舞动幅度最大峰峰值为8m。其中,安装分布失谐摆和双摆稳定防舞器的三相中,1~3个半波的舞动稍有削弱,高阶舞动受到抑制,当舞动伴随约 38° 的扭

转时,舞幅达最大值。当时气温为 $-8\sim-1.5^{\circ}\text{C}$,风速为 $2\sim 18\text{m/s}$,风向为西北风,月牙形冰最厚处估计为 $15\sim 23\text{mm}$,舞动频率为 15.6次/min 。

1991年12月24日6时至27日8时,中山口大跨越发生了受到明显抑制的覆冰导线舞动。这次事故中,除采用防振锤防止舞动的上相发生了频率为 $18\sim 21\text{次/min}$ 、最大峰峰值为 2m 的四个半波舞动外,其余五相都未发生舞动。但是,采用集中防振锤防止舞动的四相在跨越档中部的次档距子导线发生了频率为 84次/min 、峰峰值约为 0.5m 的鼓形振荡。

1992年10月3日至4日,青海省龙羊峡至西宁的2回 330kV 输电线路在日月山口地段发生了覆冰倒杆塔8基的重大事故,直接经济损失600多万元。这次覆冰事故是西宁地区罕见的雨淞覆冰造成的。

1993年11月15日16时至19日10时,中山口大跨越又一次发生了覆冰舞动。这次舞动时导线覆冰大大超过了历次舞动时的覆冰,2回线路六相导线都出现了小舞动,最大峰峰值为 2.5m 。次日上午风速稍减,舞动即停。当时气温 $-3\sim 0^{\circ}\text{C}$,风速 $8\sim 16\text{m/s}$,月牙形覆冰最厚处为 $38\sim 48\text{mm}$,导线舞动频率为 12.24次/min 。

1993年11月19日,葛双II回 500kV 线路在距离荆门市 19km 处的海拔约 500m 的山上出现了严重覆冰。严重覆冰造成了231~237号七基杆塔倒塌、230号塔局部变形,231号杆塔左相线夹小号侧和235号杆塔左相线夹大号侧的四根子导线全部被拉断,237号杆塔左相线夹大号侧一根子导线被拉断,倒塌杆塔上绝缘子大部受损,部分金具损坏。这次覆冰是受强冷空气南下的影响,荆门地区出现严重覆冰的微气象条件造成的,当时气温约为 -5°C ,风速为 15m/s ,导线覆冰 36mm 。

1994年11月16日7时, 500kV 葛双II回再次在1993年事故地段发生覆冰倒杆塔事故,232号拉猫塔头在K节点处向小号侧弯折,233~234号拉猫塔向山下偏小号侧倒塌,235号塔K节点上部中相横担瓷绝缘子串受拉脱落并滚落在大号侧山谷中,234号塔中相大号侧邻近线夹处的四根子导线被拉断,235号塔大号侧右地线断落至山谷中。当时最低气温 -1.5°C ,伴有冻雨,风向为北偏西,最大风速为 17.1m/s 。

1999年3月12日至17日,京津唐地区出现持续时间近一周的大雾,部分地区有雨雪,气温在 0°C 左右。绝缘子覆冰造成京津唐电网10条线路47次闪络,闪络线路涉及的电压等级包括 110kV 、 220kV 及 500kV 。事故持续时间之长、范围之大,均为1990年大面积污秽闪络以来之最。

2001年12月, 500kV 葛双II回线路因严重覆冰致使B相线路两次接地,引起线路跳闸。覆冰闪络使233号杆塔B相左、右串第一片瓷瓶、钢帽及导线侧均压环均有放电,绝缘子有明显烧伤痕迹。当时气温为 $-2\sim 0^{\circ}\text{C}$,覆冰厚度约为 80mm 。

