

# 500 kV输电线路区段固定式直流地线融冰方案应用研究

郝夏鹏, 张要强, 苗 栋, 唐 华, 郭华栋, 张 星

(国网河南能源互联网电力设计院有限公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 随着全球气候的变化, 架空输电线路覆冰问题频发, 严重影响电网的安全运行。直流地线融冰技术是一种有效解决因线路覆冰而导致铁塔受损、倒塌和断线等事故的方法。以河南 500 kV 汉郑线 124<sup>#</sup> ~ 149<sup>#</sup> 为研究对象, 针对实际情况, 对融冰方案比较、融冰接线方式选取、融冰电流选取和地线融冰站选址等问题进行深入研究与分析, 提出最合理的区段固定式直流地线融冰技术方案, 率先完成全国首个交流超高压线路地线融冰项目, 为后续交流超高压输电线路地线融冰的设计提供参考。

**关键词:** 500 kV 输电线路; 覆冰; 区段固定式直流地线融冰; 地线融冰站

## Research on the application of sectional fixed DC ground wires de-icing method for 500 kV transmission lines

HAO Xiapeng, ZHANG Yaoqiang, MIAO Dong, TANG Hua, GUO Huadong, ZHANG Xing

(State Grid HeNan Energy Interconnection Power Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** With the change of global climate, the problem of overhead transmission line icing occurs frequently, which seriously affects the safe operation of power grid. DC ground ice melting technology is an effective method to solve the accidents caused by the ice covering of the line, such as tower damage, collapse and line breaking. In this paper, 124 -149 of 500 kV Hanzheng Line in Henan Province is taken as the research object. According to the actual situation, in-depth research and analysis are carried out on the ice-melting scheme comparison, ice-melting wiring mode selection, ice-melting current selection, ground ice melting station location, etc., the most appropriate Sectional Fixed DC ground wire ice melting technology scheme is proposed, taking the lead in completing the nation's first AC ultra-high voltage line ground wire de-icing project, providing a reference for the design of subsequent AC ultra-high voltage transmission line ground wire de-icing.

**Keywords:** 500 kV transmission lines; ice accretion; sectional fixed DC ground wire ice melting; ground ice melting station

## 0 引言

随着全球气候的变化, 极端天气频发, 架空输电线路覆冰造成的危害越来越严重<sup>[1]</sup>, 常会出现过负荷、冰闪、舞动和脱冰跳跃等现象, 导致线路跳闸、断线、倒塔、放电和通信中断等事故

发生, 造成电网停运等后果, 严重威胁电网的安全运行, 对我国国民经济和人民生活造成严重危害。为此相关单位及工作者开展了大量工程应用研究。研究表明, 相较于交流融冰技术, 直流融冰技术操作简单, 需要电网提供的容量小, 可解

决地线等两相线路串联融冰问题，因此已广泛应用于电网建设中<sup>[2]</sup>。

本文以河南500 kV汉郑线124<sup>#</sup>~149<sup>#</sup>为研究对象，针对实际情况，对融冰方案比较、地线融冰站选址及地线绝缘化改造进行深入研究与分析，提出最适宜的地线融冰方案，确保电网安全稳定运行，提高了供电可靠性，降低了故障概率，从而进一步提高了架空输电线路的安全水平。

## 1 直流地线融冰技术方案

### 1.1 直流融冰原理

直流融冰是将交流电源转换为直流施加于线路上，利用电流热效应融化线路覆冰。融冰时，融冰电流 $I$ 的计算式为 $I = U\sqrt{R^2 + X^2}$ 。由于采用直流融冰，电抗分量将不起作用，即 $X = 0$ 。通常情况下，线路电抗分量 $X$ 较电阻分量 $R$ 大得多，在同样的融冰电流条件下，采用直流融冰所施加的电压比交流融冰要小得多。因此，直流融冰所需的电源容量比交流融冰要小得多。采用直流融冰的意义在于：①减少了融冰所需要的系统容量；②可实现对单回输电线路融冰，避免了交流融冰时需要进行线路阻抗匹配和繁杂的倒闸操作；③可满足地线等两相线路串联融冰需求。直流融冰原理如图1所示。

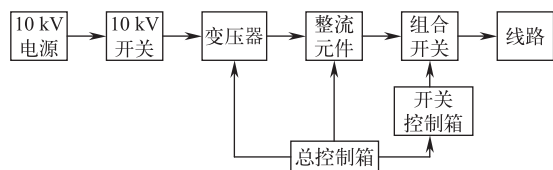


图1 直流融冰原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of DC ice-melting principle

