

[电网设备]

电网设备冻雨覆冰研究

文/张勇 朱涛 黄少华 刘浩
国网安徽省电力有限公司安庆供电公司

电网设备作为电网的重要组成部分，在电能从生产到消费的过程中均起到重要作用。然而每年因冻雨天气引发的电网设备覆冰事故已经屡见不鲜，严重影响电网的安全稳定运行。针对上述问题，首先讨论电网设备冻雨覆冰的机理。其次，分析影响冻雨覆冰的因素，及不同因素与覆冰间存在的关系。在此基础上，提出设备覆冰会给电网带来的危害，并进一步分析危害产生的机理。最后，针对冻雨覆冰带来的危害，提出应对的策略。

电能作为现代社会运转的基石，重要性不言而喻。近年来，随着全球温室效应的加剧，极端天气频发，电网设备在冬季所面临的冻雨覆冰问题愈发严重[1]。设备覆冰会引发线路跳闸、杆塔坍塌等一系列严重的事故，严重影响电网安全稳定运行。为保证供电的可靠性和持续性，已经有很多学者基于大电网背景对冻雨覆冰现象展开研究，并提出应对方法及策略。文献[2]提出覆冰输电线路发生舞动时杆塔所承受舞动负荷的计算方法。文献[3]指出当前电网覆冰时所需面临的挑战，并分析应对冰雪灾害要采取的综合性技术手段。文献[4]讨论绝缘子每个覆冰阶段下的闪络特性，并通过人工实验验证其所建模型的准确性。然而这些文献没有阐述冻雨的覆冰机理，也没有系统讲述冻雨覆冰会给电网带来的危害。

本文选取最易发生冻雨覆冰的两类典型电网设备作为研究对象，即绝缘子和输电导线。首先分析冻雨覆冰的形成原因和影响因素。在此基础上，分析冻雨覆冰危害的产生机理，并提出应对策略，最后对全文结论进行总结。

冻雨覆冰的形成

在冬季和早春时期，冷暖气流交汇，大气层中易形成逆温层，进而产生“冷-暖-冷”的温度层

结。如图1所示，当上层冷气层中过冷却水滴、冰晶及雪花下落到暖气层时，冰晶和雪花会因温度升高融化成水滴。而当融化后的水滴下落到接近地面的冷气层时，水滴会迅速降温，呈现出过冷却特征。其中，大直径的过冷却水滴会包裹住空气中的小粒子，将其作为冰核。在低气温的作用下，迅速凝固形成冰粒落至地面。因冰粒是固体，对绝缘子及输电线路的附着性很低，不会造成覆冰。

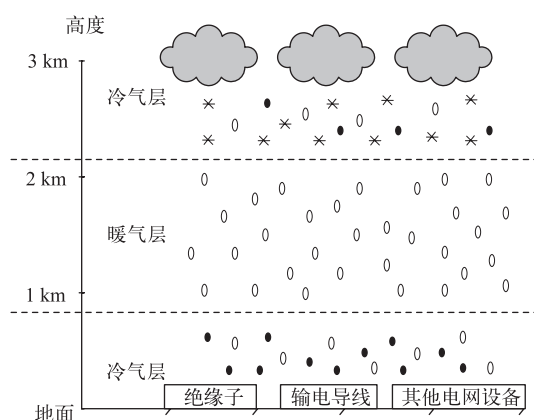


图1 冻雨的形成

而冻雨往往是由直径较小（ $10 \sim 40 \mu\text{m}$ ）的过冷却水滴组成的^[5]。当过冷却水滴体积较小时，因接触面积小，难以包裹住悬浮在空中的小粒子。即便在 0°C 以下的环境里，缺乏冰核的过冷却小水滴

仍会继续保持液态下落至地面。在落至地面的过程中,缺乏冰核的过冷却小水滴处于亚稳定态,当碰撞到低于冰点温度的物体时,过冷却小水滴会因为碰撞获得能量形成冰核,进而迅速凝固在被碰撞物体上。在冷气层影响下,绝缘子和输电线路表面温度低于 0°C ,且可接触面积大。故过冷却小水滴当碰撞到上述设备时,会迅速凝固在其表面,从而产生覆冰。因冻雨产生的设备覆冰,一般称为雨凇。

