

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191287

高压架空输电线路防冰、融冰、除冰技术研究综述

王勇¹, 苗虹¹, 莫思特¹, 查云峰¹, 李仁杰¹, 刘首文²

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 湖北省电力公司, 湖北 武汉 430077)

摘要: 目前的防、融、除冰技术多样, 但尚无明确的体系来划分三者间的区别。对以往的国内外防冰、融冰、除冰技术进行梳理归纳, 划分高压架空输电线路防、融、除冰三大技术体系, 并指出当前防、融、除冰技术发展需克服的一些难点。除此之外, 介绍正在研究的自制热融冰导线、基于 PTC(Positive Temperature Coefficient)材料的智能融冰导线方案以及目前部分地区已工程应用的地线融冰技术。最后, 从“智能电网”中的“可适应、可自愈”角度出发, 提出建设一体化防、融、除冰技术体系, 并对融冰技术的下一步发展趋势进行了展望。

关键词: 输电线; 防冰; 融冰; 除冰体系; 智能

Summary of research on anti-ice, ice melting and de-icing of high voltage overhead transmission lines

WANG Yong¹, MIAO Hong¹, MO Site¹, ZHA Yunfeng¹, LI Renjie¹, LIU Shouwen²

(1. School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2. Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China)

Abstract: The current technologies for prevention, melting and deicing are diverse, but there is no clear system to distinguish the differences between the three. This paper sorts out the past domestic and foreign anti-icing, melting ice and de-icing technologies, and points out that the current development of anti-icing, melting and deicing technologies needs to overcome some difficulties. In addition, this paper introduces the self-made hot-melt ice wire that the team is studying, the concept of intelligent ice-melting wire based on Positive Temperature Coefficient (PTC) material, and the ground melting ice technology that has been applied in some areas. Finally, from the perspective of “adaptable and self-healing” in the “smart grid”, this paper proposes to build an integrated prevention, melting and deicing technology system, and discusses prospects for the next development trend of ice melting technology.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. 5200-201999363A) and Open Foundation Project of National Key Laboratory of State Grid Hunan Disaster Prevention and Mitigation Center (No. SGHNFZ00FZCSJS1800092).

Key words: transmission line; anti-icing; melting ice; deicing system; intelligent

0 引言

导线覆冰程度主要受地形、气象、导线本身结构、海拔高度^[1]等因素影响。输电线路在不同的因素影响下会产生雨淞、混合淞、雾淞、积雪、白霜等覆冰类型, 其中, 又以雨淞对线路危害程度为最^[2]。

我国电网建设初期, 因其规模较小^[3], 冰灾对电网的危害程度不高^[4]。但随着我国电力工业现代

化进程的不断加快, 冰灾给电网造成的危害愈发严重。与此同时, 世界范围内的电网覆冰灾害情况亦是不容乐观^[4-5]。输电线路覆冰所带来一系列问题如: 杆塔倒塌^[6]、导线相间舞动^[7]造成的短路、绝缘子污闪^[8]、铝线断裂、钢芯抽动^[9]等, 不仅直接影响到电网的安全稳定运行^[10], 还将间接影响到我国的国民生产, 所造成的经济损失难以估量^[11]。为此, 国内外专家针对电网覆冰灾害进行了大量研究。文献[12]对以往的输电线路覆冰在线监测预警模型进行了改进, 该模型以温湿度、风速风向为关键风险影响因子, 能够实时反映线路覆冰变化趋势。文献[13]建立了一种新的导线临界防冰电流模型, 同

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(5200-201999363A); 国网湖南防灾减灾中心国家重点实验室开放基金项目资助(SGHNFZ00FZCSJS1800092)

时推导出了导线直径、外界环境的变化与导线防冰电流的关系。文献[14]提出一种特高压带电直流融冰方法,但该方法带电融冰会抬高融冰段线路电压,对电路输电造成影响。文献[15]提出一种考虑融冰因素的输电线路覆冰故障概率计算模型,但该模型是在一定理想环境下建立的,只能在一定程度上反映实际天气对覆冰故障概率的影响。综上,目前消除电网覆冰灾害的手段虽多,但都有一定的局限性。因此,不断完善和研究新的高效率、高性能、低能耗、低风险的防冰、融冰、除冰技术很有必要。本文将对目前国内外防冰、融冰、除冰技术进行系统的归纳、总结。

1 输电线路防冰技术

1.1 导线表面涂防冰涂料(超疏水涂料和发热型涂料)

超疏水涂料:目前的超疏水涂料可分为表面微纳结构和液体润滑层两大类。其作用方式又可分为三种:(1)阻止水滴在结冰前黏附在导线表面;(2)通过延缓导线表面水滴在结冰时的结晶成核过程进而延长其结冰时间;(3)降低线路覆冰后导线与冰层之间的黏附力^[16]。

发热型涂料:基于涂料的配方和其工作原理,发热型涂料可分为两大类——光热型和电热型^[17-18]。光热型涂料防冰效果有限,只有在充足的光照条件下,涂料中吸热物质在进行一定程度的光热转换后,涂层才能有较好的防冰效果;而电热型涂料主要用于绝缘子防冰上,通过添加导电填料使涂层的电阻率降低,进而利用其涂料中产生较大的泄露电流发热,起到防覆冰的效果。

目前利用超疏水涂料来防冰,但由于其技术性不强,工程维护成本高,涂层有效期只有3~5年等问题,尚未完全应用到工程实际中,各国都尚在研究阶段,然而其对输电导线防冰的积极意义不可否认。

1.2 规划线路设计时,尽可能使线路避开覆冰地区

在输电线路设计阶段,依据冰区分布图,综合考虑地形、海拔、风速、地表水体因素^[19]、导线自身特性等对输电线路覆冰的影响,对电网线路进行差异化设计^[20],在必须经过的重冰区,选择机械强度较高的钢芯铝绞线^[21],适当缩小档距。在实际施工过程中,对输电塔主要构件的连接螺栓采取防松动措施^[22]等,尽可能减小导线因覆冰发生事故的概率。

