

# 江西电网移动式直流融冰装置设计及其系统试验

范瑞祥<sup>1</sup>, 孙 旻<sup>1</sup>, 贺之渊<sup>2</sup>, 严树刚<sup>3</sup>

(1. 江西省电力科学研究所, 江西省南昌市 330096; 2. 中国电力科学研究所, 北京市 100085;

3. 变流技术国家工程研究中心, 湖南省株洲市 412001)

**摘要:** 根据江西电网的实际情况, 提出 2 种分别适用于 500 kV 线路和 220 kV 及以下电压等级线路的移动式直流融冰装置设计方案。前者考虑融冰、直流输电等多种用途, 以可关断元件绝缘栅双极晶体管(IGBT)构成的电压源型换流器(VSC)为基础, 通过模块化设计, 实现装置与半挂式平板拖车整体移动。后者以简单实用为前提, 采用基于晶闸管的三相全控整流桥的主电路结构, 整体装置通过集装箱吊装实现移动化。结合现场调试经验, 提出了较为完整的直流融冰装置调试试验方法及其注意事项, 为类似装置的工程应用提供了有益的参考。

**关键词:** 直流融冰; 移动式装置; 主电路; 系统试验

**中图分类号:** TM721

## 0 引言

输电线路覆冰和积雪会引起线路的跳闸、断线、倒杆、导线舞动、绝缘子闪络、通信中断和大面积停电等事故。欧美和亚洲都有国家曾因输电线路覆冰引发安全事故, 中国也深受其害<sup>[1]</sup>, 尤其是 2008 年初的长时间冰冻灾害令中国南方各省损失巨大。从国内外目前的技术水平来看, 对于覆冰架空导线, “交流短路融冰”和“直流电流融冰法”是最为成熟可行的 2 种融冰手段<sup>[2-4]</sup>。然而考虑到高压输电导线的交流阻抗及其对融冰电流的要求, 传统的交流短路融冰方法所需电源容量巨大且实现困难。与交流融冰法不同, 在一定的环境条件下, 直流融冰所需要的电源容量由于只取决于融冰线路的单位长度直流电阻和导线长度而大大降低<sup>[5]</sup>, 并可方便地实现零起升流, 正成为融冰研究应用的重点。

前苏联自 1972 年开始使用二极管整流装置实现直流融冰, 现在主要采用晶闸管整流装置。法国 AREVA 公司则开发了被称为 HVDCice 的直流融冰装置应用于加拿大魁北克省的主要枢纽 Levis 变电站, 当不用于融冰时, 装置还可作为静止无功补偿器(SVC)使用。相比较而言, 国内的直流融冰装置研究近期才成为热点。2008 年 10 月, 南方电网公司福泉 500 kV 变电站 60 MW 固定式直流融冰装置通过现场试验; 2008 年 12 月, 国家电网公司益阳 500 kV 复兴变电站 120 MW 固定式直流融冰装置通过现场试验。然而, 由于研究与应用时间较短, 目

前公开发表的可供参考的直流融冰技术文献较少, 尤其是在多用途、移动化设计和系统调试应用方面<sup>[6-8]</sup>。本文所述江西电网 2 套不同类型的直流融冰装置的设计与实施经验, 为类似装置的推广和应用起到有益的参考作用。

## 1 直流融冰装置的设计实施原则

直流融冰装置的基本原理是在线路中通以直流使其产生的热量大于导线散热量和融冰热量之和, 从而使覆冰融化。较为准确地核算出不同类型线路所需的融冰电流是装置设计的首要任务。

使导线覆冰融化所需的融冰电流  $I_r$  的常用计算公式<sup>[8]</sup>为:

$$I_r^2 R_0 T_r = \frac{\Delta t}{R_{T0} + R_{T1}} T_r + 10 g_0 db + \frac{0.045 g_0 D^2 \Delta t}{R_{T0} + R_{T1}} \left[ R_{T1} + 0.22 \frac{R_{T0}}{\ln \frac{D}{d}} \right] \quad (1)$$