冻雨覆冰的影响因素

在实际的冻雨天气里,设备覆冰是很多因素共同作用的结果。目前学者的研究表明,下列因素均会对设备冻雨覆冰产生影响。

(1) 气温

当下层冷气层的环境温度在 $-5\sim 0^{\circ}\text{C}$ 之间时^[6],设备表面易产生雨凇覆冰。而当环境温度更低时,过冷却水滴的结构就会发生变化,转而产生雾凇覆冰、混合凇(雨凇、雾凇)覆冰。

(2) 风速

当风速在 $0\sim 6\text{ m/s}$ 范围内^[7],风速越快,设备上覆冰就越快。风速的加快,会加大冻雨与设备的碰撞概率,导致更容易产生覆冰。风速的加快也会使过冷却小水滴碰撞动能增大。当发生碰撞时,过冷却小水滴会更易形成冰核,进而凝固在设备表面。

当风速大于 6 m/s 时,风速越快,反而会造成覆冰量的减少。这是因为风速过快,会导致设备上才形成并不稳固的覆冰发生脱落。其次对于输电导线而言,过快的风速会使其发生舞动,导线表面的覆冰会因舞动而发生脱落。

(3) 风向

风向会影响设备表面覆冰的冰层形状。当风向与覆冰设备角度接近 90° 时,冰层会在迎风面快速形成,进而导致不均匀覆冰。在这种情况下,输电导线迎风面上的冰层会呈现出新月形和翼型等特征。而当风向与覆冰设备角度接近 180° 时,冰层一般会均匀覆盖在设备上。在这种情况下,冻雨与设备表面可接触面积小,一般不会导致严重的覆冰灾害。

(4) 地形及地理条件

地形和地理位置也是影响冻雨覆冰的重要因素。在受风条件好且无遮拦的地形,绝缘子和导线

与冻雨接触面积大,设备极易覆冰,严重时可能会发展为冰灾。以长江三峡区域跨越巫山县的一条 35 kV 输电线路为例^[8],该输电线路处于附近山区的风口处,没有任何遮挡。每年冬季该线路都存在严重的覆冰情况,给电网安全稳定供电造成极大的威胁。而在江河湖泊等潮湿地形附近,空气中水汽含量会更高。冻雨天气设备覆冰的密度会更大。

(5) 设备自身性质

对于输电导线而言,直径、刚度及内部电流强度都会影响冻雨覆冰的情况。首先,导线直径越大,与冻雨的接触面积就越大,就越容易覆冰。其次,刚度决定了导线覆冰时发生扭转的难易程度。当发生不均匀覆冰时,输电导线的偏心荷重,会发生扭转现象。发生扭转后的输电导线,未覆冰的一侧将暴露在风向下,继续覆冰。刚度小的输电导线发生不均匀覆冰时,相较于刚度大的导线,更易发生扭转现象,产生雨凇覆冰情况也会更加严重。最后,导线内电流强度决定了导线表层的温度。根据焦耳定律可知,当导线内电流越大时,产生的热量就越大,就越不容易产生覆冰情况。对于绝缘子而言,伞面直径、伞间间距及其悬挂角度都会直接影响到其与冻雨的接触面积。绝缘子与冻雨的可接触面积越大,越容易形成覆冰。

冻雨覆冰危害的机理分析

冻雨覆冰会对电网的安全运行构成严重威胁,主要会造成绝缘子覆冰闪络、导线舞动、不均匀覆冰与不同期脱冰引发的事故以及过荷载事故四类危害。本节将深入讨论这四类危害发生的机理,并特别着重分析最为频发的绝缘子冰闪和导线舞动问题。

1. 绝缘子冰闪

组成冻雨的过冷却水滴碰撞绝缘子表面时会发生形态的改变,由液态水转化为固态冰。在这个过程中,绝缘子表面的导电离子会因晶释效应向冰层的外表面进行迁移。分布在冰层外表面的导电离子会改变覆冰绝缘子的放电路径,降低其电气强度,引起闪络。