1.3 结合气象监测预警系统,利用临界电流来防冰

临界电流防冰一般和气象监测预警^[23-25]手段结合起来使用来达到防冰的目的。通过提前对电网潮流进行科学合理的调控,使重冰区的输电线路潮流

增大,利用电流焦耳热效应使导线表面温度保持在零度以上,进而达到防冰的目的。这种方法既可用于防冰,又可用于融冰,但由于操作较为复杂,能耗较高,且不能同时对多段线路防冰、融冰,目前这种技术还处在实验阶段,工程应用不多。

1.4 利用防冰导线来防冰

通过在钢芯和铝绞线之间加绝缘层来制作防冰导线防冰。不融冰时,铝线表面通过线路电流;需要融冰时,使线路电流全部经过钢芯,由于钢线铝线之间存在绝缘层,铝线表面无电流通过,再加上同等单位钢芯的电阻远大于铝线电阻,输电线路可在较短时间内产生足够的热量使线路覆冰融化,起到防、融冰的作用。

1.5 利用形记合金防冰

利用形记合金“冷胀热缩”产生的内应力^[26-27]来破坏输电线路冰层结构,在重力、风速的作用下,使输电线路覆冰自然脱落。但形记合金因为其制作工艺和技术的复杂性,再加上高昂的成本,目前这种技术尚处在理论研究状态。

2 输电线路短路融冰技术

交直流融冰是目前消除输电线路覆冰灾害最为有效、且比较成熟的技术之一^[28-30]。国内外已有不少专家和学者在此领域进行了大量研究和探索,成果斐然。20世纪90年代,俄罗斯和加拿大的一些地区及机构便开始进行交流短路融冰。1972年,基于二极管整流的直流融冰装置^[31]在前苏联问世。国内方面,多家电力单位如:中国电科院、湖南省电力公司、南瑞集团、许继集团成功研制各种融冰装置,并在我国贵州、湖南等地相继投入使用^[32-33]。

2.1 交流融冰技术

2.1.1 常规交流融冰技术

常规交流融冰方式可分为发电机零起升压(图1)和系统冲击合闸短路^[34](图2)。两种方式都是通过将变电站内的110 kV、35 kV或10 kV交流电源加到覆冰线路上,并在覆冰线路的对侧或者中间段进行三相短路,通过施加几百至上千安的短路电流快速将线路覆冰融化。

与下文提到的直流融冰技术相比,交流融冰技术可实现输电线路三相同步融冰,可大大减小不同相脱冰所造成事故的概率,此外,相比新融冰装置,这种方式的投资较少。当然,这种技术也存在一些缺陷。(1)融冰时,需要停运相关线路。(2)融冰电源采取发电机零起升压方式应用范围有限,发电机操控量大,需要较多的倒闸操作。而采取系统冲击合闸短路的方式需要转移负荷,直接短路,对系统

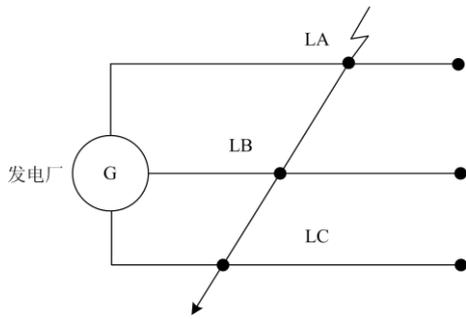


图 1 发电机零起升压

Fig. 1 Generator zero boost

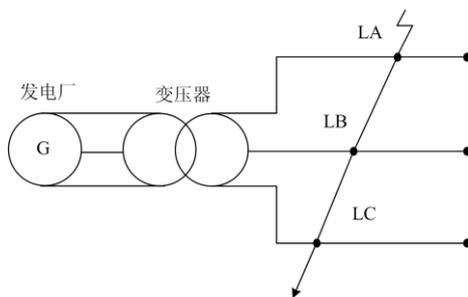


图 2 系统冲击合闸短路

Fig. 2 System shock closing short circuit

电压有一定的冲击，且融冰电流取决于系统条件，可控性较差^[35]。(3) 冬季本就是用电负荷高峰期，融冰所需的大量电能无疑会使电网供电更加紧张；(4) 开展融冰工作需要电网多部门相互协作，融冰准备时间较长，对调度操作人员要求高，需要的倒闸操作非常复杂。难以在多覆冰地区、多覆冰线段同时进行融冰，效率较低。

2.1.2 带负荷交流融冰技术

带负荷融冰方法基本原理也是通过增大覆冰线路的电流来实现融冰。这种方法不需要停运线路，只需改变线路潮流。目前国内外带负荷融冰主要基于以下三种方法^[36-37]。

1) 基于调度的调整潮流融冰。通过制定科学的调度方案，向覆冰线路传送更多的功率。具体措施有：停运并列线路(效果最好)、增加送端开机容量或减少受端开机容量、降低电压水平、增加无功传输、转移负荷等。500 kV 输电线路由于融冰电流太高^[38]，通过调度难以实现，因而这种方法只适用于 220 kV 及以下的网状结构电网，且需要停运多条线路才能对线路潮流产生较大的影响。此外，对于负荷自然分布、受电网稳定极限限制的 110 kV 馈线网络，难以通过调度潮流来实施融冰。

2) 基于增加无功电流的调整潮流融冰。通过降低系统功率因数的同时保证负荷正常供电不受影

响，向所需融冰的线路增加无功功率传输。这种方法融冰对无功功率的控制要求较高，尤其是对网状结构的电网难度更甚。此外，该方法融冰还会破坏系统的无功功率分布，不利于系统维持稳定，实用性不高。

