

输电线路覆冰特点及防冰技术研究综述

巢亚锋¹, 杨 力², 彭晓亮³, 彭展旗³, 王 成¹, 赵世华¹

(1. 国网湖南省电力公司电力科学研究院, 长沙 410007; 2. 湖南省送变电工程公司, 长沙 410007;

3. 湖南省电网工程公司, 湖南 衡阳 421000)

摘要: 分析冰灾发生的气候背景等因素, 详细阐述国内外目前采用和正在研究的防冰新技术的原理和应用情况, 从有效性、安全性、技术性、可操作性和经济性等方面对这些防冰除冰技术及方法进行了综合评估, 并对其应用价值和市场前景做出了评估。得到在电网设备的防冰方法中, 不存在既具有安全性、可操作性, 又能有效且经济的防冰技术的结论。提出在输电网络防冰除冰工作中, 应把预防电网冰雪灾害工作放到更加重要的位置, 重视输电网络覆冰的理论研究, 认真分析冰灾原因, 不断研究新技术、新方法, 提高防冰水平的建议。

关键词: 输电线路; 覆冰; 冰灾特点; 防冰技术; 评价

中图分类号: TM726 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2014)10-0131-08

Review of the Researches on Icing Characteristics of Transmission Lines and Anti-icing Technologies

CHAO Yafeng¹, YANG Li², PENG Xiaoliang³, PENG Zhanqi³,
WANG Cheng¹, ZHAO Shihua¹

(1. State Grid Hunan Electric Power Corporation Research Institute, Changsha 410007, China;

2. Hunan Electric Power Transmission & Transformation Engineering Company, Changsha 410007, China;

3. Hunan Power Grid Engineering Company, Hunan Hengyang 421000, China)

Abstract: The influencing factors of transmission line icing are analyzed. The principles and application conditions of the existing or in-research anti-icing technologies are summarized. All of the anti-icing technologies are comprehensively evaluated in terms of validity, safety, operability, and economical efficiency, and the results indicate that for all of the anti-icing technologies, no one can possess all satisfactory validity, safety, operability, and economical efficiency. It is suggested that emphases be laid on prevention of transmission line icing, including theoretical research on transmission line icing, cause analysis of the icing damage, development of new anti-icing method and technology, and enhancement of anti-icing capability.

Key words: transmission line; icing; icing characteristic; anti-icing; evaluation

0 引言

严重覆冰会导致输电线路机械和电气性能急剧下降, 从而导致覆冰事故的发生^[1-5]。自开始出现有记录的输电线路冰灾事故的 1954 年至 2012 年, 中国湖南、湖北、贵州、江西、云南、四川、河南及陕西等省都曾发生过十分严重的输电线路覆冰事故。覆冰事故严重威胁了中国电力系统的安全运行, 并造成了巨大的经济损失^[6-19]。

输电线路覆冰导致的电路损害以及由之引发的安全事故, 给人们的生活和生产带来极大的不便, 并造成巨大的经济损失^[20-21]。因此及时开展防冰技术的研究, 提出一些有针对性的措施和处理方法, 对提高电力系统的安全运行将有积极意义和应用价值。

1 中国电网覆冰与冰灾特点

1.1 覆冰及其影响范围广

以庐山云雾试验站提供的 1951—1980 年共 30 a 全国各地雨淞日数的资料来看, 中国的雨淞主要分

收稿日期: 2014-04-07; 修回日期: 2014-05-09

布于云、贵、川、湘、鄂、赣等省区^[2],见图 1。而根据国网公司规划,大部分特高压骨干网架不可避免要穿越这些雨淞带。

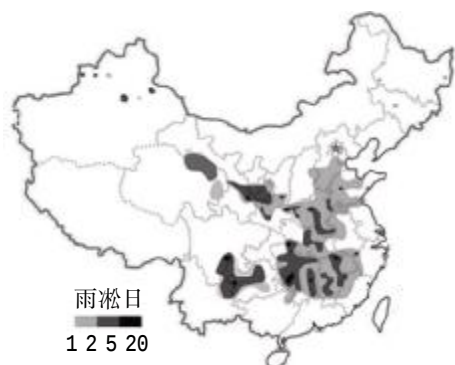


图 1 中国年平均雨淞日统计图

Fig. 1 Annual statistic of freezing rain days in China

1.2 覆冰与冰灾具有典型的微地形、微气候特征

随着中国电网的大规模发展,电源点尤其是水电站到用电负荷中心的距离越来越远,大容量、远距离的特高压输电工程将在未来电网格局中充占据主导,见图 2,这使中国大量东西或偏东西走向的输电线路比纯南北走向的线路更容易发生覆冰灾害^[22-28]。在冬天,穿过这些区域的输电线路容易覆冰,在极端天气条件下,极易形成冰灾。



