

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.06.027

自然条件下导线覆冰形状及对融冰过程的影响研究

范松海¹, 毕茂强^{2,3}, 龚奕宇¹, 张星海¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 成都 610072; 2. 重庆理工大学电气与电子工程学院, 重庆 400054;
3. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 架空输电导线覆冰灾害是极为严重的自然灾害之一。目前采用大电流直流融冰技术是解决架空输电线路覆冰灾害最有效的方法, 而导线覆冰形状对直流融冰时间有显著影响。文中在自然覆冰试验站开展了导线覆冰形状测量和直流融冰试验研究。研究表明: 导线上的覆冰形状随着导线位置的变化而变化, 单导线与分裂导线相比变化差异更显著, 靠近铁塔处导线的覆冰较薄, 越靠近中部导线的覆冰厚度增加, 融冰时需要融化的冰层体积也随之增加; 导线布置方式对导线的覆冰厚度及需融化冰层的体积也有影响; 由于分裂导线不容易发生扭转, 导线上的覆冰形状随着导线变化的幅度较单导线布置方式小; 融冰试验结果表明, 融冰过程中导线两端的覆冰首先发生脱落, 而中部的覆冰最后脱落, 导线融冰时间出现一定的分散性。

关键词: 自然条件; 导线; 覆冰形状; 融冰过程

Influence of Ice Shape Around Transmission Line on Ice Melting Process Under Natural Condition

FAN Songhai¹, BI Maoqiang^{2,3}, GONG Yiyu¹, ZHANG Xinghai¹

(1. Electric Power Research Institute of Sichuan Power Electric Corporation of State Grid, Chengdu 610072, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering of Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: At present, the high direct-current ice melting technology is the most effective way to solve the icing problem of overhead transmission line. Ice shape on conductor has a significant influence on the ice melting time. This paper focuses on the ice shape measurement and DC ice-melting test at a naturally icing test station. The results show that: ① the ice shape on conductor varies with the distance to the tower; ② the icing layer at the position close to the tower is thin, and it gets thicker as approaching to the center of the conductor, which means the increasing volume of ice needs to be melt during ice melting process; ③ the arrangement of conductors also influences the thickness of ice and the volume of ice layer to be melt; ④ the change of ice shape on bundled conductor is smaller than that on single conductor because bundled conductor is difficult to twist. DC ice-melting test shows that the ice drops off firstly at two ends of conductor and finally at the center during the ice melting process, and the time duration of ice melting appear certain dispersion.

Key words: natural icing condition; conductor; ice shape; ice melting process

0 引言

架空输电导线覆冰灾害是极为严重的自然灾害之一。在冬季冰冻雨雪条件下, 架空输电线路、信号铁塔、风力发电机叶片等结构物将发生覆冰现

象, 在极端恶劣的覆冰条件下, 结构物上的覆冰重量将严重超过其设计荷载, 可能造成架空输电线路断线、倒杆(塔)、信号铁塔倒塌和风力发电机发电效率降低、甚至故障等严重灾害事故^[1-7]。2008年初, 中国南方出现了历史罕见的大面积持续低温、雨

收稿日期: 2019-01-20; 修回日期: 2019-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(51607019)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51607019).

雪,冰冻极端天气,造成21个省(区、市)不同程度的受灾,造成电网设备严重覆冰,输电线路发生倒塌、断线、跳闸的事故上万次,部分地区大面积停电,给人民生活带来了巨大的影响,直接经济损失高达千亿元^[7-15]。为增强架空输电线路的安全可靠性,必须对其覆冰进行监测和防治,在灾害未形成之前,破坏其形成条件,达到预防和防治的目的。目前国内外研究人员对输电线路防冰、除冰技术和方法展开了大量研究,提出了30余种防冰及除冰方法^[16-25]。工程实践经验表明,大多数的防冰、除冰方法因工程实施难度或经济效益等原因无法应用于架空输电线路,而采用大电流直流融冰技术是解决架空输电线路覆冰最有效的方法^[7,10-12]。

采用大电流融冰技术需解决融冰电流的选择和融冰时间的计算等关键问题。导线覆冰形状、环境温度和风速都是影响融冰时间和合理选取融冰电流的关键因素。导线覆冰形状不仅与降雨量、风速有关,还与导线直径及刚度、导线的布置方式有关^[13,7,26]。而由于导线覆冰现场试验投入巨大,目前对输电线路覆冰导线融冰过程的研究一般都是在人工气候实验室进行。受到人工气候室的尺寸限制,模拟覆冰的导线较短,覆冰形状差异较小,与自然条件下长导线的覆冰形状有一定的差异。因此文中在自然覆冰试验站对长度约80 m的单导线、三分裂导线和四分裂导线的覆冰形状进行了测量和分析,研究了导线覆冰形状随导线位置的变化规律;同时在自然条件下开展了分裂导线直流融冰试验,分析了导线覆冰形状对覆冰导线融冰时间和及融冰过程的影响。