3) 基于移相变压器的带负荷融冰。通过在变电站安装移相变压器，使其在双回线路产生一个有功功率循环，其中一回路正向传输，另一线路反向传输，这样就增加了正向传输线路的电流，其值等于移相器电流与负荷电流之和，从而达到融冰的目的。但采用这种方法融冰需要在线路中增加移相变压器，且操作过程中增加了系统对无功的需要，会对系统安全造成影响。

2.1.3 可调电容串联补偿式交流融冰技术

继 2008 年南方冰灾以后，某省电力公司提出了可调电容串联补偿式交流融冰方法，并在部分地区获得试验性应用^[39]。该方法根据融冰电源电压大小和输电线路长度，来调节串联在线路上电容的容抗，进而使输电线路的电流满足融冰要求。利用该方法融冰存在两个难点：(1) 最佳串联电容容抗值的选取，如何保证串联电容后的线路电流既要在线路安全运行的电流范围内，又要达到融冰电流的要求；(2) 串联电容的容抗需要根据融冰线路的长度逐级可调^[40]。

2.2 直流融冰技术

直流融冰技术可分为两大类。一类为增设额外融冰装置，如：固定式融冰装置、移动式发电车或便携式整流装置。其中固定式融冰装置由于体积大、造价高，为提高其经济性，多设计成一体两用，即融冰时提供所需电源。不融冰时设计成动态无功补偿装置，用来提高电网电能质量或消除电网电压波动^[41]，这种一般多用于 500 kV 及以上电压等级网络。移动式是由发电车或系统电源经其携带的整流装置后带线路融冰，这种一般用于短线路，常见于中高压及以下电压等级网络，可实现零起升流。除移动式发电车外，固定式和便携式整流融冰装置的融冰基本原理如图 3 所示，即交流电源经融冰装置带线路进行两相或三相融冰。

另一类为不增设融冰设备，仅在高压直流输电系统中可用，按运行方式又可分为两种。(1) 利用直流输电系统过载能力融冰。由于直流输电系统都有一定的过载能力，可在过载范围内增大线路电流达到融冰要求，但这种方式易受直流线路过载能力和线路覆冰环境的限制，融冰能力有限。(2) 通过改变系统中换流站和逆变站的运行方式来使线路电流达到融冰要求。采用这种方式融冰受限于不同的高压

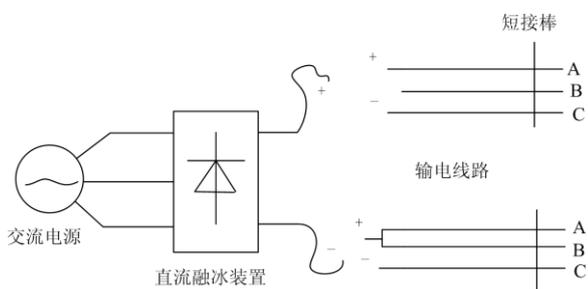


图3 直流融冰基本原理

Fig. 3 Basic principle of DC melting ice

直流输电线路状况, 此外, 这种方式会对原系统改变较大。

与交流融冰技术相比, 直流融冰技术需要电网提供的融冰电源容量小、无需无功补偿装置、无需考虑线路阻抗匹配和进行复杂的倒闸操作, 在直流融冰装置足够的情况下, 可对多覆冰地区、多覆冰线路同时进行作业, 效率较高。

直流融冰技术的不足: (1) 直流不可控整流融冰装置难以实现电压连续可调, 可控整流融冰装置控制系统复杂, 运维成本高, 调压时会产生大量谐波并向系统注入无功; (2) 融冰时皆需要停运线路, 影响电网冬季用电高峰期正常供电; (3) 需要投资建设直流融冰装置, 且装置的使用率低, 经济性差。

2.3 地线融冰技术

架空地线不承担输电功能而无电流焦耳热效应, 故其覆冰程度更甚导线。地线覆冰超过一定程度后, 会引起线路断裂/股, 进而造成输电线路整体结构失衡, 增加杆塔倾斜/倒塔几率。此外, 若地线断线误搭到输电线上还会造成线路短路、跳闸等事故^[42]。现有的架空地线因考虑防雷功能, 一般设计成逐塔接地或分段接地, 这种运行方式给地线融冰作业带来困难, 运用短路融冰法需要对地线进行一定的改造, 现有的地线融冰技术大致有以下几种。

2.3.1 短路融冰

地线短路融冰通过对架空地线线路进行改造, 让逐塔接地或分段接地的地线全部连接起来, 再通过交直流, 形成电流回路进行融冰。这种方法融冰的优势是可以进行远距离地线融冰, 缺点是地线的防雷功能被破坏。针对此问题, 有专家提出了通过在地线支架处装绝缘子, 如图4—图6所示, 通过将地线挂在绝缘子上, 使地线与杆塔绝缘, 当发生雷击时, 绝缘子间的并联放电间隙将被击穿接地, 从而实现避雷功能。我国湖南部分地区电网已经利用这种方法成功进行融冰, 但其防雷功能有待进一步验证。此外, 利用这种方法实施融冰依然要对架

