

# Development and Application of DC Ice-Melting Equipment for Power Distribution Network

Qinghua Wang<sup>1</sup>, Youbin Huang<sup>1</sup>, Guangyan Li<sup>1</sup>, Xinmiao Chen<sup>1</sup>, Ren Huang<sup>2</sup>, Fei Lan<sup>1</sup>, Gangyi Wei<sup>2</sup>, Jian Zeng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning

<sup>2</sup>Tianhu Water Resources and Hydropower Science and Technology Co., Ltd. of Guilin City, Nanning

Email: [wqhboy@163.com](mailto:wqhboy@163.com)

Received: Feb. 27<sup>th</sup>, 2014; revised: Mar. 6<sup>th</sup>, 2014; accepted: Mar. 13<sup>th</sup>, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

The ice-coating of transmission line can cause serious problems such as collapsed pole, broken line, trip power cut and so on. It plays a vital role in safe operation of the electrical network by using ice-melting equipment to eliminate the disaster of ice-coating. But only ice-melting of the power transmission network and the distribution network are coordinated mutually, the function and the benefit of ice-melting equipment can be displayed well. The characteristics of ice-melting equipment for power distribution network are elaborated in this paper, which are distinguished between the power transmission networks. Four kinds of ice-melting equipment for distribution network developed successfully are introduced, including application scope, technical plan, characteristic and performance. The technologies and solution measures are also analyzed. The field test and use have obtained satisfied ice-melting effect.

## Keywords

Power Distribution Network; Ice-Melting Equipment; Ice-Melting Mode

---

## 配电网直流融冰装置的研制应用

王庆华<sup>1</sup>, 黄有斌<sup>2</sup>, 李广岩<sup>2</sup>, 陈新苗<sup>1</sup>, 黄任<sup>2</sup>, 兰飞<sup>1</sup>, 韦刚毅<sup>2</sup>, 曾建<sup>2</sup>

<sup>1</sup>广西大学电气工程学院, 南宁

<sup>2</sup>桂林天湖水电业科技发展有限公司，南宁  
Email: [wqhboy@163.com](mailto:wqhboy@163.com)

收稿日期：2014年2月27日；修回日期：2014年3月6日；录用日期：2014年3月13日

---

## 摘要

线路覆冰会引起倒杆断线、跳闸停电等严重后果，采用融冰装置消除覆冰灾害，对电网的安全运行有重要作用，但只有输电网和配电网融冰相互配合，才能发挥融冰装置的最大作用和效益。本文论述了配电网融冰装置区别于输电网的特点，介绍了研制成功的配电网四种模式融冰装置的应用范围、技术方案、技术特点和技术性能，分析了研制的关键技术和解决措施。现场试验和使用取得了满意的融冰效果。

## 关键词

配电网；融冰装置；融冰模式

---

## 1. 引言

我国是电力线路覆冰较为严重的国家之一。线路覆冰的危害主要表现在倒杆断线、绝缘子闪络、设备损坏、跳闸停电等方面，严重时甚至可能导致电网瘫痪。近年来，受全球气候变暖影响，各类气象灾害更为频繁，极端天气气候事件更显异常，破坏程度越来越强，造成的损失和影响也更趋严重。2008年初发生的低温雨雪冰冻灾害，共造成全国共170个县(市)发生供电中断。南方电网供电区域的电网设施遭受严重破坏，直接经济损失就高达150多亿元[1]，这次冰灾表明中国电网抵御和防范极端天气灾害的能力仍然较低。实际上每年都有程度不同的冰冻灾害和输配电线路覆冰现象，2014年初，也出现了较大的冰雪灾害，南方各省电网线路覆冰情况相当严重。