10 kV电源首先通过12脉波整流变压器降压后，输出至二极管不可控12脉波整流器，此整流元件根据实际融冰需要，可以实现两桥串联和两桥并联两种运行方式。然后经过感应电压抑制部件消除线路感应电压对整流装置的影响。最后通过开关输出至线路，利用导线短接形成直流电流回路，使地线发热升温，从而消除覆冰。

### 1.2 融冰方案比较

目前常用的直流融冰方案主要分为固定式和

移动式两类。其中，固定式分为区段固定式直流地线融冰和站端固定式直流地线融冰；移动式分为区段移动式直流地线融冰和站端移动式直流地线融冰。

固定式直流地线融冰装置利用10 kV/35 kV电源或柴油发电机组作为输入，通过整流变压器降压后接入直流整流元件，再由直流整流元件将交流整流成直流，然后经装置内部串并联方式模块和融冰开关，将整流元件输出的正负极施放到融冰地线进行融冰<sup>[3]</sup>。区段固定式直流地线融冰装置需放置在融冰区段临近耐张塔下或临近10 kV/35 kV电源点处，通过地线引下线与地线相连，装置固定放置，避免移动运输对装置造成破坏。地线固定式直流地线融冰装置融冰实施过程操作简便，无需临时接线，可快速对地线完成融冰，极大地提高了装置的可靠性与实用性。运维人员可根据气象预报数据信息在区段固定式直流地线融冰装置场地进行提前部署，根据天气变化和覆冰情况，主动开展融冰作业。

移动式直流地线融冰装置是将交流输入电源变换为直流电压电流，并用于对输电线路实现直流融冰的成套设备。该设备安装在移动式承载平台（即半挂车）上，长约17 m，重约49 t，一般配置到需要融冰的变电站，实现对主电网导线的现场融冰。移动式直流地线融冰装置融冰需临时接入输入输出电缆，同时需要耗费大量人力及时间；融冰区段一般位于山区，道路崎岖，地形复杂，难以到达现场；运输过程中易造成融冰部件故障，因此相较于固定式直流地线融冰装置可行性较差，一般适用于临时接入变电站的工况。

汉郑线124<sup>#</sup>~149<sup>#</sup>区段位于黄河南岸24~28 km处，嵩山北麓，海拔较高，最高塔位海拔916 m（135<sup>#</sup>），气候类型为温带季风性气候，冬季主导风向为西北风，与线夹走向夹角大于45°，属于历史上多次发生覆冰、舞动故障的微地形微气象区。

由于汉郑线124<sup>#</sup>~149<sup>#</sup>融冰区段位于山区，道路地形复杂，恶劣环境下区段移动式直流地线融冰装置难以满足融冰可靠性和时效性的需求，

