

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.04.024

研究与分析

电网架空地线防覆冰自动运行装置研究

崔 勇¹, 聂新华², 简 钢², 姬德森³

(1. 三峡大学经济与管理学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 国网江西吉安供电公司, 江西 吉安 343000;
3. 国网江西省电力科学研究院, 南昌 330096)

摘要: 文中研究了架空地线覆冰的机理,通过力学计算得出:同等条件下架空地线在覆冰后易先断裂,从而引起塔头断裂,最终导致倒杆断线。为防范架空地线发生覆冰断线影响输电线路的可靠运行问题,文中基于风杯定向转动原理,设计了一种架空地线无源机械式防覆冰装置,利用特定的气象条件,对装置牵引力和架空地线的摩擦力进行计算,证明了初始风能可以为该装置提供循环游走的动力,通过对该装置机械机构的优化设计,使得其在架空地线上反复游走过程有效清扫地线上的雾凇和初始雨凇,实现防覆冰功能;另外该装置设计体积小,安装使用简单,无需电源供能,全机械动力驱动,适合恶劣气象条件下使用,实践证明该装置具有很强的实用性。

关键词: 风杯; 无源; 机械; 防覆冰

Research on Automatic Control Device of Overhead Ground Wire in Power Grid

CUI Yong¹, NIE Xinhua², JIAN Gang², JI Desen³

(1. School of Economics and Management, Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China;
2. State Grid Jiangxi Ji'an Power Supply Company, Jiangxi Ji'an 343000, China;
3. State Grid Electric Power Research Institute of Jiangxi Province, Nanchang 330096, China)

Abstract: In this paper, the mechanism of icing on overhead ground wire is studied, and the mechanical calculation shows that under the same conditions, the overhead ground wire is easy to break, which can lead to the collapse of the tower. In order to avoid the influence of the icing breakage of the overhead ground wire on the reliable operation of the transmission line, this paper based on the principle of the wind cup directional rotation, designs a kind of anti-icing device of overhead ground wire passive mechanical type, calculates the friction force and traction device of overhead ground wire through using certain meteorological conditions, it can provide the initial wind power cycle walk into the device, through the optimization design of the mechanical structure of the device, making it in the overhead wire repeatedly walk effectively cleaning ground rime and glaze initial, achieve anti-icing function; and the device has the advantages of small volume, simple to install and use, without power supply, mechanical drive, use suitable for bad weather conditions, it is proved that the device has very strong practicability.

Key words: wind cup; passive; mechanical; anti-icing

0 引言

在特定的气候条件下,冰冻天气导致的电力线路覆冰断线事故时有发生,由此而产生的大面积停

电问题,给国家、企业和人民生活造成了很大损失和不利影响。近年来,在输电线路设计方面尽管提高了设计标准,并结合不同地区的气象条件实施了局部地段差异化防冰冻设计^[1],但由于气候变化的不确定性其收效甚微。为了更好地解决线路覆冰问题,国内外学者对融冰装置和技术开展了大量研

收稿日期:2015-11-09; 修回日期:2015-12-10

基金项目:国家电网公司江西省电力公司科技项目(5218L014006K)。

Project Supported by State Grid Corporation Science and Technology Project of Jiangxi Province Electric Power Company (5218L014006K).

究^[1-20]:文[13]中提出了基于直流融冰技术的冰灾防御策略;文[14]中介绍了直流融冰装置设计及现场实际融冰效果;文[15]中研究了覆冰预警系统;文[16]中建立了直流融冰临界电流计算模型。另外也有文献介绍了阻冰环、平衡锤、除冰铲滑车、除冰套环、涂憎水性涂料防冰等技术,但这些主要是涉及输电导线的融冰计算或融冰措施的应用;也有些介绍除冰机器人装置的文献,但是成本高昂。上述这些方法在一定程度上提升了电网的安全运行,但这些方法大多属于覆冰后被动处理,且融冰装置设计或可操作性繁琐;同时现有方法存在能耗大、安全性低以及成本过高的问题。文中通过调研气象条件和覆冰的内在联系,查阅大量气象和导线覆冰记录,得出线路覆冰的总体趋势:山区线路的覆冰与山脉的走向及坡向的地理环境有关,当线路与水源较近,大量的水气易在导线上形成覆冰,同时风是整个覆冰过程的催化剂。由此笔者提出了一种基于风杯定向转动的机械式防覆冰设计原理,利用风能作为机械传动的初始动力,实现装置在每档地线之间循环游走,并驱除雨淞或雾淞的目的。