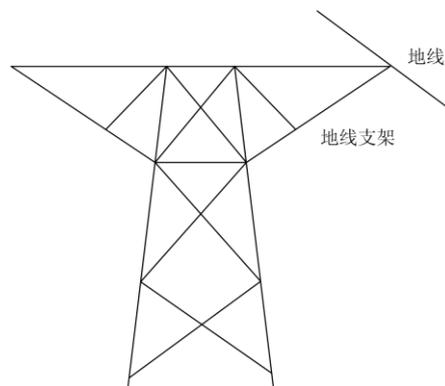


图4 常规地线接线方式

Fig. 4 Conventional ground wiring

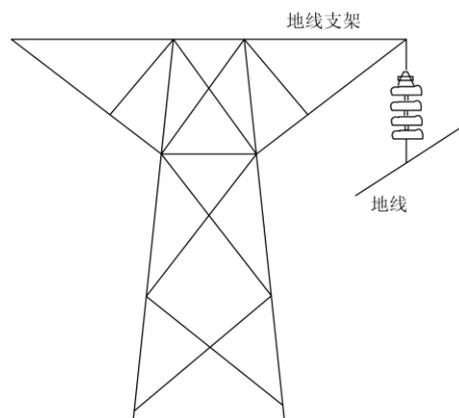


图5 全绝缘地线接线方式

Fig. 5 Fully insulated ground wiring

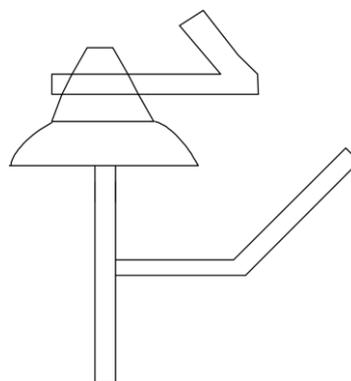


图6 带并联放电间隙的绝缘子

Fig. 6 Insulator with parallel discharge gap

空地线和杆塔连接处进行大规模改造。

2.3.2 内嵌绝缘导线融冰方法

内嵌全绝缘导线主要通过导线“内热”来实现融冰。通过将普通钢绞线中的2股或多偶数股钢线替换为绝缘导线(图7), 将其分成两组后, 对其一头进行短接, 另一头将直流电压接入两组导线。当内嵌的绝缘导线达到合适的融冰电流后, 即可将线路

覆冰融化。实际应用中，这种方法的工程改造量依然很大，仅在国内试点性应用。

2.3.3 地线外缠绕导线融冰方法

与“内热”式融冰导线相对的是地线外缠绝缘融冰导线。地线外缠绝缘融冰导线不需要改变现有地线结构，只需对原地线进行外缠式改造(图 8)。融冰方法与上述内嵌绝缘导线融冰方法类似。这种“外热”式融冰方法对外缠式绝缘导线除了有绝缘要求外，从其寿命和使用率上来说，还对其在各种环境下的性能提出了更高的要求，实际工程应用不多。

2.3.4 输电线与地线短接融冰方法

为了实现地线融冰的同时而又不破坏其避雷功能，我国最新的直流双极输电网络采取了如图 9 所示的地线融冰方式。杆塔下方处设地线刀闸开关，

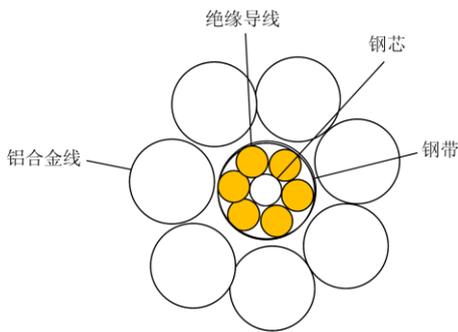


图 7 内嵌绝缘导线

Fig. 7 Insulated insulated wire

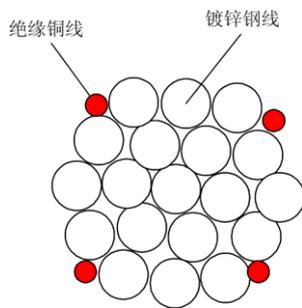


图 8 外缠绝缘导线

Fig. 8 Wound insulated wire

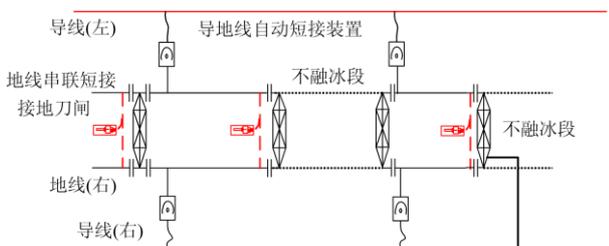


图 9 输电线与地线短接

Fig. 9 Short-circuit the power line to the ground

当处于雷暴季节时，接地刀闸开关合上，地线分段接地。当处于冬季雪凝天气时，无防雷必要，则断开接地刀闸开关，分段接地的地线连接成一个整体，然后通过装在杆塔下方的导地线自动短接装置，让导线与地线短接形成回路，实现融冰。利用这种方法融冰的优点是解决了融冰电源的问题，缺点是导地线自动短接装置不能实现远程控制，需要人工手动操作，此外还需对杆塔、地线进行一定的改造。

2.3.5 新型自制热融冰导线与智能融冰导线方案

为解决架空线路在线实时融冰的难题，四川大学莫思特提出了一种新型自制热融冰导线结构^[43-44]，该结构与一般输电导线的不同之处在于钢芯和铝绞线之间加了一层高分子导电制热材料(图 10)。融冰原理如图 11 所示，参考三绕组变压器，设计特殊的融冰输电变压器，变压器二次侧两个绕组分别定义为融冰与输电绕组。其中，融冰绕组的输出端分别接钢芯和铝绞线，输电绕组输出端则接铝绞线和地线。当需要融冰时，通过融冰控制开关使融冰绕组作用于高分子导电制热材料，实施防冰融冰。无需防融冰作业时，融冰控制开关控制融冰绕组不作用，由于钢芯在输电绞线中主要起提供强度和承载力的作用，自制热导线在输电方面与现有输电导线输电性能差别不大。此外，这种方法的优点是在不断电的情况下，可以做到在线防冰、融冰，且所需能耗