且山区临近电源的可靠性较差，移动式直流地线融冰装置人员的日常运维和融冰运维也存在一定

风险，接线复杂耗时。因此本文采用区段固定式直流地线融冰装置，如图2所示。

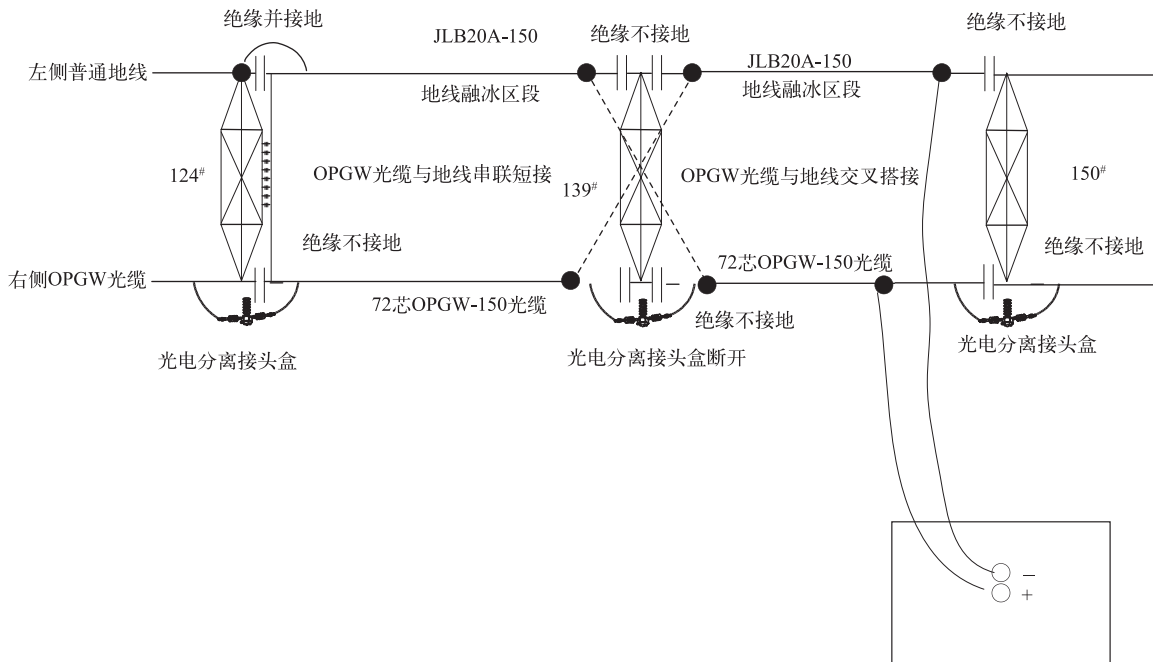


图2 区段固定式直流地线融冰示意图

Fig. 2 Schematic diagram of section fixed DC ground wire melting ice

### 1.3 融冰接线方式选取

汉郑线属于单回线路，普通地线在左侧，光纤复合架空地线（OPGW）在右侧，地线融冰范围为124#~149#，单回长度为11.495 km。线路参数见表1。

表1 汉郑线 124#~149# 线路参数

Tab. 1 Line parameters of Han zheng line 124#~149#

| 项目   | 导线型号       | 单回长度 /km | 整相 20℃ 直流电阻 流电阻 / (Ω/km) | 允许通过电流 /A | 风速 / (m/s) | 覆冰 /mm |
|------|------------|----------|--------------------------|-----------|------------|--------|
| OPGW | OPGW-150   | 11.495   | 0.295 2                  | 347 ~ 677 | 27         | 10     |
| 普通地线 | JLB20A-150 | 11.495   | 0.284                    | 295 ~ 500 | 27         | 10     |

根据表1可知，OPGW和普通地线允许通过的电流有大范围的重合，因此，采取普通地线和OPGW串联的融冰方式，同时设置地线融冰开关，将地线及OPGW引至地线融冰站，如图3所示。

### 1.4 融冰电流选取

融冰电流应在最小融冰电流和最大融冰电流之间选取，且应留有一定裕量。当融冰电流小于

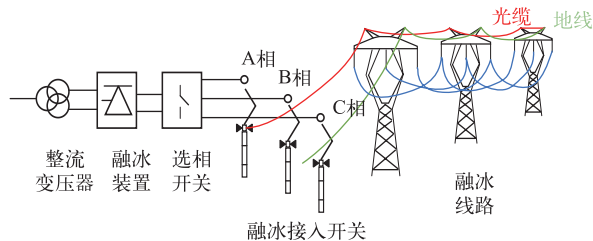


图3 汉郑线地线融冰接线示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ground ice melting wiring for Han-Zheng Line

最小融冰电流时，融冰无效；当融冰电流大于最大融冰电流时，地线会发生永久性变形，导致弧垂增大或损坏导线机械强度。

最小融冰电流计算式为

$$I_{\min} = \sqrt{\frac{\Delta t}{R_0(R_{r0} + R_{r1})}} \quad (1)$$

式中， $I_{\min}$ 为最小融冰电流，单位为A； $R_0$ 为0℃时导线的单位长度电阻，单位为Ω/m； $\Delta t$ 为导体温度与外界温度之差，单位为℃； $R_{r0}$ 为冰层传导等效热阻； $R_{r1}$ 为对流及辐射等效热阻。

最大融冰电流<sup>[4]</sup>计算式为

1) 风速  $V > 2$  m/s时

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{7.24(\frac{318+0.5t_2}{1000})\sum id + 0.7(\frac{Vd}{2})^{\frac{3}{4}}(90-t_2)}{R_{90}}} \quad (2)$$

2) 风速  $V \leq 2$  m/s时

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{0.0314\left[2\sum i(1+0.01t_2) + 5.1(\frac{1}{d})^{0.25}\right](90-t_2)^{13}}{R_{90}}} \quad (3)$$

式中， $R_{90}$ 为90℃时导线的单位长度电阻，单位为Ω/m； $t_2$ 为外界温度，单位为℃； $d$ 为导线直径，单位为cm； $V$ 为风速，单位为m/s； $\sum i$ 为辐射系数。