1 架空地线的覆冰机理

架空地线相比输电线路而言,导线型号偏细;同等条件下从力学角度分析地线更容易先断裂;地线断裂后强大的冲击力往往会拉断地线支架或使地线连接金具发生断裂,而地线支架断裂后改变了整基铁塔的受力平衡,使导线横担发生弯曲变形或断裂,引发导线发生断线,导线断线时会直接拉断导线横担,直接引发整基铁塔倾覆。另外,输电线路正常运行时,架空地线没有电流流过,而输电线路上有电流通过则可产生热能,在一定程度上可以遏制覆冰,由此可知架空地线上的覆冰一般先于输电导线。气象条件恶劣时架空地线覆冰后导致与导线的安全距离不够,出现舞动放电问题,从而影响线路的正常运行。

2 防覆冰装置设计

2.1 架空地线防覆冰装置总体思路

输电线路形成覆冰的条件是在当气温下降至 $-5\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度在90%左右,风速为 $3\sim 15\text{ m/s}$,经过一定的时间,线路就会产生覆冰^[3]。因此利用产生覆冰的风速条件和风速仪中的传动风杯,可以作为本装置驱除雨淞或雾淞的原始驱动力。该设计要解决4个问题:一是传动问题;二是换向问题;三是装置固定以及防止冰冻问题;四是运行环境适用性问题。主要实施思路如下:

1)风能的原始动力能否克服导线的摩擦力,根据当地的情况搜集气象资料,进行装置牵引力计算,验证驱动力大小;

2)装置循环游走清除雨淞或雾淞的传动和换向利用机械原理实现;根据导线摩擦力或导线型号反复验证装置体积或重量;换向装置可以利用防震锤给的反向作用力,实现反向驱动;

3)为了固定和防止脱落,材质选择很关键;可利用凹槽滚动滑轮共同夹住架空地线;设计弹簧部件,利用弹簧反作用力,使装置上坡时防滑,且不发生翻转或前后摆动;

4)解决装置运行环境的适用性,利用自然风能动力,无需电源;为防止装置本身冰冻,滑轮轨道要进行防水处理,并对整个装置设计防雨罩,另外在装置两边设计硬质毛刷,使其在架空地线上行走时,把地线上积存的冻雨、雾淞或薄冰刷掉。

2.2 功能设计

1)驱动部分构成:装置能在地线上游动的原始动力,产生覆冰风力 $3\sim 15\text{ m/s}$ 时,使风杯转动而产生扭力(约为 $1.44\sim 25.99\text{ N}$),以驱动传动装置从而带动装置的滚轮转动,使装置在架空地线上游走。

2)传动部分构成:由传动轴、齿轮组(两个斜向齿轮、一个复合齿轮、两个平面齿轮)、转动轴、两组滚轮等部件组成,见图1,当风杯转动时,其中一个斜向齿轮带动复合齿轮转动,再带动两个平面齿轮工作,最后带动两组滚轮在架空地线上滚动,实现装置驱动功能。