2004年12月至2005年2月,我国华中电网,特别是湖南、湖北电网,遭遇历史上时间跨度最长、范围最广的严重覆冰灾害。数千公里长的电网设施出现覆冰现象,一些地段覆冰厚度达到 $80\sim 100\text{mm}$,严重超出了 $10\sim 20\text{mm}$ 的设计标准。严重覆冰导致华中电网 500kV 线路多次跳闸,高压输电线路多处倒塌,电网结构遭到破坏。重庆东南地区遭遇20年一遇的特大风雪袭击,覆冰厚度 $50\sim 70\text{mm}$ 。 220kV 黔秀西线的127号、128号两基铁塔因覆冰过重而倒塌,黔秀西线97号、129号铁塔分别倒塌。

2008年初,低温雨雪冰冻天气覆盖我国南方、华中、华东地区,导致贵州、湖南、广东、云南、广西和江西等省出现输电线路大面积、长时间停运,造成全国范围36740条输电线路停运,2018座变电站停运,110~500kV线路共有8381基杆塔倾倒及损坏,全国共170个县发生供电中断情况。南方电网供电区域的贵州大部分地区、广西桂北地区、广东粤北地区和云南滇东北地区电网设施遭受到严重的破坏。这次冰灾给国民经济和人民生活造成巨大损失,仅南方电网的直接经济损失就达150多亿元。

国外也有类似的案例。从1998年1月5日0时开始,美国东北部和加拿大东南部冻雨持续了6天,降水量惊人。从Ontario东南部和纽约北部到魁北克的西南部,冻雨量累计超过80mm。这次冰灾对加拿大和美国造成了巨大的经济损失,其中加拿大的Ontario东南部和魁北克南部省份的受灾情况最为严重。严重覆冰导致大量输电线路铁塔倒塌,电力供应中断,交通堵塞,通信异常,最后约60万人撤离家园,10万人需要到临时收容站避寒。这次冰灾中,Hydro Québec的电力网络超过3000km受到冰灾影响,造成1000座高压输电杆塔、30000座配电杆塔倒塌,4000台变压器需要修复。Hydro Québec和Ontario Hydro电网系统的维修费用大约为10亿加元。美国在持续和大范围的电力中断下,20条主要输电线路、13000座电线杆塔、1000台高压设备和5000台变压器需要更换,费用高达1750万美元。此次冰灾使470万加拿大人和50万美国人受到停电影响,其中40万户居民停电超过两个星期,电网系统的修复直到10月份才完成。据估算,冰灾给美国、加拿大造成的经济损失约为35亿美元。

此外,德国在2005年11月的冰雪灾害造成超过70条输电线路杆塔倒塌断线,约20万人受此次事故停电影响,如图1.2所示。



图1.2 输电线路覆冰断线

我国是世界上受冰灾影响最大的国家之一,基本上每年都会发生输电线路覆冰的情况,而且每隔数年便会发生一次较为严重的冰灾事故。相对其他电力设备,覆冰对输电线路和绝缘子串等造成的危害最大,按对线路及与之相连接的设备造成的危害可以分为以下几类:

1. 输电线路覆冰自重过荷载

冰冻期间,气温过低,过冷却水滴随风在天空中运动,与输电线路和绝缘子串等设备发生碰撞而凝结成椭圆形覆冰;雨雪天气,雪花飘落在输电线路和绝缘子等设备上,逐渐堆积造成线路覆冰。在冰荷载、风力荷载和导线自重荷载等的共同作用下,覆冰线路弧垂增大,杆塔承受压力增大。当覆冰较为严重时,输电线路由于覆冰不均匀而导致长度不一致,在风力或其他力的作用下,输电线路之间或输电线路与地之间极易发生碰撞,造成相间短路、相对地短路等故障,极易引起跳闸、烧焦、以致线路烧断等事故。当线路覆冰极为严重时,则会造成导线直接从压接管内抽出、钢芯错位、变形、断股、断线、绝缘子串扭转、绝缘子串与跳跃线路发生碰撞而导致碎裂、杆塔折断或倒塌等事故。

