



国家电网公司
电力科技著作出版项目

架空输电线路杆塔 覆冰破坏及防治

中国电力科学研究院 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

中国电力科学研究院专著出版基金资助

架空输电线路杆塔 覆冰破坏及防治

中国电力科学研究院 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

覆冰会导致输电线路的电气性能和机械性能下降, 严重情况下还会引起跳闸断电故障, 甚至断线、倒塔, 影响工农业生产和人民生活, 造成巨大的经济损失。本书总结了电力科学研究院近年来在输电线路杆塔结构冰灾破坏及防治方面的研究成果, 并介绍了输电线路冰灾防治的一些技术进展, 以期对提高我国输电线路杆塔的抗冰防冰能力有所帮助。

本书分八章, 主要内容包括输电线路覆冰破坏、输电线路覆冰杆塔荷载、输电线路覆冰杆塔静力破坏、输电线路覆冰杆塔动力破坏、中重冰区输电线路杆塔结构设计、输电线路冰灾受损杆塔恢复改造技术和输电线路冰灾防治技术及进展等。

本书可供从事输电线路杆塔结构研究、设计以及运行维护的技术人员、管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

架空输电线路杆塔覆冰破坏及防治/中国电力科学研究院编著. —北京: 中国电力出版社, 2013. 7

ISBN 978-7-5123-3921-7

I. ①架… II. ①中… III. ①架空线路—输电线路—线路杆塔—冰凌防护 IV. ①TM753

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 000678 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京博图彩色印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 7 月第一版 2013 年 7 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 15 印张 256 千字

印数 0001-3000 册 定价 60.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前言

我国是一个冰雪、洪涝、地震、台风等自然灾害多发的国家。覆冰会导致架空输电线路的电气性能和机械性能下降,严重情况下还会引起跳闸断电故障,甚至断线、倒塔,影响工农业生产和人民生活,造成巨大的经济损失。

我国湖南、贵州、四川、湖北等省是冰雪灾害较为多发和严重的地区,历史上都曾发生过严重威胁电力系统安全运行的线路覆冰事件。特别是近年来,受全球气候变暖影响,冰雪灾害性气象频发。2005年2月,湖南省局部地区发生严重雨雪冰冻灾害,多条500kV输电线路发生倒塔。2008年初,我国南方地区出现大范围持续低温雨雪冰冻天气,湖南、江西、浙江、湖北、河南、四川、安徽、贵州、云南等地电网设施严重毁损,其中,湖南、江西、浙江、贵州、广西电网受灾最为严重,造成大面积倒杆(塔)断线,局部电网遭到毁灭性破坏。2010年春节前后,受三次大范围大风降温、降雨雪等恶劣天气过程影响,河南、辽宁、山东、山西、河北、湖南、江西、浙江等地输配电线路发生大面积导线舞动,导致多条线路故障停运、杆塔受损破坏。灾害暴露出我国在输变电设施冰雪灾害的预防、处理以及灾后恢复等方面的技术还不够成熟和完善。

为了应对可能发生的严重冰雪灾害,最大限度地减少灾害损失,不断提高我国输变电设施的冰雪灾害防治水平,加紧进行电网防冰减灾技术的系统研究势在必行。遵循“预防为主,综合治理,损失最小,恢复最快”原则,国家电网公司组织直属科研单位,并借助高校、科研院所等社会力量,从冰灾预防技术、冰灾处置技术、冰灾后电网恢复技术、灾害下电网管理技术等方面开展科研攻关,研究内容覆盖电网规划建设、生产运行、应急处置和恢复重建各个环节。

本书总结了电力科学研究院在杆塔冰灾受损破坏以及防治技术方面的主要研究成果,主要包括输电线路覆冰破坏、输电线路覆冰杆塔荷载、输电线路覆冰杆塔静力破坏、输电线路覆冰杆塔动力破坏、中重冰区输电线路杆塔结构设计、输电线路冰灾受损杆塔恢复改造技术以及输电线路冰灾防治技术及进展等。