由于2008年冰灾极其严重的后果，电网迫切要求提高线路的抗冰能力，一些科研单位相继进行了直流融冰技术和装置的研究[1]-[4]，由于直流融冰比交流融冰所需容量小得多，而现代直流技术的发展和直流可控整流元器件的开发，更促进了直流融冰技术的快速发展。目前在江西、湖南、贵州、云南、广西等省份的220~500 kV电网中的若干超高压变电站先后安装有直流融冰装置[5]-[9]，这些装置的投入使用对电网的安全运行起了重要作用，但是对于电压等级较低、直接和广大用电户相联的下层配电网10~35 kV线路的融冰关注不够，而这部分电网分布面更广、线路数更多、地形更复杂，且安全余度较低，冰灾引起的后果也很严重。这种只有高压输电网融冰而没有下层配电网融冰的状况，严重制约了融冰抗灾的效果，只有从大电网到地方电网、从输电网到配电网、从高压线路到低压线路，融冰装置相互配套、各司其职、同步运作，才能发挥融冰装置的最大作用和效益。在公开的报导中，只有文献[10]介绍了采用不可控整流方式的配网线路直流融冰装置的研究，我们认为，这一研究具有一定的开拓性，但存在融冰线路长度过短、调节不便、成本较高等不足之处。因此进一步研究性能优良的配电网10~35 kV线路的融冰装置是十分必要的。

10~35 kV配电网的融冰装置有它的特殊性，其技术方案、装置型式、参数计算、结构与输电网高压线路融冰装置有很大区别，必须独立研制。主要区别是：

1) 高压线路融冰装置的投资十分巨大，结构和接线十分复杂，占地面积很大，装置一般采用水冷却，建有泵房、过滤设施、冷却装置等，还有复杂的计算机网络和光纤通信网络，另外还设有体积庞大的高

压负荷试验装置，这样耗资巨大的庞然大物地方电力企业是无法承受的，只能望而却步。因此，研究一种成本低廉、结构简单、方便实用同时又有高的技术含量、性能优良的 10~35 kV 配电网直流融冰装置有重要现实意义，是大范围推广应用融冰技术的基础。

2) 地方电力企业的技术水平、管理水平和人员素质相对较低，配电网融冰装置不但要求工作可靠性高、性能优良，还要求简单实用，操作简便、维护容易，运行维护人员易于掌握。

3) 低压配电网的情况要比高压输电网复杂得多，不但变电站众多、网络结构复杂、线路数量多，而且地理条件复杂，不少是交通不便的高寒山区，融冰难度很大。因此，单一的融冰模式是不能满足要求的，必须研制开发应对不同情况的多模式、系列化融冰装置。为此，我们研制了四种模式的融冰装置：

①35 kV 线路融冰装置：装于配电网 110~220 kV 中心变电站，融冰电源从 10 kV 引出直接整流，对全站 35 kV 线路和除电源线以外的其它电压等级线路进行融冰。

②10 kV 线路融冰装置：装于配电网 35 kV 变电站，由于已有了 35 kV 主干线融冰装置，使沿线的变电站有了可靠的融冰电源，采取 10 kV 经变压器降压整流对变电站 10 kV 出线进行融冰。

③车载发电机组移动式融冰装置：对长线路和分支线以及电网无法供电时进行融冰，发电机组融冰车开到现场实施融冰，使用灵活、覆盖面广。

④轻型便携式融冰装置：10~35 kV 线路地理条件复杂，有些线路往往在山上一小段覆冰，而融冰车又开不到，便携式融冰装置可以人工搬运到现场进行融冰。

我们已独立研制了四种模式的融冰装置，进行了实验室模拟试验和现场试验，表明技术性能优良，并于 2014 年初，桂北遭受冰雪灾害致线路覆冰时，装置投入了使用，短时间内覆冰全部脱落，达到理想的融冰效果。