式中:  $I_r$  为融冰电流(A);  $R_0$  为 0 °C 时导线电阻( $\Omega/m$ );  $T_r$  为融冰时间(h);  $\Delta t$  为导线温度与外界气温差(°C);  $g_0$  为冰的相对体积质量(一般取 0.9);  $b$  为覆冰每边冰厚(cm);  $D$  为导线覆冰后的外径(cm);  $R_T$  为对流及辐射等效热阻, 对于雨淞,  $R_T = (0.09D + 0.22 + 0.73(VD)^{\frac{2}{3}})^{-1}$ , 对于雾淞,  $R_T = (0.04D + 0.84(VD)^{\frac{3}{4}})^{-1}$ ;  $R_{T0}$  为等效冰层传导热阻,  $R_{T0} = \left( \ln \frac{D}{d} \right) / (273\lambda)$ ;  $V$  为风速(m/s);  $d$  为导线直径(cm);  $\lambda$  为导热系数(雨淞为 0.022 7, 雾淞为 0.001 2)。

由式(1)可知,导线类型、融冰时间和覆冰厚度是影响  $I_r$  的主要因素,设计时还要求  $I_r$  不得大于导线最大允许电流,同时为提高效率,融冰操作不应在覆冰已十分严重的情况下进行。因此,最理想的融冰方式应当是将线路覆冰监测装置与直流融冰装置相结合,根据气象预测在线路覆冰的初期即实施融冰操作,这样做效果更好,也更为安全。

融冰线路的长度是影响融冰装置设计的另一个主要因素,它与装置的容量直接相关,在设计中必须以融冰线路的最大长度为依据进行基准容量的核算,此时其所需直流电压不得高于装置所能提供的最高电压。

在需融冰线路对侧短接的基础上,融冰装置的正、负极输出端各接一相导线实施两相同时融冰,也可一极接一相,另一极接并联的两相,从而实施单相融冰。相比较而言,后者虽然完成三相融冰所需改换接线的操作次数更多,但由于所需电源容量相对较小,因此在长线路融冰中更为适宜。值得注意的是,依据现场经验,为防范线路感应电压的影响,在融冰操作过程中,融冰线路对侧可考虑短接接地。

考虑到 500 kV 线路多采用大截面及多分裂导线,结合融冰线路的长度,其所需融冰电流及装置容量将远大于 220 kV 及以下电压等级线路的需求,加之融冰过程中可能产生的谐波和无功电流,其所需输入电源的容量也将大一些。基于以上原因,设计一套装置同时应用于各电压等级的输电导线融冰较为困难,而将融冰装置的应用对象分为 500 kV 和 220 kV 及以下 2 个电压等级将是更好的选择。结合变电站电源的实际情况,前者通常取 500 kV 变压器 35 kV 绕组作为输入电源,后者的输入电源则通常为 10 kV 电压等级,容量需求更小的也可考虑自备小型发电机。

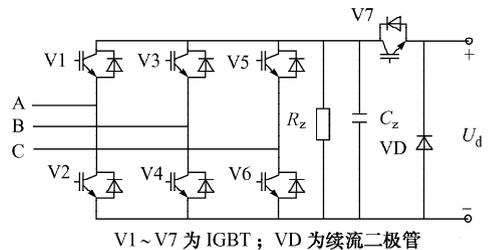
由于融冰操作具有极为明显的季节性,为提高装置的性价比和使用率,在设计中必须考虑其多功能性。同时,由于线路覆冰的不确定性,装置应具备可移动性。

综合以上分析并针对江西电网的实际情况,在对各条可能覆冰的典型线路进行详细核算的基础上,设计采用 2 种不同类型的装置来实施 500 kV 线路和 220 kV 及以下电压等级线路的直流融冰操作。两者均为可移动式,其中 500 kV 线路直流融冰装置设计容量为 20 MW,输入电压为 35 kV,最大输出电流为 4 kA,采用基于绝缘栅双极晶体管(IGBT)的电压源型换流器(VSC)式主电路结构。220 kV 及以下电压等级线路直流融冰装置设计容量 15 MW,输入电压 10 kV,最大输出电流 1.5 kA,

采用基于晶闸管的全控整流桥式主电路结构。

## 2 500 kV 线路移动式直流融冰装置

考虑到 500 kV 线路移动式直流融冰装置对其多用途性和电能质量的要求,采用可关断器件构成的脉宽调制(PWM)整流电路成为必然选择。这样既能保证融冰操作时具备较高的功率因数和较低的谐波含量,同时考虑到采用可关断器件构成的 PWM 整流电路实质上也可受控变为逆变电路,这将有助于方便地拓展融冰装置的功能。在设计中为降低控制的难度并提高装置的可靠性,主变流电路由结合了直流支撑电容  $C_z$ 、电阻  $R_z$  和降压斩波单元的 IGBT 型 VSC 构成,如图 1 所示。