本书是我国第一部专门介绍架空输电线路（简称输电线路）杆塔冰灾的专著，理论分析结合工程案例，可供从事输电线路杆塔结构研究、设计以及运行维护的技术人员参考。

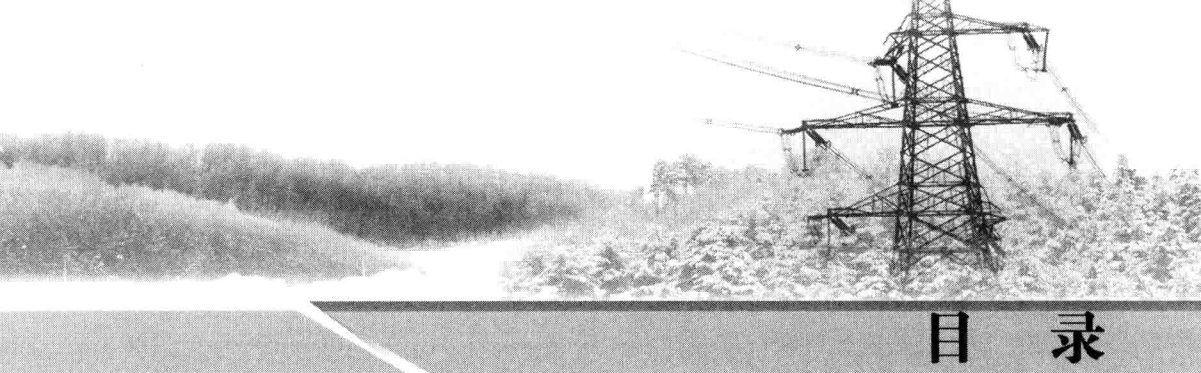
本书第一章由李茂华、刘胜春撰写，第二章由杨靖波、韩军科撰写，第三章由杨风利、李清华撰写，第四章由韩军科、杨靖波撰写，第五章由杨风利、党会学撰写，第六章由张子富、邢海军撰写，第七章由刘学武、夏开全、高雁、刘思远撰写，第八章由李茂华撰写。杨靖波对全书内容进行了统稿。

在本书的撰写过程中，得到了国家电网公司科技部、运维检修部、基建部等部门的大力支持。湖南、浙江、河南、江西、四川等省电力公司为本书的编写提供了不少素材。电力规划设计总院李喜来、中国能源建设集团有限公司郭跃明、浙江省电力设计院应建国、四川电力设计咨询有限责任公司赵庆斌、湖南省电力勘测设计院何洪波等专家，也为本书的编写提供了悉心的指导和帮助，在此一并表示诚挚的感谢。

限于编者水平，书中不足之处，敬请读者批评指正。

编 者

2013 年 4 月



目 录

前言

第一章 输电线路覆冰机理及主要冰雪灾害	1
第一节 输电线路覆冰机理及危害	1
第二节 国内外近年来输电线路主要冰雪灾害	7
第二章 输电线路覆冰破坏	12
第一节 2008 年初电网冰灾倒塔破坏模式与特征	13
第二节 2009~2010 年冬季线路舞动杆塔破坏模式与特征	17
第三节 杆塔破坏模式典型案例	21
第四节 导地线破坏及特征	27
第五节 输电线路覆冰闪络	30
第六节 输电线路其他破坏	33
第三章 输电线路覆冰杆塔荷载	35
第一节 现行设计规范取值	35
第二节 不均匀覆冰荷载	41
第三节 脱冰跳跃荷载	48
第四节 断线荷载	61
第五节 舞动荷载	75
第四章 输电线路覆冰杆塔静力破坏	85
第一节 典型塔型破坏	85
第二节 典型大档距线路段破坏	96

第三节	典型大高差线路段破坏	106
第四节	输电线路覆冰杆塔静力破坏案例及分析	117
第五章	输电线路覆冰杆塔动力破坏	126
第一节	导线脱冰跳跃杆塔破坏	126
第二节	导线覆冰舞动杆塔破坏	147
第六章	中重冰区输电线路杆塔结构设计	161
第一节	杆塔规划	161
第二节	结构优化设计	170
第三节	典型塔力学性能真型试验	188
第七章	输电线路冰灾受损杆塔恢复改造技术	197
第一节	灾后杆塔状态评估技术	197
第二节	灾后杆塔恢复改造技术	205
第三节	工程实例	221
第八章	输电线路冰灾防治技术及进展	223
第一节	输电线路冰灾防治技术	223
第二节	输电线路覆冰状态监测及预警	225
第三节	输电线路融冰、除冰技术	226
参考文献		232



第一章

输电线路覆冰机理及主要冰雪灾害

覆冰是一种常见的自然现象，过冷却水滴碰到温度低于冰点的物体上就形成了覆冰。如果水滴凝结到导线、铁塔、绝缘子等物体的表面，就会造成架空输电线路覆冰。输电线路地域分布广泛，气象、地形条件复杂多变，容易形成覆冰。覆冰与过冷却水直径、风速、风向、气温等多种因素有关，覆冰严重时会引起输电线路跳闸、断线、倒塔等事故，威胁电网的安全运行。近年来，受全球极端气候频发的影响，电网覆冰灾害呈现增多、加剧的趋势。