## 2. 35 kV 线路融冰装置

### 2.1. 融冰装置技术方案

35 kV 线路直流融冰装置主回路接线如图 1 所示。

融冰电压直接从变电站 10 kV 进线开关柜引来，不设整流变压器，经限流电抗器引至整流装置，将

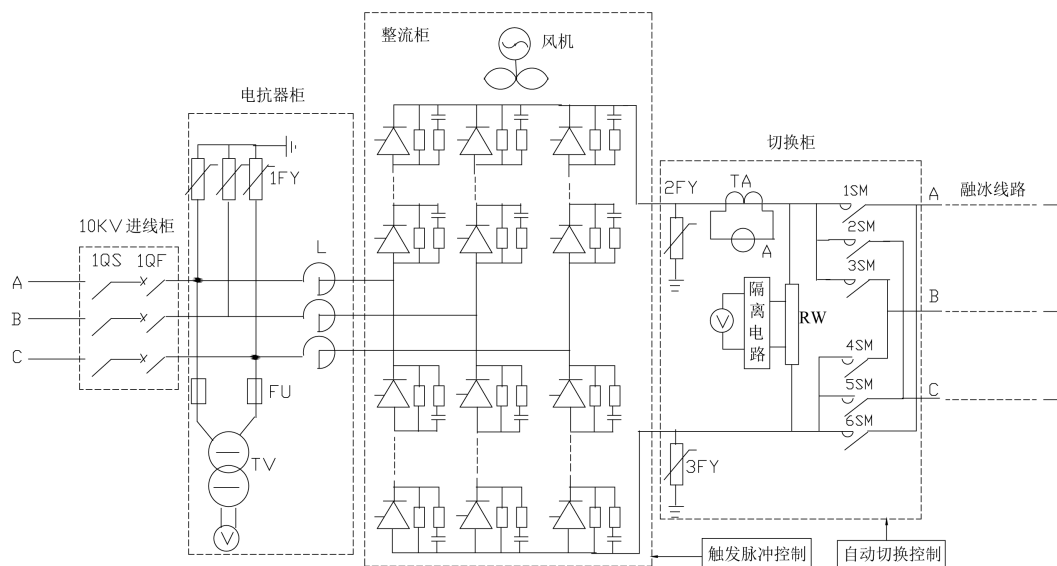


Figure 1. Configuration of 35 kV DC ice-melting equipment

图 1. 35 kV 线路直流融冰装置主回路接线图

交流电压转换成直流电压。整流方式采用高压大功率六脉动全控整流装置，每桥臂由 7 个高压大功率晶闸管串联成阀组，采用性能优良的高压大功率串联晶闸管数字触发电路。每一晶闸管接有静态和动态均压保护电路，电阻采用高压大功率氧化锌陶瓷电阻。整流装置采用风机强迫风冷，比采用水冷要简化得多，成本也低得多。切换装置采用 6 台性能优良、价格低廉的真空接触器，可以实现两相串联或两相并联加一相串联的融冰方式，装置能自动切换、闭环控制。整套装置由电抗器柜、整流柜、切换柜构成，结构紧凑，运输安装方便。交直流都有避雷器过压保护，控制电路有过流限制、脉冲消失等保护，进线柜有微机过电流保护。

## 2.2. 装置的技术特点

1) 新颖的脉冲高压隔离技术。为了节省投资，简化接线，直流融冰装置直接取用 10 kV 电源，因此用 7 个晶闸管串联组成一个桥臂(阀组)，这样对晶闸管触发脉冲要求很高：脉冲的一致性要好；脉冲前沿要很陡；脉冲的幅度和宽度要足够；三相触发要很平衡。我们采新一代的数字触发集成芯片，完全满足这些技术要求，且线路简单、成本低廉、维护方便。但是晶闸管处于高电压，而脉冲的生成和驱动电路是低电压，高、低压之间的耐压要求很高，现有的融冰装置都是采用光电隔离、光纤传输，这种方式成本高、接线复杂、可靠性低，我们所研制的融冰技术方案不采用光纤，而采用一根单芯高压电缆穿过多个磁环脉冲变压器实现高、低压隔离，做法简单而巧妙，费用极少。同时突破现有的融冰装置所采用的传统的电压触发方式，采用了电流触发方式。

2) 采用强迫风冷方式。高压大功率晶闸管以及均压电阻运行中会产生很大的热量，必须冷却。目前超高压系统直流融冰装置都采用强迫水循环冷却，这种方式耗资巨大，结构复杂，也降低了可靠性，不宜在中低压线路融冰装置使用，我们采用风机强迫风冷方式，投资省得多，结构简单得多，但阀组散热器的设计和参数选择很关键。

