



国家电网公司
电力科技著作出版项目

武守远 荆平等 编著

输电线路直流融冰 关键技术



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

输电线路直流融冰 关键技术

武守远 荆平等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

输电线路在冬季覆冰是威胁电力系统安全、稳定运行的严重灾害之一。2008年发生在中国南方的冰雪灾害,给国计民生带来严重的影响,重要的原因之一是由于输电线路覆冰造成电网的部分瘫痪,故加强对输电线路防冰除冰技术与装置的研究开发势在必行。本书综合分析和总结了目前国内外各种先进实用的防冰除冰技术,发现对于输送距离长的500kV输电线路来说,直流融冰是一种最直接、有效、可靠的除冰方案。

《输电线路直流融冰关键技术》一书由具有丰富科研和工程经验的相关专业领域的科技专家和工程技术人员编写而成。

本书共分为概述、直流融冰技术原理、直流融冰装置技术方案、直流融冰装置参数设计、无功特性分析与谐波治理、控制与保护系统、直流融冰系统集成及典型直流融冰工程8章。

本书可供电力系统设计、运行维护技术人员学习使用,也可供大专院校相关专业师生及对直流融冰技术感兴趣的读者阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

输电线路直流融冰关键技术/武守远等编著. —北京:中国电力出版社,2014.7

ISBN 978-7-5123-5609-2

I. ①输… II. ①武… III. ①直流输电线路-冰害-灾害防治 IV. ①TM726

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第039245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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2014年7月第一版 2014年7月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 12.5印张 234千字

印数0001—3000册 定价56.00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

输电线路直流融冰关键技术

编写人员

武守远	荆 平	李永亮	徐桂芝
李长宇	彭海燕	张 帆	康 健
蔡成良	王明新	孙 栩	蒋卫平
杨星磊	吴 田	阮江军	乐 健

自然界中持续的雨雪冰冻天气等极端气候条件会引起输电线路覆冰，严重覆冰会导致输电线路的机械和电气性能急剧下降，从而导致电网事故。我国多省（市）都曾发生过输电线路覆冰事故，已严重威胁电力系统的安全运行，并带来了巨大的经济损失。

输电线路直流融冰技术有别于传统的交流融冰，是一种新型且有效的输电线路融冰技术，克服了交流融冰方式的技术缺陷，被普遍认为是解决线路覆冰问题的较好方法。融冰技术尤其是直流融冰技术已成为当前研究的热点，受到政府部门、电网企业、电力设备制造商、科研机构 and 高等院校的广泛关注。

本书多角度、全面系统地论述了输电线路直流融冰问题：首先介绍融冰技术的概况；接着介绍直流融冰技术原理、直流融冰技术方案、直流融冰装置参数设计，并对谐波和无功特性进行分析；还介绍控制保护系统设计、直流融冰的系统集成；最后简要介绍典型的直流融冰工程。

本书作者均是相关领域的科技工作者和工程专家，其最大特点是内容服务于工程实际又高于实际工程，从多方面、多角度介绍直流融冰技术所涉及的问题，内容全面翔实、易于理解，而又不失技术深度和权威性。



中国科学院院士
中国电力科学研究院名誉院长

2014年3月

近十年来,世界性的干旱、酷热、严寒等极端天气频发,给各国人民的经济生活带来重大的影响。输电线路在冬季覆冰是威胁电力系统安全、稳定运行的严重灾害之一。由于导线上增加了冰载荷,对导线、铁塔和金具都会带来一定的机械损坏,覆冰严重时会断线、倒塔,导致大面积停电事故。2008年发生在中国南方的冰雪灾害,给国计民生带来严重影响,其重要原因之一是由于输电线路覆冰造成电网的部分瘫痪,故加强对输电线路防冰除冰技术与装置的研究开发势在必行。

综合分析目前国内外先进实用的防冰除冰技术,发现对于输送距离长的500kV输电线路来说,直流融冰是一种最直接、有效、可靠的除冰方案。其优点是:可实现零起升压和升流,且快捷方便;通过控制晶闸管阀组触发角,结合现场线路类型、覆冰状况、气象条件等因素控制直流融冰电流,以达到线路稳定的最佳融冰温度,对不同长度、不同类型线路适应性较好。

