

交直流输电线路热力融冰技术分析

向往¹, 谭艳军², 陆佳政², 化雨¹, 文劲宇¹

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学电气与电子工程学院), 武汉市 430074;
2. 湖南省电力公司试验研究院, 国家电网公司输变电设备防冰减灾技术实验室, 长沙市 410007)

摘要:针对输电线路覆冰严重影响电力传输可靠性的问题,对多种热力融冰技术进行了研究。阐述了热力融冰技术的基本原理,重点介绍了热力融冰技术中交流融冰和直流融冰的方法,以及国内各种交流融冰方案和直流融冰装置的研究进展。通过对比各种交流融冰方法的特点,以及应用于交流线路与直流线路的直流融冰装置的特点,划分了几种融冰方法各自的适用范围,并对未来直流融冰装置的发展进行了探讨与展望。

关键词:热力融冰;交流融冰;直流融冰

Thermodynamic Ice-Melting Technology for AC/DC Transmission Lines

XIANG Wang¹, TAN Yanjun², LU Jiazheng², HUA Yu¹, WEN Jinyu¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. Power Transmission and Distribution Equipment Anti-Ice & Reducing-Disaster Technology Laboratory of State Grid Corporation, Hunan Electric Power Test and Research Institute, Changsha 410007, China)

ABSTRACT: According to the problem that the ice-coating of overhead transmission lines was harmful to the reliability of power transmission, this paper discussed various thermodynamic ice-melting technologies. The basic theory of the thermodynamic de-icing technology was introduced, especially the AC and DC de-icing method, as well as the status quo of AC de-icing schemes and DC de-icing device in China. Through the comparison of the characteristics of various AC de-icing methods and DC de-icing devices applied in AC/DC transmission lines, the application scopes of several de-icing methods were divided, and the future development of the DC de-icing devices was discussed.

KEYWORDS: thermodynamic ice-melting; AC de-icing; DC de-icing

中图分类号: TM 755 文献标志码: A 文章编号: 1000-7229(2014)08-0101-07
DOI: 10.3969/j.issn.1000-7229.2014.08.018

0 引言

我国的湖南、贵州等地是冰灾多发地区,冰灾期间,输电线路、塔杆和绝缘子串上的积雪容易形成覆冰层,当设备上的覆冰达到一定重力时,便容易造成断线、倒塔等严重事故,给电力系统的安全运行造成严重破坏,对人类生产生活造成严重危害。因此分析各种融冰的特点和应用范围对于冰灾时期电网的稳定运行具有重大意义^[1-2]。输电导线的除冰融冰是电力系统防冰抗灾的重点,目前国内外已应用和正在研究的除冰和融冰技术已有40余种^[3-5],一般按照原理的不同将它们划分为机械除冰、自然被动除冰、热力除冰和其他除冰方法^[6-8]。

机械除冰法泛指利用机械力破坏输电线路导线

的冰层来实现除冰的方法。最简单易行的机械除冰法是外力敲打法,需要线路工作者在现场执行,速度慢,安全性差。较为简易且经济实用的机械除冰法是滑轮碾压铲刮法,通过滑轮施加力道使得导线产生弯曲,产生的应力使冰破裂脱落,缺点是费时和受地形限制。强力振动法是在电缆上螺旋缠绕一对导线,依靠导线中电磁脉冲产生的电磁力使线缆振动,从而使覆冰脱落,这种方法要求外加振动源,同时振动会导致线缆疲劳^[9-10]。新型机器人除冰法是利用电动机机械除冰装置来清除输电线路上的覆冰。

自然被动除冰法是通过在线路上加装阻雪环、平衡锤等装置,依赖风力、引力等自然力使得冰层脱落。这种方法投入成本低,但使用范围受自然条件限制,并且效率和可靠性不高。

热力除冰方法是目前应用最为广泛的融冰方法，它是在线路上通过较大的电流来产生一定的焦耳热，以此使得线路覆冰融化。常见的热力融冰法包括交流融冰法和直流融冰法，本文重点针对这2种热力融冰方法进行研究。