3) 采用氧化锌陶瓷电阻。高压大功率整流装置最高电压达 15 kV，目前晶闸管最高耐压为 6500 V，一般应有 3 倍以上的裕度，因此多个晶闸管串联的均压问题非常关键[11]，需要研究有效的动态和静态均压措施，取消水冷以后，均压电阻的散热也是一个难点。我们起初采用大功率金属膜高压电阻作为动态均压电阻，试验中电阻多次打火烧坏，后来改用新型的大功率高能氧化锌陶瓷体无感线性电阻，这种电阻的特点是瞬间能吸收极大功率，在以后的试验和使用中，电阻再没有损坏过。

4) 创新的低成本分步试验方法。融冰装置每年使用的时间很有限，平时都在断电停运状态，因此每年冬季到来之前，必须进行试验，确保装置完好待命。试验最重要的内容就是带负载运行，因此高压电网融冰装置都带有高压大功率负载试验装置，此装置体积大，耗资大，占地多，如果照搬这一方法，很难将融冰装置的成本降下来。经过试验研究，我们采用“高压试压、低压试流”的分步试验新方法，即采用很小功率的高压负载电阻箱，加上高压以检验装置在高电压下的工作情况。实验室的高压试验接线如图 2 所示，试验电源接 380 V 系统，采用一台配电变压器升压，由三相调压器调节输出电压，因为实验室已检验装置高压工作正常，现场试验可直接加 10 kV 电压。然后将负载改接为价格很低的低压大功率负载电阻，加上低电压，以检验装置在大电流下的工作情况。试验接线如图 3 所示，试验电源仍接 380 V 系统，经三相调压器接三单相变压器组降压，以输出大电流。这种试验方法的费用很低。

35 kV 线路融冰装置的技术参数见表 1。

## 3. 10 kV 线路融冰装置

### 3.1. 技术方案

10 kV 线路直流融冰装置主回路接线如图 4 所示。

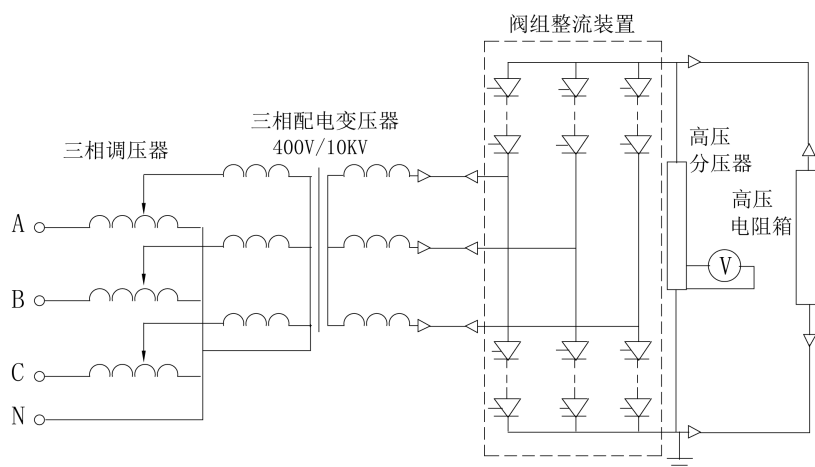


Figure 2. High voltage test configuration of ice-melting equipment  
图 2. 融冰装置高压试验接线图

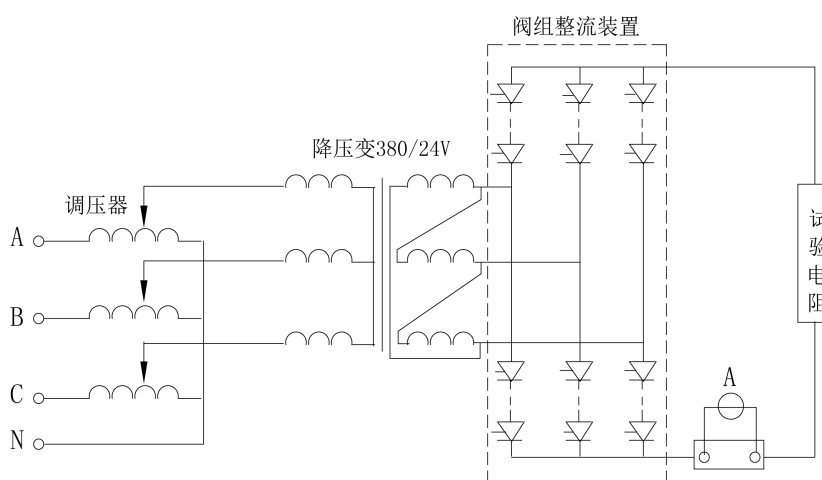


Figure 3. Low voltage test configuration of ice-melting equipment  
图 3. 融冰装置低压试验接线图