由于冰灾持续时间短、发生频度小,若直流融冰设备仅作为融冰装置使用,则其经济性较差。经过调研,结合国外直流融冰装置的状况,在输电线路没有融冰需求时,作为动态无功补偿装置使用,其功能相当于常规的SVC装置,可以为系统提供动态无功支撑,阻尼系统低频振荡,提高系统稳定极限和输送能力。而当输电线路需要融冰时,经过简单的主接线重构,可以较方便地改为直流融冰装置,为输电线路提供必要的直流融冰电流。采用这种可重构型直流融冰/无功补偿装置可以极大地提高设备的利用率,维持设备的健康状况。

本书从近几年冰雪灾害的实际情况出发,论述了推广融冰技术的必要性和重要意义,介绍了直流融冰技术的基本原理和直流融冰系统构成、功能及主要装置选择原则。在参数计算部分,给出了一套直流融冰系统各主要一次设备的主要技术参数指标。进行直流融冰系统分析设计时,还必须进行谐波和无功特性的分析,本书在该部分内容中给出了交/直流侧谐波特点与无功功率需求的计算和补偿方法,同时给出了交/直流侧滤波器的设计方法。为了满足读者对直流融冰系统控制保护部分内容的了解,本书专门设计了一章详细介绍相关部分的内容。在本书的最后两章中介绍了直流融冰系统的集成及国内典型直流融冰工程。

本书的编写者都是相应专业领域的科技专家和工程技术人员,具有丰富的科研和工程经验。本书的编著者武守远教授级高级工程师从事系统分析与控制领域的研

究工作近三十年，获得多项科研成果和创造发明，他负责本书的组织工作，提出本书的写作大纲，负责全书的审稿；荆平负责全书的统稿工作，对本书的写作给予很大的指导；第1章由李永亮编写；第2章由李永亮、蔡成良编写，康健校核；第3章由彭海燕、张帆编写，荆平校核；第4章由孙栩、蒋卫平编写，徐桂芝校核；第5章由吴田、杨星磊编写，乐建、阮江军校核；第6章由王明新、孙栩编写，康健校核；第7章由徐桂芝、李长宇编写，张帆校核；第8章由张帆编写，李永亮校核。康健对本书全稿提出了许多有价值的修改意见。

由于水平有限，编写时间仓促，书中难免存在不妥之处，敬请读者谅解并提出宝贵意见。

编 者

2014年3月

目 录

序 前言

第 1 章 概述	1
1.1 输电网覆冰危害	1
1.2 除冰方法及其适用性	5
1.3 国内外除冰技术发展概况	8
1.4 电网冰雪灾害的防治与策略	13
1.5 小结	14
第 2 章 直流融冰技术原理	15
2.1 覆冰的形成条件及种类	15
2.2 直流融冰原理	17
2.3 直流融冰电源	18
2.4 整流技术	19
2.5 融冰线路的连接与电阻	22
2.6 融冰电流与融冰时间研究	23
2.7 小结	42
第 3 章 直流融冰装置技术方案	43
3.1 直流融冰装置的构成	43
3.2 运行结构	44
3.3 运行方式	44
3.4 晶闸管阀	44
3.5 整流变压器	52
3.6 平波电抗器	53
3.7 直流滤波器	53
3.8 交流滤波器	54
3.9 小结	55

第4章 直流融冰装置参数设计	56
4.1 概述	56
4.2 500kV 复兴变电站主参数	57
4.3 主要参数技术指标	57
4.4 计算条件	59
4.5 整流变压器	61
4.6 晶闸管阀整流器	64
4.7 无功及滤波计算	65
4.8 平波电抗器	66
4.9 直流滤波器	67
4.10 整流变压器直流偏磁分析	67
4.11 直流融冰系统谐振分析	70
4.12 仿真计算与参数验证	73
4.13 小结	84
第5章 无功特性分析与谐波治理	85
5.1 无功特性分析及补偿策略	85
5.2 交流侧谐波分析及滤波器设计	98
5.3 直流侧谐波分析及滤波器设计	125
5.4 小结	137
第6章 控制与保护系统	138
6.1 概述	138
6.2 控制策略	139
6.3 保护方案	144
6.4 阀基电子单元	155
6.5 TFR 故障录波及显示	156
6.6 后台监控系统	157
6.7 小结	163
第7章 直流融冰系统集成	164
7.1 过电压与绝缘配合	164
7.2 装置集成要求	166
7.3 保护配置和定值的选择	171
7.4 直流融冰装置的现场接入	172

