

特殊环境条件下输电线路实用技术丛书

输电线路 冰灾防治技术

万启发 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

特殊环境条件下输电线路实用技术丛书

输电线路 冰灾防治技术

万启发 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

我国幅员辽阔、气候迥异、地形复杂,长距离输电线路受不同区域的特殊环境因素的影响,雷害、污闪、覆冰和舞动时常发生,对电网的安全运行造成很大的危害。为满足特殊环境下输电线路规划设计、运行维护和防灾减灾的实际需求,总结国内外的科研、工程设计、运行维护的经验,结合国内外的最新动态及特殊环境灾害防治工程实例,组织国内相关专业的专家编写了《特殊环境条件下输电线路实用技术丛书》,共分为四册,分别以雷害、污闪、覆冰和舞动为主要内容进行阐述和介绍。

本分册为《输电线路冰灾防治技术》,主要内容包括输电线路覆冰危害及冰害防治现状、覆冰形成及理论模型、覆冰监测与预警、导/地线冰害防治、绝缘子覆冰试验与冰闪防治、覆冰地区高压输电线路设计和冰害防治技术应用实例。

本书可为输电线路科研、设计、运行维护提供技术参考,也可作为相关人员技术培训教材和大专院校教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

输电线路冰灾防治技术 / 万启发主编. —北京: 中国电力出版社, 2016.12

(特殊环境条件下输电线路实用技术丛书)

ISBN 978-7-5123-9314-1

I. ①输… II. ①万… III. ①输电线路—冰害—灾害防治 IV. ①TM726

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 100284 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>)

三河市万龙印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 12 月第一版 2016 年 12 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 14 印张 237 千字

印数 0001—1000 册 定价 138.00 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

《特殊环境条件下输电线路实用技术丛书》

编委会

主 编	万启发				
编 委	张国威	杜忠东	吕 军	赵永生	
	张 勤	律方成	蒋兴良	王黎明	
	周文俊	陆佳政	蔡 炜	王保山	
	王力农	陈家宏	陈 勇	刘云鹏	
	彭旭东	徐 涛	张广洲	余 波	
	宋金根	王建华	谷山强		

本 册 编 写 组

组 长	刘云鹏	蒋正龙		
组 员	许佐明	南 敬	姚 涛	胡 伟
	霍 锋	谢 梁	谢雄杰	万小东
	刘 琴	陈 勇	黄道春	张红先
	罗晓庆			

序

我国幅员辽阔、气候迥异、地形复杂，长距离输电线路受不同区域的特殊环境因素的影响，雷害、污闪、覆冰和舞动时常发生，对电网的安全运行造成很大的危害。我国电力科研、设计及运行单位对成灾机理及灾害防治进行了大量的研究工作，对维护线路安全运行起到良好作用。由于这些线路灾害难以根治，特殊环境下输电线路规划设计、运行维护和防灾减灾是我国输电线路的重点工作之一。

为满足特殊环境下输电线路规划设计、运行维护和防灾减灾的实际需求，总结国内外的科研、工程设计、运行维护的经验，结合国内外的最新动态及特殊环境灾害防治工程实例，组织国内相关专业的专家编写了《特殊环境条件下输电线路实用技术丛书》，共分为四册，分别以雷害、污闪、覆冰和舞动为主要内容进行阐述和介绍。

《输电线路雷电防护技术》主要包括雷电与雷电参数、输电线路雷电闪络与耐雷性能分析、输电线路雷电防护技术现状、特高压输电系统雷电特性、输电线路雷电防护措施、接地网的测量与防腐改造和雷电防护应用案例，并总结了国内外输电线路雷电防护理论研究成果及雷电防护方法。

《输电线路绝缘子防污闪技术》主要包括污闪的形成及危害、污闪机理及模型、污秽等级与污区分布图、污秽绝缘子试验与污闪特性、污秽地区绝缘子的选择与绝缘配置、防污闪技术措施和防污闪治理及应用实例，并总结了国内外绝缘子污闪及防治研究进展及绝缘子防污闪方法。

《输电线路冰灾防治技术》主要包括输电线路覆冰危害、覆冰形成机理、覆冰监测、除冰/防冰技术措施、绝缘子覆冰试验及防冰闪措施、覆冰地区输电线路设计等，并总结了国内外输电线路覆冰理论研究成果及冰害防治方法。