V1~V7 为 IGBT; VD 为续流二极管

图 1 主变流单元电路

Fig. 1 Main circuit of a converting unit

变流电路可通过直接电流控制法由 IGBT 脉冲整流实现直流稳压,而后经由斩波电路实现连续直流调压,从而控制输出直流电流。当采用最简单的控制方式时,可同时闭锁图 1 中 V1~V6 的触发脉冲,利用其续流二极管构成的三相不可控整流桥完成稳压,再通过 V7 的通断控制完成斩波调压。此时输出直流电压  $U_d$  为:

$$U_d = 1.35U_{L1}\alpha \quad (2)$$

式中:  $U_{L1}$  为输入线电压有效值;  $\alpha$  为斩波导通比。

应用于 500 kV 线路的直流融冰装置其电源的电压等级为 35 kV,由于电压等级和容量所限,直接应用图 1 所示的电路无法选择合适的 IGBT。采用 IGBT 的串并联是解决此困扰的一个方法,但由此造成的复杂结构将使得装置的控制和保护难度加大,可靠性和稳定性降低。实际设计中,融冰装置采用多绕组变压器,通过变压器低压侧多个变流单元输出端的串联来解决此问题,达到选用低压 IGBT、输出高压直流电压的目的,如图 2 所示。

图 2 中,整流变压器 TM 原边为 35 kV 绕组,采用星形接法,副边共有 6 个 520 V 绕组,采用三角形接法,每个副边绕组连接一个以主变流单元为主体的功率单元 DY,6 个功率单元的直流输出端按图 2 所示方式连接。显然,由于每个功率单元的输入电压仅为 520 V,因此变流单元中 IGBT 型号的

选择余地很大,也无需串并联。由于功率单元直流输出串联,因此尽管单个模块的直流输出电压仅几百伏,但融冰装置总的直流输出电压仍可超过 4 kV,能够满足 500 kV 线路的融冰要求。

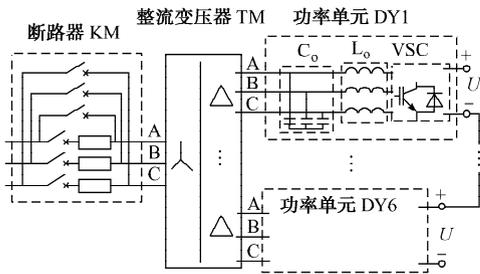


图 2 融冰电源主电路  
Fig. 2 Main circuit of de-icer

为防止在直流电容的初始充电储能过程中过电流对电子器件带来的损害,装置输入断路器模块由带限流电阻的断路器和普通断路器并联构成。正常合闸时带限流电阻的断路器首先闭合,延时数秒后普通断路器自动闭合,而后带限流电阻的断路器自动断开。

为实现装置的可移动化,在装置内部采用模块化设计,将单个主变流单元中的 IGBT、驱动部件、二极管、电容、连接母线、水冷散热器、单元控制器等元部件集中到一个模块内,构成箱式变流单元模块,以减少杂散电感,降低干扰,方便散热和维护。箱式变流单元模块输入端与滤波电感  $L$  和滤波电容  $C$  连接构成功率单元。图 2 所示的 6 个变流模块单独组屏构成功率单元柜,相对应的滤波电感和滤波电容放在一起形成电抗器柜,冷却水系统和控制柜组装在一个柜体内形成控制柜,连同进线开关柜、出线开关柜和变压器的所有柜体均放置于一台半挂车平板拖车的箱体内,如附录 A 图 A1 所示。

考虑到拟融冰线路长短不一,其对融冰装置容量的要求也有所差异,另外从器件选型考虑,20 MW 容量用一套装置实现在技术上有一定风险,设计中采用 4 套如附录 A 图 A1 所示的电源车构成。单台电源车容量 5 MW,各车可单独或并联使用,其中 4 台车并联使用达到最大容量 20 MW,如附录 B 图 B1 所示。

基于 VSC 的结构特点,装置也很容易被改造成轻型柔性直流输电系统,见附录 C 图 C1。此时只需将同一电源车内所有功率单元之间采用串联模式形成一个换流站,2 组电源车采用背靠背模式,中间直流部分通过直流电缆相联,除此之外,系统其他主回路及控制硬件都只需改变控制软件即可。