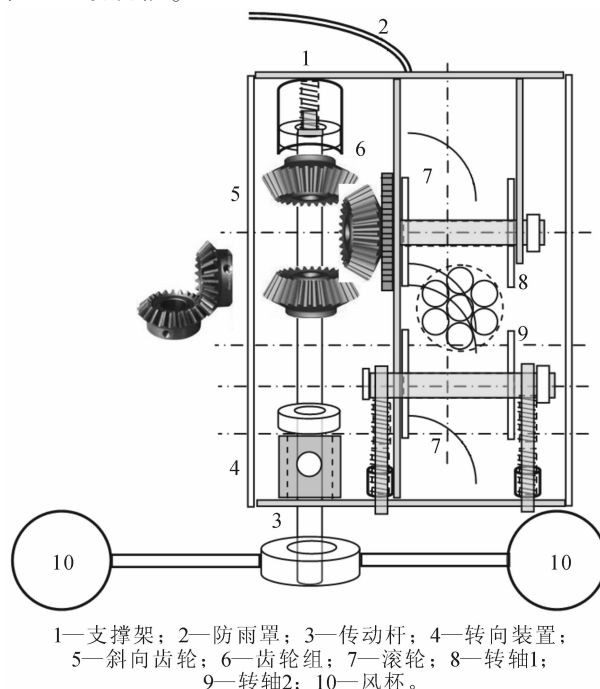


图1 防覆冰装置构造示意图

Fig. 1 Diagram of the anti-icing device

3)换向导引元件:该元件为特殊设计部分,它与传动轴底部的弹簧底座配合工作使用,当传动轴上任何一个斜向齿轮驱动齿轮组带动滚轮朝一个方向滚动到地线防震锤位置时,导引装置的传动杆会碰触到防震锤,导引装置会作水平位移,会使传动轴作向上(或向下)移动从而使另一个斜向齿轮工作,再带动齿轮组工作,这时齿轮组转动的方向发生改变,使滚轮的滚动方向也发生改变,从而使装置向相反的方向行走。

4)安装固定元件:装置的固定采用两组滚轮分别夹住架空地线,安装时,需将两组滚轮的下滚轮向下压,使两组滚轮的空间打开,将架空地线放置在两组滚轮的上下之间,当松开下滚轮的时候,下滚轮会因弹簧作用向上顶,从而配合上滚轮将架空地线夹在上下滚轮之间,设计两组滚轮是为了装置在架空地线上平稳行走,因为若只设计地线上的两个传动滚轮,就如同装置在地线上边单受力,装置只能在直线上行走,而且受风摆影响较大,滚轮容易脱出导线导致掉落。地线在档距中是呈弧形的,单边设计滚轮在上坡时是会下滑的,起不到走动的目的,因此就必须设计地线下面的两个滚轮,即两组滚轮同时夹住地线,使地线能双边受力,滚轮就能在地线上自由行走。而且两组滚轮夹住地线后,即使装置受风力的影响有一定的摆动,也能使地线永不会从滚轮上脱出,从而保持持久运动。因风杯重量及形状均比装置本体要大得多,该装置将风杯设计在装置本体下方(地线下方),使装置能始终保持垂直向下,即使受风力的影响有一定的摆动,但摆动幅度不会太大,不影响风杯的受力。

5)装置外形尺寸的确定:因为考虑到装置需爬坡,既要克服装置重力的作用,也要考虑装置在地线上行走产生摩擦力的作用以及滚轮的防滑性,因此装置重量必须小巧轻便,当力矩传递到滚轮上,能使装置稳定行走并产生一定的提升力,假设装置总重不超过 0.5 kg,经计算(计算过程见后述),需要的风杯直径为 120 mm,风杆长度为 100 mm,为确保装置能正常行走并留有余地,该装置实际采用风杯直径为 150 mm,风杆长度为 200 mm,考虑到装置零件需小巧、紧密,设计装置本体(除换向导引杆)长度为 60 mm,宽度为 50 mm,高度为 70 mm,这个尺寸即使装置发生掉落,也不可能造成带电导线对架空地线因空气间隙距离不足而产生放电现象。

6)材质选择:风杯采用铝合金或用塑料浇铸,力矩杆、传动轴、转向装置、转向轴采用铝合金,各类齿轮采用尼龙;装置底座、防雨罩采用铝合金或塑

料浇铸等装置的各部分零部件尽量选择轻质的材料,以减少装置驱动所需的动力,从而减小风杯和传动杆的尺寸,使装置总重量保持在 0.5 kg 以内,不能超标,否则需加大风杯及传动杆的尺寸而影响装置工作的稳定性。

2.3 防覆冰装置的力学计算

2.3.1 装置牵引力计算

假设防覆冰装置的控制总重量为 0.5 kg,当山区两相邻杆塔档距为 300 m,高差为 80 m 时,架空地线的坡度理论上为 15° ,滑轮在架空地线上的滚动摩擦系数为 0.01。计算 0.5 kg 重的装置爬上坡度为 15° 的架空地线所需牵引力,力的分解见图 2。

