

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190197

# 基于 DSP 的 12 脉动融冰控制保护系统的设计与实现

常凤筠<sup>1</sup>, 景炜<sup>1</sup>, 崔旭东<sup>2</sup>, 陈佳永<sup>3</sup>, 张玉龙<sup>1</sup>

(1. 辽宁科技大学电子与信息工程学院, 辽宁鞍山 114044; 2. 鞍山师范学院计算中心, 辽宁鞍山 114005;  
3. 辽宁荣信兴业电力技术有限公司, 辽宁鞍山 114000)

**摘要:** 设计了一套基于 DSP 的 12 脉动直流融冰装置控制保护系统。该系统采用恒电流控制策略确保输出稳定的融冰电流, 同时在出现故障时能确保装置与变电站设备安全。分别建立了三相输电线路融冰时需进行倒闸切换和地线融冰仿真模型。地线融冰之前需要进行空载升压试验, 防止由于地线绝缘强度不足, 使接入装置的地线与相邻地线间的间隙可能会被击穿, 产生接地故障损坏换流站设备。使用牛寨换流站的地线融冰参数建立了仿真模型, 并对地线空载升压试验进行了仿真分析。结果表明, 在地线击穿导致接地故障时, 电压偏差保护能迅速动作, 确保融冰装置与变电站设备安全。所提出的电压偏差保护已经在牛寨换流站的直流融冰设备中得到验证。

**关键词:** 直流融冰装置; 空载升压试验; 12 脉动整流

## Design and implementation of 12-pulse melting ice control and protection system based on DSP

CHANG Fengjun<sup>1</sup>, JING Wei<sup>1</sup>, CUI Xudong<sup>2</sup>, CHEN Jiayong<sup>3</sup>, ZHANG Yulong<sup>1</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114044, China; 2. Computing Center of Anshan Normal College, Anshan 114005, China;  
3. Liaoning Rongxin Xingye Electric Power Technology Co., Ltd., Anshan 114000, China)

**Abstract:** This paper designs a control and protection system of 12-pulse DC ice-melting device based on DSP. The system adopts constant current control strategy to ensure stable ice-melting current output, and in the event of failure to ensure the safety of equipment and substation equipment. Three-phase transmission line defrosting switch and ground line defrosting simulation models are established. No-load booster test is needed before the ground line melts ice. To prevent the ground wire insulation strength is insufficient, so that the ground wire of the access device and the adjacent ground wire gap may be broken, resulting in ground fault damage converter station equipment. The simulation model is established by using the ground wire ice melting parameters of Niuzhai converter station, and the simulation analysis is carried out on the no-load booster test of the ground wire. The results show that the ground fault is caused when the ground wire is broken, the voltage deviation protection can act quickly, ensuring the safety of the ice melting device and the substation equipment. The voltage deviation protection proposed in this paper has been verified in the DC ice-melting equipment of Niuzhai converter station.

This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid (No. RXSVC14090201) "Guizhou-Tongren-Bijiang (Daxing) 500 kV Power Transmission and Transformation Melting Ice and SVC Device".

**Key words:** DC melting ice device; no load boost test; 12 pulsating rectification

## 0 引言

冬季极端天气的频繁出现会使输电线路出现覆冰, 导致电网瘫痪, 给国民经济造成巨大损失。直

流融冰是解决输电线路覆冰最有效的方法。针对高压输电线路的直流融冰研究, 目前国内外已经取得了一些理论和应用成果, 研究的直流融冰装置主要是基于六脉波晶闸管<sup>[1-3]</sup>。文献[4]给出了直流融冰控制系统的一些保护功能, 但这些保护功能并不完善; 文献[5]使用的换流器件为 IGBT, 使用该器件的直流融冰装置成本太高而且技术难度太大; 文献[6]使

基金项目: 南方电网科技项目资助 (RXSVC14090201) “贵州铜仁碧江(大兴)500 千伏输变电融冰兼 SVC 装置”