### 3 220 kV 及以下电压等级线路移动式直流融冰装置

220 kV 及以下电压等级线路移动式直流融冰装置设计的主要要求是简单、可靠且造价低,对电能质量和多用途性没有过多要求,为此,主电路采用基于晶闸管的全控整流桥式结构,如图 3 所示。

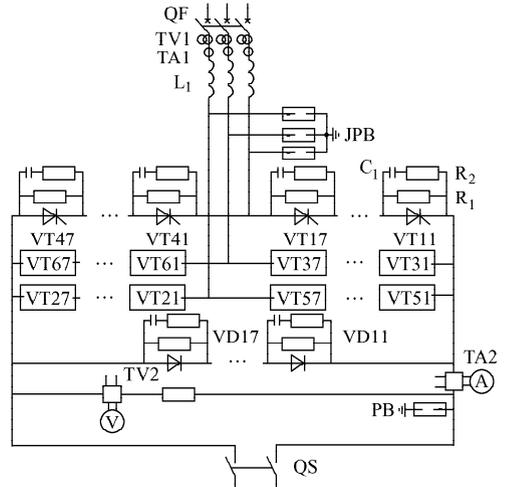


图 3 基于晶闸管的直流融冰装置主电路  
Fig. 3 Main circuit of DC de-icer based on thyristor

装置主要由 10 kV 进线断路器 QF、阳极电抗器  $L_1$ 、带续流二极管 VD11~VD17 的晶闸管三相全控桥及其相应的 RC 吸收回路、直流输出隔离开关 QS、避雷器和电压互感器、电流互感器等构成。正常工作时,由晶闸管串构成的各个桥臂依次导通,通过调整晶闸管的触发角度改变直流输出电压,融冰线路作为阻感负载其电流亦随之改变,从而实现输出电流 0~1.5 kA 的连续调节。融冰过程中的无功  $Q$  和输入电流谐波  $I_n$  与晶闸管的触发延迟角  $\alpha$  密切相关,在融冰线路参数较为准确的前提下可根据式(3)和式(4)预先计算出来,从而有助于为调试试验和实际操作中可能出现的谐波和电压波动问题提供完善的处理预案。

$$Q = \sqrt{3} \times \sqrt{\frac{2}{3}} \times \frac{1.35U_L^2 \cos \alpha}{R} \times \sqrt{1 - (0.955 \cos \alpha)^2} \quad (3)$$

$$I_n = \frac{\sqrt{6}}{n\pi} \frac{1.35U_L \cos \alpha}{R} \quad n = 2, 3, \dots \quad (4)$$

式中: $R$  为线路直流电阻值; $U_L$  为母线线电压。

考虑到装置交流进线直接接入 10 kV 电源,由于额定电压所限,晶闸管和续流二极管必须分别串联使用。其串联个数的确定依据为:每相晶闸管或续流二极管串联后其不可重复峰值电压  $V_{DRM}$  之和不得低于 2.5 倍母线额定峰值电压(不包括热备用

晶闸管或续流二极管),且晶闸管阀或续流二极管的冗余度至少应为1个,则总电压可靠性系数为:

$$k_V = \frac{(n_S - 1)V_{\text{DRM}}}{\sqrt{2}U_L} > 2.5 \quad (5)$$

本工程所选晶闸管和二极管的 $V_{\text{DRM}}$ 均为6500V, $U_L=10.5$  kV,由式(5)可知,串联晶闸管和续流二极管个数 $n_S$ 取7即可满足要求。

为使移动方便,整套装置所有设备集中放置于一个集装箱体内,可整体吊装,输入/输出电缆采用穿墙套管从箱体侧面连接,整体布置如附录D图D1所示。根据融冰操作时的实际情况,装置正常工作时的环境最高温度设定为10℃,以此为依据进行装置紧凑化的冷却方案设计。最终确定采用强迫通风冷却系统,工作时冷却风从集装箱下部打开的窗口进入整流柜的下风道,通过装在顶部的3个轴流风机把工作中产生的热量从柜顶排出。

#### 4 移动式融冰装置系统试验

江西应用的2套融冰装置的系统试验基本相同,仅在一些细节上有差异。主要有以下几个部分:

##### 1) 一般检查与低压试验

首先需要检查运输过程对设备有无损伤及明显的外部问题;然后进行绝缘电阻测试,即采用2.5 kV兆欧表分别测量主电路和辅助电路对外机壳的绝缘电阻。在绝缘电阻检测合格的基础上,接入控制电源,对装置的冷却系统进行测试;在无异常的情况下,再进行低压触发试验。对500 kV装置而言,可将380 V交流电源接入单个功率单元模块依次进行触发测试;对220 kV及以下线路直流融冰装置,依次短接各桥臂除一个晶闸管外的其他6个晶闸管,接入380 V交流电源,触发导通晶闸管,测试触发脉冲与输出电流,依次验证每个晶闸管都能够触发导通。低压触发若正常,即可应用继保测试仪进行采样精度以及保护定值的校验。

##### 2) 空载投切与调压试验

紧接低压试验后进行的空载投切与调压试验,主要目的是验证融冰电源在额定电压、无电流情况下的耐压能力及装置在空载模式下的控制系统功能特性。一般而言,空载投切3次,每次间隔5 min~10 min,第3次投入之后进行空载调压试验。试验过程中应记录母线电压,检查融冰装置控制系统同步电压的大小和相位,测试验证交流输入电压和直流输出电压,巡视晶闸管阀体、冷却系统、避雷器、电抗器等设备有无异常。

##### 3) 模拟负载试验

为在线路试验之前进一步确认装置的运行状

态,空载投切与调压试验之后还可进行模拟负载试验,即用阻感性负载模拟融冰线路,进行30 min以上200 A~400 A直流输出电流的测试试验。考虑到500 kV融冰装置的特殊性,此项试验还需分为1台车、2车并联及4车并联这3种典型运行方式分别进行。多车并联运行时还需特别注重各台车直流输出电流的均衡性。由于融冰装置采用移动式结构,空间比较紧凑,对冷却系统的要求相对更高,因此,在此项试验中要格外注意功率器件温升是否正常。根据经验,水冷方式下10 min左右装置即可达到热平衡,风冷方式下则需20 min左右。

##### 4) 带线路融冰试验

模拟负载试验通过之后即可进入最后阶段的带线路融冰试验。其中500 kV线路装置在梦山变电站选用500 kV梦永Ⅱ线进行试验,220 kV及以下线路融冰装置在虎岗变电站选用220 kV万虎Ⅰ线进行试验。为稳妥起见,带线路融冰试验可分为2个阶段。第1阶段升流至额定值的50%左右,运行一段时间后再将输出电流降至0后退出,用以检验系统的调节及正常投退功能。若一切正常,则进入第2阶段升流至额定值进行试验,重点测试线路温升及装置融冰能力。现场试验中升流和降流过程以100 A为一个阶梯逐级进行,为确保线路安全,试验规定当导线温度超过80℃、电缆或导引线接点温度超过150℃时立即停止试验。为保障线路安全,试验过程中还必须在重点区域做好测温和交叉跨越及弛度测量,技术验证试验中的数据如附录E表E1所示。作为典型的电力电子装置,融冰装置运行过程中不可避免地将产生谐波和无功,需要进行全程的电能质量监控。试验结果表明采用IGBT的装置功率因数基本可保持在0.94左右,谐波也低于国标要求,但采用晶闸管的装置问题较为突出,不仅无功大、功率因数低,而且以5次、7次、11次、13次为主的谐波超标严重,其试验中的谐波和无功数据如附录F表F1所示。

#### 5 结语

本文结合江西电网直流融冰装置的设计和调试经验,针对不同电压等级线路直流融冰的要求,提出2套移动式直流融冰方案及完整的现场调试试验方法:一套采用IGBT并具备直流输电功能,另一套采用晶闸管全控整流方式。现场试验表明,融冰装置大电流运行时线路温升明显,但采用晶闸管的融冰装置谐波和无功问题较为突出,对变电站的正常运行和其他用户的正常用电造成了一定的影响,因此其输入最好接入短路容量较大的单独母线,为补偿

无功,需要时还应投入电容补偿支路或5次、7次的滤波器,为防止装置大量注入系统中的5次谐波放大,其容性补偿支路中串联电抗率不应小于6%。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