其他除冰方法包括使用CO₂激光热融法、低居里磁热线等方法以及添加新型覆冰材料等新技术^[11]，但目前这些方法大多还处于试验阶段。

本文首先对热力融冰基本原理进行阐述，然后对交流融冰法、直流融冰法进行介绍，最后对多种交流融冰方法、直流融冰方法进行比较，给出各自的适用范围，并对未来直流融冰装置的发展进行探讨。

1 热力融冰基本原理

热力融冰方法核心在于利用电流通过导体产生的焦耳热进行融冰，这是一个复杂的物理过程，受多种环境因素影响，目前尚未有准确而有效的物理模型。一般热力融冰理论的基础包括导线临界防冰电流、临界融冰电流、最大容许电流、融冰时间这4个概念。

导线临界防冰电流简称临界电流或保线电流，是指覆冰环境下，使导线不覆冰的最小电流。一般认为保线电流受风速、环境温度、液态水含量、导线直径等多种因素影响，文献[12-13]提出了保线电流I_c的计算公式为

$$I_c = \left\{ \frac{2\pi R_{eq} k_s}{R_c} [h(t_s - t_a) + \frac{0.622hL_v [e(t_{as} + 273.15) - e(t_a + 273.15)]}{2c_a p_a} + \varepsilon\sigma [(t_s + 273.15)^4 - (t_a + 273.15)^4] - \frac{h_p r_c v^2}{2c_a} + \frac{R\alpha_1 \omega v}{2\pi R_{eq} k_s} (2c_w(t_s - t_a) - v^2)] \right\}^{0.5} \quad (1)$$

式中：h为导线表面对流换热系数；R_c为当前温度下电阻率；R_{eq}为导线等效半径；k_s为导线表面系数；h_p为空气强制对流换热系数；t_s为导线表面温度；t_{as}为水膜与空气接触面温度；t_a为空气温度；c_a为空气的比热容；R_e为雷诺系数；ε为水膜相对于黑体的总辐射系数；σ为Stefan-Boltzman常数；ω为空气中液态水质量浓度；c_w为水的比热容；L_v为水蒸发潜热；v为风速；p_a为自由气压；r_c为导线表面恢复系数；e为温度t时的饱和蒸汽压；α₁为碰撞系数。

临界融冰电流又称为最小融冰电流，是指在一定外部环境下，能够使线路覆冰融化的最小电流。文献[14]提出了临界融冰电流公式：

$$I_r^2 R_0 T_r = \frac{\Delta t}{R_{T0} + R_{T1}} T_r + 10g_0 db + \frac{0.045g_0 D^2}{R_{T0} + R_{T1}} \left(R_{T1} + 0.22 \frac{R_{T0}}{\ln \frac{D}{d}} \right) \Delta t \quad (2)$$

式中：I_r为融冰电流；R₀为0℃时导线电阻；T_r为融冰时间；Δt为导体温度与外界气温之差；g₀为冰的密度；d为导线直径；b为冰层厚度；D为导线覆冰后的外径；R_{T0}为等效冰层传导热阻；R_{T1}为雾凇对流及辐射等效热阻。

最大容许电流是指融冰状态下导线达到最高允许温度时通过的电流。融冰时间指融冰开始到覆冰完全融化的时间，一般可以在融冰电流确定情况下根据热平衡关系推导得出^[15]：

$$T_v = \frac{[c_i(273.15 - T_a) + L_f] \rho_i R_i (2R_0' - \pi R_i / 2)}{I_r^2 R_e} \quad (3)$$

式中：c_i为冰的比热容；T_a为空气温度；ρ_i为冰的密度；L_f为水的汽化潜热；R₀'为覆冰后导线平均半径；R_i为不覆冰时导线半径；I_r为融冰电流；R_e为单位长度导线在0℃时的电阻。

文献[16]给出了交流和直流融冰2种情况下线路对电源的电压和容量要求，如表1所示。

表1 线路融冰对电源电压和容量要求
Tab. 1 Requirements of power voltage and capacity for line de-icing