7.5 小结	173
第 8 章 典型直流融冰工程	174
8.1 系统构成	174
8.2 设计规模	175
8.3 结构原理	176
8.4 工作模式的转换	176
8.5 直流融冰兼 SVC 装置	177
8.6 谐波滤波效果	180
8.7 工程投运情况	181
8.8 小结	182
参考文献	183
索引	186

概 述

1.1 输电网覆冰危害

近十年,极端冰雪气候日益频繁。输电线路的覆冰和积雪常会引起线路的跳闸、断电、倒杆、导线舞动、绝缘子闪络和通信中断等事故。美国、俄罗斯、加拿大、日本、英国、芬兰、冰岛和中国均曾因输电线路覆冰引起安全事故,并带来巨大经济损失。如今,电网覆冰灾害日益加剧,冰雪灾害已经成为全世界许多国家的电网面临的共同问题。

中国是输电线路覆冰最严重的国家之一,线路冰害事故发生的概率居世界前列。据不完全统计,从 1954 年 12 月我国首次出现电网覆冰灾害,到 2008 年 3 月上旬为止,仅各地 6kV 及以上电压等级的电网(包括输电线路和变电站)就发生各种各样的覆冰灾害 1000 多起,其中 35~500kV 电压等级电网发生规模较大并引起电网严重故障的覆冰灾害 100 起以上。尤其是 2004~2008 年,每年都有大量的电网覆冰灾害发生。可见,电网覆冰灾害发生的频率越来越高、影响的范围越来越大、造成的危害越来越严重。

为了降低输电线路覆冰灾害的发生率及其造成的损失,世界各国研究人员都在积极研究线路防冰和融冰技术,以提高电网的运行可靠性和安全性。

1.1.1 2008 年中国南方冰雪灾害

2008 年 1 月,世界上许多国家都发生了严重的暴风雪灾害:

- 1 月 5 日,伊朗大雪(雪厚 55mm);
- 1 月 11 日,伊拉克遭遇百年来首次大雪;
- 1 月中旬,阿富汗遭遇罕见雪灾,积雪达 200cm;
- 1 月 22 日,约旦大雪;
- 1 月 28~29 日,土耳其大雪并引发雪崩;
- 1 月 29 日巴以积雪 1m 以上,以色列北部山区积雪深达 7m;

1月,美国、英国、法国、比利时及德国等国家先后也被暴风雪席卷;

日本沿海以及北海道等地区连降大雪,14条铁路的15个区段停运,138万个家庭电力中断;

我国南方的华中、西南、华东地区发生严重的雨雪冰冻灾害,先后出现4次大范围雨雪冰冻天气,输变电设施覆冰覆雪严重,遭受了不同程度的损害,线路跳闸和倒塔断线现象普遍,严重威胁电网安全稳定运行,给国民经济带来了重大损失。

1.1.1.1 受灾情况

国家电网公司经营区域内华中、华东及所属10个省级电网遭受灾害影响,其中湖南、浙江、江西电网受灾最为严重,输电线路大面积覆冰、舞动,覆冰厚度普遍超过30mm,最大超过60mm。此次冰灾时间之长、范围之广、程度之深、损失之重前所未有。公司经营区域共计37个地市545个县(区)供电受灾,其中80个县(区)供电几乎全部中断,主要集中在湖南省衡阳、郴州、永州和江西省抚州、赣州等地区。冰灾中累计停电台区约22万个,停电用户2700万户。2008年冰灾部分电网区域塔杆倒塌统计情况见表1-1,2008年冰灾部分电网区域的输电线路断线的统计情况见表1-2。