1 试验装置及试验方法

1.1 自然覆冰试验站简介

2008年中国发生大面积冰灾后,重庆大学输变电装备及系统安全与新技术国家重点实验室在湖南雪峰山上建立了自然覆冰试验站,见图1。自然覆冰试验站位于雪峰山坪山塘,海拔1 400 mm,属于典型的微地形、微气象覆冰区,年覆冰时间超过60天,每年都可发生多次雨淞、雾淞和混合淞覆冰,最大雨淞覆冰厚度超过500 mm,最低温度低于-15 ℃,最大风速超过25 m/s^[17,26]。自然试验目前已建成两基雨淞铁塔和多回试验导线,包括单导线、三分裂、四分裂和八分裂导线,一基500 kV真型铁塔,3 600 kV冲击试验电源,500 kV交流试验电源、±1 000 kV直流试验电源和300 kW风力发电机,满足高压、特高压电网覆冰,导线融冰,风力发电机覆冰等研究需求。



图1 自然覆冰站

Fig. 1 The nature icing station

1.2 试品

雪峰山自然覆冰实验站在两个山头上建有两基雨淞架(铁塔A和铁塔B)^[6-7],试验站利用两基雨淞架架设了多条长度约为80 m试验线路段,由于地形限制的原因文中对其中单导线(LGJ-120/25)、三分裂导线(LGJ-185/30)和四分裂导线(LGJ-300/50)进行覆冰观测,并对四分裂导线进行直流融冰试验,导线参数见表1。

表1 导线技术参数

Table 1 Technological parameter of test conductor

导线型号	(根数/直径)/mm		外径/ mm	直流电阻/ (Ω·km ⁻¹)
	铝绞线	钢芯		
LGJ-300/50	26/3.83	7/2.98	24.26	0.096 36
LGJ-185/30	26/2.98	7/2.32	18.88	0.159 20
LJG-120/20	26/2.32	7/1.85	15.74	0.249 60

1.3 导线覆冰形状测量方法

文中采用人工描绘的方法获取导线的覆冰形状,测量流程见图2。

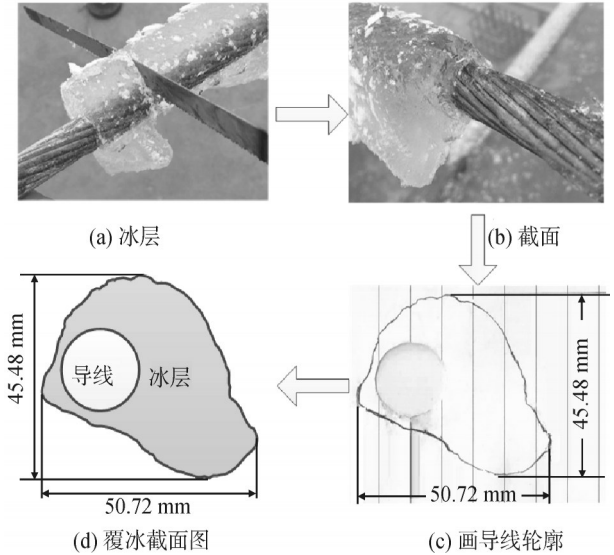


图2 导线覆冰形状测量流程

Fig. 2 Flow chart of the measurement of ice shape

图2(a)中用锯条小心的锯开一段约10 cm长的冰层;图2(b)中用软木敲去此段冰层,获取导线覆冰的截面,并用游标卡尺测量覆冰导线冰层的尺寸;图2(c)

中取1张带有标线的白纸,在中间钻1个与导线直径相同的圆孔,然后把白纸套在覆冰导线上,让导线穿过白纸中间的圆孔,并将标线与重力作用方向一致,用笔沿着冰层勾画出覆冰导线的轮廓;图2(d)中将绘于白纸上的导线覆冰截面图,通过扫描仪转换成数字照片,通过绘图软件得到导线覆冰的截面图,同时求取覆冰导线冰层厚度、截面图的面积等参数。

两个铁塔中部导线距离地面较高无法通过人工观测,因此文中采用大疆无人机(MAVIC Pro)对该位置处导线上的覆冰进行了图像观测。观测时将无人机悬停在导线正上方约2 m处,调节无人机的摄像头,俯视拍摄导线上的覆冰情况。

1.4 导线覆冰形状测量位置的选择

由于雪峰山自然条件的限制,只有导线两端的部分导线距离地面的高度较低,在人工可测量的范围内。文中在人工可观测的范围内,采用间隔1 m作为一个测量点,对导线上的覆冰形状进行了测量,而单导线和四分裂导线距离铁塔5~14 m远处这段导线距离铁塔较高,超出了人工可测量的范围,因此也未进行测量。三分裂导线在A铁塔处悬挂高度较高,不能进行人工测量,因此选择满足人工可测量的B铁塔处进行测量。