图 2 中国发电基地和负荷中心区域分布图

Fig. 2 Generating plant and load center distribution of China

1.3 杆塔和线路结构变化导致覆冰多样化,冰灾形成机理差异较大

20 世纪 80 年代以来,中国电网的电压等级由 220 kV 提高到 330 kV 和 500 kV 及以上,但因输电线路自身结构的变化不仅抗御恶劣气候袭击的能力没有增加,而且还有所下降^[2]。这是因为随着电压等级的提高,输电线路普遍采用分裂导线。每根子导线之间的距离为 30 mm 左右,客观上更容易使几根子导线上的覆冰或积雪连为一体,形成巨大的冰桶体或冰雪桶体,尤其是每相导线或每极的子线迎风面

覆冰达到一定重量便会扭转,扭转后再覆冰便形成更加坚实的冰桶体,使一相或一极线路的质量成数倍或数十倍的增加。冰桶体形成后导线迎风面大大增加,直接导致风雪交加时线路荷载又成倍增加。

1.4 局部地段严重覆冰导致电网设备整体抗御冰灾能力降低

一是电网覆冰强度超出了预料。由于气候变暖,冻雨、暴风雪和寒雾对电网袭击的强度空前地加大了,超出了以前的设防标准。二是输电线路、铁塔等输电设施老化,不能承受覆冰之重。三是设防标准本来就不符合实际需要。设计和建设的电网本身抗御覆冰和暴风雪灾害的标准就达不到实际需要,给电网安全运行带来重大危害。

1.5 污秽的存在加剧了绝缘子覆冰闪络的几率

随着经济的发展,燃煤电厂、钢铁厂、化工厂、水泥厂等高污染、高排放企业日益增多,除尘和除硫不达标的工业锅炉折算容量高达 1 亿多 kW,排放出大量的污染物。通过高污染、高排放企业附近地区的输电线路,便会在线路、绝缘子、铁塔、金具等设施上产生大量污秽物,过去的无污染或轻污染区,现在逐步上升为重污染地区。线路上的污秽物或浮尘极大地影响了其输电设施表面的光滑度,并使其憎水性能下降,为覆冰和积雪准备了充分条件^[24]。事实证明,污染越严重的地区,发生覆冰、冰闪、雪闪、雾闪等灾害的机率就越高。

2 电网设备防冰技术研究现状及评价

防止电网设备覆冰从原理上讲就是要在电网设备覆冰前采取各种有效技术措施,使各种形式的冰无法在其上积覆,其总的覆冰荷载也能控制在物体可承受的范围内,只有在设计阶段无法做到有效抗冰时,才考虑采用防冰和除冰技术措施。输电线路防冰方法可分为 3 类:热力防冰、被动防冰和其他防冰方法。这些方法的目的是采用一切可以运用的手段,防止覆冰在电网设备上形成。

2.1 提高电网设备抗冰灾的能力

2.1.1 提高抗冰设计标准

1) 提高设计标准防止冰灾。中国的输电线路设计中,考虑了不同电压等级和不同地区的差别设计。然而随着全球气候的变化,原有的设防标准仍不能抵御频繁发生的极端气候的侵袭。因此,加强设计,提高电网抗冰能力称为灾后电网重建工作的重中之重。2008 年冰灾后,国家电网对原有线路设计规程规范进行了修订,提高了线路的设计标准。

2) 提高设计标准防止冰灾的综合评估。提高建

设标准可以大大加强电网设备的抗冰性能, 但就目前来说, 全面提高电网设防标准耗费巨大。如将电网设备设防标准从 15~30 a, 意味着成本将增加两倍以上, 而若将电网设备设防标准由 30 a 提高到 60 a, 投资将增加 3 倍。因而, 普遍提高电网设计标准并不可行。其次因为人力物力的限制, 中国输电线路里程过长, 在短期内全面提高电网设防标准是不现实的。因此, 应根据国家电网公司研究制定的《电网差异化规划设计指导意见》, 因地制宜加强抗冰设计。

2.1.2 采用高强度抗冰导线

1) 基本原理。抗冰导线之所以具有防冰特性, 主要是因为: ① 防覆冰导线光滑的表面以及更大的扭矩消除了冰霜覆盖产生的各种问题, 使得冰雪不易在表面堆积; ② 防冰导线的表面平滑, 具有更好的阻尼特性, 能有效减小对杆塔的拉力; ③ 防冰导线耐热性能好, 可以承载更高的电流, 在大雪灾发生时, 通过提高输电线的载流量, 提升导线的工作温度, 及时融化输电线上覆盖的冰雪; ④ 防冰导线比传统的钢芯铝绞线强度大, 增加了导线的载重量; ⑤ 防冰导线比传统的钢芯铝绞线重量轻, 自身重量的减轻更增加其在冰雪中的承载能力。典型的防覆冰导线有 AERO-Z 型抗冰导线和 JRLX/T 复合芯软铝导线两种, 见图 3。AERO-Z 型抗冰导线于 2005 年 12 月在云南昭通供电局挂网运行, JRLX/T 复合芯软铝导线于 2007 年先后在福建、江苏、浙江、湖北、辽宁、上海、天津等地挂网运行。