图 10 自制热导线实物图

Fig. 10 Picture of self-melting-ice conductor

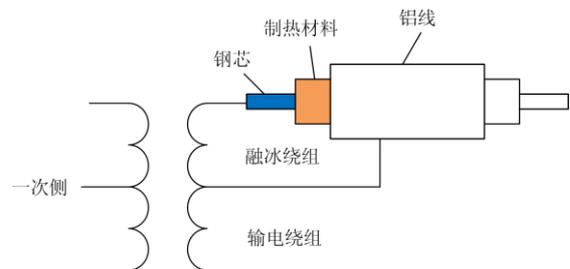


图 11 自制热导线融冰示意图

Fig. 11 Self-melting-ice conductor melting diagram

低。目前该技术面临的难点有：(1) 新型自融冰导线能否满足正常输电的要求；(2) 制热材料的制备及选取，工程造价、能否大规模应用；(3) 融冰电源的设计、控制方法以及对电网的影响等。

为防止融冰过程中过高温度对融冰线路中的未覆冰段和已脱冰段线路造成损害，本文提出一种基于 PTC(Positive Temperature Coefficient)材料的智能融冰导线方案。该智能导线结构及融冰原理与图 10、图 11 相似，区别是将制热材料替换为 PTC 材料，利用 PTC 材料的正温度效应，做到融冰过程中融冰温度的自适应控制。(正温度效应指材料电阻随温度的升高而变大，当超过某一温度时，材料电阻将在很小的温度范围内发生几个量级的变化甚至呈现近绝缘性。而使材料电阻发生剧变的临界点温度定义为居里点)融冰过程中，当未覆冰或已脱冰线路段的 PTC 制热材料温度到达其居里点后，该材料将呈现出绝缘性，无通流发热效应。而覆冰线路段，由于电流产生的热量大部分将被覆冰吸收，该处的 PTC 材料难以达到其居里点温度，将继续产热融冰(图 12 所示)。利用这种方法可在某种程度上实现覆冰不均匀导线的智能融冰，同时还可以实现节能的目的。目前该方案还处在理论实验研究阶段，需要解决 PTC 材料的制备、融冰居里点，以及工程应用等问题，但可行性和未来的发展前景很大，已经得到国网总部科技项目和国网湖南防灾减灾中心国家重点实验室开放基金项目的支持。

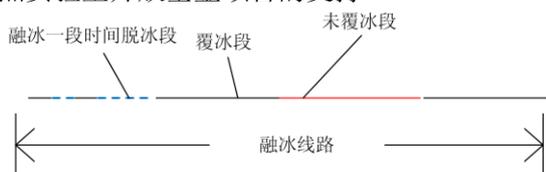


图 12 不均匀覆冰线路

Fig. 12 Uneven ice coating

3 输电线路(机械)除冰技术

3.1 ad hoc 方法

早期电网覆冰一般采用机械外力 ad hoc 方法，ad hoc 方法不需要专用的除冰设备支持，仅通过运行维护人员实现人工除冰，一般有以下几种。

1) 地面运维人员在线路断电时，通过特制的除冰工具，对覆冰线路进行敲打或振动使覆冰破碎脱落。

2) 线路带电时，用与线路电压等级相符的绝缘棒敲打。

其他除冰方式诸如：地面链球击打、导线上下抖动、导线间相互撞击亦可起到除冰的效果，但以上方法除冰皆存在较大的人身安全隐患，且实施起

来较为困难。

3.2 滑轮铲刮法

滑轮铲刮法在国外已使用多年^[45]，除冰效果较好。它由滑轮、牵引绳及涂漆的胶合板或环氧树脂板组合而成。通过滑轮使导线弯曲，导线弯曲产生的应力使覆冰破裂脱落。

3.3 弹盒操作冰器

弹盒操作除冰器是一种人工可完全在地面进行除冰操作的机械装置。当线路需要除冰时，该装置会对覆冰线路施加足以使冰层破裂的高应力冲击波。从目前使用效果来看，该装置除冰效果较好，且装置简单、便于携带。

3.4 电磁脉冲除冰

电磁脉冲除冰的原理是通过电容器组向线圈放电，由线圈产生强磁场，在置于线圈附近的目標物上产生一个幅值高达几千牛顿、持续时间极为短暂的电磁力，从而使目标物上的冰层膨胀后收缩破裂，然后脱落^[46]。这种方法目前对去除线路雾凇有一定效果^[47]，但激励源不太理想，只能用于短距离除冰。

3.5 机器人除冰

机器人除冰主要利用其携带的除冰装置，但这种除冰方式需要借助人辅助。随着技术的不断革新，机器人跨障除冰的难题已被攻克，但现有的机器人跨障除冰必须借助专门的滑轨装置^[48]，需要对输电线路进行大范围改造，难以大规模应用。

3.6 利用平衡锤、阻雪环、风力裙、热吸收器除冰

平衡锤技术可防止导线因覆冰扭转、阻雪环减少冰雪积聚。此外，设计输电线路在过负载条件下采取导线滑动和升降技术，可有效减少覆冰积聚量，减少杆塔倒塔概率。这些在自然条件下，利用风速、重力等脱冰的方法只在输电覆冰线路局部有效，且针对一定的冰型和在特殊条件下才起作用，防冰效果有限，但配合其他防、除冰技术，无论从经济性还是工程应用角度来看，都可以取得令人较满意的效果。

4 其他除冰方法

4.1 热力蒸汽除冰

通过特殊管道将经电阻丝加热过的空气输送到覆冰面。相似的办法还有高压水枪喷射热水法。这种方法由于操作困难、需要解决热气/水源、存在烫伤操作人员风险等问题，仅在国内试验性应用。

4.2 激光除冰

激光除冰主要利用不同波长的光照射线路覆冰。当覆冰吸收一定的能量后，冰层表面液化或者直接气化，或者冰层内部温差产生的应力使冰层内

部破裂松动,易于去除。这种方法除冰效率低且成本高,2018年在国内有试点应用。

4.3 微波除冰

微波穿过冰层,与冰层相粘接的材料吸收微波后温度升高,致使接触面冰层融化、冰层与输电线表面的粘接力下降,在外力的作用下可使覆冰脱落。这种方法时间长、耗费高、效率低,在国外一般用于道路除冰。