用移相变压器和脉宽调制方法解决使用融冰装置后的电力系统电能质量问题, 但是该装置占地范围太广, 并且成本太高, 设计难度大, 不符合工程实际要求。

本文针对 12 脉动直流融冰装置<sup>[7-9]</sup>的安全运行设计了一套功能完善的控制保护系统, 可对三相输电线路, 也可对架空地线进行融冰。

## 1 直流融冰系统控制与保护策略

### 1.1 直流融冰接线方式

直流融冰的接线方式<sup>[10-12]</sup>如图 1 所示, 图 1(a)与图 1(b)是直流融冰装置对三相导线融冰时的接线方式, 两种方式分别为 1-1 式与 1-2 式, 图 1(c)是直流融冰装置对地线融冰时的接线方式。

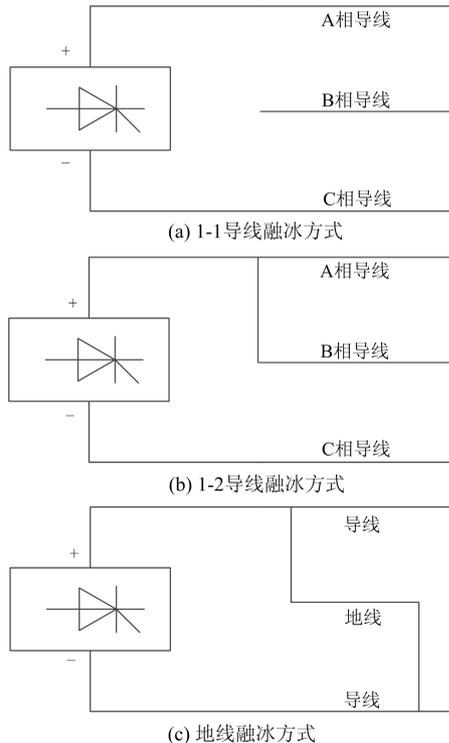


图 1 直流融冰接线方式

Fig. 1 DC ice melting wiring

### 1.2 直流融冰设备工作模式

12 脉动直流融冰控制保护系统具有常规运行模式、空载升压模式和零功率实验模式三种。

常规运行模式就是融冰模式, 空载升压模式与零功率为融冰设备的检修工作模式。

### 1.3 直流融冰及其设备的控制策略

#### 1.3.1 直流融冰设备的控制策略

本文研究的 12 脉动直流融冰装置的控制策略主要为恒电流控制、恒电压控制两种策略<sup>[13-16]</sup>。

恒电流控制策略控制融冰装置输出待融冰线路

所需的融冰电流。对三相线路融冰时, 还需要配置三相倒闸切换策略<sup>[17-19]</sup>, 使三相线路均衡融冰。对架空地线融冰, 不需要配置三相线路倒闸切换策略。

零功率试验通过刀闸操作将平波电抗器作为负载接入融冰装置正负极之间, 用于测试融冰装置大电流运行性能, 检验融冰装置的电流调节等功能。

空载升压试验就是直流侧不带负载, 阀组解锁, 直流侧输出只有电压没有电流。

#### 1.3.2 恒电流控制策略

12 脉动融冰控制保护系统采用闭环直接电流控制即恒电流控制策略, 如图 2 所示。

输入指定的融冰电流值  $I_{ref}$  和采样回来的实际融冰线路电流  $I_{dc}$  作差, 通过比例积分和限幅环节得出反馈量, 再经过反余弦环节得出反馈控制的触发角  $\alpha$ , 将触发角送到触发控制单元, 产生触发脉冲使晶闸管导通。这种控制方式输出的融冰电流跟踪性好, 整流器输出的实际电流和指定的目标电流不存在偏差。