图 3 JRLX/T(ACCC)复合导线

Fig. 3 JRLX/T anti-icing transmission line

2) 采用防冰导线的综合评估。高强度抗冰导线具有较多优点, 运行经验表明, 各种类型的防冰导线都能够一定程度上起到防冰的效果。但运行经验也表明, 目前还没有一种防冰导线的防冰性能能够达到满意的效果。如 AERO-Z 型导线, 在 2008 年初中国的特大冰灾中, 由云南昭通供电局引进的 AERO-Z 型导线不仅未能抗覆冰, 还因覆冰过重引起了断线。而 JRLX/T 复合芯软铝导线目前只在 220 kV 及以下线路有过运行记录, 对于超高压和特高压线路, 其技术领域还属空白。此外, 大规模采用

防冰导线价格难以接受。因采用的材料不同, 不同种类的防冰导线造价差别很大。如防冰效果较好且适用电压等级较高线路的 AERO-Z 型导线, 其价格是常规钢芯铝线的上百甚至几百倍; 而 JRLX/T 碳纤维复合芯导线价格则比普通钢芯铝线略低, 但其只在 220 kV 以下线路有过运行经验。

因为应用防冰导线防冰花费高昂, 且防冰效果有限, 因而目前还没有广泛应用到实际线路, 所以下一步的研究应该进一步提高抗冰导线防覆冰性能, 同时改进其性能扩大抗冰导线的使用范围, 降低造价。

2.1.3 提高绝缘子串电气耐受能力

1) 提高绝缘子抗冰闪能力的方法。① 增加绝缘子串长。重庆大学的试验表明, 绝缘子串交直流冰闪电压与串长基本呈线性关系^[29-31], 故在易覆冰地区, 可以采取适当增加绝缘子串长的方法来提高绝缘子串的抗冰闪性能; ② 优化绝缘子布置方式。根据统计表明, 绝缘子覆冰闪络基本上发生在悬垂串上, 未发现耐张串和 V 型串、倒 V 串绝缘子冰闪, 这说明冰闪概率与绝缘子串组装型式密切相关。2008 年冰灾后, 发生冰闪事故的线路大多数采用插花方式或改为倒 V 形布置方法。5 a 的运行经验表明, 优化绝缘子布置方式具有明显的抑制冰闪的效果; ③ 采用防覆冰绝缘子。运行经验和试验已经证明, 防覆冰绝缘子可以调大爬距, 防止不同覆冰厚度、不同污秽程度和不同海拔高度下的闪络。2008 年 11 月, 近千支 110~500 kV 新型防冰复合绝缘子在湖南等地供电线路抗冰改造工程中成功挂网。4 a 的运行经验表明, 此种新型防冰复合绝缘子具有很好的防冰效果, 而且较一般产品更不易积污, 能够更持久地保持伞裙的清洁, 该产品的防雷、防雨、防鸟害能力也有相应提高。

2) 提高绝缘子抗冰闪能力的综合评估。运行经验表明, 增加串长、优化绝缘子布置方式和采用新型的防冰复合绝缘子都能有效提高绝缘子串的抗冰闪性能。

2.2 憎水性涂料防冰技术

2.2.1 憎水性涂料防冰的原理

化学涂料防冰方法是通过在输电线路导(地)线、杆塔结构或绝缘子等上覆涂具有憎水性能涂料, 降低冰与衬垫表面的附着力, 虽不能防止冰的形成, 但可使冻雨或雪等在冻结或粘结到导线或绝缘子之前就可以在自然力, 如风或导线及绝缘子摆动时的作用下即能滑落, 或者使冰或雪在导线或绝缘子的附着点明显降低, 同样可以达到防止覆冰、减少线路出现冰害事故的目的^[31-32]。涂料防冰方法的关键技术

是降低冰和衬底(导线)的附着力,为了降低冰的附着力就必须降低衬底(导线)的可湿性,使其具有憎水性或疏水性,即降低其反应性和表面力,使其更具惰性,更不渗水。由此产生的高接触角 θ 更有可能在交界面吸留空气,见图 4。吸留空气可以阻止跨越界面交换吸力,减小附着结合力,造成不平衡的应力集中,使之发生裂纹并扩大,导致附着力失效,达到防冰的效果。

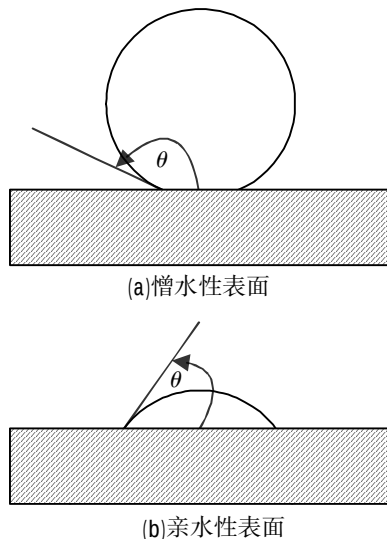


图 4 水滴与衬底的接触角 θ

Fig. 4 The contact angle θ of water and interface

目前使用最广泛的憎水性涂料是 PRTV 涂料。在覆冰开始的 1~2 h 内,由于 PRTV 的憎水性,过冷却水滴在绝缘子表面呈水珠状,部分水滴易滑离覆冰表面,覆冰较未涂覆 PRTV 时慢,但仍会形成覆冰,且其覆冰呈颗粒状并在冰层中形成微小“空腔型”的气隙,此外,由于涂覆 PRTV 的表面水珠易倾向于向绝缘子伞裙边缘滑落,涂覆 PRTV 的绝缘子伞裙边缘形成冰凌的速度较未涂覆 PRTV 的表面更快。随着覆冰的继续和时间的增长,二者之间覆冰没有明显区别^[32]。