本章主要介绍覆冰的机理、对输电线路的危害以及近年来国内外较为严重的冰雪灾害。

第一节 输电线路覆冰机理及危害

架空输电线路是电网的主要组成部分，具有点多、面广、线路长的特点，自然环境和地形条件复杂多变。电网的大气覆冰是一种很常见的自然现象，也是威胁电力系统安全运行的重要因素之一，输电线路覆冰轻则引起闪络跳闸，重则导致金具损坏、断线倒杆（塔）等事故。随着全球极端气候频发，恶劣气候导致的电网灾害日益增多，冰灾给世界各国电网造成了巨大的损失。我国是输电线路覆冰灾害最严重的国家之一，大面积冰害事故时有发生，造成了巨大的经济损失和严重的社会影响。特别是近年来，电网覆冰灾害不断加剧，覆冰影响范围日益扩大，造成的危害也越来越严重。

一、覆冰形成机理

1. 覆冰形成过程

覆冰是受温度、湿度、冷暖空气对流、环流及风等因素影响的综合物理现

象, 输电线路产生覆冰应具备以下三项基本条件:

(1) 具有足够可以冻结水滴的气温及输电线表面温度, 一般为 $-20\sim-2^{\circ}\text{C}$, 能使液滴在冻结时释放出潜热。

(2) 具有较高的湿度, 因为空中过冷却的液水含量是各种覆冰的水来源, 空气相对湿度一般要在 85% 以上。

(3) 具有可使空气中的过冷却水滴或过冷却云粒产生运动的相应风速, 以便水滴与输电线发生碰撞, 被输电线捕获, 一般风速为 $1\sim 10\text{m/s}$ 。

我国典型的输电线路覆冰形成过程: 每年的冬季和初春季节, 北方冷空气与南方暖湿空气交汇, 形成“静止锋”。由于冷气团由北向南贴近地面插在暖湿气团下部, 在“静止锋”影响范围内的大气中出现逆温现象, 即从地面向上至静止锋线, 温度先是在 0°C 以下, 往上由于暖湿气团的影响, 温度反而升高至 0°C 以上, 再往上温度又降至 0°C 以下。在冻结高度以上, 空气中的水汽形成冰晶、雪花或过冷却水滴而下降。在下降过程中穿过 0°C 以上的暖湿气团时, 过冷却水滴温度将升高, 雪花和冰晶部分或完全融化; 继续下降时, 又进入 0°C 以下的大气层, 此时一些直径较大的过冷却水滴可能会遇到尘埃, 尘埃可作为凝结核, 水滴就会变成冰粒落至地面。对于较小的过冷却水滴, 会以较慢的速度落至地面层,

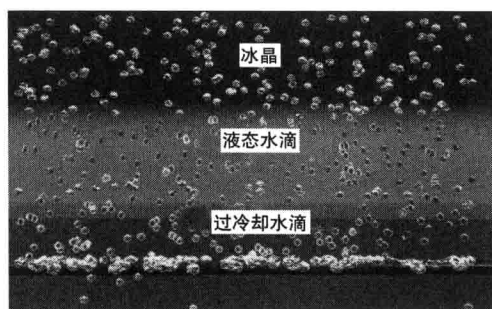


图 1-1 输电线路导线覆冰形成过程示意图

形成“冻雨”。这种过冷却水滴很不稳定, 在风的作用下运动, 一旦与地面上较冷的物体如导线或杆塔发生碰撞, 就会发生变形, 水滴表面弯曲程度减小, 表面张力也相应减小, 导线本身又可起到类似凝结核的作用, 于是过冷却水滴就会在导线表面凝结成雨淞覆冰或雾淞覆冰。

图 1-1 是输电线路导线覆冰形成过程示意图。

过程示意图。

除了“静止锋”导致冻雨覆冰现象外, 冻雾覆冰也是导线覆冰的一种重要成因, 尤其在西南高原地区, 这类覆冰现象是比较常见的。此外, 在云南、贵州、四川的一些山区, 冬、春季节在寒冷无风的夜间因辐射冷却也可形成晶状雾凇。