根据T/CSEE 0061—2017《架空线路电流融冰技术导则》，JLB20A-150与OPGW-150线路的典型融冰电流区间为273~500 A，选择典型融冰工况，即在环境温度为-5℃、风速为5 m/s及覆冰厚度为10 mm的环境条件下，经计算，汉郑线地线串联融冰时运行参数见表2。

表2 汉郑线地线串联融冰时运行参数  
Tab. 2 Operation parameters of ground wire of Han zheng line during ice melting in series

| 融冰回路     | 导线型号                   | 线路长度/km | 导线理论计算电阻/Ω | 融冰最大电流/A | 融冰最大电压/V | 融冰变压器功率/MV·A |
|----------|------------------------|---------|------------|----------|----------|--------------|
| 124~149# | OPGW-150<br>JLB20A-150 | 11.495  | 13.07      | 502      | 6 560    | 3.28         |

为满足全站易覆冰线路的防冰融冰需求，保障线路融冰效果，考虑极端天气情况，线路在环境温度为-10℃、风速10 m/s及覆冰厚度为20 mm的环境条件下，选取直流融冰电流为500 A，最大融冰电压为6 560 V，在考虑一定裕量的前提下，将融冰装置额定输出直流电压选取为±8 kV。融冰装置总体参数见表3。

表3 融冰装置总体参数  
Tab. 3 Overall parameters of ice melting device

| 融冰回路     | 导线型号                   | 线路长度/km | 导线理论计算电阻/Ω | 额定输出电流/A | 额定输出电压/V | 额定容量/MV·A |
|----------|------------------------|---------|------------|----------|----------|-----------|
| 124~149# | OPGW-150<br>JLB20A-150 | 11.495  | 13.07      | 500      | 8 000    | 4         |

1.5 地线融冰站选址

根据前文对于总体参数的计算，可知融冰装置需满足4 MW的负荷需求，为此选取了合适的融冰装置，包括10 kV电源、融冰变压器、融冰整流器和融冰开关等部件，其中不再过多阐述电源进线。主要设备参数见表4。

表4 主要设备参数  
Tab. 4 Main equipment parameters

| 参数      | 12脉波整流变压器  | 12脉波整流器 | 感应电压抑制部件 | 变压器电源切换开关 | 串并联开关 | 输出开关 |
|---------|------------|---------|----------|-----------|-------|------|
| 额定电压/kV | 10/3.2/3.2 | 8       | 17       | 10.5      | 10.5  | 10.5 |

上述融冰设备布置于一个18 m×14 m的集装箱内，同时基于以下考虑设立地线融冰站：

- 1) 不涉及基本农田。
  - 2) 考虑到光缆开断时间的要求，融冰站需设置于有接头盒的塔位，便于接引，避免光缆重新展放。
  - 3) 考虑到融冰沿线全线为山地，10 kV电源需从110 kV变电站引出，为减少10 kV线路路径长度，尽量选择距110 kV站址较近的塔位。
- 根据线路电气要求，考虑避开生态敏感区、基本农田以及低洼易涝区，通过对该区域大范围的筛选，最终确定本文的地线融冰站选址范围为汉郑线149#~150#线路塔附近。站址区域为山间丘陵地貌，现状为林地，交通便利，地面平坦开阔，地表无可见物，场地稳定，无不良地质条件，场地地震基本烈度均为7度，地震加速度为0.10g，满足建站要求，站址航拍图如图4所示。

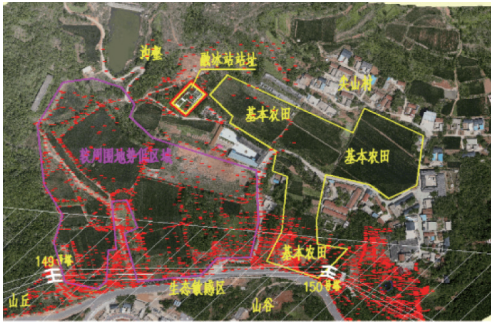


图4 站址航拍图  
Fig. 4 Aerial view of the site

## 2 地线绝缘化改造设计方案

500 kV汉郑线地线融冰区段124<sup>#</sup>~149<sup>#</sup>全长11.495 km, 该区段共有26座塔, 其中直线塔22座, 耐张塔4座。对该区段进行直流融冰技术改造, 需对普通地线和OPGW均进行绝缘化改造。而在绝缘化改造的同时, 必须考虑融冰、防雷及通信的需求, 确保OPGW在防雷和融冰过程中的安全稳定运行。