2.2.2 憎水性涂料在电网设备防冰中的综合评估

运行经验表明,PRTV 涂料在覆冰初期能有效延缓覆冰的形成,但随着覆冰时间的增长,PRTV 涂料不再具有优势,且试验结果表明,涂覆 PRTV 绝缘子串的冰闪电压低于未涂覆 PRTV 涂料的,即采用 PRTV 涂料防冰闪存在局限性。此外,虽然憎水性涂料用于输电线路防冰看起来简单易行,但是涂料涂于导线上后由于股线的扭动,涂层容易破裂,憎水性再好的涂料有了裂纹后容易渗透到股线间,形成结冰,另外还有抗老化等问题需要解决,因此涂料防冰是不易攻破的难题,要达到工程应用要求还须花更大的力气才能解决。

2.3 低居里铁磁材料防冰技术

2.3.1 铁磁材料防冰的原理

在热力防冰技术中,目前只有铁磁材料可用于输电线路防冰,工程应用中已实现的铁磁材料防覆冰方法有多种形式。将低居里点铁磁材料防冰器件裹在输电导线表面,输电线路的交变电流产生一个交变磁场,使裹在外层的铁磁材料磁芯磁化。当环境温度高于居里点时铁磁材料的磁化率很低,这时磁感应强度(B)的值很小;而当环境温度低于居里点时,铁磁材料则具有很大的磁转化率,产生很强的磁感应强度(B),从而产生损耗放热^[33-41]。

2.3.2 铁磁材料防冰工程应用及其综合评估

低居里点铁磁材料利用其涡流损耗和磁滞损耗随温度变化而变化的性质,使装配有低居里点铁磁防冰器件的输电线路实现自动防冰,经运行检验防冰效果较明显。但低居里点铁磁材料目前具有很难让人接受的缺点:①低居里点铁磁材料制作工艺复杂,对加工环境和加工器具要求严格;②低居里点铁磁材料使用成本高。如对于 LGJ-400/50 的导线,要想达到理想的防冰效果,约需 0.9 kg/m 铁磁材,对于 4×LGJ-400/50 的 500 kV 线路,铁磁材料需要量为 10.8 t/km。一般的铁磁材料的成本价格约为 10 万元/t,考虑加工、覆层(一般为铝或铜)等综合因素,市场价约为材料成本价的 2.7 倍,由此可知,对于四分裂 500 kV 线路(LGJ-400/50),防冰需要的费用超过了新建一条 500 kV 线路的价格。对于严重覆冰地区,需要的费用更高。因此,从成本上考虑,目前低居里铁磁材料没有工程应用前景;③利用低居里点铁磁材料防冰需要较高的能量消耗。以 5 W/kg 作为一年的平均损耗功率,每千克铁磁材料防冰器件一年损耗的能量约为 43.8 kW·h。一条长 1 000 km 的三相交流线路,按每公里装配 1 kg 铁磁材料计算,一年损耗的功率大约为 131 400 kW·h;④低居里点铁磁材料安装复杂,可操作性差。使用低居里点铁磁防冰器件如铁磁线、预绞丝或防冰套筒等,需要手工或专用机械将其固定螺距缠绕或套在导线上。由于铁磁材料防冰器件一般比较纤细(磁热线的直径为 1.5~3 mm),且结构复杂,外层覆有较薄的覆层,安装时容易拉断或变形,不利于架空线路高空作业。目前还没有研制出比较好的自动安装方法,主要靠人工安装。中国南方地形复杂,电网大多分布在山地,人工装配铁磁防冰器件需要消耗大量的人力、物力和财力,且装配的效率很低,另外高空作业增加了危险性。

正因为低居里点材料成本高,制造工艺复杂,不仅增加线损而且增加线路负载,从经济和工程实施

的角度上讲具有较大的困难,所以就现有的条件来说是不可行的。要使低居里点在铁磁材料应用在输电线路防冰中,必须攻克铁磁材料 0℃的居里温度点,以及磁感应强度在居里点突变等技术难关。