2. 覆冰的影响因素

导线覆冰过程是与气象学、流体力学、热力学等有关综合物理过程, 涉及

诸多复杂因素。由以往的研究和观测可知,影响覆冰的因素主要包括气象、地形及环境、输电线自身、海拔高度和线路走向。

(1) 气象因素。影响导线覆冰的气象因素主要包括气温、空气湿度、风速、风向、云中过冷却水滴的直径及凝结高度等参数。

气温及过冷却水直径对覆冰有较大的影响,根据观测结果,通常雨淞覆冰形成时温度较高,一般为 $-5\sim 0^{\circ}\text{C}$,水滴直径大,一般为 $10\sim 40\mu\text{m}$,中值体积水滴直径为 $25\mu\text{m}$ 左右;而对于雾淞覆冰,其温度较低,一般为 $-15\sim -10^{\circ}\text{C}$,水滴直径为 $1\sim 20\mu\text{m}$,中值体积水滴直径为 $10\mu\text{m}$ 左右;混合淞通常介于雨淞和雾淞之间,温度为 $-9\sim -3^{\circ}\text{C}$,水滴直径为 $5\sim 35\mu\text{m}$,中值体积水滴直径为 $15\sim 18\mu\text{m}$ 。

风对云和水滴起着输送作用,风速和风向对导线覆冰均有重要影响。根据经典气象理论,在其他要素不变的情况下,冷却水冻结过程中风速越大,单位时间内过冷却水水滴输送能力越强,冰重增长越快。风向主要会对覆冰形状产生影响,一般导线迎风面冻结相对较大,背风面则相对较小,冰结厚度与风向和导线之间夹角的正弦成正比,当风向与导线垂直时,结冰会先在迎风面上生成,产生偏心覆冰,而当风向与导线平行时,则容易产生均匀覆冰。

空气湿度的大小对导线覆冰影响甚大。空气湿度大,一般在85%以上,这是输电线路导线覆冰的必要气象条件之一。

每一个地区都有一个起始结冰的海拔高度,即凝结高度。我国地域广阔,山地气候复杂,凝结高度随气压变化而变化,分布特点是西高东低。在凝结高度以上,随着高度的增加,覆冰厚度也随之增加。在我国西部,当海拔到达一定高度后,因水汽输送不足,反而覆冰更小或不覆冰。

(2) 地形及环境因素。受海陆分布和山脉走势影响,我国南岭以南冬季较暖,秦岭以北冬季较干,使得这些地区结冰概率很小。而南岭到秦岭之间冬季最低气温常降至 0°C 以下,且水汽充沛,空气湿度较大,较易形成覆冰,因此在南岭到秦岭之间构成了一个成冰气候带。同时,覆冰受微地形、微气候地区的影响也比较大,一般而言,在受风条件比较好的突出地形,如山顶、垭口、风道和迎风坡,以及空气水分较充足的江河、湖泊、水库和云雾环绕的山腰、山顶等处都是极易覆冰的地点。

(3) 导线自身的因素。导线本身的影响因素包括导线的直径、扭转刚度以及通过的电流大小等。

导线直径是决定导线接触过冷却水滴的有效面积因素之一。实验数据表明,在其他条件相同的情况下,当风速在 8m/s 以下时,对于 40mm 以下直径的导线,较粗的导线覆冰量重于较细的导线;而当风速大于 8m/s 时,导线越粗则覆冰量越大。但是对此问题还有不同的意见,德国、挪威等国的有些学者认为,导线覆冰量与其直径无明显的关系,只有当空气中的过冷却水滴特别大(直径超过 $25\mu\text{m}$)或风速很高时,覆冰重量才随导线直径的增长而显著增大。

导线覆冰时往往在迎风面上形成扇形或新月形积冰,产生偏心荷重,对导线施以扭矩,迫使导线扭转,让未覆冰或覆冰较少的表面对准风向,继续覆冰。导线扭转刚度越小,在扭矩作用下,导线的扭转角度越大,覆冰进一步增加。由于导线在扭矩作用下的扭转角度与 l^2/d^2 成比例(l 为档距长度, d 为导线直径),故档距较长、直径较细的导线容易扭转,便于覆冰分布于导线的各个侧面上,形成圆形或椭圆形覆冰。

通过的电流对导线覆冰的影响体现在两个方面:当电流不够大,焦耳热不能使导线表面维持 0°C 以上温度时,负荷电流反而会使导线覆冰增加,因为出现了电场的影响;当电流足够大,能使导线发热并维持其表面温度在 0°C 以上时,这时即使有过冷却水滴碰撞导线,导线表面也不会覆冰,从而达到自然防冰的效果。这种维持导线表面温度为 0°C 的电流称为临界负荷电流,其大小由气温、风速及导线表面的辐射特性等因素决定。

(4) 海拔的因素。研究表明,输电线路导线覆冰随海拔变化而变化,就同一地区来说,在同一地形及天气形势下,一般海拔越高,越易覆冰,覆冰也越厚,多为雾凇;海拔较低处,其冰厚虽较小,但多为雨凇或混合冻结。导线悬挂高度越高,覆冰越严重,因为风速和空气中水含量随高度的增加而升高。风速越大、水含量越高,单位时间内向导线输送的水滴越多,覆冰也越严重。