1.5 融冰试验原理及方法

四分裂导线直流融冰试验的接线见图3,导线与铁塔的连接形式见图4,导线通过复合绝缘子与铁塔绝缘。由于四分裂导线的两根子导线通过三角联板相连,由于三角板为导体,因此1、2号两根子导线为并联,3、4号子导线并联,在铁塔B处,4根子导线短接,在铁塔A处的施加电流,即“2+2”融冰方式,见图3。为了监测分裂导线的直流融冰和脱冰过程,摄像机被固定在三脚架上,并调整好焦距,使其尽量能观测到整段覆冰导线。

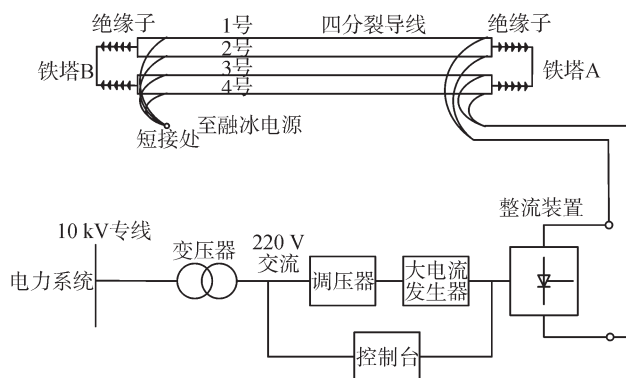


图3 现场直流融冰试验接线示意图

Fig. 3 Sketch of line connection on field experiment



图4 分裂导线端部的连接方式

Fig. 4 Connection mode of bundled conductors

融冰电流由大电流发生器提供,其最大输出电流可达5 000 A,电流的大小通过控制台进行调节。该大电流发生器主要有,控制台、调压器和大电流生成器3个部分组成。进行直流融冰试验时,需将桥式整流器接入融冰的电流回路中,见图5。

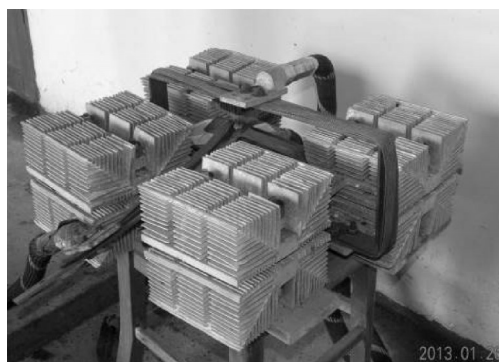


图5 桥式整流器

Fig. 5 DC bridge rectifier

2 导线覆冰测量及分析

2.1 导线覆冰形状

根据文中所述的测量方法,分别测量了导线不同位置处(以铁塔作为参考点)单导线、三分裂导线及四分裂导线上的覆冰形状,部分测试结果见图6~8。从图6~8中可以看出,导线上的覆冰随着距离铁塔距离的不同而变化,靠近铁塔处导线上的覆冰量较少,而远离铁塔处导线上的覆冰量有逐渐增加的趋势。

从图6中还可以看出,随着距离铁塔距离的增加,导线上的覆冰在重力的作用下,有向下倾斜的趋势,而图7、8表明这种趋势并不明显,这是因为单导线的扭转半径较小,在冰层作用力下更容易发展扭转,而三分裂导线和四分裂导线由于间隔棒的存在,扭转半径较大,不易发生扭转。

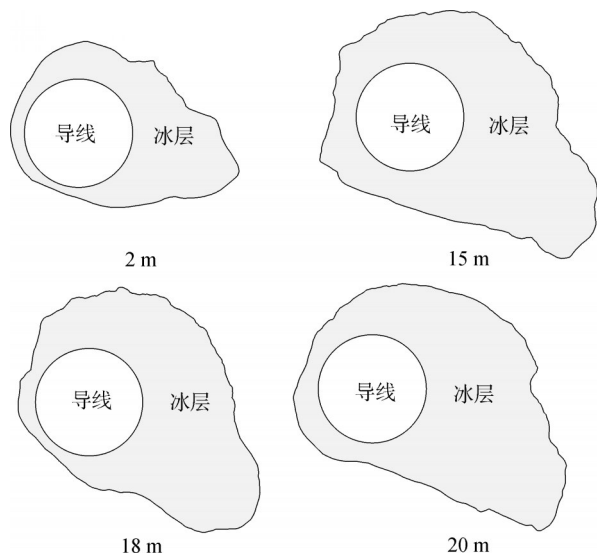


图6 距离铁塔不同距离处单导线覆冰形状
Fig. 6 Shape of single icing conductor at different distances