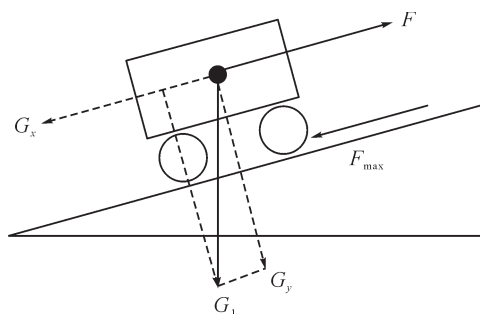


图2 防覆冰装置受力示意图

Fig. 2 Stress diagram of the anti-icing device

x 轴和 y 轴的分为: $G_x = G \sin \alpha$, $G_y = G \cos \alpha$; 摩擦力: $F_{\max} = f \times G_y$, $F = G_x + F_{\max}$; 装置自重 $G = mg = 9.8 \times 0.5 = 4.9$ N; $G_x = G \sin \alpha = 4.9 \times \sin 15^\circ = 1.269$ N; $G_y = G \cos \alpha = 4.9 \times \cos 15^\circ = 4.733$ N; $F_{\max} = f \times G_y = 0.01 \times 4.733 = 0.048$ N; $F = G_x + F_{\max} = 1.269 + 0.048 = 1.316$ N。

由上述计算可知装置所需牵引力 F 为 1.316 N。

2.3.2 风杯转动时轴心矩计算

风杯轴心力矩示意图见图 3。已知三级风的风压为 $0.72 \sim 1.82$ kg/m², 取最下限值为 0.72 kg/m², 约合 7.056 N/m², 风杯的直径为 0.12 m, 风杆长度每根为 0.1 m, 求风杯对轴心产生的扭矩(设机械效率为 90%, 滚轮半径为 0.01 m)。

作用在风杯上的风压 $F = 4\pi R^2 / 2 \times 7.056 = 4 \times 3.14 \times 0.06^2 / 2 \times 7.056 = 0.16$ N; 风杯对轴心产生的扭矩 $f_1 = FL = 0.16 \times 0.1 = 0.016$ N·m; 轴心扭矩产生的牵引力 $F_1 = f_1 p / r = 0.016 \times 0.9 / 0.01 = 1.44$ N。 1.44 N > 1.316 N, 因此, 防覆冰装置可在地线上滚动行走。

该装置风杯的直径实际采用为 0.14 m, 风杆长度每根为 0.16 m, 此时风杯对轴心产生的扭矩为:

作用在风杯上的风压 $F = 4\pi R^2 / 2 \times 7.056 = 4 \times 3.14 \times 0.07^2 / 2 \times 7.056 = 0.217$ N; 风杯对轴心产生的扭矩 $f_1 = FL = 0.217 \times 0.2 = 0.043$ N·m; 轴心扭矩产生的牵引力 $F_1 = f_1 p / r = 0.043 \times 0.9 / 0.01 = 3.87$ N。 3.87 N > 1.316 N =

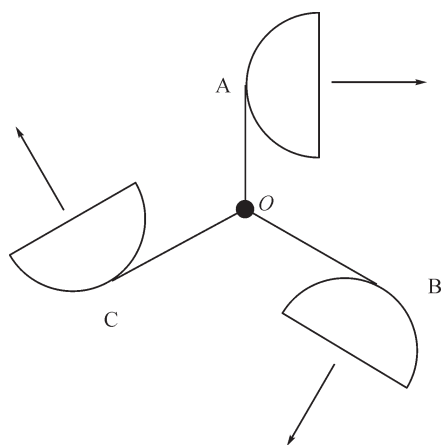


图3 风杯轴心力矩示意图

Fig. 3 Axis torque diagram of the wind cup

2.94 倍,也就是说该装置设计风杯及风杆的尺寸产生的牵引力比提升 0.5 kg 的装置所需的理论计算牵引力提高了 2.94 倍安全系数,因此,防覆冰装置完全可在地线上滚动行走。