2. 绝缘子串发生覆冰闪络

悬挂在铁塔上的绝缘子覆冰后,当过冷却水滴持续飘落在冰凌表面时,水膜将溶解污秽物中的电解质,大大提高了冰面水膜的导电率,使绝缘子的绝缘强度大大减小,导致覆冰绝缘子串的闪络电压出现较大降低。随着冰水导电率的不断增大,泄漏电流也会随着增大,当泄漏电流大到某一极限值时,则会形成闪络通道从而使输电线路发生短路故障。绝缘子串持续冰闪时产生的电弧容易烧伤绝缘子,造成其绝缘强度的永久性降低,过大的泄漏电流则会直接击穿绝缘子串或将金具烧伤甚至熔化。

3. 覆冰线路舞动

在风力和覆冰导线重力作用下,被拉长的覆冰线路极易发生舞动。据相关研究资料记载,在 $4\sim 15\text{m/s}$ 的风速作用下,覆冰线路会发生频率为 $0.1\sim 3\text{Hz}$ 、振幅达 10m 以上的低频摇摆。初始舞动阶段,线路一般只在平衡位置做小幅度振动;通常情况下,导线受到气动负阻尼作用,从而不断吸收风能,使得势能不断加强,振动振幅跟着增大;当振幅增大到某一较大值时,由于受到冰和覆冰线路质量的作用,导线的水平拉力超过其机械极限值,导致断股、断线、线路相间闪络、金具损坏、线夹变形、螺栓松动、线路跳闸停电、线路烧伤或杆塔倒塔等严重事故。据相关资料统计,我国南方地区的大部分 500kV 高压输电线路都曾发生过导线舞动事故,由于导线舞动造成断股、断线、相间短路等事故占 500kV 输电线路总事故的 23.5% 左右。如图 1.3 所示。

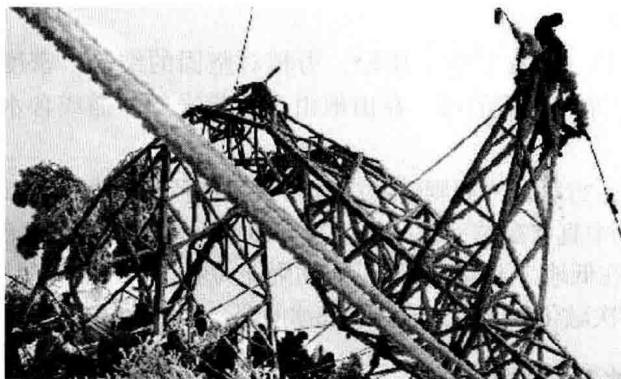


图 1.3 覆冰造成杆塔倒塔

4. 融冰、脱冰进程不同步

覆冰线路在气温升高、风力作用、人为敲击或采用交流、直流融冰技术等进行融冰时,冰结构会发生变化从而不断融化,导致不均匀脱冰或不同期脱冰现象。线路在脱冰过程中,其储存的势能迅速转化为动能,使导线发生几米至十几米的大幅度弹跳。在此过程中,由于瞬时拉力骤变,使得与线路相连接的其他线路或电力设施(如绝缘子、金具、防振器等)产生巨大的机械冲击作用,轻者引起线间短路或接地,造成连续性跳闸故障,重者会造成线路断股、断线、绝缘子损坏、横担翻转、折断或向上翘起、地线支架损坏等故障。

5. 覆冰影响电力通信线路

目前,我国仍有电力载波通信线路。当担负着电力载波通信功能的输电线路发生覆冰后,线路结构受到冰块挤压而发生形变,尤其是受到水平拉力作用而被拉长,结构变化会对输电线路中的通信信号产生影响,致使噪音增大,损耗增加;此外,覆冰不均匀的三相线路被拉长程度不一致,造成三相不对称,相间电磁场分布不对称。因此,覆冰的载波通信输电线路常常会造成通信信号杂音增加、信号减弱,致使通话声音不清晰等。

1.2 覆冰的分类

架空线路的覆冰,因其形成过程和所处环境的不同,其物理特性各有不同,对线路的危害程度也有不同。从覆冰形成条件和危害程度上大致可以分为以下几类:

1.2.1 按覆冰形成条件分类

(1)雨凇:纯粹、透明的冰,坚硬,可形成冰柱,密度在 0.9g/cm^3 或更高,粘附能力很强。在低地由过冷却雨或毛毛细雨降落在低于冻结温度的物体上形成,气温 $-2\sim 0^{\circ}\text{C}$;在山地由云中来的冰晶或含有大水滴的地面雾在高风速下形成,气温 $-4\sim 0^{\circ}\text{C}$ 。