《输电线路舞动防治技术》主要包括输电线路舞动及危害、输电线路舞动机理、输电线路舞动仿真与试验、输电线路舞动监测及分布图划分、输电线路防

舞装置、输电线路防舞设计与改造以及输电线路舞动灾害治理实例，并总结了国内外输电线路舞动机理与防治的研究进展及工程治理方法。

希望本套丛书的出版可以为相关领域专家学者、科研人员及大专院校师生提供有益的参考与帮助。

石序发

前 言

覆冰是输电线路面临的自然灾害之一，由覆冰引起的倒塔、断线和绝缘子闪络给电力系统的安全稳定运行带来严重危害，同时给国民生产生活带来巨大损失。由于受到地理环境、气象等多种因素的影响，输电线路覆冰灾害形成机理复杂，长距离大面积除冰难度大，国内外均开展了大量研究，多种除冰方法和防冰技术得以研究和发展。我国是世界上输电线路严重覆冰的地区之一，输电线路冰害事故发生的频率较高。自 20 世纪 70 年代末以来，我国就十分关注覆冰对输电线路的危害，并对其进行了长期的观测和研究。近年来，特别是在 2008 年南方大面积冰灾以后，我国在直流融冰、绝缘子冰闪特性研究等方面取得了技术突破，同时也开展了除冰新技术的研究，取得了一定的成果。

本书是《特殊环境条件下输电线路实用技术丛书》之一，从输电线路覆冰危害，覆冰形成机理及理论模型，覆冰监测与预警，导、地线冰害防治，绝缘子覆冰试验及防冰闪措施，覆冰地区高压输电线路设计等方面总结了国内外输电线路覆冰理论研究成果及冰害防治方法。全书共分七章，第一章为输电线路覆冰灾害的表现形式、形成原因；第二章介绍了覆冰分类、覆冰形成机理及影响因素，总结分析了目前国内外常用的覆冰预测及绝缘子覆冰闪络理论模型；第三章为输电线路覆冰调查及覆冰监测方法，总结了我国覆冰类型、严重程度等，分析了输电线路覆冰在线监测及预警系统的功能定位、系统组成和设备参数选取方法；第四章从技术原理、实施方法及应用效果等方面总结了目前常用的及具有应用前景的除冰及防冰方法；第五章介绍了绝缘子覆冰试验方法、提出了冰闪电压影响因素及防冰闪技术措施；第六章为覆冰地区输电线路设计原

则及方法；第七章分析了输电线路防冰改造、融冰等方面的成功案例。本书融知识性、资料性为一体，理论联系实际，可供相关领域科技人员和电力系统运行维护人员参考。

本书在编写过程中得到了中国电力科学研究院、国网电力科学研究院、湖南省电力公司怀化供电公司、国网湖北省电力公司、中南电力设计院等单位的大力支持，重庆大学蒋兴良教授为书稿的编写提出了许多宝贵意见，石岩、南敬、刘琴等为本书稿搜集了大量资料，在此一并致以衷心的感谢。

由于时间仓促，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

序 前言

第一章 输电线路覆冰危害及冰害防治现状	1
第一节 覆冰危害	1
第二节 输电线路冰害防治研究概况	9
第二章 覆冰形成及理论模型	14
第一节 覆冰分类与物理性质	14
第二节 覆冰影响因素	21
第三节 导线覆冰预测模型	30
第四节 绝缘子覆冰闪络电气模型	38
第三章 覆冰监测与预警	48
第一节 覆冰人工观测	48
第二节 覆冰在线监测技术	57
第三节 覆冰预警系统设计及应用	73
第四章 导、地线冰害防治	81
第一节 机械除冰	81
第二节 热力融冰	88
第三节 热力防冰	107
第四节 其他防冰及除冰方法	112
第五章 绝缘子覆冰试验与冰闪防治	122
第一节 绝缘子覆冰试验方法	122
第二节 覆冰绝缘子闪络特性	134
第三节 覆冰绝缘子泄漏电流特性	146