(5) 输电线路走向的因素。导线覆冰与输电线路走向有关,我国冬季覆冰天气主导风向大多为北风或西北风,导线为东西走向时,风与导线约成 90° 的夹角,导线覆冰最为严重;当导线为南北走向时,风向与导线轴线基本平行,导线覆冰较东西走向少得多。

二、覆冰的分类

输电线路导线覆冰按冰的表观特性可分为雨凇、混合凇、雾凇、积雪(干雪、湿雪)、白霜,按覆冰增长过程又可分为干增长和湿增长。其中雾凇和干雪

属于干增长过程，雨淞和湿雪属于湿增长过程，而混合淞是介于两者间的一种覆冰过程。下面简单介绍各种类型覆冰的特性。

(1) 雨淞。雨淞是由粒径较大的过冷却水滴，碰撞在物体上，先散开成水膜然后冻结成冰凌，呈湿增长方式。雨淞冰体透明坚固，密度为 $0.6\sim 0.9\text{g}/\text{cm}^3$ ，粘附力强，常伴有冰柱，产生的机械负荷最大，对输电线路危害也最大。

雨淞多出现在海拔较低的地区，一般在导线的迎风面上形成，而且在气温不很低的情况下出现（一般 $-3.0\sim 0.0^\circ\text{C}$ ）。密度较小的雨淞往往呈混浊的半透明的毛玻璃状，密度较大时呈光滑的透明玻璃状，前者粘附力较小，后者粘附力较大。

(2) 雾淞。雾淞也叫软雾淞，是由粒径较小的过冷却水滴，随气流浮动，在碰击物体瞬间即冻结成冰凌，呈干增长方式。冰体白色疏松，密度小，粘附力较弱，通常在物体的迎风面冻结，对输电线路一般不构成威胁。

雾淞有两种，粒状雾淞和晶状雾淞。粒状雾淞一般都在导线的迎风面上生长，其气温一般为 $-8.0\sim -3.0^\circ\text{C}$ 。在外形上具有无定形结构的特点，可呈叶状、扇形状、针状等。粒状雾淞的密度为 $0.1\sim 0.4\text{g}/\text{cm}^3$ 。晶状雾淞一般是在有雾、无风或微风的天气里，由雾滴蒸发而产生的过饱和水蒸气升华直接凝结在物体上形成的，是一种呈毛茸茸的非常松脆的干燥冰。晶状雾淞的密度比粒状雾淞小得多，为 $0.01\sim 0.08\text{g}/\text{cm}^3$ 。

(3) 混合淞。混合淞又称硬雾淞，当不同粒径的过冷却水滴随气流浮动，在碰撞物体瞬间，部分呈干增长、部分呈湿增长。冰体呈半透明状，密度中等，常在物体的迎风面冻结，有一定的粘附力，对输电线路的危害次于雨淞。

混合淞是由两种或两种以上的单种冰层重叠或混合构成的复杂冰层，如在雨淞上凝聚雾淞，在雾淞上凝聚透明状雨淞，或者雾淞和雨淞的冻结过程多次交替而构成多层履冰等。这种混合冻结密度介于雨淞和雾淞之间，其密度大小视其雨淞所占比例而定，一般对导线粘附力较强，遇振动不易脱落，它的密度通常为 $0.2\sim 0.6\text{g}/\text{cm}^3$ 。

(4) 积雪。积雪是自然降雪粘附在导线上形成的，有干、湿雪之分：干雪密度小于 $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ ，粘附力很弱；湿雪又称冻雪或雪淞，是冻结的雪片，在降落过程中，通过一段温暖层后，雪片趋于潮湿、融化，然后冻结在物体上，冰体呈白色堆积状，密度为 $0.1\sim 0.7\text{g}/\text{cm}^3$ 。当气温进一步降低时，粘结在导线上的湿雪将变成坚硬的冰冻体。

(5) 白霜。白霜是由空气中的水汽直接凝结而成的,发生在寒冷而平静的天气,气温低于 -10°C ,呈白色、雪状、不规则针状结晶,脆而轻,密度为 $0.05\sim 0.3\text{g}/\text{cm}^3$,粘着力很弱,几乎不对输电线路构成威胁,但会增加输电线路的电晕损失。

在我国,雨淞多见于湖南、粤北、赣南、湖北、河南及皖南等丘陵地区,而雾淞多见于云贵高原、四川西部及海拔较高的高山地区。

三、覆冰的危害

覆冰的随机性导致覆冰尺寸、密度和形式随机变化,这使输电线路结构系统的各种荷载会连续发生不规则的变化,导致输电线路产生电气故障或机械故障。根据对我国输电线路覆冰事故的分析,其危害主要有以下几方面。