2.4 形记合金防冰技术

2.4.1 形记合金防冰的原理

形状记忆合金由于其独特的冶金成分,可在一个相当窄的相变温度范围内产生很大的形状尺寸上的变化,这是一般合金所不具备的特性,见图 5,当合金处于转变温度范围的冷侧一边时,其结构为马氏体相,这种材料相当软,有塑性,因此有可能对合金进行大约达到 8%的应变^[37]。此时如果将合金加热,马氏体将无扩散转变成奥氏体相,奥氏体的材料硬而无柔性由于材料在马氏体状态经过了变形,而加热后材料又能回到变形前的形状,这种效应称为形状记忆,这种合金就称为形状记忆合金。 NiTi 合金的马氏体、奥氏体转变温度范围大约为 22℃。根据合金成分的不一样,相变的起始温度可控制在 $-212\sim+121$ ℃之间。

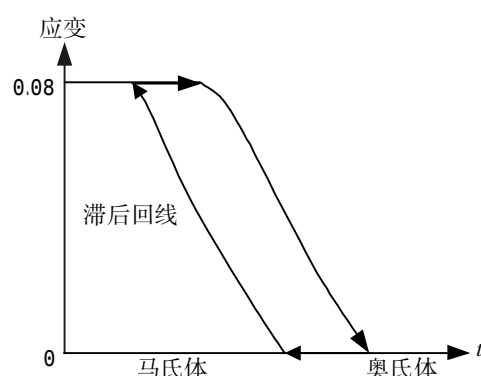


图 5 形状记忆合金应变—温度关系

Fig. 5 Relationship of strain and temperature of shape memory alloy

在形状记忆合金相变过程中,如果材料回到变形前的几何尺寸的运动受阻,则会产生内应力,其大小为每 1%应变产生 68.9 MPa 的内应力,也就是说形状记忆合金能产生有用的力和运动。当合金再进行冷却时它又会转变成马氏体,这是一种单向的形状记忆效应。为了使上述形状记忆动作重复进行,必须对马氏体相材料再进行应变。此种应变不能自动进行,必须另外施加外力。材料经过再应变后,再加热转变成奥氏体相时,合金又回复到应变前的尺寸状态。这样,合金有了双向记忆效应。

2.4.2 形状记忆合金在电网设备防冰中的综合评估

形状记忆合金由于温度变化产生形状上的变化很像传统材料受冷热变化一样,不同之处在于它是“冷胀热缩”而不是热胀冷缩,但如何施加外力产生

再应变在设计上是一难点。在向反方向运动时,由于明显的温度滞后回线的存在,要求在温度上有一个大的反向变化,这是除冰器设计上的又一个难点。因为其制作工艺和技术的复杂性,且在除冰过程中要消耗大量能量,所以采用形状记忆合金材料防冰花费较为高昂。

2.5 碘化银类化学制剂人工干预防冰技术

2.5.1 人工干预防冰的原理

人工干预防冰是人工影响天气的一种。在大部分形成降水的混合云中,降水的形成主要取决于云中是否有足够数量的冰晶,能否通过冰水转化过程形成大水滴。在温度为 $-30\sim 0$ ℃的云中,往往存在过冷却水滴,若在这种云中播撒碘化银等成冰催化剂,可以生成大量的人工冰晶。这些人工冰晶通过伯杰龙过程迅速增长,促进冷云降水过程,使降水量增加。同时,在重力场中下降的云滴,半径大的速度较快,可赶上小云滴而发生碰撞并合,这称为重力碰并,在重力碰并的作用下,凝结而成的小水滴越来越大。一些比较严格试验的统计分析表明,冷云催化可以增加降水量 10%~20%。而众所周知,覆冰形成的有利条件是毛毛雨。通过人工干预天气,改变雨量和雨滴大小,破坏了覆冰形成的有利条件,可以达到延缓覆冰的目的。

此外,如果人工冰晶的浓度很大,则形成的雪晶的平均尺度较小,它们从云中下落到地面的时间较长,在气流的作用下,会落到下风方向更远的地方而改变降水的分布。可见,恰当的播撒碘化银等成冰催化剂,可以改变输电线路附近的降水分布,达到延缓覆冰的目的。

2.5.2 碘化银类化学制剂在电网设备防冰中的可行性

人工影响天气是以云和降水的物理学为理论基础,它包括云和降水生成的宏观动力学和微物理学。在适宜的地理背景和自然环境条件下,在适当的云体部位进行有科学指导的人工催化作业,有可能达到人工影响局部天气的目的,目前人工影响天气在技术上已经比较成熟,而且人工影响天气一般采用飞机或者火箭播撒碘化银。但人工增雨作业在催化对象的选择、播撒时机和播撒部位的确定以及催化剂量的控制等方面都要力求符合播云原理假说所限定的可播性条件,方可能使作业达到预期的增雨目的。所以人工影响天气来防冰操作起来相当复杂,对操作人员要求很高,需要很深的专业知识和丰富的经验。

