

[输电线路]

某110 kV高压架空线路导、地线线路融冰技术的研究

文/王双兴

广东省能源集团贵州有限公司

针对某110 kV架空线路导、地线开展线路融冰技术研究，介绍了该线路的运行现状，从导线融冰、地线融冰等方面分析了线路融冰的设计要求，提出了110 kV导、地线线路融冰的具体实施方案，通过改造该110 kV高压架空线路导、地线达到了较好的融冰效果，提高了电力系统的可靠性和稳定性。

高压架空线路多位于高海拔微气象微地形区，该线路冬季极易发生严重覆冰，面临极高的舞动及倒塔断线风险，极易因冰害发生倒塔断线事故。由于冬季抢修难度大、时间长、安全风险高，一旦发生事故将导致线路长时间停运，给企业造成严重的经济损失。利用直流融冰装置对线路开展融冰是输电线路抵抗雨雪冰冻灾害最直接有效的技术手段，为输电线路在冬季的安全稳定运行提供坚实的技术保障。

某110 kV高压架空线路运行现状

该线路为雷家坡110 kV升压站间联络线路，起自雷家坡110 kV升压站110 kV龙门架，止于达棒山220 kV升压站内110 kV龙门架上。线路全长17.28 km，共61基铁塔，全线设计冰区20 mm，均采用单回路架设。导线使用1×LGJ-240/40钢芯铝绞线，地线一根选择OPGW-36B1-80，另一根G37-G43段选择为JLB20A-80型铝包钢绞线，其余段选择为1×19-11.5-1270（LGJ-80）型镀锌钢绞线。

自2018年11月建成投产以来，该110 kV线路受极端气象（如持续冻雨或雨夹雪）的影响，产生严重凝冻，已发生3次多处断线。为解决该110 kV线路频繁覆冰受损问题，在达棒山升压站加装一套固定式直流融冰装置，对该110 kV高压架空线路导、

地线进行融冰。

设计技术要求

1. 导线融冰要求

在达棒山升压站建设一套固定式融冰装置，在雷加坡建设一套融冰短接刀开关，对线路停电后接入融冰电源，合上融冰短接刀开关，实施导线融冰，三相导线融冰可分为两相串联融冰和两并一串联融冰两种方式。

2. 地线融冰要求

（1）接线方式

该110 kV线路全线地线为一根OPGW光缆和一根LGJ-80普通地线，长约17.28 km。普通地线中有一截JLB20A-80型铝包钢绞线，LGJ-80型地线与JLB20A-80型铝包钢绞线直流电阻相差较大，考虑到融冰时发热差距较大，需先将G37-G43段JLB20A-80型铝包钢绞线更换为LGJ-80型镀锌钢绞线后再融冰。考虑采取单回地线串联导线回路方式进行融冰，两根地线分两次融冰。在首端分别连接到融冰装置正或者负极，末端与导线相连。通过相线构成融冰回路。

（2）绝缘方式

地线融冰需全线进行绝缘化改造，采用带并联

间隙的绝缘子对地线进行绝缘化改造，融冰期间可承受正常融冰电压，雷击时并联间隙将击穿接地，达到防雷的目的。

(3) 线路覆冰监测要求

在该110 kV线路重覆冰区段设置覆冰监测点，并安装拉力传感器式覆冰在线监测装置，确认安装位置，并将相关线路覆冰监测信息可靠回传至升压站。初步在全线覆冰最严重的5个点（G34、G37、G49、G54和G58塔）安装五套拉力传感器式覆冰监测装置。

直流融冰装置容量的确定及选型

1. 线路导地线参数

某110 kV高压架空线路全线地线融冰段导、地线使用情况见表1。某110 kV高压架空线路导、地线参数见表2。

表1 线路110 kV线路全线地线融冰段导、地线使用情况

冰区	导线使用情况	地线型号
20 mm	LGJ-240/40	1×19-11.5-1270, OPGW-36B1-80

表2 某110 kV高压架空线路导、地线参数

电压等级/kV	线型	长度/km	20℃时的直流电阻率/(Ω/km)	20℃时的直流电阻/(Ω/km)	导线电阻/Ω	线路电阻/Ω
110	1×LGJ-240/40	17.28	0.120 9	0.434 6	2.108 9	7.510 6