4.4 无人机喷火除冰

利用无人机喷火,加速线路重冰区冰层融化。这种方法一般用来“救急”,除冰范围有限,只能进行单点除冰,且无人机蓄电池使用条件受限,2018年在我国南网区域有部分应用。

5 伪命题与展望

当前防冰、融冰、除冰技术面临四大难点。

1) 时效性

目前,国内外绝大多数防冰、融冰、除冰技术消除输电线路覆冰都是以停运输电线路为前提。断电实施融冰作业不仅对于减轻电网覆冰灾害的效果有限,而且还会造成冬季用电负荷高峰期用电更加紧张。如何使覆冰输电线路正常供电,且保证覆冰线路进行融冰作业,是融冰技术下一步发展中应重点考虑的。

2) 效率性

及时消除输电线路覆冰和恢复供电可大大减轻电网因覆冰造成的损失。但在实际消除输电线路覆冰作业中,常常受到天气、经济、地形、技术等因素的制约,融冰、除冰作业往往在夜间或者凌晨进行,在某些输电线路覆冰段,只能依靠人工手动除冰。

3) 经济性

现有的防冰技术中,防冰材料造价高、防冰效果有限,而且还需对输电线路进行一定的改造。融冰、除冰技术中,需要设计专门的融/除冰装置,且这些装置的使用率低、价格昂贵。在融、除冰作业中,需要停运线路给电网造成“二次损失”,影响国民生产。

4) 整体协作性

纵观目前的防、融、除冰技术,多数都自成体系互不兼容,难以发挥组合技术的优势。此外,现有的防、融、除冰技术仅满足当前所需,且耗资耗力,若无一定的技术兼容性,势必被新兴技术快速取代,因此,防、融、除冰应进行体系化建设。

(1) 信息交联

充足可靠信息的获取将对处理电网覆冰事件发挥先导作用。线路是否需要实施防融冰作业目前尚无一定的实施标准。为此,可以充分运用现代化信息化技术(如冰区线路天气预警和监测、覆冰中线路实时状况:温湿度、风速、杆塔拉力、导线重力等,以及运用大数据技术对历年覆冰线路状况进行实时分析比对等技术)交联互动,综合产生决策因子,以决策因子指导启动相应的防融除冰机制,根据决策因子的反馈来实施相应的防、融、除冰力度,做到电网智能决策,而不是依靠人工主观上的判断来决定防、融、除冰作业的实施。

(2) 完善防、融、除冰实施标准

随着新老技术的更替,在线防、融冰的难题势必将攻克。在线防冰、融冰电流的大小需要制定相应的实施标准,防、融冰电流要做到“有则可依、有迹可寻”。此外,现有防、融、除冰技术实施起来无明确的细则来指导,如防融冰实施力度、作业强度。因此,需要根据线路覆冰状况,科学制定防融冰实施细则,做到“因地制宜”,而不是“大材小用”。

参考文献

- [1] 蒋兴良. 重庆地区输电线路导线覆冰特性[J]. 高电压技术, 2011, 37(12): 3065-3069.
JIANG Xingliang. Icing features of wire in Chongqing region[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(12): 3065-3069.
- [2] 廖祥林. 导线覆冰性质分类和密度浅析[J]. 电力建设, 1994, 15(9): 17-25.
LIAO Xianglin. Classification and density analysis of wire icing properties[J]. Electric Power Construction, 1994, 15(9): 17-25.
- [3] 孙才新, 司马文霞, 舒立春. 大气环境与电气绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [4] 陆佳政. 电网覆冰灾害及防治技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [5] 戚大安. 电网覆冰灾害的特点和发展趋势[J]. 电业政策研究, 2007, 1(1): 27-30.
QI Da'an. Characteristics and development trend of grid ice-covered disasters[J]. Electric Industry Policy Research, 2007, 1(1): 27-30.
- [6] 曾健, 赵胜利, 苏耀国, 等. 110 kV 六回路耐张塔受力性能分析[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(3): 7-11.
ZENG Jian, ZHAO Shengli, SU Yaoguo, et al. An analysis of mechanical behaviors of the 110 kV six-circuit tension