表 1-1 2008 年部分电网区域冰灾塔杆倒塌统计情况

电网区域	500kV		220kV	
	累计倒塔基数(基)	累计受损基数(基)	累计倒塔基数(基)	累计受损基数(基)
湖南	182	82	630	167
江西	116	0	144	18
湖北	15	13	0	2
浙江	167	28	43	16
安徽	2	2	0	0
四川	1	2	2	3
重庆	0	7	0	0
福建	0	0	1	2
江苏	0	0	0	0
贵州	169	134	147	86
云南	0	2	72	78
广西	26	25	90	38
广东	0	0	303	176
合计	678	295	1432	586

表 1-2

2008 年部分电网区域冰灾输电线路断线情况

电网区域	累计断线数 (条)	
	500kV	220kV
湖南	482	542
江西	116	507
湖北	21	0
浙江	117	29
安徽	2	0
四川	16	5
重庆	3	1
福建	0	3
江苏	0	0
贵州	195	541
云南	4	56
广西	25	228
广东	0	296
合计	981	2208

同时,电网的损坏造成无法对电气化铁道牵引站供电,严重影响电气化铁道的运行。如湖南郴州、衡阳电网损坏引发多个电气化铁道牵引站失电,造成京广铁路“大动脉”停运。

据不完全统计,2008年初我国发生的冰雪灾害造成了影响1亿多人的电网大面积覆冰、断电和电力设施严重损毁灾害,给国民经济和社会生活带来了巨大的损失,直接经济损失超过1100亿元。

国家电网公司范围内35kV及以上变电站停运884座,线路停运约1.5万条,倒杆倒塔17万基、受损杆塔1.2万基;低压线路累计受损约15万km、倒杆52万基;电力通信光缆损坏约2500km,各类通信站损毁8座,通信设备损坏182台(套)。

灾害造成公司系统电网设施直接财产损失约104.5亿元,减少售电收入约51亿元。

1.1.1.2 覆冰特点

这次冰雪灾害的凝冻天气持续时间长、强度大、范围广,正好吻合了导线覆冰所需的气温、湿度、风速、逆温层等条件。其主要有以下4个特点:

(1) 覆冰过程气温为 $-5\sim 0^{\circ}\text{C}$,降小雨或毛毛雨,浓雾,相对湿度大于95%,

风速 $5\sim 10\text{m/s}$ ，风向大多为北风和西北风。

(2) 覆冰体半透明，坚硬光滑且密实，密度约 0.9g/cm^3 ，导、地线覆冰体近似椭圆形，其长短轴相差较小，附着力强。

(3) 与 2005 年冰灾不同，2008 年结冰没有高低海拔的区别，地面及水面普遍有覆冰，梯形覆冰不明显，但随海拔增高覆冰也略严重。

(4) 同一地段高程越高覆冰越严重。在海拔 $50\sim 250\text{m}$ 的山地及丘陵区，地形相对高耸和突出的地方覆冰较重，标准冰厚达 $30\sim 50\text{mm}$ 。

某地本次线路覆冰的形态见图 1-1。

1.1.2 输电线路覆冰造成的主要危害

输电线路覆冰造成的主要危害有以下 4 个方面。

1.1.2.1 线路超重引发过载事故

当输电线路覆冰积累到一定体积和重量之后，输电线路的重量倍增，弧垂增大，输电线路对地间距减小，从而导致闪络事故的发生。同时，在风的作用下，两根输电线路或输电线路与地之间可能相碰，会造成短路跳闸、烧伤甚至烧断输电线路的事故。如果覆冰的重量进一步增大，则可能超过输电线路、金具、绝缘子及杆塔的机械强度，使输电线路从压接管内抽出，或外层铝股全断、钢芯抽出。当输电线路覆冰超过杆塔的额定承载限度时，可能导致杆塔基础下沉、倾斜或爆裂，杆塔折断甚至倒塌（见图 1-2）。



图 1-1 某地本次线路覆冰的形态



图 1-2 杆塔倒塌图

1.1.2.2 相邻档不均匀覆冰或不同期脱冰造成事故

输电线路相邻档不均匀覆冰或不同期脱冰都会产生张力差，使输电线路在线夹内滑动，严重时输电线路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。相邻档张力的不同,还会导致直线杆塔承受张力的能力变差,悬垂绝缘子串偏移很大,碰撞横担,造成绝缘子损坏或破裂;也可使横担转动,输电线路碰撞拉线,烧伤或烧断拉线,杆塔在失去拉线的支持后倒塌。不同期脱冰使横担折断或向上翘起,地线支架破坏,因覆冰不均匀使横担扭转。