Table 1. Technical parameter of various mode ice-melting equipment  
表 1. 各种模式融冰装置的技术参数

融冰装置模式	35 kV 线路	10 kV 线路	移动式	便携式
额定输入交流电压(V)	10,000	1200	690	24
额定输出直流电压(V)	14,000	1620	930	32
额定输出直流电流(A)	700	300	385	300
额定功率(kW)	10,000	500	300	10
最大融冰线路长度(km) (LGJ-70 导线)	78.5	10.87	6.03	0.252
外形尺寸(长 × 宽 × 高)(mm)	4200 × 1200 × 3100	600 × 600 × 2200	2800 × 3600 × 1100	810 × 740 × 700

融冰电压从变电站 10 kV 经整流变压器降压。整流方式采用晶闸管模块六脉动全控整流装置，每桥臂由 2 个晶闸管模块串联成阀组，采用性能优良的晶闸管数字触发电路。每一晶闸管有静态均压和阻容动态均压保护，直流侧有阻容过压保护。切换装置采用交流接触器，操作方便，成本低。控制电路有过

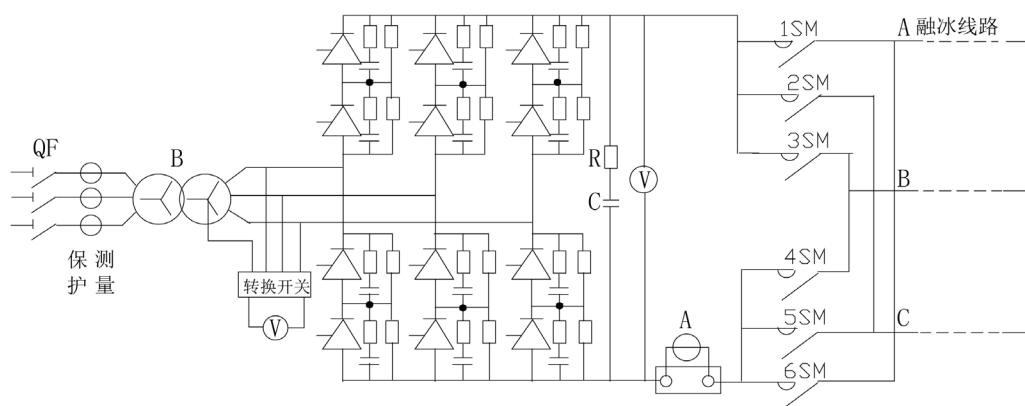


Figure 4. Configuration of 10 kV line DC ice-melting equipment

图 4. 10 kV 线路直流融冰装置主回路接线图

流限制、脉冲消失等保护，进线有微机过电流保护。柜内配有负载电阻作试验用。

### 3.2. 技术特点

单条 10 kV 线路一般都不长，融冰所需容量并不大，因此装设整流变压器降压隔离，这样整流、均压、切换、测量、试验等回路都可以采用较低电压器件，整体结构简单轻便，全套装置安装在一个 GGD 型标准柜内，既可以固定于一个变电站内，也可运至其它变电站融冰。

10 kV 线路融冰装置的技术参数见表 1。

## 4. 移动式融冰装置

### 4.1. 技术方案

移动式融冰装置主回路接线如图 5 所示。

采用无刷励磁柴油发电机组作融冰电源，根据试验中出现的问题其励磁系统已进行了改造。发电机绕组接有星形-三角形切换开关，可输出三相 690 V 或 400 V 电压。整流方式采用二极管模块六脉动不可控整流电路，取消了脉冲触发控制电路，直流侧设阻容过压保护电路。为简化接线，融冰方式采用双投三相闸刀开关手动切换，整套装置安装于一个小型配电箱并固定于柴油发电机组的机座上，发电机组和融冰装置装在汽车上，可以运到融冰现场。