2.6 应用导线覆冰自身特性的被动防冰的方法

2.6.1 被动防冰方法的定义

利用风、地球引力、随即散射和温度变化等自然

条件脱冰的方法称为被动除冰方法,主要有平衡锤、阻雪环、风力裙、热吸收器等方法^[38]。被动除冰方法虽不能保证可靠除冰,但无需附加能量,所以在工程上应首先考虑采用这种方法。被动除冰技术不能阻止冰的形成,但有助于限制冰灾。如 1988 年由 Admirat 和 Lapeyre、1990 年由 Yasui 等使用的平衡锤技术可防止导线扭转;1978 年由 Moreau 等采用的在给定的过负载条件下允许导线滑动技术对于减少冰的积聚量有一定作用;1993 年分别由 Goia 和 Chirita 采用的在给定的过负载条件下允许导线升降技术,可减少倒塔概率或防止倒塔事故发生,并有助于确保冰灾事故后线路迅速恢复供电。

2.6.2 被动防冰方法的综合评估

被动除冰技术虽然可以加速导线覆冰的脱落,但

它常常只在局部有效,并只针对一定的冰型和在特殊条件下起作用。可见,采用被动防冰方法在一定情况下是可行的,但防冰效果有限,不过从经济性和安全性来看是值得推广的,宜和其他防冰技术配合使用。

3 电网设备防冰技术的比较

要做到防止输电网络不覆冰,除了在线路选择时避开冰区外,到目前为止,还没有完全可靠的方法和技术能做到这一点,采用防冰导线,防冰绝缘子,防冰材料,憎冰性材料等方法均能起到一定的防覆冰作用,但在使用过程中仍有较大局限性。笔者从有效性、技术性、可操作性、安全性和经济性 5 个方面对现有的防冰技术进行了综合评价,表 1 列出了这些典型防冰技术的评价信息。

表 1 典型防冰方法的综合评价

Tab. 1 Integrative assess of the typical anti-icing techniques

防冰方法	防冰(闪)具体措施	效果	技术性	可操作性	安全性	价格
提高电网设备抗冰灾的能力	提高设备抗冰设计标准	有效	低	高	高	高
	采用高强度抗冰导线	有效	低	高	高	不定
	增加绝缘子串长	有限	低	高	高	低
	优化绝缘子布置方式	有限	低	高	高	低
	采用防覆冰绝缘子	有限	低	高	高	中
憎水性涂料防冰	有机硅涂料	有限	低	高	高	中
	超疏水性仿荷叶涂料	有限	低	高	高	高
铁磁材料防冰	低居里铁磁材料防冰	有限	高	高	高	高
形记合金防冰	形状记忆合金防冰	不确定	高	高	高	高
人工影响天气防冰	碘化银类化学制剂人工干预防冰	不确定	高	低	高	中
被动防冰方法	平衡锤	有限	低	高	高	低
	线夹	有限	低	高	高	低
	阻雪环	有限	低	高	高	低
	风力裙	不确定	低	高	高	低
	热吸收器	有限	中	高	高	低
	油脂	有限	低	高	高	中

4 结论

1)输电线路覆冰具有典型的微地形、微气候特征,但不同结构物覆冰形成机理差异较大;

2)设计和建设达不到实际抗冰需要,环境污染加剧了绝缘子覆冰闪络的几率,均给电网的安全运行带来重大威胁;

3)在电网设备的防冰方法中,不存在既具有安全性、可操作性,又能有效且经济的防冰技术;

4)在输电网络防冰除冰工作中,应把预防电网冰雪灾害工作放到更加重要的位置,重视输电网络覆冰的理论研究,认真分析冰灾原因,不断研究新技术、新方法,提高防冰水平。

参考文献:

[1] 孙才新,司马文霞,舒立春.大气环境与电气外绝缘[M].

北京:中国电力出版社,2002.

[2] 蒋兴良,易 辉.输电线路覆冰及防护[M]. 北京:中国电力出版社,2002.

[3] 曹 琪,杨凯全,吴鑫强,等. 66 kV 输电线路移动式交流融冰装置研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2012,33(4):34-38.

CAO Qi,YANG Kaiquan,WU Xinqiang,et al. Research on a portable AC ice-melting device for 66 kV transmission line[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2012,33(4):34-38.

[4] 李妍红,王 奇.500 kV 独山变电站直流融冰兼 SVC 装置经济运行研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2012,33(6):9-16.

LI Yanhong,WANG Qi.Research on economic operation of DC de-icer and SVC device in 500 kV Dushan substation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2012,33(6):9-16.