2. 直流融冰设计

(1) 在达棒山升压站建设一套固定式直流融冰装置

额定直流输出电流1 000 A，额定输入电压35 kV，额定输出电压 $\geq \pm 2$ kV，额定容量 ≥ 5.5 MW，满足该110 kV线路导、地线融冰需求。同时线路融冰需满足后期融冰装置运行可靠性及维护便捷性，尽量减少融冰工作量，避免人工临时搭接线等。

(2) 35 kV交流电源引接

新增一台35 kV开关柜用于给直流融冰装置提供电源，开关柜通流能力满足该线路导地线融冰能力。

融冰装置交流侧电源引接方式从220 kV升压站内2#主变压器35 kV母线引接，该35 kV母线为2#SVG及11母PT柜的汇集母线，当融冰装置启动对

该110 kV线路进行线路融冰时，35 kV母线电压可由220 kV达车线“反送电”。

(3) 直流融冰装置布置

根据现场实际情况，利用达棒山220 kV升压站内现有预留的3#SVG设备场地规划剩余空间（约6×18 m），用于建设固定式直流融冰装置。

(4) 直流融冰装置直流输出接入

融冰装置直流输出侧通过融冰电缆，经电缆敷设至高压室外场地，通过直埋布置于该110 kV线路出线下方，并在其下方靠围墙侧新增一组导、地线融冰专用设备，用于实现融冰电缆与110 kV线路导线相连，同时确保专用设备安装后带电安全距离满足要求。

(5) 对侧短接方式

直流融冰需在线路末端对导、地线路进行短接，从而形成融冰回路，需要在雷家坡110 kV升压站110 kV线路进站靠围墙侧建一组融冰短接刀开关，实现导地线路快速短接。

3. 融冰时间要求

导线融冰时间根据《输电线路融冰方法选择与装置配置原则》应控制在45~90 min。根据《直流融冰装置第1部分：系统设计和应用导则》《直流融冰系统设计技术规程》（报批稿）相关规定以及目前已实施的地线融冰工程的运行融冰经验，本工程融冰时间按1 h设计。

4. 融冰电流计算

根据DLT 5511—2016《直流融冰系统设计技术规程》，融冰电流应在最小融冰电流与最大融冰电流之间选取，当融冰电流小于最小融冰电流时，会使融冰无效；当融冰电流大于最大融冰电流时，会使导、地线发生永久性变形，造成弧垂增大或损坏导线机械强度。

最小融冰电流是指在相应的气温和风速条件下，使导、地线覆冰融化所需要的电流最小，实际融冰电流应大于最小融冰电流。最小融冰电流采用布尔斯道尔计算；计算出不同风速时的导、地线的最大融冰电流。同时在计算最大融冰电流时，导、地线的允许温度应符合表3规定；实际融冰电流是在初步确定融冰时间与覆冰状态的情况下，估算所需的融冰电流，以指导融冰装置的运行，该线路融冰时间按1 h考虑。融冰电流与融冰冰厚、时间、风速及环境

温度有关。计算条件取环境温度 -5°C （导线表面温度 0°C ），风速 5 m/s ，融冰时间 $\leq 1\text{ h}$ 。

表3 导地线融冰允许温度

地线类型	融冰允许温度/ $^{\circ}\text{C}$	地线类型	融冰允许温度/ $^{\circ}\text{C}$
钢芯铝绞线	70	铝包钢绞线	80
钢芯铝合金绞线	70	镀锌钢绞线	125
钢芯铝包钢绞线	80	OPGW复合光缆	90