(1) 垂直荷载增加。冰的重量将增加所有支持结构和金具的垂直荷载。当覆冰积累到一定体积和重量之后,导线的垂直荷载倍增,弧垂增大,导线对地间距减小,从而有可能发生闪络事故。弧垂增大的同时,在风的作用下,两根导线或导线与地线之间可能相碰,会造成短路跳闸,烧伤甚至烧断导线的事故。冰的重量将增加塔身和导地线挂点的垂直荷载,当垂直荷载超过设计条件后可使铁塔受损或压垮铁塔。

(2) 横向荷载增加。当导线迎风面覆冰厚度增加时,输电线路横向荷载也将随之增加。横向荷载超过设计条件后,如遇有大风时,可能造成杆塔受损或倒塔事故。

(3) 纵向荷载增加。输电线路不均匀覆冰、不均匀脱冰、风或断线等均会增加导地线的纵向荷载。不平衡张力引起导线在悬垂线夹内滑动,严重时导线外层铝股在线夹出口处全部断裂,钢芯抽动,造成线夹另一侧的铝股拥挤在线夹附近。邻档张力的不同,还会导致悬垂绝缘子串偏移,严重时会造成碰撞横担,造成绝缘子损坏或破裂;同时,不均匀覆冰、脱冰或断线将导致导线挂点承受很大的冲击荷载,超过设计条件时会造成铁塔横担局部损坏或铁塔倒塌。

(4) 导线振动、舞动。覆冰在导线表面的不同积聚形状会引起导线对风所引起的振动的敏感性,产生振动荷载。当导线上凝聚霜淞时,其截面增大,形状仍保持为均匀圆形,而霜层几乎不改变导线阻尼。因此,一定的风力所引起的导线振动,其频率低于裸线时的频率,而振幅比裸线时小,并且频率下降可能低到防振装置的有效运行范围以下。

如果导线发生非均匀覆冰,从空气动力学分析会使导线处于一种不稳定状态,若风速适当,在风力作用下发生舞动,这是一种低频、大幅度的振动,其振动频率通常为 $0.1\sim 3\text{Hz}$,振幅为导线直径的 $5\sim 300$ 倍。导线舞动容易引起杆塔、导线、金具及部件的损坏,造成频繁跳闸甚至停电事故。

(5) 覆冰闪络。覆冰闪络是污闪的一种特殊形式,绝缘子在严重覆冰的情况下,大量伞形冰凌桥接,绝缘强度降低,泄漏距离缩短。融冰过程中,冰体或者冰晶体表面水膜很快溶解污秽中的电解质,提高了融冰水或冰面水膜的电导率,引起绝缘子串电压分布及单片绝缘子表面电压分布的畸变,从而降低了覆冰绝缘子串的闪络电压。融冰时期通常伴有的大雾,使大气中的污秽微粒进一步增加融化冰水的电导率,形成覆冰闪络。闪络过程中持续电弧烧伤绝缘子,引起绝缘子绝缘强度下降。

第二节 国内外近年来输电线路主要冰雪灾害

一、国外覆冰灾害情况

由于特殊的地理条件,架空输电线路覆冰严重的国家主要有加拿大、美国、瑞典、芬兰、德国等。这些国家历史上曾发生过多起严重的冰灾,导致重大电网事故。

1. 1984年1月加拿大曼尼托巴冰暴

1984年1月,加拿大曼尼托巴省发生因冻雨引发的严重冰暴,导致多条输电线路严重损坏,多基杆塔倒塔,抢修工作数周才完成,造成数亿美元的经济损失。

2. 1998年1月加拿大魁北克冰暴

1998年1月5~9日,连续3场冻雨袭击了加拿大魁北克西南部电网,部分地区导线等效冰厚达到 75mm ,最大达到 105mm 。共有 3200km 的输电线路受到影响,其中 900km 输电线路发生破坏,使得10条 735kV 输电线路倒塔150基,各电压等级线路倒塔(杆)累计1000多基。约450万人的电力供应中断,受灾人数超过加拿大人口总数的 16% ,冰灾造成28人死亡,数千人受伤。事故造成直接经济损失达54亿多美元,是加拿大20世纪最严重的自然灾害。