2.3.3 装置运转速度定性分析

根据线路覆冰条件最低风速(3 m/s),假设水平长度为 600 m 的档距,风力吹到这个档理论时间计算需要 200 s。考虑风力吹到装置上的风杯后滚轮转速有严重削减,假设风速削减至其最小速度的 1/10,那么装置走过 600 m 所需时间为 2 000 s。从此数值可以得出,装置运行比线路覆冰形成所需 2~3 h^[4]的时间至少缩短了 4 倍;同时也说明,在整个覆冰形成过程中,装置已走过线路中每档线路任意一点至少 4 次进行清扫任意点处的冻雨、雪花、霜、雨淞、雾淞等覆冰的前期状态,且装置可以无障碍运行。

3 防覆冰装置应用实践

该装置已经成功应用于江西电网,取得了较好的应用效果,主要的使用范围和运行要求如下。

3.1 适用范围

该防覆冰装置适用于 35~120 mm² 范围内所有截面的架空地线(包括铝包钢绞线及 OPGW 光缆),若扩大滚轮尺寸还适用于 35~220 kV 单导线(LGJ-400/35 及以下)的线路,但不适用于档距中央有接头(如接续管、补修管、修补缠绕的铝丝)的导线,因受装置本身重量及风杯、力矩杆尺寸的限制,该装置未设计过障碍部件。

3.2 安装运行

由于装置轻便(不超过 0.5 kg)、小巧(全尺寸:长 460 mm、宽 230 mm、高宽 240 mm),安装较便捷。由于是防覆冰装置,因此使用时间应在覆冰前后季节,即覆冰来临之前在每档每根架空地线上安装一

个装置(线路不停电安装)。当覆冰季节结束后找一个有风的日期(风能使装置回到防震锤位置)将装置从架空地线上拆除(线路不停电拆除)并妥善保管。

安装步骤如下:

1)打开防雨罩;

2)将转轴 2 上的滚轮往下压,上下滚轮空间就可打开,将架空地线放置在两个滚轮之间,松开转轴 2 上的滚轮,两个滚轮即可卡住地线;

3)将防雨罩复位。

使用及保管注意事项:

1)该装置安装及拆除均可在线路不停电情况下进行,若遇到绝缘架空地线时,需将绝缘地线接地后才能安装;

2)每根架空地线每个档距中均需安装一个装置,也就是说当一条线路覆冰时,并不是每基杆塔均会覆冰严重,只需找出覆冰严重地段(容易产生严重覆冰而发生倒杆断线的海拔较高、临近水源及山口或山谷的杆塔),每个档距每根架空地线上均需安装,但需避开档内有接头的地线;

3)安装前,先打开防雨罩,将装置上的灰尘清除干净,再在装置上各转齿轮、轴承、弹簧上滴上润滑油,确保装置上各零件转动灵活;

4)安装时,需调整地线防震锤方向,必要时可在防震锤(针对预绞丝防震锤)上安装一个专用撞板(镀锌钢板),使装置上转向导引元件撞针能顺利撞上防震锤;

5)拆除时在覆冰过后需找一个有风的时间,等装置滚动到防震锤附近时,即可拆除,拆除顺序也是先打开防雨罩,将装置从地线上取出,再将防雨罩复位吊下杆塔即可,最后将防震锤复位及取下专用撞板;

6)该装置属于精密部件,装置的保管需放置在专用保管箱内,放置时,需将装置的 3 个风杯拆除,将风杯及装置放置安稳后,再将保管箱放置在干燥、无尘的房间内(如带电库房内),等来年再取出使用。

4 结语

文中基于风力条件及机械传动原理设计了一种新型架空地线防覆冰装置,并给出了防覆冰驱动的力学相关计算。该装置无需电源支持,可以全自动实现防覆冰功能,且对导线无任何损伤,整个工作过程输电线路无须停电,只要具备一定的风速该装置就可以工作。在冬春季节或结合当地实际情况将装置安装即可,同时该装置在装、拆及运用过程

中不影响线路正常运行。该装置主要是用于防冰,相比交直流融冰或者其他人工防、除冰方法的成本更为低廉,且性能可靠,更重要的是体现了电力安全预防为主的特点。该装置在江西电网公司得到了有效应用,工程实践表明该装置对架空地线防覆冰工作起到较好的效果,在一定程度上有效避免了因地线覆冰严重而导致的倒杆断线事故,保证了电网的安全运行。