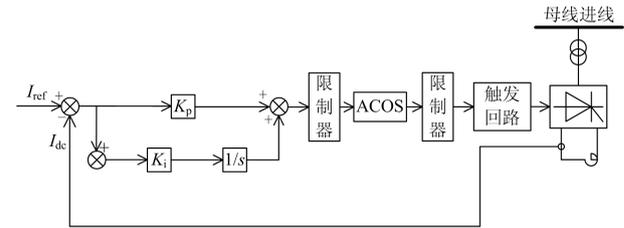


图 2 恒电流控制框图

Fig. 2 Block diagram of constant current control

$I_{dc}$  为直流电流采样值, 由 12 脉动桥拓扑结构中的  $I_{meas\_1}$  与  $I_{meas\_2}$  的决定, 式(1)为  $I_{meas\_1}$  与  $I_{meas\_2}$  的判定公式,  $\Delta I$  建议取值为额定电流 10%。

$$|I_{meas\_1} - I_{meas\_2}| < \Delta I \quad (1)$$

如果式(1)成立, 那么  $I_{dc}$  的取值为式(2)所示的值。

$$I_{dc} = (I_{meas\_1} + I_{meas\_2}) / 2 \quad (2)$$

否则,  $I_{dc}$  的取值为式(3)所示的值。

$$I_{dc} = \max(I_{meas\_1}, I_{meas\_2}) \quad (3)$$

## 2 直流融冰设备控制保护系统工作原理

直流融冰设备控制保护系统由切换柜、控制柜、脉冲柜三个柜体组成。硬件结构图如图 3 所示。



图 3 控制保护系统原理图

Fig. 3 Schematic of control and protection system

### 2.1 切换柜

切换柜主要完成开关量的采集和操作、发出晶闸管触发脉冲、丢脉冲检测、与脉冲柜晶闸管击穿检测单元通信等功能，切换柜的功能框图如图 4。

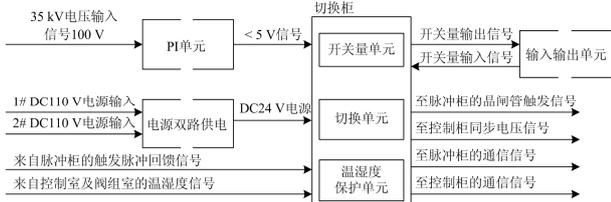


图 4 切换柜功能图

Fig. 4 Function chart of switch cabinet

### 2.2 控制柜

控制柜由数显表单元、微机监控单元、控制箱单元、采样单元组成。控制柜功能框图如图 5。

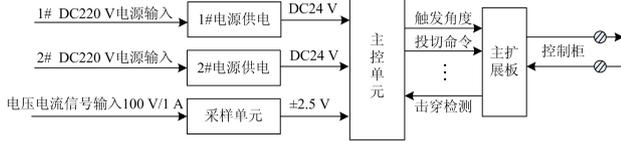


图 5 控制柜功能图

Fig. 5 Function chart of control cabinet

数显表单元用于实时显示系统采样点电流及考核点母线电压等参数。

主控板是控制系统的核心板卡。它采用美国德州仪器公司生产的高性能浮点型 TMS320F28335 DSP 作为系统的中央处理器，配合 FPGA 和 CPLD，完成复杂的控制任务。主控板实现了控制策略、继电保护、断路器及各个开关的投切逻辑、监控系统的信息处理及故障处理上报等功能。