此次冰暴还使得同一地区的美国遭受了严重的灾害,超过54万人电力供应

中断,造成 17 人死亡,多人受伤,经济损失达数十亿美元。

3. 2005 年 11 月德国冰灾

2005 年 11 月 25 日,德国 Musterland 地区以及比利时和荷兰的部分地区突降百年不遇的暴雪,架空输电线路最大覆冰超过设计的 15 倍,超过 70 基输电杆塔被损坏,在 8h 内超过 400 条·次线路跳闸,约 20 万人受到停电影响。

4. 2007 年 5 月纽芬兰冰灾

2007 年 5 月 22 日,纽芬兰发生严重的冰暴,半岛周围多达 1300 个家庭供电中断,虽经全力抢修,在纽芬兰的北方半岛上仍然有数百个电力用户受到了停电的影响,数日后才完全恢复。这次冰暴共造成 30 多基铁塔倒塌。

5. 2007 年 12 月美国冰灾

2007 年 12 月 11 日,冰风暴席卷美国中西部,造成至少 24 人死亡,给这些地区带来更多的冰风暴和大范围的停电。在衣阿华州,冰的厚度为 25~130mm;在俄克拉荷马州,输电线路导线覆冰厚度超过 30mm。在威斯康辛州和衣阿华州,数以万计的学生无法上学,而在俄克拉荷马州和堪萨斯市,几乎所有人都待在家中。这些地区,由于冰雪造成的部分停电达数十天之久,造成了美国历史上范围最广的停电事故,几座主要城市的机场被迫取消数百个航班。

二、国内覆冰灾害情况

我国是世界上输电线路覆冰灾害最严重的国家之一,而华中地区是灾害最严重的地区。华中地区冬季平均气温一般都高于 0℃,但受西伯利亚寒流和太平洋暖流的影响,几乎每年冬季都会出现短期(3~15 天)的雨淞、雾淞覆冰气象条件,使得输电线路覆冰,对电网安全运行造成严重影响。

我国最早有记录的输电线路冰害事故是 1954 年。近 30 年来,大面积冰害事故在全国各地时有发生,继 1974~1976 年全国电力系统发生大面积冰灾之后,1984、2005 年又发生了大面积冰灾事故,2008 年的冰灾事故范围最广、损失最大。近年来,较严重的覆冰事故如下:

(1) 1972 年 2 月 1~8 日,湖南、贵州、江西等地出现了一次大范围的冻雨天气,最严重的地段输电线路覆冰厚度接近 100mm,造成电报、电话中断。

(2) 1992 年 10 月青海冰灾。1992 年 10 月 3~5 日,青海省龙羊峡水电站 330kV 超高压输电线路在日月山口海拔 3321~3348m 地段发生了严重覆冰事故,2 条 330kV 输电线路共计倒塔 8 基。龙羊峡水电站因此全厂停止发电 11 天,直

接经济损失 600 多万元。这次覆冰事故是西宁地区罕见的严重雨淞覆冰造成的，覆冰厚度超过 20mm，而该线路设计抗冰厚度为 10mm。

(3) 1993、1994、2001 年湖北冰灾。1993 年 11 月，500kV 葛双Ⅱ回输电线路在距荆门市 19km 处、海拔约 500m 的山上出现了严重覆冰。造成 231~237 号 7 基铁塔倒塌，230 号塔局部变形，231 号左相线夹小号侧和 235 号左相线夹大号侧，4 根子导线全被拉断，237 号左相线夹大号侧 1 根子导线被拉断，倒塌杆塔上绝缘子大部分受损、部分金具损坏。当时气温约为 -5°C ，风速为 15m/s，导线覆冰 36mm。

1994 年 11 月 16 日，500kV 葛双Ⅱ回输电线路再次在 1993 年事故地段发生覆冰倒塔事故。232 号拉猫塔头向小号侧弯折，233、234 号拉猫塔向小号侧倒塌，235 号塔上部中相横担瓷绝缘子串受拉脱落并滚落到大号侧山谷中；234 号塔中相大号侧邻近线夹处，4 根子导线被拉断，左地线拉断并抽出线夹；235 号塔大号侧右地线断落至山谷中。当时最低气温为 -1.5°C ，伴有冻雨，风向北偏西，最大风速 17.1m/s。

2001 年 12 月 12 日，500kV 葛双Ⅱ回输电线路发生因严重覆冰致使 B 相 2 次接地，引起输电线路跳闸。覆冰闪络使 233 号塔左、右相第 1 片绝缘子、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 80mm。

(4) 2002 年 12 月、2003 年 3 月甘肃冰灾。2002 年 12 月 19 日，甘肃省麻川乡出现强降雪、大雾天气，330kV 天眉线形成严重覆冰，覆冰区段为 33~65 号，长度为 15.737km，铁塔为 38 基，20 日晚线路发生倒塔。37~40、46、47、49、50 号 8 基铁塔由于覆冰过重导致中相横担破坏，上下曲臂结合点折断，边相导线横担严重扭曲变形，地线支架折断等倒塔事故（见图 1-2）。