导线类型	设计融冰电流/kA	线路长度/km	三相施加交流电源		2并1串施加直流电源	
			线电压/kV	视在功率/(MVA)	直流电压/kV	直流功率/MW
LGJ-70	0.37	1	0.39	0.25	0.25	0.096
		10	3.9	2.5	2.5	1
		50	20	13	13	5
		100	39	25	25	10
LGJ-150	0.63	1	0.51	0.56	0.2	0.13
		50	26	28	10	5.5
		100	51	56	20	12.5
		150	77	84	30	18
LGJ-300	0.97	1	0.68	1.13	0.15	0.15
		100	68	113	15	15
		150	102	170	23	23
		200	136	226	30	30
LGJ-4×300	3.88	1	1.88	12.6	0.15	0.56
		100	188	1260	15	56
		200	376	2520	30	112
		300	564	3780	45	168

可以看出融冰电源采用交流电源或是直流电源对电源容量与电压要求不同,具体区别与影响将结合下文的交流和直流融冰方法分别进行阐述。

2 交流融冰法

交流融冰法一般是在输电线路中通过交流大电流以加大线路导线的发热,从而实现线路融冰。交流融冰法主要包括短路融冰法、转移负载法和基于移相器的带负荷融冰法。

2.1 短路融冰法

交流短路融冰法是将线路的某一端三相短路,并且在线路另一端施加融冰电源,使线路中通过较大的短路电流进行融冰。从表1可以看出,对于500 kV线路常用的LGJ-4×300导线,当长度为100 km时,需要的交流电源容量达到了1 260 MVA;而对于220或110 kV线路常用的LGJ-300导线,即便需要融冰的长度达到200 km,其电源容量也在可接受范围内,因此短路融冰方法常用于220 kV及以下电压等级的输电线路中。

短路融冰法的难点主要在于电源、短路点以及融冰线路阻抗匹配方面,因此短路融冰法方案的制定一般需要从以下几个方面进行考虑:(1)融冰电源的获得及选择,包括采用发电机零起升压和全电压冲击合闸这2种施加融冰电流方法的选取,根据短路电流大小选取合适的短路电压等因素;(2)电源、线路相关参数的获取;(3)方案实际可行性分析以及计算校验。

在实际应用方面,短路融冰法是湖南220 kV等级电网应对冰灾的最主要手段之一。文献[17]对湖南电网采用三相短路融冰法进行了利弊分析,并指出短路融冰法的最大缺点在于前期方案编制工作量巨大、融冰电源耗能巨大等,但是对于高山中难以进行线路技术改造的地区,短路融冰法还是一种较好的选择。文献[18-20]对短路融冰方案进行了探讨,其中文献[18]提出了以图论来快速生成融冰方案,能够减少调度人员工作负担。

2.2 转移负载法

转移负载法是调整电网的正常运行方式,使覆冰线路中通过高于正常电流的融冰电流,以达到融冰目的。除了与短路融冰法一样受限于交流电源容量外,它还会受到诸多其他因素影响。例如文献[21]对湖南电网和江西电网的网架结构和运行特性进行了分析,指出负荷中心环网不具备使用转移负载法的能力,并在此研究基础上对过电流融冰方法的适用范围进行了探讨。

除了网架结构外,如何匹配线路阻抗以构造融冰回路也是转移负载法的难点,对此研究人员提出了采用电容、电感接入网架来调整线路阻抗。例如文献[22]提出了并联补偿电容器加可调电抗器的方法,对电容器和电抗器容量选择进行了计算,并将这种方法应用于220 kV杏花一次变66 kV系统中。文献[23]记录了可调电容串联补偿式交流融冰装置在浏阳集里220 kV变电站的试验过程。这些方法扩大了转移负载法的适用范围,降低了其使用难度,但依旧只能应用于辐射网架中,对于环网结构仍然不适用。

2.3 基于移相器的带负荷融冰法

利用移相变压器的相位角度变化改变平行双回线潮流分布,在双回线路中产生一个有功功率的循环,即其中一回路正向传输,另一回线路反向传输,使正向传输的线路电流增加发热,以达到融冰目的。该方法成功应用于加拿大魁北克省,在基本不影响输电线路正常工作前提下,实现了对230 kV和315 kV累计900 km输电线路的融冰。但这种方法需要加装移相变压器,并且分裂导线间彼此绝缘,同时对系统的无功转移量要求大幅增加,影响系统安全。

综上所述,交流融冰法在使用时需要解决的主要问题是大容量融冰电源的获取,同时为了做到匹配合理的融冰电流,交流融冰方案需要考虑线路阻抗、网架结构等因素的影响,应用范围受到较大的限制。