5. 融冰电压计算

(1) 直流融冰电压的计算式

直流融冰电压的大小主要与地线电阻和融冰电流有关，且呈线性关系。在忽略融冰装置内阻及考虑地线对地阻抗无穷大条件下，可知融冰电压与融冰电流遵循安培定律，则融冰电压为

$$U=R_0LL_{1h}$$

式中， U 为融冰电压（kV）； R_0 为地线 0°C 时的直流电阻（ Ω/km ）； L 为线路全长（km）； L_{1h} 为1 h融冰电流（A）。

(2) 不同接线方式的融冰电压

根据直流融冰的原理，地线融冰无论采取哪种接线方式，都是为形成电流回路。地线直流融冰电压电流满足安培定律，即融冰电压等于融冰电流与线路直流电阻的乘积。融冰电压、融冰电流和线路输出电阻三个参数中，融冰电流由融冰时间、地线参数和环境因素决定；线路输出电阻跟线路网络结构，即地线接线方案及串并联形式有关。

假设地线1的直流电阻为 R_1 ，地线2的直流电阻为 R_2 ，导线的直流电阻为 R ，地线分段并联次数为 n ，可计算出下列常规接线方式的输出电阻 R_0 ，如图1、图2所示。

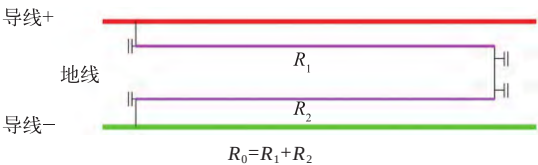


图1 地线串联回路

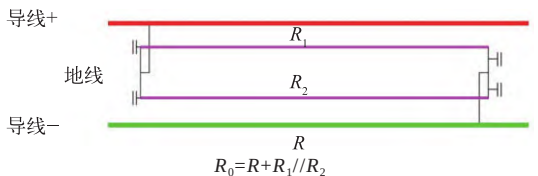


图2 地线并联与导线串联回路

由于地线融冰接线方式的选择、长线路导线的分布电阻直接影响融冰电压的选择，故本工程融冰电压设计需考虑不同连接方式下的电压可调。

地线绝缘化改造与防雷

1. 绝缘子放电间隙选择

考虑到地线绝缘必须同时满足防雷和融冰两项功能，地线需要选择有合适放电间隙的绝缘子，才能确保雷击地线时放电间隙击穿，雷电流通过放电间隙形成通道散流，以实现地线对导线的雷过电压保护。

基于绝缘子并联放电间隙的主要功能，其绝缘子并联间隙的绝缘水平与绝缘子绝缘水平的配置应遵循以下原则。

- 1) 地线直流融冰时，绝缘间隙均应该能够耐受住直流融冰装置的最大输出电压，保证地线对地可靠绝缘。
- 2) 线路正常运行情况下，绝缘间隙应能够耐受住地线上的最大感应电压，确保间隙不发生感应电压下的火花放电而影响通信和电磁环境。
- 3) 雷击地线时，一般雷电流下地线绝缘间隙必须可靠击穿，保证地线防雷效能。
- 4) 在线路发生短路故障时，故障点的地线保护间隙应被击穿接地，以减少短路回路阻抗。
- 5) 地线绝缘子的工频、直流、操作及雷电击穿电压水平均应高于地线保护间隙对应击穿电压水平。

2. 本工程绝缘间隙选择要求

依据DL/T5511—2016《直流融冰系统设计技术规程》，在海拔1 000 m以下地区，地线绝缘子放电间隙应不低于表4的规定。

表4 地线绝缘子放电间隙

融冰电压/kV	10	15	25	35	45
放电间隙/mm	25	30	45	65	80

综合覆冰工况下直流融冰绝缘子的耐压试验和已建直流线路地线融冰的运行经验，不同10 mm、15 mm和20 mm冰区并联电气间隙统一取100 mm。所有间隙电极均采用限位技术，保证运行过程中间隙值不受环境影响而变化。

3. OPGW绝缘设备

OPGW的挂线金具串与普通铝包钢地线相同，

需要带有并联放电间隙的绝缘子实现与塔身绝缘。悬垂金具采用双联结构预绞丝式悬垂线夹，并在其中串入带并联放电间隙绝缘子。耐张金具采用双联结构预绞丝式耐张线夹，并在其中串入带并联放电间隙绝缘子。