第四节 绝缘子防冰闪措施·····	152
第六章 覆冰地区高压输电线路设计·····	161
第一节 冰区划分及设计覆冰厚度确定·····	161
第二节 导线及地线的选择·····	166
第三节 杆塔设计·····	169
第四节 绝缘设计·····	172
第七章 冰害防治技术应用实例·····	176
第一节 防冰改造技术应用实例·····	176
第二节 交流融冰技术应用实例·····	179
第三节 直流融冰技术应用实例·····	184
附录 A 直流融冰典型操作流程·····	194
附录 B 根据气象条件、覆冰厚度计算融冰电流及融冰时间·····	198
附录 C GB 1179—1983 规格导线 10mm 覆冰下的融冰电流 (1h 融冰) ····	202
附录 D GB 1179—1974 规格导线 10mm 覆冰下的融冰电流 (1h 融冰) ····	204
附录 E 典型融冰主要风险及控制措施·····	205
参考文献·····	210

第一章

输电线路覆冰危害及冰害防治现状

覆冰是电力系统面临的自然灾害之一，由覆冰引起的倒杆、断线和绝缘子闪络给电力系统的安全稳定运行带来严重危害。我国是世界上输电线路严重覆冰的地区之一，线路冰害事故发生的概率较高。自 20 世纪 70 年代以来，我国就十分关注覆冰对输电线路的危害，并对其进行了长期的观测和研究。本章介绍了输电线路覆冰灾害的表现形式和形成原因，对我国输电线路冰害情况进行了统计分析，综述了国内外冰害防治技术研究现状。

第一节 覆 冰 危 害

一、覆冰故障类型

输电线路冰害事故按产生的直接原因可分为 4 类：

(1) 过负载事故。过负载事故即线路实际覆冰超过设计抗冰厚度，也就是说线路覆冰质量增加、覆冰后风压面积增加，从而导致机械和电气方面的事故，如导线弧垂过大与周围接地物体距离不够时发生沿空气间隙的闪络、倒塔、断线；同时还可能因覆冰过载引起的扭转、跳跃造成绝缘子串发生翻转、碰撞、炸裂等事故。倒塔事故主要是由覆冰时两侧的不平衡张力造成。在一些地形起伏较大的地区，当线路相邻杆塔高差和垂直档距较大时，导、地线覆冰杆塔两侧产生不平衡张力，一旦不平衡张力超出设计标准时，杆塔的受力集中部位开始损坏变形，最终导致杆塔倒塌，导、地线掉落，如图 1-1 所示。同时，对于一些转角塔，同样可能由于不平衡张力使得导线在严重覆冰时发生倒塌。

(2) 不均匀覆冰或不同期脱冰引起的机械和电气方面的事故。不均匀覆冰或不同期脱冰引起的机械和电气方面的事故如脱冰跳跃等。由于相邻档不均匀覆冰或不同期脱冰会产生张力差，使导、地线在线夹内滑动，严重时可使导线外层铝股在线夹出口处断裂、钢芯抽动，造成线夹另一侧的铝股拥挤在线夹附

近，悬垂线夹和耐张线夹都可能发生这种情况，如图 1-2 所示。不均匀脱冰时还可能产生脱冰跳跃，使导、地线发生大幅度的摆动，形成机械破坏或对周围接地物体发生闪络，如图 1-3 所示。

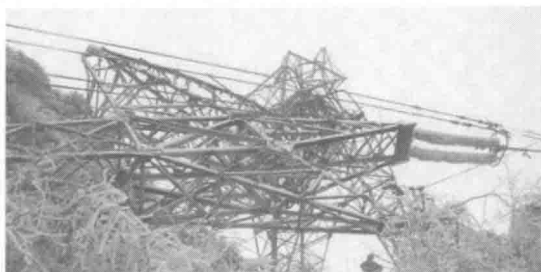


图 1-1 覆冰引起的倒塔



图 1-2 不均匀覆冰引起的线夹处导线损坏



图 1-3 脱冰跳跃引起的导线闪络烧伤

(3) 闪络事故。绝缘子(串)覆冰过多或被冰凌桥接,绝缘子串爬距大大减少,引起绝缘子电气性能降低,发生闪络。一般来说,绝缘子冰闪多在气温间歇或持续升高的融冰期发生。在融冰过程中,空气及绝缘子表面污秽中存在的电解质增大了冰水的电导,引起绝缘子串电压分布及单片绝缘子表面电压分布不均匀,从而降低覆冰绝缘子串的闪络电压,闪络过程中持续电弧将烧伤绝缘子,造成绝缘子绝缘强度永久下降,现场事故情况如图 1-4、图 1-5 所示。