### 2.3 脉冲柜

脉冲柜将切换柜发来的触发脉冲分别发送给各个晶闸管单元，用于触发，并监测各晶闸管工作状态。脉冲柜功能框图如图 6。

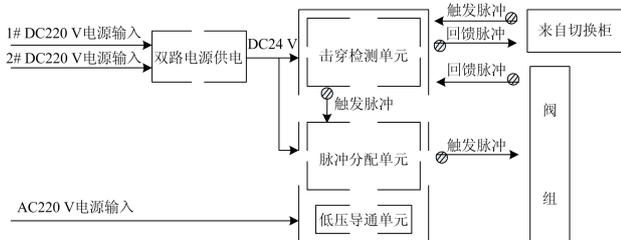


图 6 脉冲柜功能图

Fig. 6 Function chart of pulse cabinet

### 2.4 交流采样单元

交流采样单元由 4 块电压互感器板和 6 块电流互感器板组成。电压互感器和电流互感器分别实现

交流电压采样和交流电流采样的前置处理。

## 3 直流融冰设备保护配置

保护的目的是防止设备运行过程中产生的过应力危害融冰设备以及危害整个系统运行<sup>[20-23]</sup>。保护配置如图 7 所示。

由图 7 可以看出，保护系统包含了 12 种保护配置，分别为阀短路、桥差动、直流过压、过流、接地过流、谐波、开路试验、横差、交流线路阻抗监视、交流过电压、交流低电压和电压偏差保护。

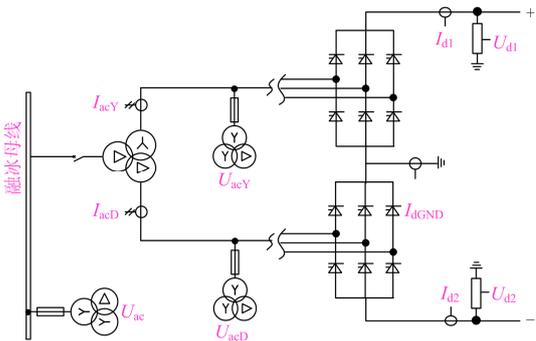


图 7 保护配置

Fig. 7 Protection configuration

### 3.1 电压偏差保护

直流融冰装置在建成调试、故障或检修后需进行空载升压试验。进行空载升压试验可验证阀组触发能力；检验阀组的耐压能力，避免融冰过程中晶闸管被击穿；同时检验晶闸管阀组的可控性，验证直流融冰装置可以稳定输出；还可以检验融冰装置直流侧的系统直流测量值是否正确。

地线直流融冰装置进行空载升压试验时，需要将待融冰的地线接入装置，其他部分正常接地，由于地线绝缘强度不足、天气等原因，升压过程中可能会将融冰段地线与相邻段地线之间的间隙击穿，导致试验过程中出现接地故障，产生的接地故障会对电网形成冲击，引起变电站的基准电位偏移，导致变电站其他设备的保护误动或拒动，对换流站的设备带来危害，本文提出的电压偏差保护可以保护换流站设备安全。

电压偏差保护判断依据是由两个整流桥臂的直流电压  $U_{d1}$  与  $U_{d2}$  决定的。保护判据如式(4)所示。

$$|U_{d1} + U_{d2}| > K \cdot U_{dnom} \quad (4)$$

式中： $U_{dnom}$  表示直流额定电压； $K$  是比例系数。

电压偏差保护跳闸动作时延为  $T$ 。

电压偏差保护的顺序：如果检测到两桥臂之间的直流输出电压偏差超过设定的参考值，控制器发出移相闭锁命令，接着交流断路器跳闸，

锁定交流断路器。

### 3.2 空载升压实验原理与控制策略

直流融冰设备的空载升压试验中, 直流侧没有形成回路, 阀组解锁, 试验结构如图 8 所示。

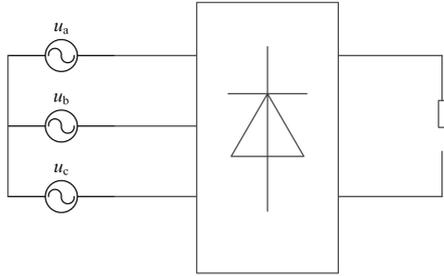


图 8 直流融冰设备空载升压试验结构图

Fig. 8 No-load boost test structure of DC ice-melting equipment

恒电压控制框图如图 9 所示, 恒电压控制策略采用 PI 闭环调节实现, 输入指定的融冰电压值  $U_{ref}$  和采样回来的实际融冰线路电压  $U_d$  作差, 通过比例积分环节和限幅环节得出反馈量, 再经过反余弦环节得出反馈控制的触发角  $\alpha$ , 将触发角送到触发控制