参考文献:

- [1] 王乐,孙强,刘建琴. 中外应对电网冰灾事故措施对比分析[J]. 电力技术经济,2008,20(2):6-10.
WANG Le,SUN Qiang,LIU Jianqin. Comparative analysis on measures taken by China and other countries to cope with power grid blackouts caused by ice storms[J]. Electric Power Technologic Economics,2008,20(2):6-10.
- [2] 王清葵. 送电线路运行和检修[M]. 北京:中国电力出版社,2003.
WANG Qingkui. Operation and maintenance of transmission line[M]. Beijing: China Electric Power Press,2003.
- [3] 张永昌. 输电线路设计基础[M]. 浙江:水利电力出版社,1988.
ZHANG Yongchang. Basis of transmission line design[M]. Zhejiang: Water Resources and Electric Power Press,1988.
- [4] 孟毅,陈继东,胡丹晖. 架空输电线路覆冰在线监测系统的运行[J]. 中国电力,2011,44(5):38-40.
MENG Yi,CHEN Jidong,HU Danhui. Application of an icing on-line monitoring system in overhead transmission lines[J]. Electric Power,2011,44(5):38-40.
- [5] LAFORTE J L,ALLAIRE M A,LAFLAMME J,et al. An update on overhead cable de-icing technology[C]//Proceedings of the 8th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Iceland:IEEE,1998:215-220.
- [6] WANG Pang. Distribution network reconfiguration to prevent wires from icing[C]//Power Engineering Society General Meeting. [S.l.]:IEEE,2004:1094-1097.
- [7] LANDRY M,BEAUCHEMIN R,VENNE A. De-icing EHV overhead transmission lines using electromagnetic force generated by moderate short-circuit current[C]//Proceedings of IEEE 9th International Conference on Transmission and Distribution Construction,Operation and Live-line Maintenance. [S.l.]:IEEE,2000:94-100.
- [8] SULLIVAN C R,PETRENKO V F,MCCURDY J D,et al. Breaking the ice(transmission line icing)[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2003,9(5):49-54.
- [9] MCCURDY J D,SULLIVAN C R,PETRENKO V F. Using dielectric losses to de-ice power transmission lines with 100 kHz high-voltage excitation[C]//IEEE Industry Applications Conference, Thirty-sixth IAS Annual Meeting. [S.l.]:IEEE,2001:2515-2519.
- [10] EGBERT R I,SCHRAG R L,BERNHART W D,et al. An investigation of power line deicing by electro-impulse methods[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1989,4(3):1855-1861.
- [11] SCHRAG R L,WZUMWALTG W. Electro-impulse de-icing: Concept and electrodynamic studies[C]//The 22nd Aerospace Sciences Meeting. Reno, Nevada:IEEE,1984:84-91.
- [12] 刘凯,吴田,施荣,等. 750 kV 输电线路光纤复合架空地线损耗分析[J]. 高电压技术,2011,37(2):497-504.
LIU Kai,WU Tian,SHI Rong,et al. Analysis on OPGW grounding loss on 750 kV AC transmission line[J]. High Voltage Engineering,2011,37(2):497-504.
- [13] 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.
- [14] 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.
FU Chuang,RAO Hong,LI Xiaolin,et al. Development and application of DC deicer[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(11):53-56.
- [15] 饶宏,傅闯,朱功辉,等. 南方电网直流融冰技术的研究与应用[J]. 南方电网技术,2008,2(6):7-12.
RAO Hong,FU Chuang,ZHU Gonghui,et al. Research & application of DC-based deicing technology in CSG[J]. Southern Power System Technology,2008,2(6):7-12.
- [16] 陈智. 江西省电网直流融冰计算研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(2):72-74.
CHEN Zhi. The research of DC anti-icing for Jiangxi Grid[J]. Power System Protection and Control,2010,38(2):72-74.
- [17] 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.
TAN Yanjun,LU Jiazheng,FANG Zhen,et al. Research on voltage regulation rectification based DC de-icing method and its device for distribution lines[J]. Power System Protection and Control,2011,39(10):126-129.
- [18] 黄新波,程荣贵,贺含峰. 输电线路融冰过程监测系统的设计与实现[J]. 高压电器,2009,45(6):31-36.
HUANG Xinbo,CHENG Ronggui,HE Hanfeng. Design of the on-line monitoring system for transmission lines de-icing process[J]. High Voltage Apparatus,2009,45(6):31-36.
- [19] 曾祥君,伍智华,冯凯辉,等. 基于行波传输时差的输电线路覆冰厚度测量方法[J]. 电力系统自动化,2010,34