### 4.2. 技术特点

1) 目前采用的移动式发电机融冰装置，都是常规低压 400 V 的柴油发电机组[10] [12]，融冰线路长度受到限制，难于满足实际要求，我们采用 690 V 发电机大幅提高电压，最大融冰长度增加 1.73 倍，这是一种煤矿、油田专用柴油发电机组，价格与 400 V 机组相同。当然同容量发电机的电压提高了，电流就相应减小了，我们又采用将定子绕组进行星形-三角形变换的新颖方法，以满足需要较大电流时的要求。此外，装置每年融冰时间毕竟是有限的，移动发电机组平时可作为应急电源使用，做到一机多用。

2) 励磁系统的改造。柴油发电机组都是自励恒压式发电机，装有自动励磁调节器 AVR，密封固化于一块印刷板上，当负载变动时能维持机端电压稳定。但在发电机组融冰装置试验中，当融冰电流增大到一定数值时，电流出现大幅摆动振荡，振幅可从零至最大值，发电机的各项参数以及柴油机调速机构也随之摆动，而发电机组带一般负载却没有振荡现象，究其原因就在于融冰负载的特殊性。融冰装置的三相六脉动整流电路带负载后，会产生一系列高次谐波，包括  $6k \pm 1$  ( $k$  为整数) 的特征波和非特征波，使发

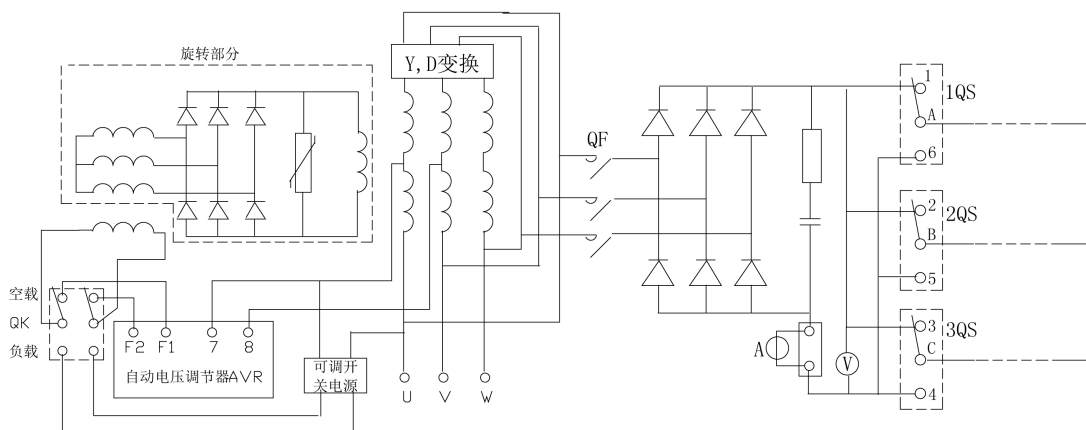


Figure 5. Configuration of generator car ice-melting equipment  
图 5. 车载发电机组融冰装置接线图

电机电压波形严重畸变，而 AVR 是按基波正弦电压设计的，当较严重的谐波干扰时就会破坏其正常工作而出现振荡。为解决这一问题需对励磁系统适当改造，方法是加装一台输出电压可调的开关电源和转换开关，如图 5 所示。机组启动并起励建压时，融冰切换开关 1~3 QS 断开，转换开关 QK 投向“空载”位置，使发电机电压升至额定值。实施融冰时，融冰切换开关根据需要投切，QK 投向“负载”位置，调节开关电源输出电压改变发电机励磁电流，从而调节融冰电流，现场使用表明，融冰电流平稳可调，振荡现象不复存在。同时，这样改造后可将整流方式由可控整流改为不可控整流，装置结构大为简化，降低了成本，提高了可靠性。