## 参考文献

- [1] 蒋兴良,易辉. 输电线路覆冰及防护. 北京:中国电力出版社, 2002.
- [2] 常浩,石岩,殷威扬,等. 交直流线路融冰技术研究. 电网技术, 2008,32(5):1-6.  
CHANG Hao, SHI Yan, YIN Weiyang, et al. Ice-melting technologies for HVAC and HVDC transmission line. Power System Technology, 2008, 32(5): 1-6.
- [3] 李谢森,左文霞,石延辉,等. 直流融冰技术探讨. 电力设备, 2008,9(6):20-24.  
LI Shusen, ZUO Wenxia, SHI Yanhui, et al. Discussion on the deicing technology using DC current. Electrical Equipment, 2008, 9(6): 20-24.
- [4] 李再华,白晓民,周子冠,等. 电网覆冰防治方法和研究进展. 电网技术,2008,32(4):7-13.  
LI Zaihua, BAI Xiaomin, ZHOU Ziguan, et al. Prevention and treatment methods of ice coating in power networks and its recent study. Power System Technology, 2008, 32(4): 7-13.
- [5] 饶宏,傅闯,朱功辉,等. 南方电网直流融冰技术的研究与应用. 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. Southern Power System Technology, 2008, 2(6): 7-12.
- [6] 张旭航,祝瑞金,周孔均,等. 移动融冰装置在RTDS上的仿真试验研究. 华东电力,2008,36(10):48-51.  
ZHANG Xuhang, ZHU Ruijin, ZHOU Kongjun, et al. Simulation of mobile ice-melting systems on RTDS. East China Electric Power, 2008, 36(10): 48-51.
  - [7] 许树楷,黎小林,饶宏,等. 南方电网500 kW直流融冰装置样机的研制和试验. 南方电网技术,2008,2(4):32-36.  
XU Shukai, LI Xiaolin, RAO Hong, et al. Development and test of 500 kW DC de-icer in China Southern Power Grid. Southern Power System Technology, 2008, 2(4): 32-36.
  - [8] 许树楷,杨煜,傅闯. 南方电网直流融冰方案仿真研究. 南方电网技术,2008,2(2):31-36.  
XU Shukai, YANG Yu, FU Chuang. Simulation study of DC de-icing scheme for China Southern Power Grid. Southern Power System Technology, 2008, 2(2): 31-36.

---

范瑞祥(1977—),男,通信作者,博士,主要研究方向:电力电子技术在电力系统中的应用。E-mail: ricefan117@126.com

孙旻(1970—),男,高级工程师,主要研究方向:电力系统谐波抑制与无功补偿技术和电能质量管理。

贺之渊(1977—),男,高级工程师,主要研究方向:高压直流输电的研发与应用。

## Design and System Test of Movable DC De-icer for Jiangxi Power Grid

FAN Ruixiang<sup>1</sup>, SUN Min<sup>1</sup>, HE Zhiyuan<sup>2</sup>, YAN Shugang<sup>3</sup>

(1. Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China; 3. National Engineering Research Center of Converters, Zhuzhou 412001, China)

**Abstract:** According to the practical situation of Jiangxi Grid, two kinds of movable DC de-icer design which are respectively suitable for 500 kV and 220 kV or under transmission line are presented. The former may work as DC de-icer or as HVDC transmission, etc. Its main equipment is built based on the voltage source converter (VSC) with insulated gate bipolar transistor (IGBT), which realizes removability with semi-mounted platform trailer by modular design. The main circuit structure of the latter one is used three phase controlled thyristor bridges to meet practical requirement. The removability of whole system is implemented with container suspension. Combined with testing experience on site, an integrated commissioning method of DC de-icer and some key remarkable items are put forward. It may be an useful reference for testing similar equipments.