- tower[J]. *Power System and Clean Energy*, 2018, 34(3): 7-11.
- [7] 郭应龙, 李国兴, 尤传永. 输电线路舞动[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [8] 蒋兴良, 张志劲, 胡建林, 等. 高海拔下不同伞形结构 750 kV 合成绝缘子短样交流污秽闪络特性及其比较[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(12): 159-164.
JIANG Xingliang, ZHANG Zhijin, HU Jianlin, et al. AC pollution flashover performance and comparison of short samples of 750 kV composite insulators with different configuration in high altitude area[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(12): 159-164.
- [9] 杜明. 输电线路抗冰除冰技术分析[J]. *电力与能源*, 2013, 12(23): 106-107.
DU Ming. Analysis of anti-icing and deicing technology for transmission lines[J]. *Electricity and Energy*, 2013, 12(23): 106-107.
- [10] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [11] 蒋兴良. 贵州电网冰灾事故分析及预防措施[J]. *电力建设*, 2008, 29(4): 1-6.
JIANG Xingliang. Analysis and preventive measures of ice disaster accidents in Guizhou power grid[J]. *Electric Power Construction*, 2008, 29(4): 1-6.
- [12] 朱晔, 王海涛, 吴念, 等. 输电线路覆冰在线监测动态预警模型[J]. *高电压技术*, 2014, 40(5): 1374-1381.
ZHU Ye, WANG Haitao, WU Nian, et al. Icing on-line monitoring dynamic prediction model[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(5): 1374-1381.
- [13] 蒋兴良, 兰强, 毕茂强. 导线临界防冰电流及其影响因素分析[J]. *高电压技术*, 2012, 38(5): 1225-1232.
JIANG Xingliang, LAN Qiang, BI Maoqiang. Analysis on critical anti-icing current of conductor and its impacting factors[J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(5): 1225-1232.
- [14] 罗日成, 潘俊文, 刘化交, 等. 超/特高压输电线路带电直流融冰方法[J]. *中南大学学报: 自然科版*, 2016, 47(5): 1551-1558.
LUO Richeng, PAN Junwen, LIU Huajiao, et al. A living DC ice-melting approach for UHV & EHV transmission lines[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2016, 47(5): 1551-1558.
- [15] 朱斌, 潘玲玲, 邹扬, 等. 考虑融冰因素的输电线路覆冰故障概率计算[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(10): 79-84.
ZHU Bin, PAN Lingling, ZOU Yang, et al. Fault probability calculation of transmission line considering ice melting factors[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(10): 79-84.
- [16] 郑海坤, 常士楠, 赵媛媛. 超疏水/超润滑表面的防疏冰机理及其应用[J]. *化学进展*, 2017, 29(1): 102-118.
ZHENG Haikun, CHANG Shinan, ZHAO Yuanyuan. Anti-icing & icephobic mechanism and applications of super hydrophobic/ultra slippery surface[J]. *Progress in Chemistry*, 2017, 29(1): 102-118.
- [17] 廖国虎. 输电线路防冰涂料研究现状[J]. *科技信息*, 2013(26): 471-472.
LIAO Guohu. Research status of anti-icing coating on transmission lines[J]. *Science Information*, 2013(26): 471-472.
- [18] 张宇, 胡琴, 李雪源, 等. 复合绝缘子光热型涂料制备与融冰试验[J]. *电网与清洁能源*, 2020, 36(7): 1-8.
ZHANG Yu, HU Qin, LI Xueyuan, et al. Ice-melting effect of photo-thermal coating applied to composite insulators[J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(7): 1-8.
- [19] 龚彦辉, 李佳城, 陈飞飞, 等. 试论电力线路覆冰机理及融冰技术[J]. *通讯世界*, 2018(7): 133-134.
GONG Yanhui, LI Jiacheng, CHEN Feifei, et al. Discussion on ice coating mechanism and ice melting technology of power lines[J]. *Telecom World*, 2018(7): 133-134.
- [20] 蒯圣宇, 邓子鸣, 陈炜, 等. 基于覆冰气象条件的电网差异化规划经济性评估[J]. *智慧电力*, 2018, 46(3): 8-13, 67.
KUAI Shengyu, DENG Ziming, CHEN Wei, et al. Economic assessment on power grid differentiated planning considering icing condition[J]. *Smart Power*, 2018, 46(3): 8-13, 67.
- [21] 王燕, 皇甫成, 杜志叶, 等. 覆冰情况下输电线路有限元计算及其结构优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(8): 99-106.
WANG Yan, HUANGFU Cheng, DU Zhiye, et al. Finite element calculation and structural optimization method for the high voltage transmission line under icing condition[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(8): 99-106.
- [22] 杨伦, 楼文娟, 陈勇, 等. 覆冰导线舞动作用下输电塔破坏机理的试验研究[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(24): 70-75.
YANG Lun, LOU Wenjuan, CHEN Yong, et al. Test for

- failure mechanism of a transmission tower under iced conductor galloping[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(24): 70-75.
- [23] 庄文兵, 祁创, 熊小伏, 等. 计及气象因素时间累积效应的输电线路覆冰预测[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(17): 6-13.
ZHUANG Wenbing, QI Chuang, XIONG Xiaofu, et al. Transmission line icing forecast considering the time cumulative effect of meteorological factors[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(17): 6-13.
- [24] 庄文兵, 祁创, 王建, 等. 基于微气象监测的输电线路覆冰动态过程估计模型[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(14): 87-94.
ZHUANG Wenbing, QI Chuang, WANG Jian, et al. Dynamic ice process estimation model of transmission line based on micrometeorological monitoring[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(14): 87-94.
- [25] 陈勇, 李鹏, 张忠军, 等. 基于 PCA-GA-LSSVM 的输电线路覆冰负荷在线预测模型[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(10): 110-119.
CHEN Yong, LI Peng, ZHANG Zhongjun, et al. Online prediction model for power transmission line icing load based on PCA-GA-LSSVM[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(10): 110-119.
- [26] 巢亚锋, 杨力, 彭晓亮, 等. 输电线路覆冰特点及防冰技术研究综述[J]. *高压电器*, 2014, 50(10): 131-138.
CHAO Yafeng, YANG Li, PENG Xiaoliang, et al. Review of the Researches on icing characteristics of transmission lines and anti-icing technologies[J]. *High Voltage Apparatus*, 2014, 50(10): 131-138.
- [27] 邢壮季. 形状记忆合金在飞机除冰器上的应用[J]. *航空制造工程*, 1996(3): 28-30.
XING Zhuangji. Application of shape memory alloy on aircraft deicer[J]. *Aviation Manufacturing Engineering*, 1996(3): 28-30.
- [28] PERSONNE P, GAYET J F. Ice accretion on wires and anti-icing induced by the Joule effect[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1988, 27(2): 101-114.
- [29] 漆铭钧, 李西泉. 湖南电网冰冻灾害及其应对措施的回顾与思考[J]. *华中电力*, 2008, 10(2): 25-28.
QI Mingjun, LI Xiquan. The review and reconsider of icing disaster & countermeasure in Hunan electric grid[J]. *Central China Electric Power*, 2008, 10(2): 25-28.
- [30] 刘文涛, 和识之, 陈亦平, 等. 基于直流融冰的电网大面积冰灾防御策略[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(11): 102-107.
LIU Wentao, HE Shizhi, CHEN Yiping, et al. Defensive strategy for wide area ice disaster of power grid based on DC deicer[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(11): 102-107.
- [31] 宋宏俊. 输电线路导线及地线复用新型直流融冰装置技术研究综述[J]. *南方能源建设*, 2018, 5(3): 72-76.
SONG Hongquan. Overview on technology of new model DC ice-melting device for phase wire and ground wire of transmission line[J]. *Southern Energy Construction*, 2018, 5(3): 72-76.
- [32] 刘刚, 赵学增, 姜世金, 等. 架空电力线路防冰除冰技术国内外研究综述[J]. *电力学报*, 2014, 29(4): 335-342.
LIU Gang, ZHAO Xuezheng, JIANG Shijin, et al. Summary of domestic and foreign research on anti-icing and deicing technology of overhead power lines[J]. *Journal of Electric Power*, 2014, 29(4): 335-342.
- [33] 武守远, 荆平. 输电线路直流融冰关键技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [34] LU J Z, XU X J, ZHANG H X, et al. Analysis of Hunan Power Grid ice disaster in 2008 and related series anti-icing technology research[C] // *Proceedings of the 14th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS2011)*, Structures (IWAIS2011), May 2011, Chongqing, China.
- [35] 李再华, 白晓民, 周子冠, 等. 电网覆冰防治方法和研究进展[J]. *电网技术*, 2008, 32(4): 7-13.
LI Zaihua, BAI Xiaomin, ZHOU Ziguan, et al. Prevention and treatment methods of ice coating in power networks and Its recent study[J]. *Power System Technology*, 2008, 32(4): 7-13.
- [36] 赵国帅, 李兴源, 傅闯, 等. 线路交直流融冰技术综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(14): 148-154.
ZHAO Guoshuai, LI Xingyuan, FU Chuang, et al. Overview of de-icing technology for transmission lines[J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(14): 148-154.
- [37] 陈雪林, 周志龙. 电流融冰法在郴州市电网的应用[J]. *湖南水利水电*, 2007(6): 56-58.
CHEN Xuelin, ZHOU Zhilong. Application of current melting ice method in Chengzhou power grid[J]. *Hunan Hydro & Power*, 2007(6): 56-58.
- [38] 高燃, 杨兵, 于和林, 等. 安徽地区超高压输电线路融冰技术方案分析[J]. *电力安全技术*, 2016, 18(10): 9-12.
GAO Ran, YANG Bing, YU Helin, et al. Analysis of ice melting technology scheme for EHV transmission lines in Anhui province[J]. *Electric Safety Technology*, 2016,