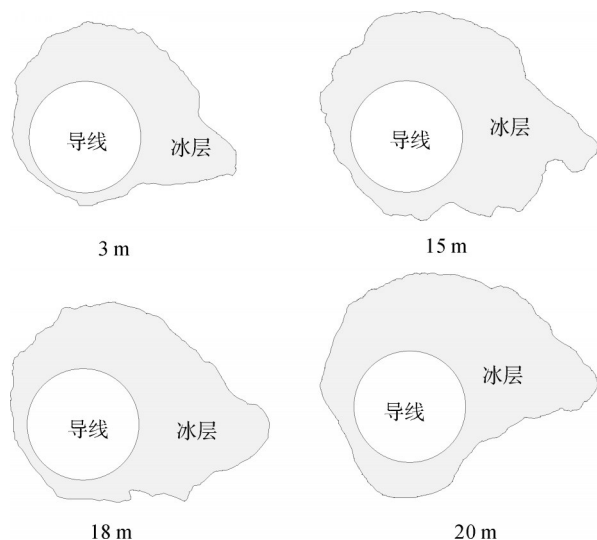


图7 距离铁塔不同距离处四分裂导线覆冰形状
Fig. 7 Shape of quad bundle icing conductor at different distances

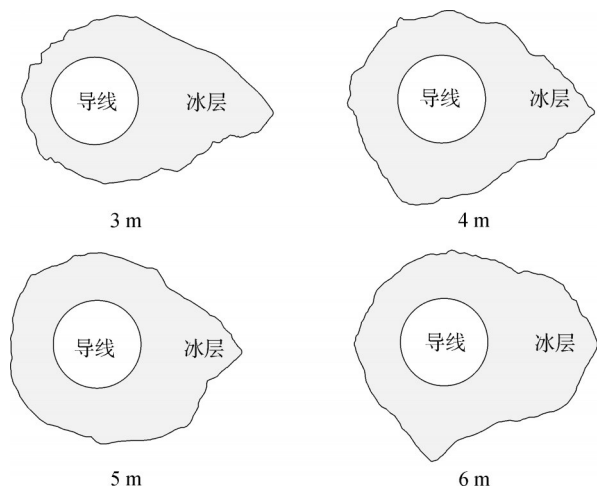


图8 距离铁塔不同距离处三分裂导线覆冰形状
Fig. 8 Shape of 3-bundle icing conductor at different distances

2.2 导线覆冰截面积

从图6~8中得出:导线上的覆冰不是均匀的,会随着距离的变化而变化。因此文中利用图像处理软件,根据测得的不同位置的覆冰截面图,求取覆冰冰层面积的大小,见图9。

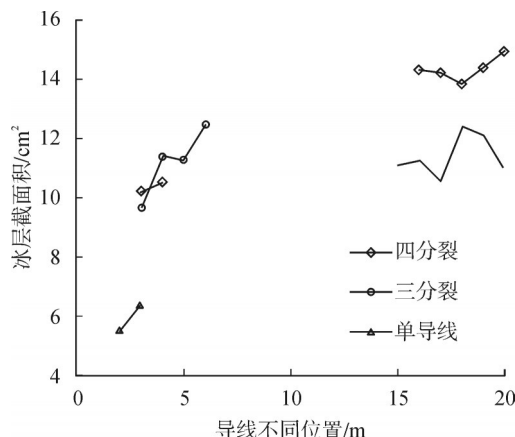


图9 覆冰截面积随导线位置变化关系

Fig. 9 Relationship between the sectional area of ice cover and the distance

从图9中可知,随着距离的增加,不管是单导线还是三分裂导线和四分裂导线上的覆冰面积都有增加的趋势。在距离铁塔位置相同时,四分裂导线上的覆冰截面积最大,单导线上的较少。文[27]的研究表明,导线直径对覆冰量有显著影响,导线直径越大覆冰越少,这与文中的测试结果有一定的差异。这是因为文中所测试四分裂导线的端部连接方式(见图4)容易使四分裂导线在离铁塔较近处发生扭转,而单导线的端部与铁塔是刚性连接不易发生扭转。这就导致分裂导线在距离铁塔较近处比单导线更容易扭转,导致分裂导线上的覆冰较单导线多。在远离铁塔时分裂导线的扭转半径大,从而不易扭转,而单导线恰好与之相反。因此单导线上的覆冰量随着导线距离铁塔位置的不同,变化幅度较大,而分裂导线上的覆冰量变化幅度较小。随着测量位置距离铁塔越远,单导线上的覆冰量与四分裂导线上的覆冰量更加接近。