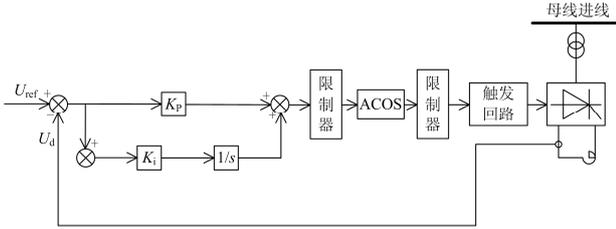


图 9 恒电压控制框图

Fig. 9 Block diagram of constant voltage control

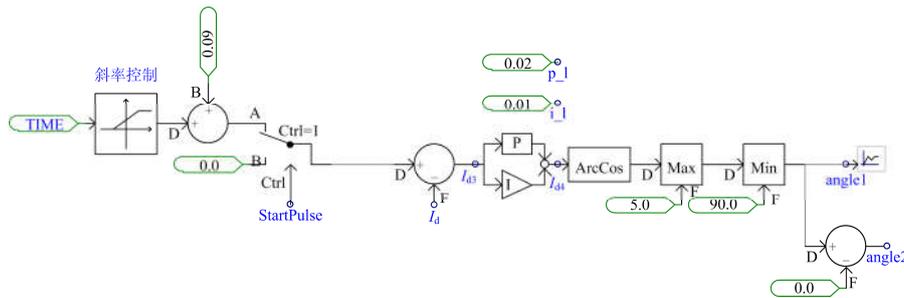


图 10 直流电流控制模型

Fig. 10 DC current control model

牛寨站的直流融冰装置带负载正常运行时的仿真波形如图 11, 仿真时长设定为 5 s, 从图 11 中可以看出, 1 s 时整流桥接收到触发脉冲导通, 装置先以一个较小的电流启动, 在 1.4 s 时直流电流开始增大, 在 3 s 时增大到设定值后停止增加, 之后装置稳定运行直到仿真结束。图 11(a)为直流电流波形, 装置稳定运行时直流电流为 0.79 kA, 分别为直流电流的整体波形和稳定运行时的一个周期的直流电流

单元, 产生触发脉冲使晶闸管导通。

图 9 中的  $U_{ref}$  表示系统设定电压值,  $U_d$  表示直流电压采样值, 该值是综合整流桥两端电压  $U_{d1}$  与  $U_{d2}$  的结果。