根据绝缘子覆冰的过程,可分为轻度覆冰、中度覆冰和重度覆冰三个阶段。在每个阶段下,覆冰绝缘子发生的闪络机理均不同。轻度覆冰时,绝缘

子覆冰后的形状不会发生改变。导电离子聚集在绝缘子表面的冰层外表面上,形成导电膜。泄漏电流顺着导电膜流经绝缘子上层和下层,导致沿面放电。绝缘子轻度覆冰的闪络机理和污闪类似,主要区别是冰闪时的泄漏电流会更大,产生的热量会更多,绝缘子表面温度的变化会更加明显;中度覆冰时,绝缘子伞裙边缘会形成冰棱,覆冰后的绝缘子形状发生了改变。在中度覆冰的过程中,导电离子会由绝缘子外表面移动至绝缘子表面的冰层外表面,最后移动至冰棱表面上。当冰棱处于临界桥接状态时,绝缘子发生冰闪的概率最大。冰棱上的导电离子会为泄漏电流提供电流通道,泄漏电流会在冰棱和冰面的间隙处放电。当泄漏电流足够大时,间隙放电会进一步发展为局部电弧,对绝缘子造成更大的损坏;重度覆冰时,覆冰会包裹住绝缘子。根据实际风向,绝缘子会形成圆柱体或半圆柱体的冰层。泄漏电流会顺着冰层侧面的电流通道,在冰层中的空气间隙形成电弧,从而引起闪络。

天气转暖或在融冰的过程中,绝缘子表面的固态冰又开始转化为液态水。冰层外表面的导电离子会溶解于液态水,提高融冰水及冰面水膜的导电率,进而降低闪络电压,提高闪络发生的概率。

绝缘子覆冰闪络时所释放的电弧,会迅速释放大量的热能,导致绝缘子表面的温度急剧升高。急剧升高的温度会使绝缘子材料失去原有的弹性,且在高温作用下逐渐炭化,大大降低绝缘性能。绝缘性能的大幅下降易进一步引发电气击穿,造成线路跳闸,对电网人员和设备安全构成威胁。

2. 输电导线舞动

根据输电导线雨淞覆冰程度,可将覆冰过程分为输电导线表面薄覆冰和厚覆冰两个阶段,两个阶段下的舞动机理存在差异。

在薄覆冰阶段,输电导线外的覆冰和冰层外表面的水膜对输电导线的形状改变不大,覆冰导线横截面仍然能保持为圆形^[9]。由流体力学中的冯卡门涡街效应可知,当风流经薄覆冰的输电导线(圆形或柱形物体)时,部分风力会绕开导线产生涡流交替脱落。当脱落频率达到一定值时,会触发导线自激振动。进入厚覆冰阶段时,冰层影响了输电导线的外形轮廓,覆冰导线横截面更接近椭圆形。关于此阶段的舞动机制,不同研究给出了不同解释。文

献[10]研究了导线垂直方向上的振动,该文献指出当输电导线垂直方向上的上升力要大于向下的阻力时,导线会发生舞动。文献[11]则指出当输电导线扭转频率与垂直振动频率的差值在一定范围内时,覆冰导线会发生舞动。文献[12]进一步将这个阶段的舞动分解为水平方向和垂直方向上的振动及导线扭转运动。其中,水平和垂直振动引发的偏心荷重是舞动发生的关键诱因。

覆冰导线舞动会严重影响电力系统的安全稳定运行。在舞动过程中,输电导线相间距离及导线对地面的相对距离减小,易引发相间短路和相地短路等电气故障,进而可造成大规模停电事故。长时间的舞动还会对导线及相关结构造成不可逆的机械危害。舞动所产生的交变张力会持续作用于导线、输电塔杆及其他支撑性结构体,导致这些结构体疲劳、变形,引发金具磨损、导线断股和绝缘子破裂等一系列问题。

3. 不均匀覆冰与不同期脱冰引发事故

冻雨天气下,相邻两基杆塔中心桩间的输电导线常面临不均匀覆冰与不同期脱冰的问题。不均匀覆冰和不同期脱冰,输电导线各部分承受的冰载荷存在差异,导致张力分布不均匀,进而产生张力差。张力差作用在输电导线上,会使导线在线夹处往复摩擦滑动。长时间的摩擦滑动会使输电导线外层铝股层发生破裂,内部钢芯暴露在空气中并抽动,线夹另一侧的铝股会因拉力拥堵在线夹附近。