1.1.2.3 安全距离不够引起事故

由于各档距内线路覆冰不均匀,会使各档距内线路的弧垂发生较大变化。有严重覆冰的档距内导线载荷很大,使导线严重下垂,当小于安全距离时会引起事故(见图1-3)。

1.1.2.4 绝缘子串短路造成接地事故

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容易溶解污秽中的电解质,提高了融冰水或冰面水膜的导电率,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导电率,形成覆冰闪络(见图1-4)。

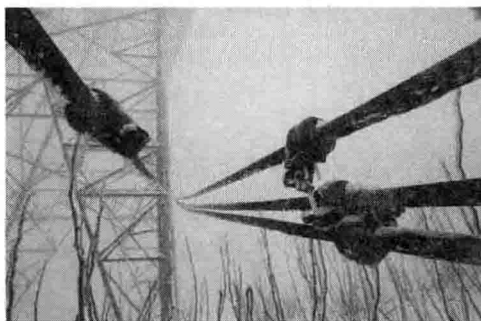


图1-3 安全距离不够引起的事故

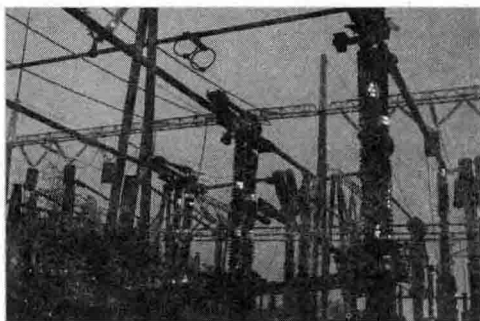


图1-4 变电站内主变压器覆冰闪络短路冲击

1.2 除冰方法及其适用性

随着全球气候变暖、极端天气增多、西部水电资源开发规模不断扩大和“西电东送”战略的实施,今后复杂大电网将会越来越多地经受大面积覆冰的考验,大电网覆冰灾害问题将更加突出。因此进行防冰除冰技术的研究任务紧迫。

为解决输电线路冬季覆冰这一严重威胁电力系统安全运行的难题,国内外对输电线路覆冰问题进行了大量研究,并提出了许多输电线路融冰方法。综合国内外的除冰方法有30余种,大致上可以分为自然脱冰法、机械除冰法和大电流融冰法

(热力融冰法) 3 类。

1.2.1 自然脱冰法

自然脱冰法是指不需要外界供给能量而靠自然力除冰防冰的方法。自然除冰法设备投资少, 简单易行, 但是融冰效果差。具体包括平衡重量、刷涂吸热涂料以及刷涂憎水性涂层等方法。

(1) 平衡重量法。在单线上安装阻雪环、平衡锤等装置, 使导线上的覆冰堆积到一定程度时, 依靠风力、地球引力、辐射以及温度变化等作用自行脱落。该方法虽然简单易行, 但是不能保证可靠除冰, 往往因不均匀或不同时除冰而产生导线跳跃的线路事故。如法国电力公司曾使用过平衡重量防冰球, 具有一定的效果。

(2) 刷涂吸热涂料法。在导线表面刷涂吸热涂料利用太阳能除冰。该方法需要足够的太阳辐射时才有效果, 但是在夏季导线表面的涂层会增加导线温度, 故该方法不适用于高压线上。

(3) 刷涂憎水性材料法。在导线表面刷涂憎水性涂层降低冰和导线之间的附着力。目前, 世界上还没有一种可以阻止冰形成的材料, 尚没有能够适用于导线的涂料。因为导线涂层容易有裂纹, 还存在老化等问题。且憎水性材料的憎水性能对于覆冰效果不明显。