3 直流融冰法

直流融冰法是在线路中通过直流大电流使导线发热进行融冰的方法^[24-25]。由表1可知,相对于交流融冰,当采用直流融冰时,由于线路中的感抗不起作用,因此对融冰电源的要求较低,能够实现交流融冰法所不能进行的500 kV线路融冰;直流融冰装置输出电压通常可调整,对于不同长度的线路融冰,不需要再进行阻抗匹配。但是直流融冰法的缺点在于往往需要独立的直流电源作为融冰电源,且装置投资成本大,1年中使用时间有限。

基于融冰对象的不同,一般将直流融冰方法划分为对交流线路和对直流线路的直流融冰法。

3.1 对交流线路的直流融冰方法

当需要对交流线路进行直流融冰时,需将待融冰线路停运,线路首端接上直流融冰电源,线路末端三相短接,或是将线路两相并联再与第三相串联,以此构成融冰回路,再对线路进行融冰。按照所使用直流融冰装置的不同,可以将对交流线路的直流融冰技术划分为3种类型。

3.1.1 基于多脉波不控整流器的直流融冰装置

基于不控整流器的直流融冰装置基本拓扑结构如图1所示,既可以制作成固定式,也可做成移动式^[26]。它的优点在于构造简单,成本低廉,此外,由于没有采用开关管器件,可以进行大容量的装置设计;同时多脉波的设计有效降低了装置注入电网的谐波含量。但该种装置也有着输出电压、电流难以调控等缺点。

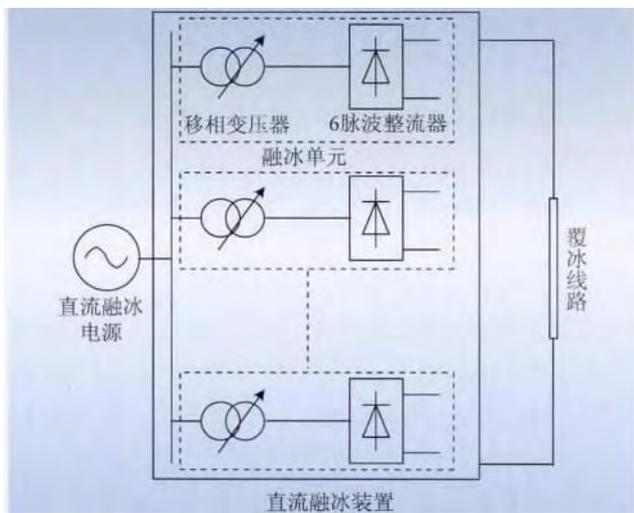


图1 基于不控整流器的直流融冰装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of DC de-icing device based on uncontrolled rectifier

文献[27-28]介绍了用于500 kV输电线路,基于12脉波整流器的直流融冰装置的设计和研制,并进行了Simulink下的仿真与现场试验,试验结果与仿真结果相一致,证明该装置可满足500 kV导线的融冰需要。

由于装置由不控整流器构成,输出的融冰电流难以调整。文献[29-30]提出了通过改变融冰装置内不控整流器的级联方式来调整输出电压,进而达到改变输出电流的目的,或在移相变压器上增加调压功能,借助调压档位实现输出直流电压的改变,并分别将这2种方法应用于35 kV等级配网不同长度线路或不同型号导线的融冰。

3.1.2 基于可控整流器的直流融冰装置兼无功补偿器

基于可控整流器的直流融冰装置基本拓扑结构如图2(a)所示,其核心部件可控整流器由晶闸管构成,整个装置可以实现对输出直流电压或直流电流的控制,能够灵活地应对各种长度的融冰线路。由于晶闸管式可控整流器耐压耐流等级较高,能够设计成大容量装置,实现对500 kV线路融冰,目前该类型融冰装置已有试验记录。