### 2.1 普通地线绝缘化改造

普通线路的架空地线在耐张塔两侧都是开断接在耐张塔上, 无法形成电流通道。而本改造段为形成电流通道, 需将非融冰分段处的耐张塔前后两侧的架空地线加装跳线, 同时加装跳线支柱复合绝缘子, 以保证地线与铁塔之间有足够的绝缘间隙。同时, 需在现有的铁塔端部开孔喷锌, 具体如图5、图6所示。

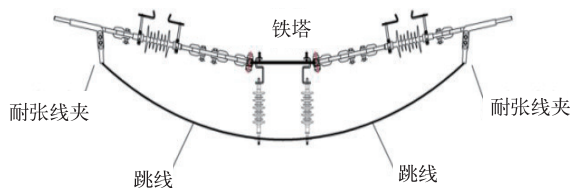


图5 跳线串示意图

Fig. 5 Jumper string diagram

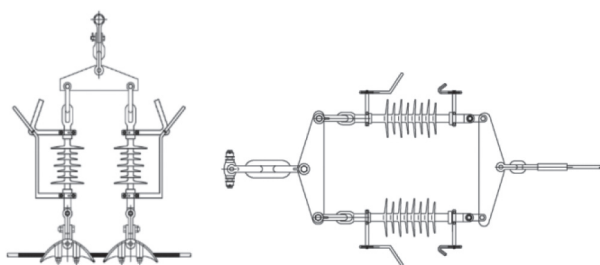


图6 金具串组装示意图

Fig. 6 Assembly diagram of the string of fittings

### 2.2 OPGW绝缘化改造

为满足OPGW直流融冰需要, 覆冰区段的OPGW与普通地线融冰接线方式保持一致, 采用分段绝缘、一点接地方式<sup>[5]</sup>, 即在OPGW的一个绝缘区段内, OPGW仅在某一座杆塔接地, 其他杆塔均对地绝缘。依照Q/GDW 2011948—2018

《分段绝缘光纤复合架空地线 (OPGW) 线路工程技术规范》, 根据接地点位置不同, OPGW分段绝缘方式有以下三种情况。

#### (1) OPGW融冰分段位处光缆接续塔

此时, OPGW在接续塔一侧接地, 另一侧绝缘。一侧采用绝缘金具、绝缘余缆盘与杆塔绝缘引下, 另一侧采用接地引下。OPGW通过光电隔离接续盒完成光纤接续<sup>[6]</sup>, 如图7所示。

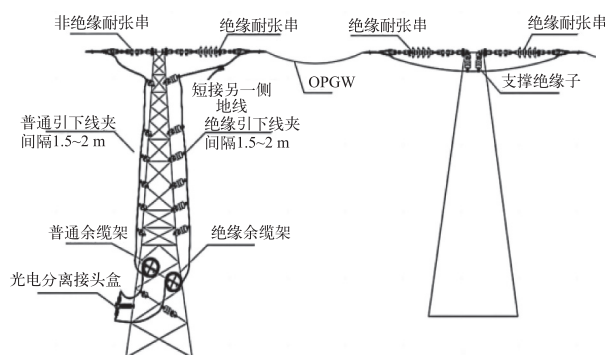


图7 OPGW融冰分段位处光缆接续塔示意图

Fig. 7 Schematic diagram of optical cable connecting tower at OPGW ice melting section

#### (2) OPGW融冰段内光缆接续塔

此时, OPGW在接续塔两侧均绝缘。OPGW两侧均采用绝缘金具、绝缘余缆盘与杆塔绝缘引下, 使用并沟线夹和预绞丝导流金具实现两侧OPGW的可靠电气连接。OPGW通过绝缘接续盒完成光纤接续, 如图8所示。

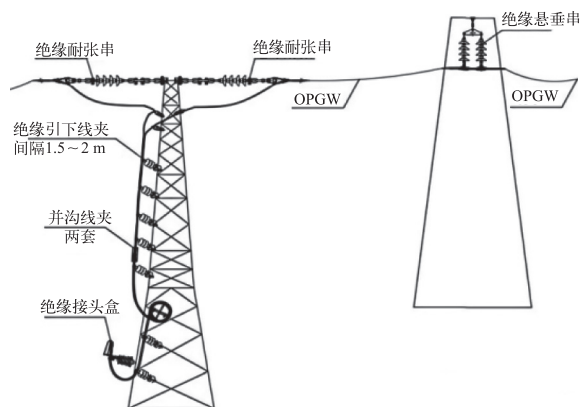


图8 OPGW融冰段内光缆接续塔示意图

Fig. 8 Schematic diagram of optical cable connecting tower in OPGW ice melting section