- [5] FARZANEH M. Atmospheric icing of power networks[M]. Springer:Springer, 2008.
- [6] 杨跃光,王 昕,秦宏伟. 输电线路人工观冰值与覆冰预警系统监测值对比分析研究[J]. 陕西电力, 2014, 42(1): 46-49.
YANG Yueguang, WANG Xin, QIN Hongwei. Comparison and analysis on transmission line icing data from artificial measurement and on-line monitoring system[J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(1):46-49.
- [7] 林泽楠,薛 涛,王永杰. 间隔棒对塔线体系脱冰跳跃的抑制研究[J]. 陕西电力, 2013, 41(12):71-74.
LIN Zenan, XUE Tao, WANG Yongjie. Control effect of phase spacer on jumping induced by ice-shedding for iced wires of tower-line system[J]. Shaanxi Electric Power, 2013, 41(12):71-74.
- [8] 吕建安. 10 kV 输电线路雷击原因及防雷措施的探讨[J]. 陕西电力, 2013, 41(7):100-101.
LYU Jian'an. Lightning reason analysis of 10 kV transmission line & its prevention measures[J]. Shaanxi Electric Power, 2013, 41(7):100-101.
- [9] 蒋兴良,马 俊,王少华,等. 输电线路冰灾事故及原因分析[J]. 中国电力, 2005, 38(11): 27-30.
JIANG Xingliang, MA Jun, WANG Shaohua, et al. Transmission lines' ice accidents and analysis of the formative factors[J]. Electric Power, 2005, 38(11): 27-30.
- [10] 宿志一. 直流绝缘子串覆冰闪络特性[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2004.
- [11] 黄河,徐光虎,余 畅. 2008 年南方电网冰灾期间孤网运行经验[J]. 南方电网技术, 2008, 2(5):6-9.
HUANG He, XU Guanghu, YU Chang. Operation experience of isolated network in CSG during ice disaster (2008)[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(5):6-9.
- [12] 丁军策,苏寅生,李建设,等. 冰灾期间电网运行特点及应对措施[J]. 南方电网技术, 2008, 2(2):23-26.
DING Junce, SU Yinsheng, LI Jianshe, et al. Operation characters of power grid and countermeasure during icing disaster[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(2): 23-26.
- [13] 熊 媛,黄 新,张薇薇,等. 冰灾期间贵阳地区低周减载方案[J]. 南方电网技术, 2008, 2(2):37-39.
XIONG Yuan, HUANG Xin, ZHANG Weiwei, et al. The under frequency load shedding scheme of Guiyang area during the Ice disaster[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(2):37-39.
- [14] 翟海燕,赵 明,李本瑜,等. 2008 年云南电网抗击冰灾继电保护技术措施[J]. 南方电网技术, 2008, 2(2):40-43.
ZHAI Haiyan, ZHAO Ming, LI Benyu, et al. Technical measures of relay protection of yunnan power system for fighting against ice disaster in 2008[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(2):40-43.
- [15] 许树楷,赵 杰. 电网冰灾案例及抗冰融冰技术综述[J]. 南方电网技术, 2008, 2(2):1-6.
XU Shukai, ZHAO Jie. Review of ice storm cases impacted seriously on power systems and de-icing technology [J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(2):1-6.
- [16] 胡文歧,井 谦,彭 静. 接触角法表征复合绝缘子用硅橡胶材料表面憎水性的研究[J]. 电瓷避雷器, 2013(2):5-10.
HU Wenqi, JING Qian, PENG Jing. Study on surface hydrophobicity of silicone rubber materials for composite insulator characterized by contact angle method[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(2):5-10.
- [17] 姚茂生,葛双 II 回覆冰断线倒塔事故的原因分析[J]. 华中电力, 1995, 8(4):60-63.
YAO Maosheng. Analysis of the causes of Ge-Shuang II reply ice breaking tower collapse accident[J]. Central China Electric Power, 1995, 8(4):60-63.
- [18] 王守礼. 影响电线覆冰因素的研究与分析[J]. 电网技术, 1994, 18(4):18-24.
WANG Shouli. Study and analysis of the factors affecting wire ice coating [J]. Power System Technology, 1994, 18(4):18-24.
- [19] 杨靖波,李 正,杨凤利,等. 2008 年电网冰灾覆冰及倒塔特征分析[J]. 电网与水力发电进展, 2008, 24(4): 4-8.
YANG Jingbo, LI Zheng, YANG Fengli, et al. Analysis of the features of covered ice and collapsed tower of transmission line snow and ice attacked in 2008[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2008, 24(4): 4-8.
- [20] JIANG Xingliang, CHAO Yafeng, ZHANG Zhijin, et al. DC flashover performance and effect of sheds configuration on polluted and ice-covered composite insulators at low atmospheric pressure [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(1):97-105.
- [21] 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. Accident analysis of Guizhou power grid ice hazard and its countermeasures[J]. Electric Power Construction, 2008, 29(4):1-6.
- [22] 蒋兴良. 输电线路导线覆冰机理和三峡地区覆冰规律及影响因素研究[D]. 重庆: 重庆大学, 1997.
- [23] 蒋兴良,孙才新,顾乐观,等. 三峡地区导线覆冰的特性及雾凇覆冰模型[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1998, 21(2):16-19.
JIANG Xingliang, SUN Caixin, GU Leguan, et al. Power lines icing characteristics of the Three Gorges district and a model of the accumulation of ice on electric on electric power lines [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 1998, 21(2):16-19
- [24] 谢运华. 三峡地区导线覆冰与气象要素的关系[J]. 中国电力, 2005, 38(3): 35-39
XIE Yunhua. The relation between meteorological elements and ice accretion in Three Gorges region[J]. Electric Power, 2005, 38(3): 35-39