三分裂导线上测点的数据点较少,在距离铁塔不远处(2~5 m)的同一位置时,三分裂导线与四分裂导线上的覆冰截面积差异不明显。而导线在距离铁塔15~20 m的距离时,导线上的覆冰截面积出现了一定程度上的波动,这是由于本次导线覆冰并不均匀,由于覆冰期间有降雨的发生,雨水在碰撞到导线表面时,并不是立即冻结,部分雨水在重力的作用下,沿着导线向中部流淌并聚集,因此形成了冰凌,见图10。



图10 四分裂导线上的冰凌情况

Fig. 10 Icing condition of quad bundle conductor

由于测试时,是按照每隔1 m测量一个点,因此覆冰的截面积出现一定范围内的波动,遇到冰凌时,文中采取在附近再次取一个点的方式测得,并取较小的一个截面积作为该位置下的覆冰截面积。现场测试表明,在距离两端铁塔,导线上的冰凌较少,而在导线中部的冰凌最为密集,这说明导线上的雨水在重力的作用下沿着导线向中部聚集,从而导致中部的冰凌偏多。

2.3 覆冰导线融冰冰层厚度

在直流融冰过程中,随着导线温度的升高,导线上方的冰层逐渐融化,见图11(b),随时融冰时间的进一步增长,冰层进一步融化,导线逐渐往上运动,当导线运动到与冰层相切位置时,见图11(d)。在重力的作用下冰层破裂,冰层从导线脱落。为简化分析过程,文中忽略了冰层旋转的影响。文中将导线移动距离 d 作为融化冰层的厚度, d 的大小与融冰面积大小成正比关系。根据文中测量的覆冰形状,测量了导线距离铁塔不同位置处,覆冰导线在融冰过程中导线移动距离 d 与距离铁塔位置的变化关系,见图12。

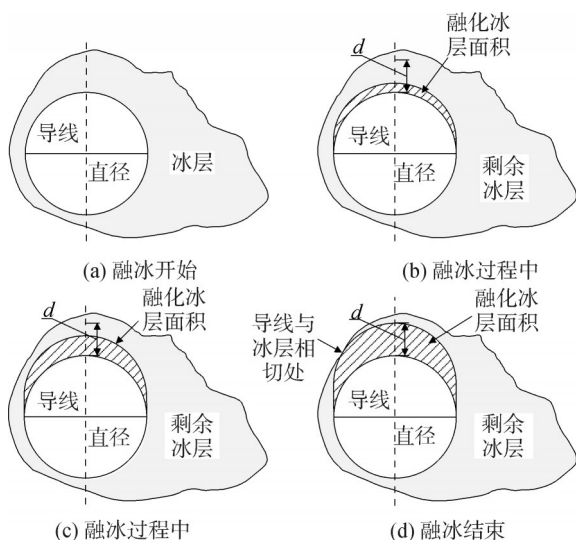


图11 导线融化冰层示意图

Fig. 11 Schematic diagram of melting ice layer

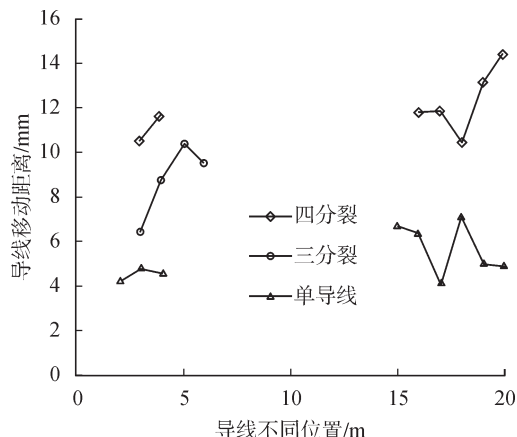


图12 融冰时导线移动距离与位置的变化关系

Fig. 12 Relationship between the moving distance of the conductor and the distance

从图12中可知,虽然导线移动距离具有一定的分散性,但是随着距离增加而增加的趋势是显著的,即导线融冰时导线端部需要移动的距离小,融化冰层面积少,因此首先发生脱冰,而随着距离铁塔越来越远,到达导线中部时,导线移动距离达到最大,需融化冰层面积最大,这部分冰层最后脱落,这一现象也与实际融冰试验的脱冰过程一致。

2.4 导线中部的覆冰情况

导线覆冰监测和预警为电力系统防冰和除冰提供参考,目前基于视频监控覆冰监测与预警系统容易受到覆冰的影响,覆冰严重时监控系统被冰雪覆盖,不能获取清晰的视频图像,难以进行监控,同时还受到工作电源的限制,应用受限;而基于导线张力变化的覆冰监测与预警系统也存在受风的作用影响较大等问题。因此文中利用型号为 MAVIC Pro 的便携式无人机对两基铁塔中部导线上的覆冰进行了监测,该型号无人机可以精准悬停,稳定性较好,能获取高清图片和视频。利用无人机获取两铁塔间导线中部的覆冰图像见图13。