**Key words:** DC de-icer; movable device; main circuit; system test

## 附录 A 500kV 直流融冰装置结构外形图

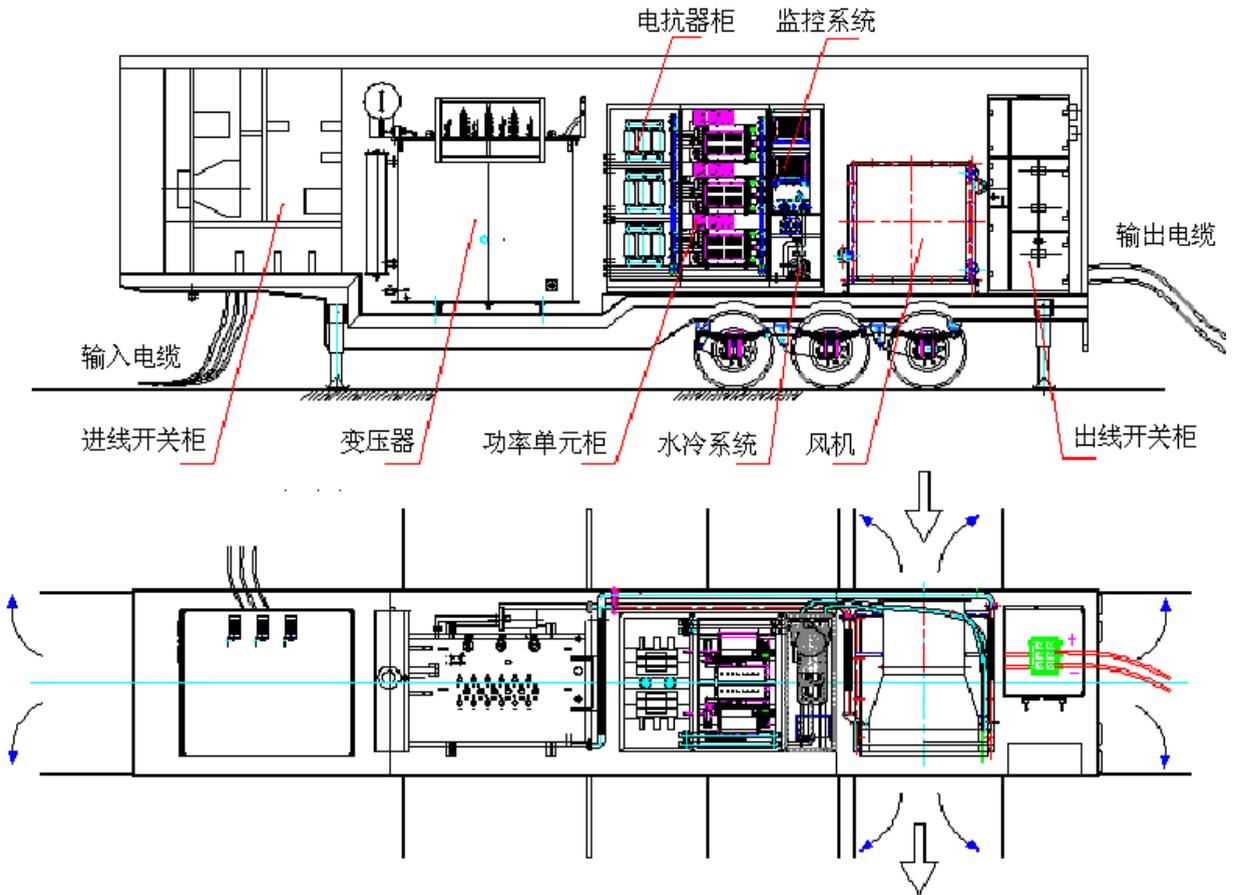


图 A1 500kV 直流融冰装置结构外形图

Fig.A1 Layout diagram of DC de-icer used for 500kV transmission cable de-icing

## 附录 B 4 台电源车并联使用图

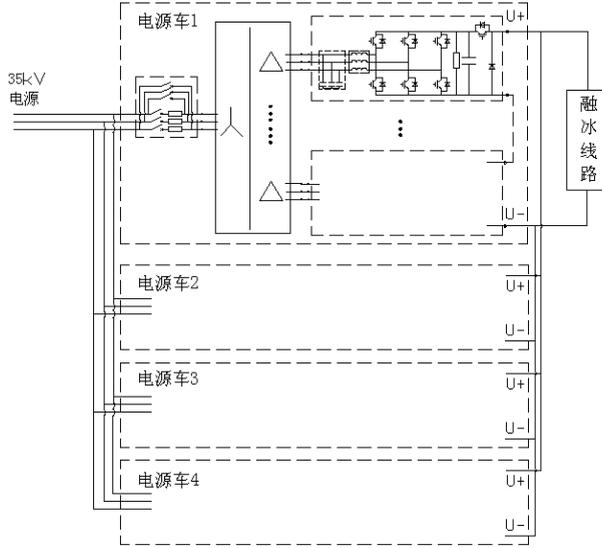


图 B1 4 台电源车并联使用图

Fig.B1 Parallel operation of four DC electrical source

## 附录 C 作为柔性直流输电系统应用图

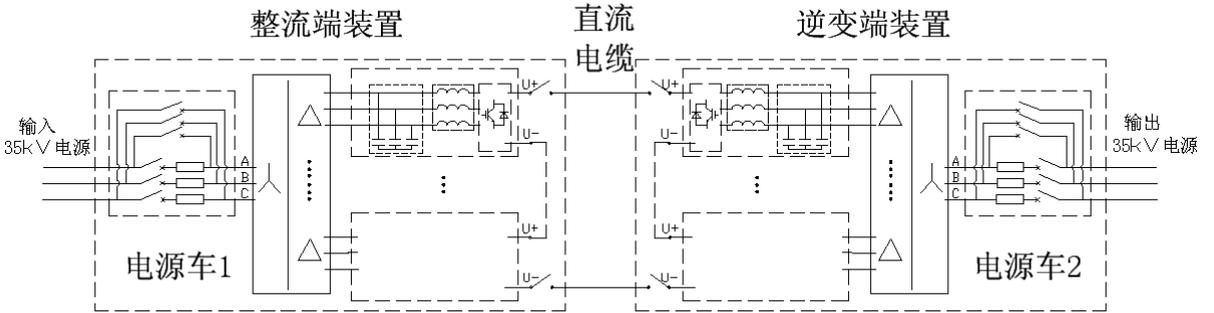


图 C1 作为柔性直流输电系统应用图

Fig.C1 Used as HVDC flexible system

## 附录 D 基于晶闸管的直流融冰装置结构外形图

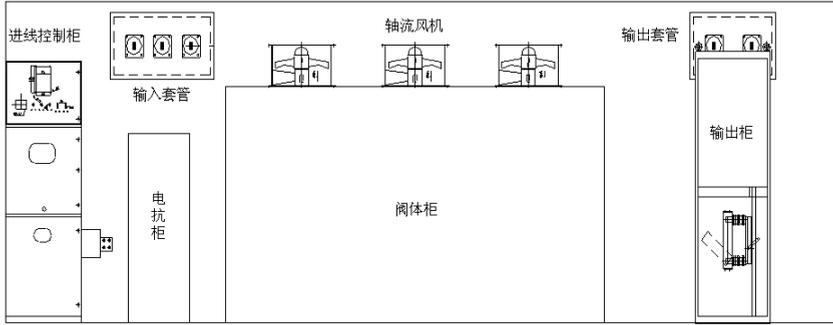


图 D1 基于晶闸管的直流融冰装置外形

Fig.D1 Layout diagram of DC de-icer based on thyristor

## 附录 E 基于 GBT 的融冰装置技术验证试验数据

表 E1 基于 IGBT 的直流融冰装置技术验证试验数据

Table E1 Verification test data of DC de-icer