2003 年 3 月 14 日，天眉线麻川地区再次出现强降雪、大雾天气，使未来得及改线处理的铁塔、导线、避雷线、金具上形成严重覆冰，覆冰区段为：33~65 号，长度为 15.737km。导线覆冰经实测达到 30mm。2003 年 3 月 16 日线路发生倒塔。46、47 号的左边相导线横担折断后落地，38、40、

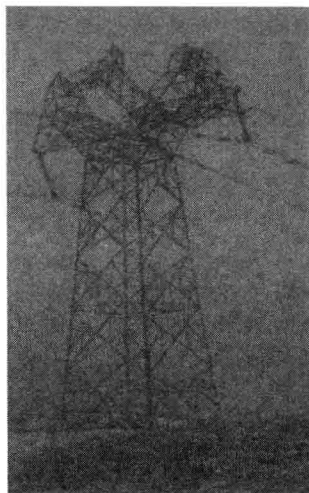


图 1-2 杆塔受损照片

46、47、49 号 5 基铁塔由于覆冰过重导致破坏（见图 1-3）。

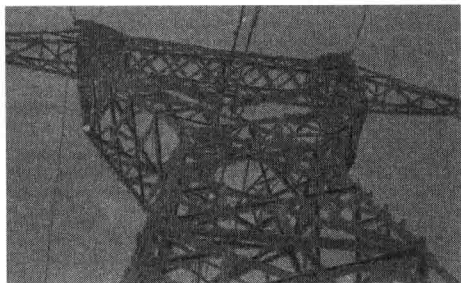


图 1-3 杆塔覆冰照片

(5) 2004 年 12 月~2005 年 2 月湖南、湖北冰灾。2004 年 12 月，华中电网在湖南、湖北发生大面积输电线路粗冰闪络、舞动事故，仅 500kV 输电线路于 2004 年 12 月 21~28 日就发生覆冰闪络 34 次。

2005 年 2 月 7~17 日，华中地区出现大范围雨雪冰冻天气，湖南、湖北两省的输电线路严重覆冰，造成了杆塔倾倒、导地线断裂、线路大面积跳闸等一系列事故，严重危及电网的安全稳定运行。据统计，此次大面积、长时间、高强度的冰冻灾害导致华中 500kV 电网跳闸 18 条 69 次、倒塔 3 条 25 基。其中，湖南 500kV 输电线路倒塔 24 基、变形 3 基，500kV 骨干网架长时中断，并与华中电网短时解列，五强溪、凤滩、柘溪、凌津滩等骨干水电厂的送出受阻，湖北 500kV 输电线路倒塔 1 基（见图 1-4）、地线支架屈服变形 1 基，造成了严重损失。

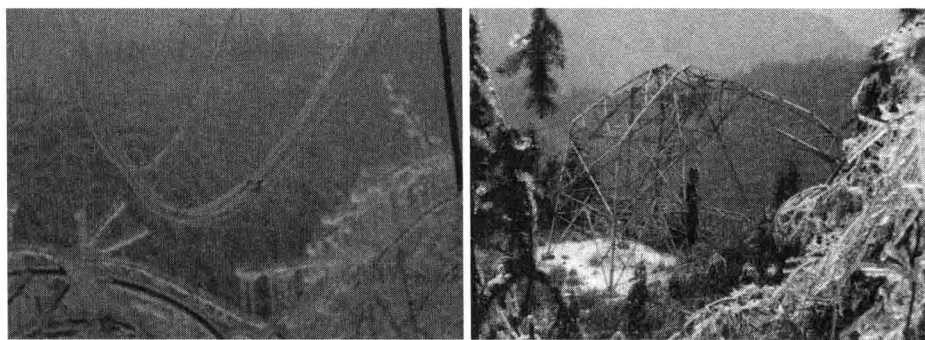


图 1-4 导线覆冰及铁塔倒塔照片

同时，2005 年 2 月冰灾在重庆地区造成 220kV 黔秀西线 97、127~129 号铁塔因输电线路覆冰过重而倒塌，覆冰厚度 50~70mm。

(6) 2008 年 1 月华中地区冰灾。从 2008 年 1 月 10 日至 1 月底，我国先后出现 3 次大范围的雨雪冰冻天气过程。此次冰灾影响了贵州、湖南、湖北、江西、安徽、河南、广西、江苏、浙江、陕西、甘肃、青海、四川、西藏、山西、上海