(2)混合凇:不透明或半透明冰,常由透明和不透明冰层交错形成,坚硬,密度为 $0.6\sim 0.9\text{g/cm}^3$,粘附能力强。在低地由云中来的冰晶或有雨滴的地面雾形成,气温 $-5\sim 0^{\circ}\text{C}$;山地地形中,在相当高的风速下,由云中带来的冰晶或带有中等大小水滴的地面雾形成,气温 $-10\sim -3^{\circ}\text{C}$ 。

(3)软雾凇:白色,呈粒状雪,质轻,为相对坚固的结晶,密度为 $0.3\sim 0.6\text{g/cm}^3$,粘附能力颇弱。在中等风速下形成,在山地由云中带来的冰晶或含水滴的雾形成,气温 $-13\sim -8^{\circ}\text{C}$ 。

(4)白霜:白色,雪状,不规则针状结晶,很脆且轻,密度为 $0.05\sim 0.3\text{g/cm}^3$,粘附能力弱。水汽从空气中直接凝结而成,发生在寒冷而平静的天气,气温低于 -10°C 。

(5)雪和冻雨:在低地为干雪,密度低,粘附能力弱;在丘陵为凝结雪和冻雨或雾,质量大。粘附雪经过多次融化和冻结,成为雪和冰的混合物,可以达到相当高的质量和体积。

1.2.2 按覆冰危害程度分类

按覆冰的危害程度,导线有覆冰和积雪两种情况。导线覆冰可以分成白霜、雾凇、混

合淞和雨淞四类,积雪可以分成干雪和湿雪两类。应注意,按照分类方式不同,相同名称的覆冰种类的物理特点可能有所不同。

(1)白霜。空气中湿气与 0°C 以下的冷物体接触时,湿气在冷物体表面凝华形成白霜。白霜的形成不需要有过冷却小水滴的存在,其基本特性是针状或树枝状晶体,形成时风速通常相当小。在大多数情况下,当有白霜形成时,包含微小水滴的云或雾常与其共存。因此,自然形成的白霜是否纯粹由水蒸气凝华形成还需要结合实际情况考虑。微小的水滴凝结到晶体上有助于白霜的增长。白霜在导线的粘结力十分微弱,即使是轻轻振动,也可使白霜脱离所粘结导线的表面。与其他类型覆冰,如雾淞、混合淞及雨淞相比较,白霜几乎不对导线构成严重危害。

(2)雾淞。雾淞分为软雾淞和硬雾淞两种,导线上积覆雾淞时,常常是两者同时并存的。风携带雾中或云中的过冷却小水滴一个接一个不断与导线表面碰撞并冻结而产生雾淞。雾淞的最明显特征是外观成虾尾状或松针状,雾淞在导线或绝缘子上粘结点小,且常在迎风面增长。雾淞是冬季高寒高海拔山区输电线路最常见的一种覆冰形式,其颜色为白色,显微镜下呈颗粒状结构,软雾淞密度小于 $0.1\text{g}/\text{cm}^3$,硬雾淞密度在 $0.1\sim 0.5\text{g}/\text{cm}^3$ 之间。条件适宜时,雾淞增长速度很快,一夜之间覆冰厚度可达 $200\sim 300\text{mm}$ 。雾淞增长纯粹是由云中和雾中过冷却水滴碰撞线路或其他物体表面引起的,当云中有降雪存在时,过冷却水滴有时将雪花粘接到覆冰组织中,在这种情况下,线路可能被大量积雪覆盖。

(3)混合淞。混合淞是由导线捕获空气中过冷却水滴并冻结而发展起来的一种覆冰形式,以硬冰块的形式出现,透明或不透明,其结构为层状或板块形式,透明和不透明层交替出现。混合淞内部常捕获有孤立微小气泡的冰晶体,结构是密实的,不像雾淞以颗粒状结构形式出现。混合淞粘结能力极强,密度在 $0.6\sim 0.8\text{g}/\text{cm}^3$ 之间。当温度较低、风速较强时,混合淞能迅速增长。