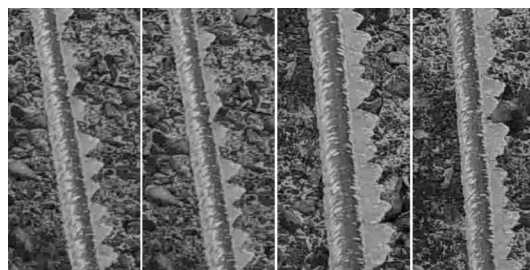


图13 导线中部不同位置的覆冰情况

Fig. 13 Icing condition of the conductor at different place

从图13可知,通过无人机拍摄的画面可以比较清晰的了解导线上的覆冰情况。导线中部单位长度导线上的冰凌数量明显多与导线端部,这与碰撞

到冰层表面的雨滴未完全冻结而向中部汇聚的现象是一致的。由于该无人机为4旋翼无人机,在飞行过程旋转机翼转数极快,当湿度较大(如大雾)温度低于0℃时,机翼极易覆冰,使得无人机升力减小,导致无人机跌落,这也限制了无人机在对导线进行覆冰监测中的应用。

3 分裂导线上融冰过程

试验前分裂导线的覆冰见图 14,覆冰类型与冰层密度如表 2。融冰时自然覆冰试验站的气象参数见表 2。为研究分裂导线的融冰过程,文中采用摄像机对分裂导线的融冰过程进行了全程监控,部分关键时间节点的融冰情况见图 15。从图 15 中可以看出,导线上的覆冰为混合淞,覆冰形状接近于翼形,与文中测试的形状相似。



图 14 融冰前分裂导线上的覆冰情况

Fig. 14 Icing condition of quad bundle conductor before melting

表 2 导线的覆冰情况和融冰时气象条件

Table 2 Icing condition on the conductor and atmosphere condition

覆冰类型	覆冰密度/ (g·m ⁻³)	温度/℃	风速/ (m·s ⁻¹)	相对湿度/%
混合淞	0.68	-5	4.5	100

融冰接线图见图 3,文[7]表明,采用 2 A/mm²的融冰电流可以有效的融化导线上的冰层,因此文中也按此原则选取融冰电流,即 600 A。由于分裂导线采用“2+2”融冰方式,4 根子导线间的电流有一定差异,利用钳形表测得的电流见表 3。

导线通过融冰电流以后,导线温度缓慢升高,由于导线端部接触电阻的存在,使端部的温度上升较快,同时在靠近铁塔处导线上的冰层厚度较其余部分的更小,需融化的冰层厚度也更小,因此导线端部上的覆冰首先发生脱落,在通过融冰电流 3 分 33 秒后,导线端部的覆冰已经发生脱落,见图 15(a)。

随着融冰时间的增加,导线上的冰层逐渐融化脱落,由于端部需要融化的冰层厚度小,而导线中部需要融化的冰层厚度大,因此导线脱冰总体都是从靠近铁塔处往档距中部发展。导线上部的冰层