张力差还会通过导线作用在杆塔上,杆塔上悬垂的绝缘子串可能因此产生位置上的偏移,增加与横担碰撞的风险。当张力差达到一定数值时,杆塔的横担会被迫转动,导致输电导线与拉线发生碰撞。因输电导线上流过的电流强度大,在碰撞的瞬间,拉线会因电流热效应而被烧断。一旦拉线失去作用,杆塔将失去必要的支撑力进而发生倒塌事件。

4. 过荷载事故

输电导线上的覆冰会使导线的弧垂增大,减小导线与地间的距离,增加闪络事故发生的风险。当覆冰量超出导线及其金具等配套设备的承载能力时,导线因过重的向下拉力而从压接管中滑脱。导线外层铝股层也可能因应力太大而直接破裂,使内层钢芯暴露在空气中,加剧安全隐患。随着覆冰量

的不断增加，一旦超过杆塔所能承受的极限载荷，杆塔基础将面临下沉的风险，严重时导致杆塔的断裂和坍塌，如图2所示。



图2 因覆冰导致的杆塔坍塌

冻雨覆冰的应对策略

在分析冻雨覆冰灾害的发生机理后，本节针对未投运的线路、已投运的线路及绝缘子，分别提出应对冻雨覆冰的技术和方法。

1. 在建输电线路的防覆冰设计

若要进行一个区域输电线路的架设工作，首先需要分析该区域以往冬季的气候数据，根据数据，科学划分冰区。输电线路应尽量避免冰区，选择在背风、有遮挡及干燥的区域走线。若无法避开冰区，应提前做好导线防覆冰的相应措施。例如采用直径小、刚度大的输电导线，通过减少导线与冻雨的直接接触面积，降低覆冰风险。增大冰区输电导线表面的电场强度，利用热效应抑制冰层的形成与增长。在覆冰重灾区，增设杆塔数量，优化杆塔布局，保证杆塔间距均匀、高度一致，以增强杆塔的最大承载能力。在固定基数设置耐张塔，以承受线路架空后的张力载荷，并提供多余的张力裕量，防范因张力差引发的各类事故。在风区，输电导线上还应安装失谐摆、扭转阻尼器等防舞动设施，降低舞动风险。

2. 已投运线路的除冰方式

已投运线路目前最常用的除冰方式可以分为电气融冰和机械破冰两大类。电气融冰利用电流热效应，通过增大导线中电流强度增加导线表面温度，使覆盖的冰层融化。该方式需要将待融冰线路退出运行，线路一端进行短接，另一端接上提供电流的

大电源装置。根据电流类型，电气融冰又可分为交流电流融冰和直流电流融冰两种类型。其中，交流电流融冰不需要专用的融冰设备，技术相对比较成熟。但交流融冰对系统无功要求较高，一旦系统无法提供充足的无功，融冰效果将受到限制，故交流融冰一般应用于500 kV及以下电压等级的线路融冰。而对无功要求高的覆冰输电线路一般采用直流融冰技术。直流融冰将交流电流通过大功率整流器转换为直流电流，再加载至覆冰线路上。该方式高效、简单，不受系统无功影响，可应用于所有电压等级的线路融冰。但直流融冰需要融冰专用设备，例如电源端的整流装置及线路短接装置。

机械除冰法是依赖操作人员借助特定工具或与设备协同作业，从而使线路脱冰的一种方式。例如操作人员通过绝缘棒等绝缘工具拍打覆冰线路，使线路发生振动，从而达到破冰目的。或是将除冰器安装在覆冰导线上，通过操作人员牵引，将覆冰轧碎等。机械除冰成本低，对线路的损耗低。但机械除冰对操作人员的操作专业性要求高，操作时存在一定的安全风险，且难以对危险地形的覆冰线路进行去冰处理。故在实际生活中，要根据现场情况，选择安全性高且高效的除冰方式。

3. 绝缘子防冰闪处理手段

绝缘子发生冰闪，本质上是因为绝缘子表面的导电离子为泄漏电流提供电流通道。而导电离子又大部分来自积累的污秽，故在冻雨来临之际，及时清理绝缘子表面的污秽，即可降低绝缘子冰闪的概率。而在覆冰阶段，可采用人工除冰法，如图3所示。通过清理绝缘子表面的冰层及伞裙边缘的冰棱，以阻断泄露电流的流通。