(4)雨淞。雨淞是理论上透明的清澈冰。大多数情况下,雨淞是由过冷却雨滴或毛毛雨滴发展起来的,即冻雨覆冰。在云中覆冰情况下,如果空气温度高(如 $-2\sim 0^{\circ}\text{C}$),且过冷却水滴直径大(如 $15\sim 25\mu\text{m}$),覆冰以薄冰情况出现,这也是雨淞。在雨淞覆冰情况下,粘结到导线或其他物体上的水滴完全冻结之前,过冷却水滴的碰撞连续不断地发生,覆冰是连续增长的。雨淞覆冰形成过程中,冰面温度为 0°C ,从而使覆冰表面完全由一层薄薄的水膜覆盖。虽然雨淞覆冰也包含有一定的气泡,但与混合淞相比较,气泡含量少的多。雨淞覆冰是透明的,其密度接近理论上纯冰的密度,即 $0.913\text{g}/\text{cm}^3$,在实际工程中常将密度大于 $0.9\text{g}/\text{cm}^3$ 的冰称为雨淞。

(5)积雪。空气中的干雪或冰晶很难粘结到导线表面,只有当空气中的雪为湿雪时,导线才会出现积雪现象。在山区,有时雪片中混杂有过冷却水滴,水滴粘附在雪花上,这种情况下雪片容易粘附到所碰撞的物体上,这种现象称为覆冰,而不是积雪。导线积雪仅指当温度在 0°C 左右、风速很小时,湿雪粒子与水体一起通过毛细管的作用相互粘结到导线表面的现象。

1.3 输电线路覆冰等级

我国南方九省市处于冰灾易发区域,该区域的输电线路覆冰问题一直困扰着电力工作

人员。由于电网庞大，输电线路众多，分布广泛，输电走廊环境恶劣，融冰装置及工作人员数量有限，一直存在着防冰不到位、融冰不及时等一系列困难，导致了众多输电线路覆冰过载，引发大量断股、断线、倒塔等事故。影响输电线路覆冰的因素很多，如气象因素、海拔高度、导线直径、电场强度和微地形等，其中气象因素对线路的覆冰起着决定性影响。目前，南方电网公司和国家电网公司在“十二五”规划中新添了加快电网发展的新内容，输电线路将会成倍增加。为了在冰灾发生前做好各线路的防冰、抗冰准备工作，或在设计输电线路时能设计合理的抗冰厚度值，亟须一种能准确判别裸露于恶劣环境中的输电线路覆冰等级的有效方法。

输电线路的覆冰程度不同，造成的损害也不一样，因此很有必要对输电线路的覆冰等级具体分类进行探讨，以便采取相应的防冰、融冰措施解决不同覆冰等级的输电线路的覆冰问题，为电力工作人员提供参考。

输电线路覆冰等级划分为四类：极度覆冰、严重覆冰、中等覆冰和轻度覆冰。

(1) 风口、垭口、山脊和分水岭等微地形对输电线路覆冰程度的影响最大，穿越这类微地形中的线路最容易覆冰。当相应线路长度大于数百米时，若通过增加线路和铁塔冰厚设计值，则需要巨额的投资费用。因此，将这些微地形对应的总线长大于或等于 1km 的输电线路视为极度覆冰线路。

(2) 峡谷、江河湖泊、迎风坡上部位置、迎风坡山腰和背风坡上部位置等微地形对线路覆冰程度的影响相对较小，将这类微地形对应总线长及长度小于 1km 的极度覆冰段线长之和大于或等于 1.5km 的输电线路视为严重覆冰线路。

(3) 迎风坡山脚和背风坡山腰等微地形对输电线路的覆冰影响较小，通常情况下，覆冰不会导致线路的断股、断线等事故。将这类微地形对应线长及严重覆冰以上线路线长之和大于或等 2.3km 的输电线路视为中等程度覆冰线路。