为了运行人员检修方便，不进行带电作业，需将OPGW光电分离接续盒安装在导线的下方，同时绝缘端的OPGW在引下时也需要同杆塔绝缘，通过绝缘引下夹具实现此功能。

绝缘夹具起到绝缘与支撑的作用，通过绝缘夹具可以将OPGW的引下线与塔身主材绝缘，从而便于实现线路的融冰。采用压盖将OPGW固定在绝缘夹具，使OPGW得到固定，同时又避免OPGW损伤，整个绝缘引下夹具通过S形铁塔固定架固定在塔身主材上。

4. OPGW绝缘余缆架

OPGW在绝缘侧的余缆架也需要同铁塔绝缘，可以采用给目前的普通余缆架加装绝缘子的方案实现与铁塔绝缘。

5. 跳线串安装要求

普遍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。为形成电流通道，需将耐张塔前后两侧的架空地线加装跳线，同时安装绝缘子，以保证地线与铁塔之间有足够的绝缘间隙。

覆冰在线监测

覆冰监测装置由终端机箱（含中央处理单元）、通信模块、微气象传感器、导/地线拉力倾角传感器、电源模块和信号电缆组成，供电方式采用太阳能加蓄电池。

该110 kV线路所处地形条件较为复杂，多个冰期出现断线事故，因此通过安装覆冰监测装置对输电线路A/B/C相及地线受力情况采用“2+1”模式进行实时监测，同一监测点的所有传感器信息通过同一个主处理单元实现数据采集和处理，由同一个通信模块实现与主站系统通信的配置方案，可以对输电线路覆冰状况进行全天候的实时监测。

状态监测装置机箱应采用不锈钢制作的高防护等级机箱，折弯连接处用满焊处理，机箱表面固定孔用无缝压卯加工而成，全封闭设计，内部功能具

有防振、防浪涌、防静电、防水和隔离电磁干扰等能力。

通过安装拉力传感器、倾角传感器，可以对输电导线、地线的承载重量、倾角等物理参数进行在线监测，同时结合对现场的气象参数进行监测。每套监测终端均配置导线拉力传感器、倾角传感器和地线拉力传感器，拉力、倾角传感器采用一体化成套结构，导线用拉力传感器控制在原有金具连接高度增加50 mm以内，地线用拉力传感器控制在原有金具连接高度增加30 mm以内，各连接部件有锁紧装置以保证在运行中不致松脱，采用特种不锈钢材料制作，满足30年以上使用寿命的要求，具有防尘、防潮和防腐蚀功能。

配置风速、风向传感器，具备一体化设计、免维护特性。其中，风速测量范围为0~60 m/s，精度达到±0.2 m/s；风向测量范围为0°~360°，精度达到±2°。

配置温湿度传感器，具有功耗低、响应速度快、体积小和方便安装的特点，安装时需考虑避免受到太阳直射、金属辐射的影响，确保各传感器的有效测量。

装置供电采用太阳能对蓄电池进行浮充的方式，供电系统由太阳能板、太阳能控制器和蓄电池组成，其输出电源为用电情况下同时对蓄电池进行浮充，以保证无日照时设备的正常工作。在天气良好的情况下，蓄电池充满，在设定的采集频率15 min/次、在运行地区连续无光照天气30天的情况下，装置能够稳定运行。

蓄电池采用硅能胶体蓄电池，该电池使用寿命大于5年，蓄电池安装需考虑便于更换，具备储备容量高、充电接受能力强、大电流放电效率高、自放电小、可靠性强且适用于各种恶劣环境等优良特性。当太阳能板的发电量不足或连续阴雨天时，监测装置的负载用电将依赖于蓄电池。

结束语

通过上述改造，该110 kV高压架空线路在后期运行过程中较好地达到了导、地线全线路融冰效果。EA

（收稿日期：2023-04-15）