图3 运维人员清理绝缘子冰层

绝缘子本身的性质也决定其发生冰闪的概率，

例如绝缘子伞裙结构、悬挂角度等。小倾角多棱伞形绝缘子,相较于大倾角无棱伞形绝缘子,增加了伞裙表面的不规则性,使导电离子不易形成连续的电流通道和导电膜,故在实际应用中可多采用不规则、复杂的伞裙结构。对于非垂直安装的绝缘子而言,悬挂角度也是防止冰闪的一个关键要素。悬挂角度若与风向夹角越小时,单位时间内捕获的过冷却水滴会更少,难以形成较为严重的覆冰,闪络的概率会更低。同时采用一定角度悬挂的绝缘子,相较于垂直安装的绝缘子,在冰层融化时融冰水更不易形成水帘,这也降低了发生闪络的风险。还可以选择复合材料的绝缘子或在绝缘子表面上涂抹特殊的疏水材料,使泄露电流变小,提高闪络电压。

结束语

本文以绝缘子和输电导线为研究对象,研究冻雨覆冰的机理及影响覆冰的因素,分析冻雨覆冰危害的作用机理,并提出应对策略,得出以下结论。

1) 缺乏冰核的过冷却小水滴在与冰点温度以下的绝缘子和输电导线发生碰撞时,会迅速凝固在其表面,从而形成覆冰。

2) 影响冻雨覆冰的因素有很多,例如风速、风向等。在不同自然因素和设备自身因素的影响下,设备上产生的覆冰密度、形状都是存在差异的。

3) 覆冰时绝缘子冰层表面会形成电流通道,泄漏电流会顺着电流通道在空气间隙中放电,从而引起闪络。输电导线覆冰时在风力的影响下会发生舞动现象,因冰载荷不同产生的张力差也会引发一系列的严重故障。而当输电导线覆冰量超出杆塔的承重极限时,会导致杆塔断裂和坍塌。

4) 在熟悉冻雨危害作用机理后,要尽量避免其发生。选择在背风、有遮挡及干燥的区域架设新投运线路。采用电气融冰和机械破冰,对覆冰的已投运线路进行脱冰处理。在冻雨来临之际,及时清理绝缘子表面污秽,采用不规则、复杂绝缘子结构,有角度地悬挂绝缘子,或在绝缘子表面上应用特殊材料,以避免绝缘子发生覆冰闪络。

电网设备冻雨覆冰是将来也一直需要面临的难题和挑战,未来研究应紧密结合实际情况,加强跨学科间的交流及合作,推动已有的技术和措施的改革和创新,争取将冻雨覆冰对电网的影响降到最

低,确保电网的安全稳定运行。EA

(收稿日期:2024-06-11)

参考文献

- [1] 周象贤,刘黎,王少华,等.浙江电网自然灾害特征、趋势与预测技术概况[J].浙江电力,2021,40(5):20-29.
- [2] 杨风利,杨靖波,付东杰,等.输电线路导线舞动荷载分析[J].中国电机工程学报,2011,31(16):102-107.
- [3] 蒋兴良,张志劲,胡琴,等.再次面临电网冰雪灾害的反思与思考[J].高电压技术,2018,44(2):463-469.
- [4] 蒋兴良,董冰冰,张志劲,等.绝缘子覆冰闪络研究进展[J].高电压技术,2014,40(2):317-335.
- [5] 桑旭,金哲岩,杨志刚,等.水滴在气流中变形破碎过程的数值模拟研究[J].上海交通大学学报,2024,58(4):419-427.
- [6] 梁曦东,李雨佳,张轶博,等.输电导线的覆冰时变仿真模型[J].高电压技术,2014,40(2):336-343.
- [7] 刘胜春,司徒钧,郭昊,等.输电线路导线覆冰模拟计算与试验研究[J].中国电机工程学报,2014,34(S1):246-255.
- [8] 蒋兴良,杜珍,王浩宇,等.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.
- [9] MCCOMBER P, PARADIS A. A cable galloping model for thin ice accretions[J]. Atmospheric Research, 1998, 1(46):13-25.
- [10] DENHARTOG M. Transmission lines vibration due to sleet[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1933, 4(51):1074-1076.
- [11] NIGOL R, CLARKE-G J. Conductor galloping and control based on torsional mechanism[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1974, 6(93):1729-1729.
- [12] 王少华.架空输电线路导线舞动及防治技术分析[J].高压电器,2010,46(12):63-67.