移动式发电机融冰装置的技术参数见表 1。

## 5. 便携式融冰装置

### 5.1. 技术方案

便携式融冰装置主回路接线示意图如图 6 所示。

采用中频低压汽油发电机组作融冰电源，发电机频率采用中频 700 Hz，以降低重量和体积。采用晶闸管模块六脉动全控整流电路，融冰时用特制的大电流夹子接到线路上，操作很方便。整套装置装于有轮子的推车上，便于移动。

### 5.2. 技术特点

我们实地了解到，有些线路往往只在山上一小段覆冰，而融冰车又开不到，便携式融冰装置可以人工搬运到现场进行融冰。由于装置要求很轻便，故不能采用常规的 50 Hz 发电机，而采用了中频和特殊结构的新型发电机组，使既能大幅降低重量和体积，又能满足融冰电流的要求，整套装置的重量约为 90 kg。同时融冰装置又可作高性能的直流电焊机使用，动态特性好、效率高、引弧容易、电弧稳定，负载使用率可达 100%(普通焊机 60%)，比交流焊机或 50 Hz 整流直流焊机性能优越，最适合在山区或无电时对电杆和接地极进行焊接作业。

便携式融冰装置的技术参数见表 1。

## 6. 结语

配电网融冰装置具有区别于输电网融冰装置的特点。针对配电网线路覆冰的复杂情况，自主研发成

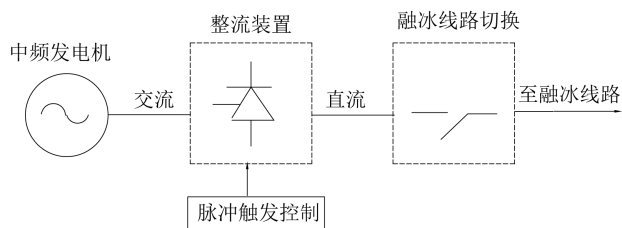


Figure 6. Schematic configuration of portable ice-melting equipment

图 6. 便携式融冰装置主回路接线示意图

功了四种模式适用于不同场合的融冰装置，装置结构简单、成本低廉、性能优良，现场试验和使用达到满意的融冰效果。

### 参考文献 (References)

- [1] 傅闯, 饶宏, 黎小林, 等 (2009) 直流融冰装置的研制与应用. *电力系统自动化*, **11**, 53-54.
- [2] 孙栩, 王明新 (2010) 交流输电线路大容量固定式直流融冰装置的设计方案. *电力自动化设备*, **12**, 102-105.
- [3] 冯炜, 吕宏水, 吴维宁, 等 (2009) 500 kV 线路可移动直流融冰装置的研制和实现. *电力电子技术*, **10**, 19-21.
- [4] 常浩, 石岩, 殷威, 等 (2008) 交直流线路融冰技术研究. *电网技术*, **5**, 1-6.
- [5] 马晓红, 赵立进, 李巍, 等 (2009) 直流融冰技术在贵州电网的应用. *南方电网技术*, **5**, 108-110.
- [6] 范瑞祥, 孙旻, 贺之渊, 等 (2009) 江西电网移动式直流融冰装置设计及其系统试验. *电力系统自动化*, **15**, 68-70.
- [7] 阮启运, 顾雪平, 陆佳政, 等 (2011) 湖南电网 220 kV 线路直流融冰问题研究. *电力系统保护与控制*, **9**, 131-136.
- [8] 张婧, 牛文娟, 蒋春芳 (2010) 直流融冰技术在桂林电网的应用研究. *红水河*, **3**, 129-130.
- [9] 杨堂华 (2010) 昭通电网直流融冰装置应用. *云南电力技术*, **6**, 12-14.
- [10] 谭艳军, 陆佳政, 方针, 等 (2011) 基于调压整流的配网线路直流融冰方法及其装置研究. *电力系统保护与控制*, **10**, 126-128.
- [11] 陈秀娟, 陈维江, 沈海滨 (2012) 可控避雷器晶闸管阀串联均压方法. *电网技术*, **6**, 32-35.
- [12] 饶宏, 傅闯, 朱功辉, 等 (2008) 南方电网直流融冰技术的研究与应用. *南方电网技术*, **6**, 11-12.