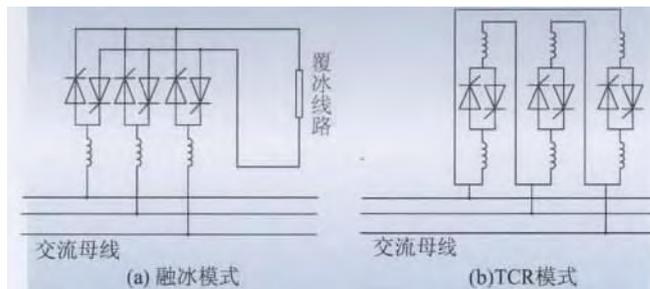


图2 兼具TCR功能的直流融冰装置结构图
Fig.2 Structure of DC de-icing device with TCR function

文献[31]介绍了湖南电网城前岭220 kV变电站使用的固定式融冰装置,该装置由12脉波可控整流器构成,主要针对LGJ300、LGJ400导线,设计融冰长度为40 km,现场试验以35.8 km长的城福线为对象,验证了融冰装置的设计功能。文献[32]记录了南网500 kW、25 MW和60 MW可控整流式融冰装置样机的设计、工厂测试、现场试验和现场实际融冰结果。

在不需要融冰的时候,基于可控整流器的直流融冰装置可以很方便地改装成晶闸管控制电抗器(thyristor controlled reactor, TCR)型的无功补偿装置,如图2(b)所示,提高了设备使用效率,降低了运行维护成本。

目前兼具TCR功能的直流融冰装置的研究已相对成熟,广西500 kV桂林变电站、湖南500 kV复兴变电站、贵州220 kV毕节变电站等均有样机在试验或运行^[33-35]。

3.1.3 基于电压源型换流器的直流融冰装置

随着绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)等可关断器件技术的发展,电压源型换流器(voltage source converter, VSC)在工业界应用愈加广泛,也出现了基于电压源型换流器的直流融冰装置。相较于晶闸管器件构成的装置,采用IGBT构成的VSC具有体积小、可以模块化、功率因数较高、谐波含量较低等优点,但是该类装置也受到了IGBT耐压耐流能力的限制,目前还难以用于制造大容量融冰电源。目前南方电网、江西电网分别完成了500 kW、20 MW移动式VSC型融冰装置样机试验^[36-37],湖南电网也完成了4.5 MW的固定式样机试验。

表2归纳了3种直流融冰装置各自的优点与缺点。对比交流融冰法,可以看出直流融冰方法虽然比交流融冰法更灵活、要求更低,但是直流融冰装置的布置也需配合电网规划进行。对于网架靠近负荷中心的重要节点适合布置带有兼具SVC功能的直流融冰装置,对于周边线路型号和长度较为统一的节点适

合布置不控整流型直流融冰装置 移动式融冰装置适合担当“救火员”的角色,作为交通便利地区的紧急或应急融冰方案。

表 2 直流融冰装置优缺点比较
Tab.2 Advantages and disadvantages comparison of DC de-icing devices

融冰装置	优点	缺点
基于多脉波不控整流器的直流融冰装置	成本低,结构简单,多脉波结构可以降低电网谐波,容量大	输出无法灵活控制
基于可控整流器的直流融冰装置	输出可以实现灵活控制,能够兼具无功补偿功能	结构复杂,造价高
基于电压源型换流器的直流融冰装置	输出可以灵活控制,可以小型化、模块化,功率因数较高	造价更高,容量较小

3.2 对直流线路的直流融冰技术

直流输电系统由于常用于大容量远距离送电,其正常工作电流一般较大,电流在导线上产生的热量已经起到一定融冰保线作用,因此现在国内对于采用额外直流融冰装置对直流线路进行融冰的研究较少,一般直流线路的融冰方案着眼于直流系统的保线运行。

常用的融冰保线方案有 3 种,示意图见图 3:

(1) 保持原直流系统运行方式不变,通过采用双极平衡大电流或单极金属回线大电流的运行方式进行融冰。这样可以不改变主接线和各种保护及控制设定,但缺点是冰灾枯水时期交流电网往往无法提供足够的功率实施这种方案。

(2) 变更主接线,将双极系统变为并联系统。这样可以将输出电流变为正常值的 2 倍,缺点是需要设备和保护控制软件去配合主接线的改变,这种方案已经属于彻底的融冰方案而非保线方案。