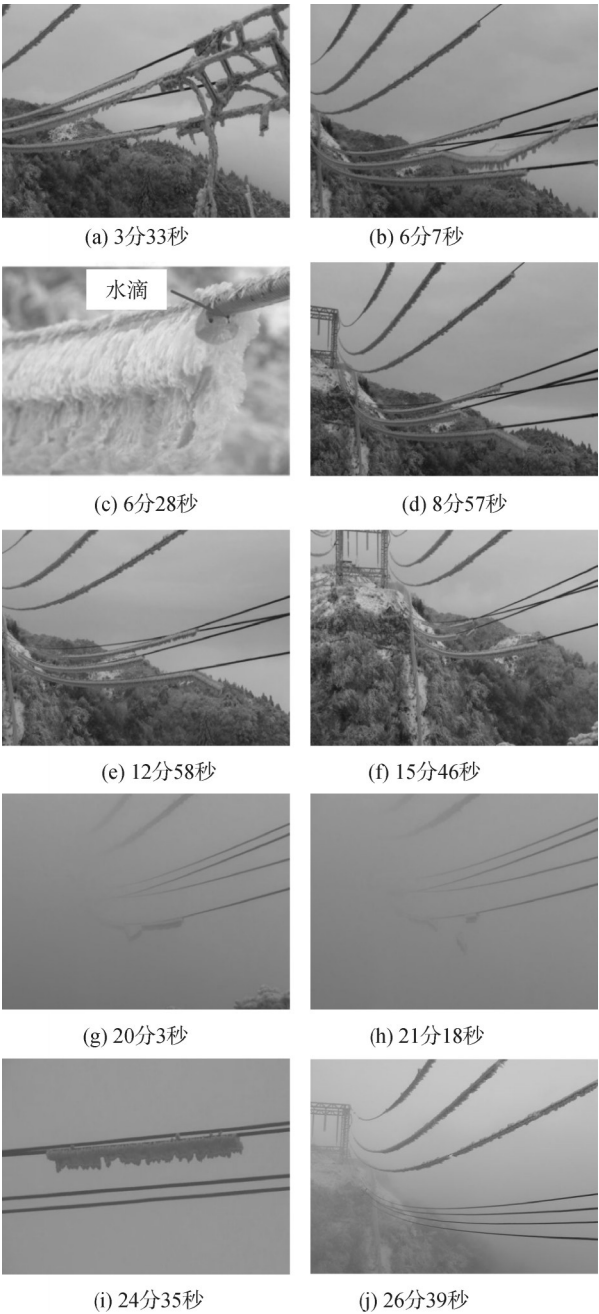


图 15 四分分裂导线上的融冰过程

Fig. 15 Ice melting process of quad-bundle conductor

表 3 四分分裂导线上通过的直流融冰电流

Table 3 Current of the different sub-conductor of quar conductor

	A			
子导线编号	1 号	2 号	3 号	4 号
电流值	607	598	589	616

在融冰电流焦耳热的作用下,逐渐融化成水膜,在重力的作用下,汇聚到一起形成水滴,见图 15(c)。利用红外测温仪测得形成水滴处导线表面温度约为 2.8℃,同时测得导线与融冰接线连接处的温度达 8.5℃。

由于自然覆冰实验站的所处地理位置气候多

变,在融冰开始后约20 min时,试验站出现了大雾,给视频监控融冰过程带来了困难,档距中央覆冰几乎变得不可见,见图15(g)。随着融冰时间的进一步增加,在融冰开始后的24 min,仅有档距中部还有部分残余的冰层,在约27 min后,导线上的冰层全部脱落。通过对整个融冰过程的观测发现,分裂导线上的冰层并不是同时在融冰开始的某一瞬间脱落,而是一个从靠近铁塔的两侧,逐渐向导线档距中部发展最终全部脱落的缓慢过程。导线中部的冰层从开始融化到脱冰的时间最长,从端部冰层开始融化至融冰结束这段时间占整个融冰过程的约80%。

4 结论

1)导线上的覆冰形状随着导线位置的改变而变化,单导线与分裂导线相比变化差异更明显,靠近铁塔处导线的覆冰较薄,越靠近中部导线的覆冰厚度增加,需要融化的冰层体积也随之增加,融冰时间随之增加。

2)导线型号和布置方式都会影响导线的覆冰厚度及需融化冰层的体积,分裂导线布置方式不容易发生扭转,导线上的覆冰形状随着导线变化的幅度较单导线布置方式小。

3)分裂导线在融冰过程中,导线上的冰层并不是在融冰开始后的某一瞬间同时脱落,而是一个从靠近铁塔的两侧,逐渐向导线中部发展最终全部脱落的缓慢过程,导线中部的冰层从开始融化到冰层全部脱落的时间最长。

参考文献:

- [1] FARZANEH M. Atmospheric icing of power networks[M]. New York: Springer, 2008.
- [2] KOLLAR L E, FARZANEH M. Modeling sudden ice shedding from conductor bundles[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 1(2): 1-1.
- [3] 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.
JIANG Xingliang, YI Hui. Icing of transmission line and countermeasures[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [4] HUNEALT M L, ST-ARNAUD R A. A dynamic programming methodology to develop de-icing strategies during ice storms by channeling load currents in transmission networks [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1604-1610.
- [5] 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. Transmission lines' ice accidents and analysis of the formative factors[J]. Electric Power, 2005, 38(11): 27-30.
- [6] 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.
- [7] 蒋兴良, 毕茂强, 黎振宇, 等. 自然条件下导线直流融冰与脱冰过程研究[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2626-2631.
JIANG Xingliang, BI Maoqiang, LI Zhenyu, et al. Study on DC ice melting and ice shedding process under natural condition[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2626-2631.
- [8] 张志劲, 蒋兴良, 孙才新, 等. 四分分裂导线运行电流分组融冰方法与现场试验[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 54-59.
ZHANG Zhijin, JIANG Xingliang, SUN Caixin, et al. De-icing method and field test of four-bundled conductor by loading operating current on grouped sub-conductors[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 54-59.
- [9] 范松海. 输电线路短路电流融冰过程与模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
FAN Songhai. Study on process and model of ice-melting with short circuit current on iced conductor[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [10] 马晓红, 赵立进, 李 巍, 等. 直流融冰技术在贵州电网的应用[J]. 南方电网技术, 2009, 3(5): 107-110.
MA Xiaohong, ZHAO Lijin, LI Wei, et al. Application of DC based de-icing technology in Guizhou power grid[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(5): 107-110.
- [11] 陈亦平, 刘文涛, 和识之, 等. 直流融冰装置在南方电网的应用分析[J]. 南方电网技术, 2011, 5(4): 74-77.
CHEN Yiping, LIU Wentao, HE Shizhi, et al. Analysis on the application of DC de-ice in China southern power grid [J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(4): 74-77.
- [12] 程改红, 康 义. 直流融冰装置应用对电力系统运行影响[J]. 南方电网技术, 2014, 8(5): 47-50.
CHENG Gaihong, KANG Yi. Impact of DC deicer installation upon power system operation[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(5): 47-50.
- [13] 傅 闯, 许树楷, 饶 宏, 等. 交流输电系统直流融冰装置设计及其应用[J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 705-711.
FU Chuang, XU Shukai, RAO Hong, et al. Design and application of DC deicer for AC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3): 705-711.
- [14] 陈彦州, 王 奇, 蔡延雷, 等. 南方电网主网架直流融冰工作流程与融冰效率研究[J]. 高压电器, 2013(6): 86-92.