### (3) OPGW接续塔处接入融冰装置

此时, OPGW在接续塔两侧均绝缘, 加装接地和融冰开关。OPGW两侧均采用绝缘金具、绝缘余缆盘等与杆塔绝缘引下。OPGW通过光电隔离接续盒完成光纤接续, 两侧引下安装融冰装置接入开关及接地开关。融冰时, 接入开关闭合、接地开关断开; 正常运行时, 接入开关断开、接地开关闭合, 如图9所示。

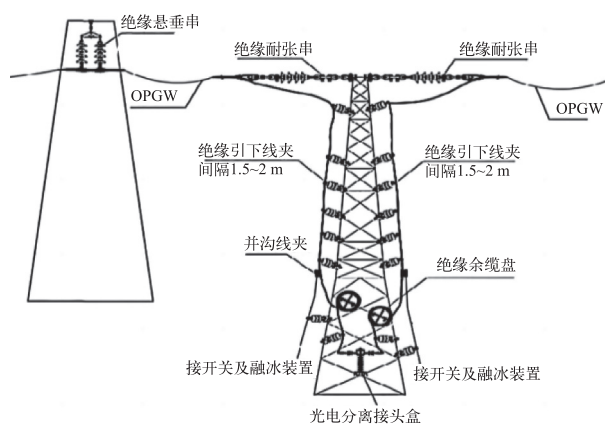


图9 OPGW 接续塔处接入融冰装置示意图

Fig. 9 OPGW connection tower access deicing device schematic diagram

对于非开断处的光缆分盘处, 安装一个普通绝缘接头盒, 对于124<sup>#</sup>和149<sup>#</sup>开断处的光缆分盘处, 安装一个光电分离终端接头盒, 与124<sup>#</sup>小号侧和149<sup>#</sup>大号侧进行有效绝缘。与此同时, 原OPGW余缆盘更换为绝缘余缆盘。

为实现地线分段融冰, 运行人员需上塔操作, 在每个融冰分段点均考虑安装融冰接地开关。线路正常运行时, 融冰开关合拢, 地线接地。在进行融冰操作时, 人员上塔完成融冰设备操作后, 断开开关, 实现地线融冰。

## 3 结束语

本文以500 kV汉郑线124<sup>#</sup>~149<sup>#</sup>直流融冰改造工程为依托, 率先完成全国首个交流超高压线路地线融冰项目, 为保障冬季大电网安全运行和电力可靠供应提供了有力支撑。

针对实际情况, 对地线融冰技术方案进行深

入研究和分析, 设计适用于此区段的固定式直流地线融冰方案, 采用普通地线和OPGW串联融冰的方式, 计算合适的最大融冰电流, 设计满足负荷需求及相关选址要求的地线融冰站, 最终对普通地线及OPGW进行绝缘化改造, 从而完成直流融冰技术的改造。研究思路和成果能够为后续的区域式地线融冰设计提供参考。

### 参考文献

- [1] 柏晓路, 刘利林, 张益修, 等.  $\pm 500$  kV直流输电线路地线融冰方案研究[J]. 电力勘测设计, 2020(3): 37-42.
- [2] 范元亮, 黄桂兰, 陈彬, 等. 移动式电池储能直流融冰装置的功率与容量的优化选取[J]. 电气应用, 2017, 36(1): 42-48.
- [3] 朱春良, 周鹏杰. 500 kV变电站固定式直流融冰装置研究及应用[J]. 科学技术创新, 2020(36): 162-163.
- [4] 黄桂兰, 范元亮, 林韩, 等. 山区农网中压线路直流融冰电流计算[J]. 电气应用, 2016, 35(1): 56-61.
- [5] 陈秀娟, 夏潮, 朱海宇, 等. 光纤复合架空地线直流融冰绝缘化改造对地线绝缘子与并联放电间隙的电气要求[J]. 高电压技术, 2017, 43(8): 2733-2738.
- [6] 邓元实, 廖文龙, 陈俊, 等. 光纤复合架空地线直流融冰绝缘化改造方法应用研究[J]. 四川电力技术, 2019, 42(3): 44-49.

### 作者简介

郝夏鹏(1998—), 男, 硕士, 研究方向为输电线路设计。

张要强(1979—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为高压输电工程设计及系统过电压及其绝缘配合。

(收稿日期: 2025-01-15)