(3) 双极异向方式,即改变负极运行方式,通过在每极采用定电流控制策略,使换流站一极正向传输功率,即整流运行工况;另一极反向传输功率,即逆变运行工况。采用这种方案,同时升高双极的直流电流并将直流电流控制在线路的安全运行范围内,通过电流的热效应使直流线路升温,达到直流线路不结冰的保线目的;当更大电流运行时,电流热效应可使附着在导线上的冰融化,达到融冰目的。这种方案需要对控制保护软件进行调整,但是不需要改变接线,不增加新的设备投资;同时换流功率主要用于直流线路的功率损耗,与交流系统交换的功率较小,使交流电网负担小。因此直流线路的直流融冰方案一般采用双极异向方式

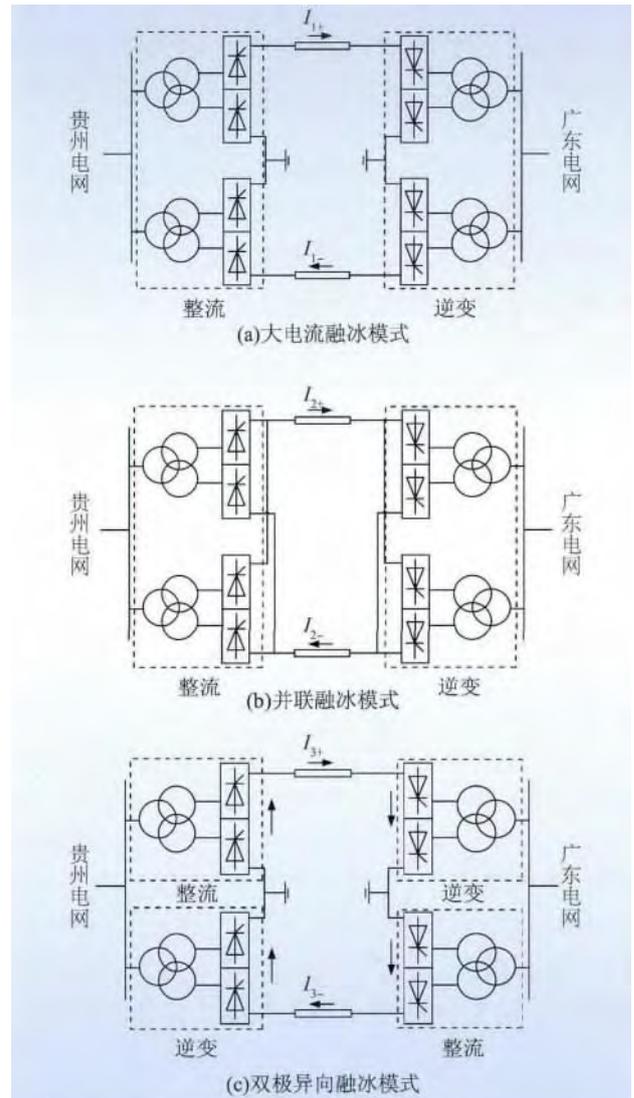


图 3 高肇线三种直流融冰模式示意图
Fig.3 Three dc de-icing modes at Gaozao tie-line

进行保线融冰,当线路覆冰情况特别严重时,才采用改变主接线方式进行紧急和彻底融冰工作。

4 其他热力融冰方法

4.1 激光热力融冰法

高功率、高能量的激光与冰相互作用会产生热效应。冰对不同波长的激光吸收长度不同,一般来说,激光波长在 1~10 μm 时,冰对其的吸收长度约从几十 mm 减小至几十 μm。因此,采用不同波长的激光照射到覆冰上,热效应作用的冰层厚度也不同,从而使覆冰产生的变化也有所差异。波长较长的激光作用在覆冰上相当于面热源,而波长较短的相当于体热源。因此,在研究利用激光进行除冰时要考虑选择多少波长的激光器以及采用何种方式使激光能量能够最大限度地被吸收,并且充分发挥激光除冰的特点,以提高激光除冰的效果和效率。因覆冰内部不能自

由形变,故当温度差产生的应力超过冰层的抗拉或抗压极限时冰层会发生断裂,使得比较坚硬的覆冰内部产生裂纹和松动,易于去除,也达到激光除冰的效果。

4.2 LC 磁热线融冰法

LC 磁热线是以低居里点(low curie point, LC)磁性材料(LC 材料)为芯线,其外覆有铝(或铜)层的覆合合金线。低居里磁性材料由 Fe、Ni、Cr、Si 等 4 种元素按一定比例配合,在真空条件下熔炼冷拔而成。