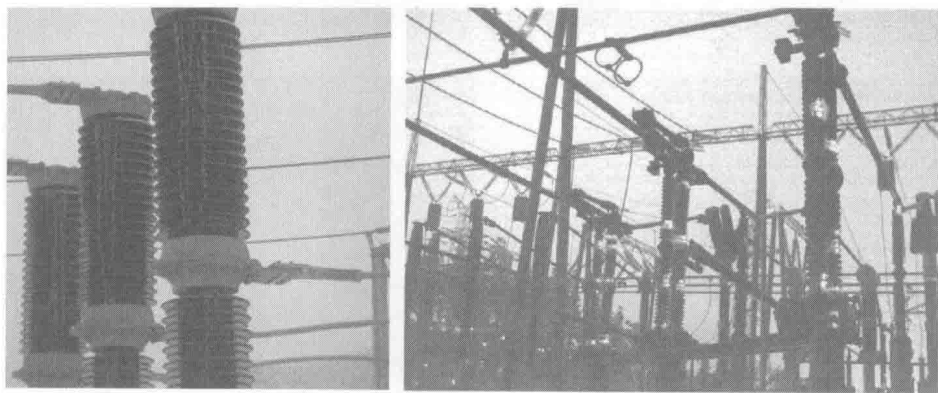


图 1-4 变电站绝缘子覆冰及放电情况

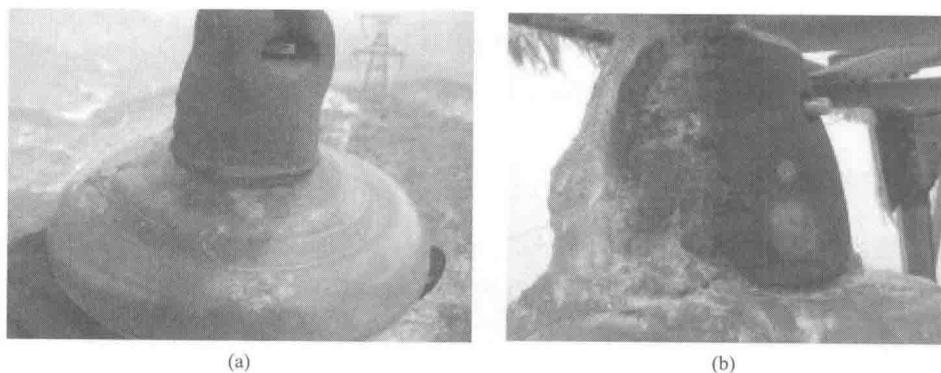
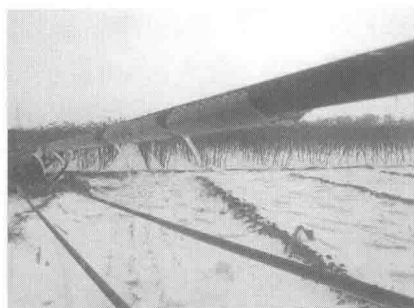


图 1-5 覆冰闪络造成的绝缘子损坏情况

(a) 绝缘子表面闪络放电;(b) 绝缘子钢帽烧伤

(4) 不均匀覆冰引起的导线舞动事故。

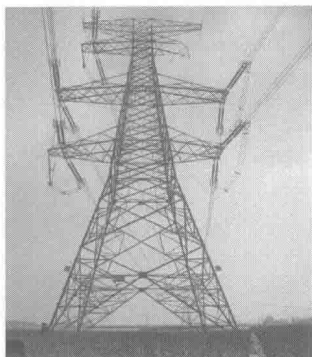
不均匀覆冰引起的导线舞动事故会造成金具损坏、导线断股及杆塔倾斜或倒塌等现象。图 1-6 为某 500kV 线路覆冰舞动产生的故障现象。



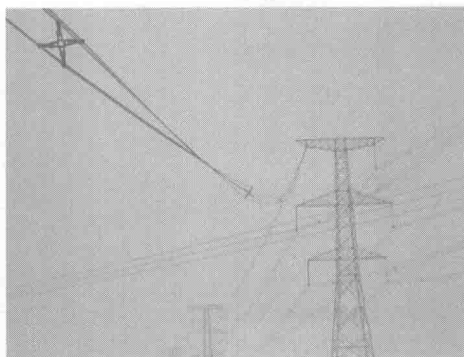
(a)



(b)



(c)



(d)