- 18(10): 9-12.
- [39] 陆佳政, 李波, 张红先, 等. 新型交直流融冰装置在湖南电网的应用[J]. 南方电网技术, 2009, 3(4): 77-79.
LU Jiazheng, LI Bo, ZHANG Hongxian, et al. Application of new AC/DC ice melting device in Hunan power grid[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(4): 77-79.
- [40] 雷红才, 陆佳政, 李波, 等. 可调电容串联补偿式交流融冰装置在湖南电网的应用[J]. 湖南电力, 2009, 29(5): 28-29.
LEI Hongcai, LU Jiazheng, LI Bo, et al. Application of new style regulative capacitor in series compensation AC de-icing equipment in Hunan power grid[J]. Hunan Electric Power, 2009, 29(5): 28-29.
- [41] 常浩, 石岩, 殷威扬, 等. 交直流线路融冰技术的研究[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 1-6.
CHANG Hao, SHI Yan, YIN Weiyang, et al. Ice-melting technologies for HVAC and HVDC transmission line[J]. Power System Technology, 2008, 32(5): 1-6.
- [42] 胡叶舟, 余绍峰, 张琳, 等. 输电线路架空地线融冰特性的研究[J]. 浙江电力, 2015, 34(9): 29-33.
HU Yezhou, YU Shaofeng, ZHANG Lin, et al. Study on characteristics of ice melting of overhead ground wire of transmission line[J]. Zhejiang Electric Power, 2015, 34(9): 29-33.
- [43] 莫思特, 刘天琪. 基于自融冰导线的在线实时融冰技术初探[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(33): 59-65.
MO Site, LIU Tianqi. Preliminary study on online real-time melting-ice technology based on self-melting-ice conductor[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(33): 59-65.
- [44] 莫思特, 谢和平, 刘天琪, 等. 嵌入制热材料自融冰导线在线防冰控制方法: 中国, CN201810979212.7[P]. 2018-10-23.
- [45] 蒋兴良, 马俊, 王少华, 等. 输电线路冰害事故及原因分析[J]. 中国电力, 2005, 38(11): 27-30.
JIANG Xingliang, MA Jun, WANG Shaohua, et al. Analysis of ice accidents and causes of transmission lines[J]. Electric Power, 2005, 38(11): 27-30.
- [46] LANDRY M, BEAUCHEMIN R, VENNE A, et al. De-icing EHV overhead transmission lines using electromagnetic forces generated by moderate short-circuit currents[C] // 9th International Conference on Transmission and Distribution Construction, October 8-12, 2000, Montreal, Quebec, Canada: 94-100.
- [47] 苑吉河, 蒋兴良, 易辉, 等. 输电线路导线覆冰的国内外研究现状[J]. 高压技术, 2003, 30(1): 6-9.
YUAN Jihe, JIANG Xingliang, YI Hui, et al. The present study on conductor icing of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2003, 30(1): 6-9.
- [48] 付子峰, 吴启进, 刘继承, 等. 人工智能除冰技术在输电线路中的应用[J]. 湖北电力, 2018, 42(3): 15-18.
FU Zifeng, WU Qijin, LIU Jicheng, et al. Application of AI deicing technology to power transmission lines[J]. Hubei Electric Power, 2018, 42(3): 15-18.

收稿日期: 2019-10-19

作者简介:

王 勇(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压架空线路在线融冰技术; E-mail: 568102172@qq.com

苗 虹(1971—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为智能微电网、新能源发电技术;

莫思特(1969—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为输电线路防灾减灾、高清数字摄像机、机器视觉、地质灾害监测、医疗仪器等。

(编辑 许 威)