当覆铝(或铜)的 LC 材料(即 LC 磁热线)缠绕在通流的输电线路时,由于这种材料具有 0℃ 以上的居里温度,在冰点环境条件下产生了磁性,并因电阻损失和铁损而产生热;环境温度超过居里点时就不具有磁性,因而也不产生热。利用 LC 材料的这一特性既保证了在冰点条件下达到除冰的目的,又能使环境温度较高时不增加线损。

5 结 论

本文对国内外常用的除冰、融冰方法进行了详细介绍与对比分析,可以得到以下结论:

(1) 对于局部小范围线路覆冰问题,可以采用机械除冰法等措施,但是对于大规模大范围除冰问题,热力除冰法才是最为有效的方法。

(2) 短路融冰法、转移负载法和基于移相器的带负荷融冰法是 3 种常用的交流融冰法,但都具有一定的局限性,对于不经常发生冰冻灾害且没有配备专门直流融冰装置的电网中,交流融冰法可以作为应急方案备用。

(3) 应用于交流线路的直流融冰装置可以采用不控整流器、可控整流器或电压源型换流器作为融冰电源,可以根据实际需要进行选择,此类直流融冰装置的发展将会向着小型化、轻量化方向发展,同时,如果是固定式装置,则还需要兼具其他功能如 SVC 或 STATCOM 等,以降低其建设和维护成本。

(4) 超/特高压直流线路的融冰一般应在保线前提下进行,在凝冻天气时,在系统允许的情况下应使直流线路运行在满载工况,以减少覆冰风险。

(5) 目前对于绝缘子、杆塔尚无有效的融冰方法,这二者的除冰方案一般需要依靠人力或机器人进行。

6 参考文献

[1] 敬华兵,年晓红. 输电线路柔性直流融冰技术[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 3060-3066.
 [2] 李扶中,卢毓欣,崔琼. 郑州特高压换流站户内直流场新型紧急融冰接线方案[J]. 电力建设, 2012, 33(11): 14-18.

[3] 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.
 [4] Yu X Z, Zhou J, Liu B, et al. DC flashover performance of ice-covered insulator strings adopted in ± 800 kV transmission lines based on up-and-down method [C]//Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2012 Annual Report Conference on, Montreal, QC:IEEE, 2012:775-778.
 [5] Liu G, Zhao X Z, Chen Y H, et al. A De-icing method of Electric transmission line by adjusting load based on controllable inductor and capacitor compensation[C]// Power Tech, 2009 IEEE Bucharest, Bucharest:IEEE, 2009:1-5.
 [6] Stuart K M, Long D G. Analysis of Antarctic Iceberg and Sea Ice Melting Patterns using QuikSCAT [C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International, Boston, MA: IEEE, 2008:192-195.
 [7] He C H, Liu J J, Zhang X Q. Research of Rapid Parallel Operation, Automatic Ice-melting on Transmission Lines, Static VAR Compound System [C]//High Voltage Engineering and Application, 2008. ICHVE 2008. International Conference on, Chongqing:IEEE, 2008:128-133.
 [8] Fletcher P N, Hardaker P J, Hume A. L, et al. Experimental and theoretical modelling of scattering properties of melting ice spheres at microwave frequencies [C]//Antennas and Propagation, 1991. ICAP 91., Seventh International Conference on (IEEE), York: IEEE, 1991:80-83.
 [9] 鲁改凤,马彬,祁学红. 基于振颤原理的架空线新型除冰法[J]. 电工技术, 2012(2): 14-15.
 [10] 谷山强,陈家宏,蔡炜,等. 输电线路激光除冰技术试验分析及工程应用设计[J]. 高电压技术, 2009, 35(9): 2243-2249.
 [11] 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, 2005/2006 IEEE PES, Dallas, TX: IEEE, 2006:529-534.
 [12] 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.
 [13] Myers T G, Charpin J P F. A mathematical model for atmospheric ice accretion and water flow on a cold surface [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(25): 5483-5500.
 [14] 许树楷,杨煜,傅闯. 南方电网直流融冰方案仿真研究[J]. 南方电网技术, 2008, 2(2): 31-36.
 [15] 常浩,石岩,殷威扬,等. 交直流线路融冰技术研究[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 1-6.
 [16] 文闾成. 高压长线路短路法融冰可行性探讨[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 46-50.
 [17] 李军. 湖南电网三相短路融冰利弊分析[J]. 湖南电力, 1998(4): 22-26.
 [18] 苏盛,刘勤,蔡德福,等. 基于图论的短路融冰方案快速制定方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 579-583.
 [19] 邓健,肖顺良,姚璞,等. 220 kV 线路融冰方案的改进[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 29-30.
 [20] 张文朝,韩奕,徐友平,等. 电网过电流融冰运行方式可行性研究[J]. 电网技术, 2009, 33(20): 54-58.
 [21] 刘刚,赵学增,陈永辉,等. 电容补偿电感调负融冰方法[J]. 电网技术, 2008, 32(S2): 99-102.