(下转第 162 页)

- [7] 姜庆密, 亓富军, 田纪法. 复合屏蔽绝缘管母线局部发热成因及案例处理[J]. 电气技术, 2013(9):53-57.
JIANG Qingmi, QI Fujun, TIAN Jifa. The causes and case processing of composite shielding insulation tube bus local heat[J]. Electrical Engineering, 2013(9):53-57.
- [8] 李煜. 中压电缆铜屏蔽层熔断引起事故扩大的分析[J]. 华东电力, 2003, 31(12):78-79.
LI Yu. Analysis on accident expanding caused by fusing of copper shielded layer on medium-voltage cable[J]. East China Electric Power, 2003, 31(12):78-79.
- [9] 徐刚, 吴炯. 中高压电力电缆金属屏蔽结构特性分析[J]. 电线电缆, 2004, 5(5):19-26.
XU Gang, WU Jiong. Analysis of the constructional characteristics of the metal screen used in MV/HV power cables[J]. Electric Wire & Cable, 2004, 5(5):19-26.
- [10] 郭飞, 邓元实, 刘益岑, 等. 某500 kV变电站直流融冰装置35 kV管母故障分析[J]. 四川电力技术, 2014, 37(5):24-26.
GUO Fei, DENG Yuanshi, LIU Yicen, et al. Fault analysis of 35 kV tube of DC ice melting device in a 500 kV substation[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2014, 37(5):24-26.
- [11] 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 Shujie, RAO Hong, et al. Design and application of DC deicer for AC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3):705-711.
- [12] 王有元, 陈仁刚, 陈伟根, 等. 有限元法计算地下电缆稳态温度场及其影响因素[J]. 高电压技术, 2009, 35(12):3086-3092.
WANG Youyuan, CHEN Rengang, CHEN Weigen, et al. Calculation of static temperature field of buried cable based on FEM and analysis of influential factors[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12):3086-3092.
- [13] 罗涛, 陈民铀, 曾灿. 电力电缆安全监测中温度场和电场数值关系分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(5):20-24.
LUO Tao, CHEN Minyou, ZENG Can. Study of numerical relationship between temperature and electric field in power cables safety monitoring[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(5):20-24.
- [14] 梁永春, 李彦明, 李延沐, 等. 地下电缆群暂态温度场和短时载流量数值计算方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8):34-38.
LIANG Yongchun, LI Yanming, LI Yanmu, et al. Numerical method to calculate the transient temperature field and short-term ampacity of underground cable system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8):34-38.
- [15] 孔祥谦, 王传溥. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
KONG Xiangqian, WANG Chuanpu. The application of finite element method in heat transfer [M]. Beijing: Science Press, 1981.

蒲丽娟(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高电压技术应用与电力设备故障诊断方面工作。

刘念(1956—), 男, 教授, 硕士研究生导师, 研究方向高电压技术与设备故障诊断。

刘航宇(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事高电压技术应用与电力设备故障诊断方面工作。

李娟(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事高电压技术应用与电力设备故障诊断方面工作。

(上接第156页)

(10):81-83.

ZENG Xiangjun, WU Zhihua, FENG Kaihui, et al. A transmission line icing thickness measurement method based on the traveling wave transmission time differences[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(10):81-83.

- [20] 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.

JING Huabing, NIAN Xiaohong, FAN Ruixiang, et al. Con-

trol and switchover strategy of full-controlled ice-melting DC power for ice-covered power lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(13):86-91.

崔勇(1978—), 男, 博士, 电力工程师, 研究方向为电力系统运行与运营、电网规划、能源经济等。

聂新华(1971—), 男, 高级技师, 研究方向为输电线路运行与检修技术。