图 1-6 某 500kV 线路覆冰舞动产生的故障现象

(a) 掉线; (b) 间隔棒损伤; (c) 横担断裂; (d) 导线扭绞

二、覆冰故障统计分析

覆冰严重威胁着我国电力系统的安全运行，造成了巨大的经济损失。华中的湖北、湖南、江西、河南等省及三峡地区，西南的云南、贵州、四川，华北的河北、山西及京津唐地区，西北的青海、宁夏等省（区）都发生过多起输电线路覆冰事故。据不完全统计，我国自 1954 年首次记录到输电线路覆冰事故以来，输电线路发生的大小冰灾事故数千次。

1999 年 11 月 24 日，东北两锦地区输电线路发生了大面积覆冰，覆冰引起输电线路跳闸达 103 次。2002 年 12 月中旬，京津唐地区连续数日出现严重的雪、雾天气，北京北部的昌平、延庆及张家口官厅一带的山区尤为严重，输电线路杆塔、导线及绝缘子上严重覆冰、积雪，导致 110kV 聂康一、二线及 500kV 沙昌二线等 14 次跳闸。2005 年 2 月 6 日～18 日，发生的大面积覆冰事故使电

网受到了严重冲击，并造成了巨大的经济损失，严重覆冰导致华中电网 220kV 以上电网共发生故障跳闸 80 次(其中 16 条 500kV 交流输电线路跳闸共 57 次)，杆塔倒塌 41 处，湖南电网与主网解列 1 次，湖北恩施电网与主网解列 2 次，华中西部电网(川渝)与东部电网(鄂豫湘赣)解列 1 次。冰灾最严重时，华中电网 10 条 500kV 交流线路同时停运，并有多条输电线路发生断线故障。冰灾导致湖南境内仅有的 4 条 500kV 线路中 3 条瘫痪，倒塔 24 基，另有 6 条 220kV 线路发生倒塌及断线事故，导致湖南骨干网架长时解列，五强溪、凤滩、柘溪、凌津滩等主力水电站的送出受阻；重庆境内 110kV 线路倒塔 4 基；连接鄂赣的 500kV 风梦线和鄂豫的 500kV 孝邵线，因覆冰过重导致地线滑移；湖北境内 500kV 玉贤变电站一度因覆冰停运。表 1-1 列出了 1990~2007 年全国电网部分典型的输电线路覆冰事故。

表 1-1 1990~2007 年全国电网典型覆冰事故

地区	时 间	线路名称或地区	电压等级 (kV)	气象条件	温度 (℃)	事故类型
华中地区	1993 年 11 月	湖北葛双 II 回	500	雨淞、大风	-5	倒塔
	1994 年 11 月	湖北葛双 II 回	500	雨淞	-1.5	倒塔
	2001 年 12 月	湖北葛双 II 回	500	小雨加雪	-2~0	冰闪
	2004 年 12 月	湖北西北部至湖南西北部	500 220	雨淞、大风	-5	冰闪 舞动
	2005 年 12 月	湖南复沙 I 回	500	雨雪和雨淞	1.5	冰闪
		湖北西北部	500	雨雪和雨淞	-2~2	冰闪 倒塔
	2006 年 1 月	湖南江城直流	±500	雨淞	-5~0	冰闪
	2007 年 1 月	湖南江城直流	±500	浓雾、小雨	-3~0	冰闪
华东地区	2006 年 1 月	安徽龙政直流	±500	雨淞	-3~0	冰闪
		江苏阳东 I、II 回	500	小雨加雪	-1	冰闪
华北地区	1998 年 12 月	山西阳泉地区	220	大雾	-2	冰闪
	1999 年 3 月	河北沙昌 II 回	500	大雾、雨淞	-5~10	冰闪
		河北保定大房 I 回	500	小雨加雪	-6~5	冰闪
		河北聂康 I、II 回	110	大雾、雨淞	-4~10	冰闪
	2000 年 1 月	河北大房线、沙昌线	500	雨淞	-5	冰闪