- [22] 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.
- [23] 冯炜, 吕宏水, 吴维宁, 等. 500 kV 线路可移动直流融冰装置的研制和实现[J]. 电力电子技术, 2009, 43(10): 19-21.
- [24] Jiang X L, Fan S H, Zhang Z J, et al. Simulation and Experimental Investigation of DC Ice-Melting Process on an Iced Conductor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 919-929.
- [25] 吴端华, 何东. 输电线路直流融冰的临界电流和融冰时间分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(5): 86-91.
- [26] 陆佳政, 张允. 基于12脉动整流技术的500 kV 输电线路融冰装置实现[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 3041-3047.
- [27] 谭艳军, 陆佳政, 方针, 等. 基于不可控整流移动式直流融冰装置的研究[J]. 华中电力, 2011, 24(1): 31-34.
- [28] Chaturvedi A, Masand D, Gupta S, et al. Comparative analysis of three phase AC-DC controlled multi pulse converter [C]// Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS), 2012 IEEE Students' Conference on, Bhopal: IEEE, 2012: 1-4.
- [29] 谭艳军, 陆佳政, 方针, 等. 基于调压整流的配网线路直流融冰方法及其装置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(10): 126-129.
- [30] 方针, 陆佳政, 张红先, 等. 基于12脉波的固定式直流融冰装置在城前岭变电站的应用[J]. 湖南电力, 2009, 29(5): 30-31.
- [31] 傅闯, 饶宏, 黎小林, 等. 直流融冰装置的研制与应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 53-56.
- [32] 张翔, 丁勇, 朱炳坤, 等. 大容量直流融冰兼静止无功补偿装置的研制与应用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(20): 104-108.
- [33] 谢彬, 洪文国, 熊志荣, 等. 500 kV 复兴变电站固定式直流融冰兼 SVC 试点工程的设计[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 182-185.
- [34] 吴永华, 张涛, 赵立进, 等. 直流融冰型 SVC 在贵州电网的应用研究[J]. 南方电网技术, 2010, 4(S1): 41-45.
- [35] 敬华兵, 年晓红, 范瑞祥, 等. 直流融冰覆冰线路全控直流融冰电源及其控制切换策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(13): 86-91.
- [36] 许树楷, 黎小林, 饶宏, 等. 南方电网 500 kW 直流融冰装置样机的研制和试验[J]. 南方电网技术, 2008, 2(4): 32-36.
- [37] 刘栋, 贺之渊, 范瑞祥, 等. 可关断器件移动式直流融冰装置研究[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 228-233.

收稿日期: 2014-03-27 修回日期: 2014-05-13

作者简介:

向往(1990) 男, 博士研究生, 研究方向为柔性直流输电系统, 模块化多电平换流器技术, E-mail: xiangwang1003@foxmail.com;

谭艳军(1983) 男, 硕士, 工程师, 主要从事输变电设备防灾技术研究, E-mail: ynanyan@yahoo.com.cn;

陆家政(1969) 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电机、高电压技术、输变电设备防灾技术研究;

化雨(1989) 男, 硕士, 研究方向为柔性直流输电系统, E-mail: asahy@qq.com;

文劲宇(1970) 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为电力系统运行与控制、储能、多端直流输电、新能源并网运行与规划, E-mail: jinyu.wen@hust.edu.cn.

(编辑: 张小飞)