(4) 背风坡山脚、林带及其他较高地物和住宅地段等微地形对应线路一般不易覆冰，只有在极端恶劣的气候条件才会发生覆冰现象。除了上述几种覆冰等级线路外，将这类微地形对应的输电线路视为轻度覆冰线路。

由于各种微地形对输电线路覆冰程度的影响大小不一致，故应给予覆冰权数赋予合理的数值，用以区别各种微地形对输电线路覆冰的影响程度。覆冰权数 $\gamma_i (i = 1, 2, \cdots, 14)$ 按表 1.1 进行取值，能较好地反映各种微地形影响穿越其中的输电线路的覆冰程度。

表 1.1 各种微地形对应的覆冰权数取值

微地形	覆冰权数	取值	微地形	覆冰权数	取值
风口	γ_1	0.13	迎风坡山腰	γ_8	0.08
垭口	γ_2	0.13	背风坡上部位置	γ_9	0.04
山脊	γ_3	0.13	迎风坡山脚	γ_{10}	0.011
分水岭	γ_4	0.13	背风坡山腰	γ_{11}	0.008
峡谷	γ_5	0.12	背风坡山脚	γ_{12}	0.002
江河/湖泊	γ_6	0.11	林带	γ_{13}	0.002
迎风坡上部位置	γ_7	0.105	住宅地段	γ_{14}	0.002

参考文献

- [1] 中国南方电网公司. 电网防冰融冰技术及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010. 2.
- [2] 罗小龙. 电网覆冰等级分类及直流融冰方案研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.
- [3] 马春雷. 贵州地区 500kV 输电线路抗冰融冰技术的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [4] 蒋兴良, 马俊, 王少华, 孙才新, 舒立春. 输电线路冰害事故及原因分析[J]. 中国电力, 2005(11): 27~30.
- [5] 陈原, 张章奎, 刘娟, 岳乔. 京津唐电网输电线路覆冰掉闸分析[J]. 华北电力技术, 2003(4): 38~45.
- [6] 王超. 输电线路直流融冰技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [7] 常浩, 石岩, 殷威扬, 张民. 交直流线路融冰技术研究[J]. 电网技术, 2008(5): 1~6.
- [8] 佚名. 国内外自然灾害造成的电力系统事故[J]. 中国电力教育, 2008(6): 10~12.
- [9] 蒙金有. 固原地区输电线路覆冰及其事故防治技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [10] 陈斌, 郑德库. 架空送电线路导线覆冰破坏问题分析[J]. 吉林电力, 2005(6): 25~27.
- [11] 刘明源. 输电线路覆冰倒塔分析研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2010.
- [12] 陈刚. 移动式 220kV 输电线路直流融冰装置研制[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [13] 刘和云. 架空导线覆冰与脱冰机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2001.
- [14] 卞荣. 浙江电网输电线路冰灾原因分析及对策研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
- [15] 朱卫华. 输电线路 CO₂ 激光除冰的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [16] 梁瑜. 带电条件下输电线路导线和绝缘子覆冰及电气特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
- [17] 陆佳政, 曾敏, 田凌, 罗小龙, 曾祥君. 基于微地形的输电线路覆冰等级判别方法[J]. 电力科学与技术学报, 2013(4): 24~30.
- [18] 覃煜, 陆国俊, 贾志东, 关志成. 输电线路绝缘子的覆冰危害及其研究现状[C]. 2011 年中国电机工程学会年会, 2011. 11. 27.
- [19] 许树楷, 赵杰. 电网冰灾案例及抗冰融冰技术综述[J]. 南方电网技术, 2008(2): 1~6.
- [20] 王国尚, 穆红文, 刘亚峰, 杨光, 安宁, 张西. 湖南省四条线路的覆冰分析[C]. 2009 年甘肃省电机工程学会学术年会, 2009. 9. 1.
- [21] Horwill C, Davidson C C, Granger M, et al. An Application of HVDC to the De-icing of Transmission Lines[C]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Dallas, USA, 2005/2006.
- [22] Wang, Juanjuan, Yu Cheng, Chen, Yiping. Research and Application of DC De-icing Technology in China Southern Power Grid[J]. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, 2012.