- CHEN Yanzhou, WANG Qi, CAI Yanlei, et al. Analysis on DC deicing process and efficiency in China southern power grid[J]. High Voltage Apparatus, 2013(6): 86-92.
- [15] 陈 亮, 傅 闯, 李兴源. 基于加权平均组合评价法的电网直流融冰计划决策[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2913-2918.
- CHEN Liang, FU Chuang, LI Xingyuan. Decision-making of power grid DC de-icing plan based on weighted average combinative evaluation[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2913-2918.
- [16] 陈 胜, 张贵新, 徐曙光, 等. 电网中激光除冰技术分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011, 51(1): 47-52.
- CHEN Sheng, ZHANG Guixin, XU Shuguang, et al. Analyses of laser de-icing methods for power systems[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2011, 51(1): 47-52.
- [17] 向 往, 谭艳军, 陆佳政, 等. 交直流输电线路热力融冰技术分析[J]. 电力建设, 2014(8): 101-107.
- XIANG Wang, TAN Yanjun, LU Jiazheng, et al. Thermodynamic ice - melting technology for AC/DC transmission lines[J]. Electric Power Construction, 2014(8): 101-107.
- [18] 蒋兴良, 王尧玄, 舒立春, 等. 分裂导线阻抗调节防冰及融冰方法[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2941-2946.
- JIANG Xingliang, WANG Yaoxuan, SHU Lichun, et al. Anti - icing and de - icing method of line impedance regulation of bundled conductor[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2941-2946.
- [19] 刘泽洪. 直流输电线路覆冰与防治[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- LIU Zehong. Icing and anti-icing on DC transmission line [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.
- [20] 中国南方电网公司. 电网防冰融冰技术及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- China Southern Power Grid. Techonology and application of power grid anti-icing and de-icing[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [21] 申屠刚. 电力系统输电线路抗冰除冰技术研究进展综述[J]. 机电工程, 2008, 25(7): 72-75.
- SHEN Tugang. Review of development of de-icing methods on transmission line[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2008, 25(7): 72-75.
- [22] 刘顺新, 罗浩东, 邓小磊. 架空输电线路除冰技术分析[J]. 高压电器, 2011, 47(3): 72-76.
- LIU Shunxin, LUO Haodong, DENG Xiaolei. Analysis of deicing methods for overhead transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(3): 72-76.
- [23] 倪喜军, 赵剑锋, 杨 铭, 等. 基于高频谐振集肤电流法的线路除冰研究[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(2): 6-9.
- NI Xijun, ZHAO Jianfeng, YANG Ming, et al. Transmission line de - icing based on high - frequency resonance skin current[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(2): 6-9.
- [24] 山 霞, 舒乃秋. 关于架空输电线路除冰措施的研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(4): 25-27.
- SHAN Xia, SHU Naiqiu. Discussion on methods of de-icing for overhead transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(4): 25-27.
- [25] 李培国, 高继法, 李永军, 等. 输电线路除冰技术与装置[J]. 电力设备, 2002, 3(2): 85-86.
- LI Peiguo, GAO Jifa, LI Yongjun, et al. Technology and devices for transmission line de - icing[J]. Electrical Equipment, 2002, 3(2): 85-86.
- [26] FAN Songhai, JIANG Xingliang, SHU Lichun, et al. DC ice-melting model for elliptic glaze iced conductor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2697-2704.
- [27] 巢亚锋. 分裂导线和多串并联绝缘子覆冰模型与影响因素的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- CHAO Yafeng. Study on the model and impact factors of boundled conductors and parallel composite insulator strings icing[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- 范松海(1977—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电网防灾减灾及在线监测等研究。
- 毕茂强(1984—), 男, 博士, 讲师, 硕导, 主要从事输电线路覆冰及防护、复杂环境中输电线路外绝缘和电工材料老化研究工作。
- 龚奕宇(1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事主要从事电网防灾减灾及在线监测等研究。
- 张星海(1964—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事输变电设备运行的研究工作。