试验线路: 500kV 梦永 II 线				
序号	输出电流/A	持续时间/min	导线温度/°C	弧垂变化值/m
1	0	0	6.4	0
2	500	5	8.2	0.079
3	800	5	11	0.119
4	2000	10	13.7	0.184
5	2900	30	17.5	0.387

## 附录 F 基于晶闸管的融冰装置谐波与无功试验数据

表 F1 基于晶闸管的融冰装置谐波与无功试验数据

Table F1 Harmonic and reactive power test data of DC de-icer based on thyristor

$U_d$ (V)	$I_d$ (A)	$I_{THD}$	I5	I7	I11	I13	$U_{THD}$	U5	U7	U11	U13	Q(kVar)	PF
1823	193	86%	68%	42%	4%	16%	3.5%	1.2%	1.8%	1.2%	1.2%	1422	0.2
3856	395	51%	42%	8%	20%	12%	4.5%	1.8%	0.8%	3.2%	1.8%	4122	0.28
5734	620	32%	24%	10%	11%	5%	5%	1.9%	3.2%	2.7%	1.5%	6882	0.35
7320	790	30%	21%	13%	11%	7%	5.2%	2.1%	1.8%	2.9%	2.4%	8877	0.45

注:  $U_d$  为输出直流电压;  $I_d$  为输出直流电流;  $I_{THD}$  为输入电流总畸变率;  $I_n$  为 n 次谐波电流畸变率;  $U_{THD}$  为输入电压总畸变率;  $U_n$  为 n 次谐波电压畸变率; Q 为无功功率; PF 为功率因数。