1.2.2 机械除冰法

机械除冰法是指利用各种机械动力使冰产生应力破坏从导线上脱落, 主要是针对输电线路已经形成严重覆冰的情况。机械除冰法主要有外力敲打法(国外类似的是“ad hoc”法)、滑轮碾压铲刮法(Icing Rolling)和电磁脉冲除冰法(Electro-Impulse De-Icing, EIDI)。

(1) 外力敲打法。主要由操作者现场处理, 处理方法千变万化。这种方法虽然简单易行, 但只是权宜之计, 只能除很少一部分覆冰, 除冰速度慢、不安全、工作量大且不经济。该方法只能在没有其他更有效方法的紧急情况下使用。

(2) 滑轮碾压铲刮法。主要利用加在滑轮上的力使导线弯曲, 产生应力使冰破裂、脱落。其优点是效果很快且不需要特别的设备, 简单易操作, 耗能小, 价格低廉, 较易使用。但拉扯时容易损伤线缆、避雷器和绝缘子, 且实际操作中比较费时, 安全性能不完善, 受地形限制。该方法目前已在加拿大的 Manitoba 使用了 50 年, 是目前唯一可行的输电线路除冰的机械方法。

(3) 电磁脉冲除冰法。其基本原理是通过给整流器施加触发脉冲, 使电容器通过线圈产生强磁场放电激发电脉冲, 从而在导线中产生涡流, 涡流的磁场与线圈磁场产生斥力使导线产生扩张, 脉冲消失后导线收缩到原状态, 反复的扩张和收缩使

导线表面的覆冰胀裂掉落。其优点是没有移动部件，但目前还没有可以有效地利用线圈产生斥力给带电线路除冰的激励源，因此不能除去长线路的冰。这种方法还未能投入实际应用。

1.2.3 大电流融冰法

大电流融冰法是利用电网已有的设备和输电能力，通过适当的技术措施进行输电线路的热力融冰。几种最主要的大电流融冰法包括增加覆冰线路负荷电流融冰（过电流融冰法）、交流短路电流融冰法和直流电流融冰法。

(1) 过电流融冰法。利用焦耳效应加热导线使之融冰。实际运用中主要依靠科学的调度提前改变电网潮流分配，使线路电流达到临界电流以上。缺点是增加覆冰线路负荷电流受系统容量以及运行方式的限制，且不能融解避雷线和架空地线上的覆冰。

(2) 交流短路电流融冰法。利用焦耳效应，用较低的电压提供较大的短路电流加热导线使导线的冰融化。短路电流融冰技术包括不带负荷的三相短路融冰技术、两相间短路融冰技术、单相短路融冰技术、传统的带负荷融冰技术、利用介质损耗除冰技术以及利用短路电磁力除冰技术等。短路电流融冰法中三相短路融冰技术最常见，即将线路一端三相短路，另一端供给融冰电源，采用较低的电压提供较大短路电流加热导线使导线上覆冰融化。国内如宁夏固原供电局采用三相短路融冰法、湖南电网采用三相短路融冰法，融冰效果显著。但短路电流融冰耗电量且需要修改保护定值，还需要在短路情况下保证系统安全和重要用户的供电，操作过程复杂、繁琐，对调度员要求高。该方法主要应用于 220kV 及以下线路融冰，在 500kV 及以上电压等级线路进行短路融冰的案例几乎没有。

(3) 直流电流融冰法。利用三相桥式整流，将交流电源转化为直流电源。其中通过调节可控的电力电子器件（GTO 触发角），动态地改变输出电压的大小，使加在导线上的融冰电流可调。直流融冰的主要原理是将覆冰线路作为负载，施加直流电源，用较低电压提供直流短路电流来加热导线使线路覆冰融化。尤其对于 500kV 线路，直流融冰是一种切实可行的技术方法。因为 220kV 以上交流输电线路，其交流阻抗大，而直流电阻一般只有交流阻抗的 10% 左右，采用交流短路融冰法时需要的无功功率较高，基本上无法实现，而采用直流电流融冰法时，达到同样融冰效果所需要的电源容量就小得多，提高了融冰效果。另外，直流融冰电压可调，可以满足不同长度线路的融冰要求。基站式的直流融冰全站共用一套装置，即可对全站所有的进出线开展直流融冰工作；在大面积覆冰时，基站式的直流融冰的效果尤其明显。