- [25] 田宏,陈文秀,张良忠. 三峡地区覆冰气候特征及个例分析[J]. 四川气象, 2000, 20(2): 47-50.
TIAN Hong, CHEN Wenxiu, ZHANG Liangzhong. Analysis of Three Gorges area climatic characteristics of ice cover and case[J]. Sichuan Meteorology, 2000, 20(2): 47-50.
- [26] 史尊伟,阳林,李昊. 基于改进Canny算子的覆冰厚度测量方法[J]. 电瓷避雷器, 2013(6): 24-29.
SHI Zunwei, YANG Lin, LI Hao. Icing thickness measuring based on improved Canny operator [J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(6): 24-29.
- [27] 樊志超,高继林. 湖南特大冰冻灾害的云物理特征与人工影响技术探讨[J]. 气象, 2009, 35(11): 84-92.
FAN Zhichao, GAO Jilin. The cloud physical characteristics of extreme freeze catastrophic weather in Hunan province and the possibility of suppression[J]. Meteorological Monthly, 2009, 35(11): 84-92.
- [28] 陈及时. 掌握导线覆冰临界电流做好预防措施[J]. 中国电力, 1997, 30(10): 51-52.
CHEN Jishi. Measures preventing conductors from ice coating under critical current[J]. Electric Power, 1997, 30(10): 51-52.
- [29] 蒋兴良,舒立春,孙才新. 电力系统污秽与覆冰绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [30] 黄斌,徐姗姗,苏文宇. 输电线路覆冰研究综述[J]. 电瓷避雷器, 2012(1): 27-32.
HUANG Bin, XU Shanshan, SU Wenyu. Summary of research on icing of transmission lines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(1): 27-32.
- [31] 蒋兴良,肖代波,孙才新. 憎水性涂料在输电线路防冰中的应用前景[J]. 南方电网技术, 2008, 2(2): 13-18.
JIANG Xingliang, XIAO Daibo, SUN Caixin. Application prospect of hydrophobic coatings on anti-icing of transmission lines[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(2): 13-18.
- [32] 毕茂强,蒋兴良,巢亚锋,等. 自然覆冰与衬垫的粘附特性及影响因素[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 1050-1056.
BI Maoqiang, JIANG Xingliang, CHAO Yafeng, et al. Adhesion strength and its influence analysis of natural ice on various substrates [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 1050-1056.
- [33] 蒋兴良,范松海,孙才新,等. 低居里点铁磁材料在输电线路防冰中应用前景分析[J]. 南方电网技术, 2008, 2(2): 19-22.
JIANG Xingliang, FAN Songhai, SUN Caixin, et al. Analysis on application of the magnetic material of low curie point to deicing of transmission lines[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(2): 19-22.
- [34] 张立春,朱宽军. 输电线路覆冰舞动灾害规律研究[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(9): 13-19.
ZHANG Lichuan, ZHU Kuanjun. Research on the law of disasters caused by transmission line galloping[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(9): 13-19.
- [35] 程思勇,薛志方. 覆冰不平衡张力计算分析[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(2): 10-13.
CHEN Siyong, XUE Zhifang. Calculation and analysis of the unbalanced tension caused by icing [J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(9): 13-19.
- [36] 蒋兴良,万启发. 输电线路除冰新技术: 低居里(LC)热线在线路除冰中的应用[J]. 高电压技术, 1992, 23(3): 55-58.
JIANG Xingliang, WAN Qifa. A new deicing method: Application of a magnetic material wire with low curie point in the deicing of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 1992, 23(3): 55-58.
- [37] 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. Shape memory alloys in aircraft in addition to the application of ice[J]. Aeronautical Manufacturing Engineering, 1996(3): 28-30.
- [38] 韩军科,杨靖波,杨风利,等. 电网冰灾典型线路覆冰倒塔分析[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(3): 31-35.
HAN Junke, YANG Jinbo, YANG Fengli, et al. Analysis on tower collapsing for ice coating on typical transmission line in power grid ice disaster area [J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(9): 13-19.
- [39] 李 宁,周羽生. 基于有限元方法的覆冰输电线路高频高压除冰法分析[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(2): 28-31.
LI Ning, ZHOU Yunsheng. Finite element analysis on deicing power transmission line with high-voltage excitation [J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(9): 13-19.
- [40] 李长明,蒋兴良,李松林,等. 混合冰覆冰对导线表面场强影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2013(5): 1-6.
LI Changming, JIANG Xingliang, LI Songlin, et al. Research the influences of mixed-phase icing on surface field density of stranded conductor[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(5): 1-6.
- [41] 李昭廷,郝艳捧. 一种基于历史数据的输电线路覆冰增长快速预测方法[J]. 电瓷避雷器, 2012(1): 1-7.
LI Zhaoting, HAO Yanpeng. A rapid prediction method for icing on transmission lines based on historical data [J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(1): 1-7.

巢亚锋(1982—),男,博士,高级工程师,主要从事复杂环境下电气外绝缘研究、电力系统过电压与绝缘配合研究。