续表

地区	时 间	线路名称或地区	电压等级 (kV)	气象条件	温度 (℃)	事故类型
华北地区	2000 年 11 月	山西霍隰线	110	雨淞	-3~1	断线
	2002 年 12 月	北京昌平、延庆	110	大雾、大雪	-5~0	冰闪
		张家口官厅	500			
	2005 年 2 月	邯郸、邢台地区	500	雨淞	-3~1	冰闪
	2007 年 2 月	山西神忻 I、II 回	500	浓雾、雨雪	-3~1	断线
		山西神原 I、II 回	220	浓雾、雨雪	-3~1	断线
		山西忻石 I 线	500	雨雪	-3~1	冰闪
西北地区	1990 年 3 月	青海黄小线、韵东线	110	大雪	-3	冰闪
		青海花晏线刘家台段	110	大雪	-5	冰闪
	1992 年 10 月	青海龙黄、龙花线	330	雨夹雪	-5~0	冰闪
		青海北浩线	110	雨夹雪	-5	冰闪
	1993 年 5 月	青海红共线	110	大雪	-5	冰闪
西南地区	2004 年 1 月	云南昭通及以北地区	110	雨淞	-3~0	断线
	2005 年 12 月	贵州玉印线、贵福线	110	雨夹雪	-3~0	断线
		云南大盘线、宣者线	110	雨夹雪	-3	倒塔
		四川武秀线	220	雨淞	-3~0	倒塔
		重庆黔秀线	220	雨淞	-3~0	倒塔
	2007 年 1 月	贵州高箐直流	500	雨淞	-3~1	冰闪

2008 年 1~2 月,持续的低温雨雪冰冻自然灾害天气,使中国 13 个省(区)的电力系统运行受到影响,其中,灾情影响最为严重的是华中和南方地区,特别是贵州、湖南、江西、广东、广西、浙江等地,灾害共造成全国 169 个县停电。下面以 2008 年冰灾期间华中电网各省覆冰事故情况为例来说明输电线路覆冰的特点。

据华中电网公司统计,2008 年 1 月 11 日~2 月 4 日,华中电网 500kV 线路跳闸 69 条,共 232 条次,其中冰闪跳闸 218 次,覆冰舞动跳闸 14 次。按照跳闸线路所属地域统计如图 1-7 所示。

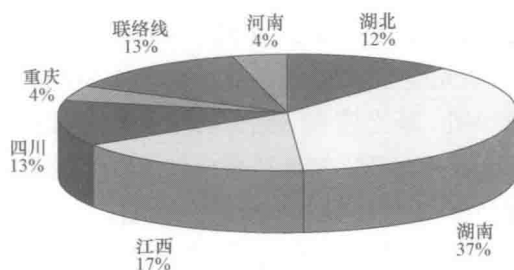


图 1-7 2008 年冰灾期间华中电网 500kV 线路跳闸分区域统计情况

可以看出,2008 年冰灾事故华中电网发生跳闸的 500kV 线路中湖南和江西占据了 54%,四川和重庆占 17%,湖北情况稍好,占 12%,其中省间联络线跳闸的有 9 条,占 13%。

在此次雨雪冰冻灾害中,湖南电网 29 条 500kV 线路发生故障跳闸 126 次,220kV 发生开关跳闸 683 次(含强送不成功),500kV 线路杆塔倒塌 182 基、变形 75 基、断线 481 处,220kV 线路杆塔倒塌 679 基、变形 269 基、断线 673 处,110kV 线路杆塔倒塌 1864 基、变形 628 基、断线 1663 处。累计 20 条 500kV 线路、96 条 220kV 线路、208 条 110kV 线路、384 条 35kV 线路以及 6 座 500kV 变电站、32 座 220kV 变电站、120 座 110kV 变电站、240 座 35kV 变电站、受损停运。城乡配电网 10kV 线路倒杆 5.99 万基,断线 4.55 万处 1.45 万 km,损坏配变 3213 台,低压线路倒杆 31.43 万基,断线 34.95 万处 3.76 万 km,停电台区 5.72 万个,停电 27160 个村、682.4 万户居民停电,在整个冰冻期间,发生了 500kV 电网解裂和衡阳、郴州等地区与主网解列,郴州电网遭受毁灭性破坏,京广电气化铁路停运,湖南省电力公司直接经济损失 32.9 亿元。如表 1-2 所示。

表 1-2 湖南电网 2008 年输电线路冰灾受损情况统计

电压等级 (kV)	线路条数	跳闸条次	断线条数	倒塔基数
500	20	481	182	20
220	96	673	679	96
110	208	1663	1864	208

江西电网约有 73.7%的 500kV 线路发生跳闸,500kV 线路共跳闸 62 次。220kV 线路共跳闸 172 次,110kV 线路共跳闸 170 次。2008 年冰灾共造成 4 次 220kV 及以上变电站母线故障;500kV 线路倒塔 116 基,断导线 62 处,断