式(5)为  $U_{d1}$  与  $U_{d2}$  的判定公式,  $\Delta U$  建议取值为额定电压的 10%。

$$|(U_{d1}) + (U_{d2})| < \Delta U \quad (5)$$

如果  $U_{d1}$  与  $U_{d2}$  满足式(5), 那么直流电压采样值  $U_d$  的取值由式(6)决定。

$$U_d = \text{ave}(|U_{d1}| + |U_{d2}|) \quad (6)$$

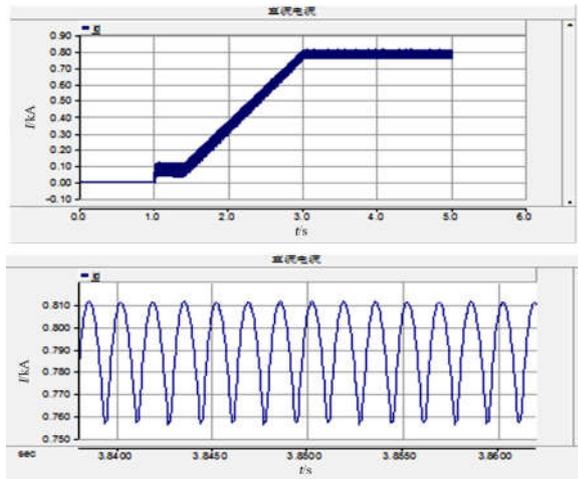
否则,  $U_d$  的取值由式(7)决定。

$$U_d = \max(|U_{d1}|, |U_{d2}|) \quad (7)$$

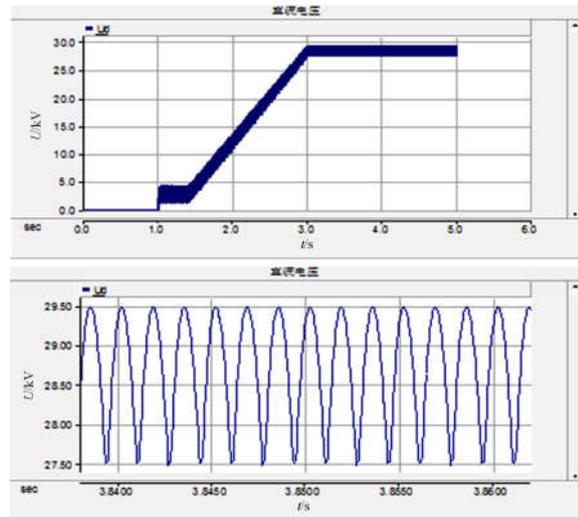
## 4 系统仿真

### 4.1 直流电流控制模型搭建

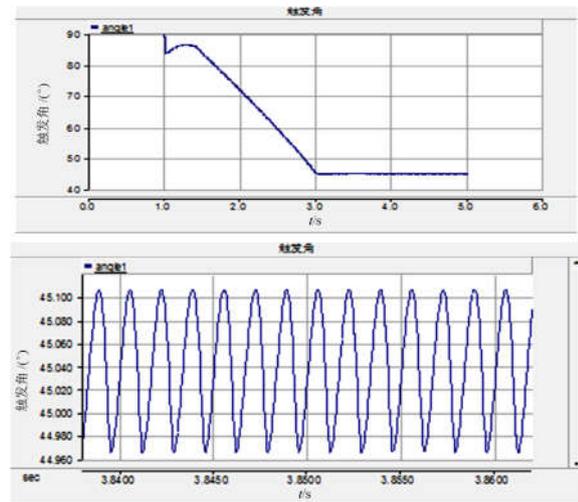
根据恒电流控制策略搭建了直流电流控制模型, 如图 10 所示。图 10 中触发信号 StartPulse 为零时, 整流桥上没有触发脉冲, 装置处于断开状态, 直流电流  $I_d$  为零; 当触发信号 StartPulse 为 1 时, 整流桥接收到触发信号, 装置导通, 直流侧产生直流电流  $I_d$ , 对直流电流的设定值与  $I_d$  的偏差进行 PI 调节, 并将其进行反余弦变换转换为触发角施加在整流桥上, 直流电流的设定值随时间逐渐增加达到最终设定值。图 10 的模型可满足牛寨站和多乐站这两个换流站的融冰装置对电流的需求。



(a) 直流电流波形



(b) 直流电压波形

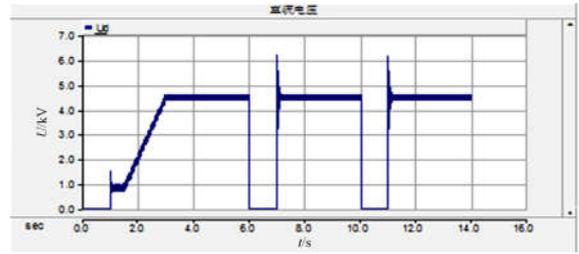


(c) 触发角波形

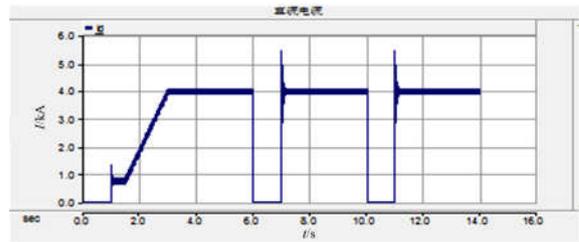
图 11 正常运行时的仿真波形

Fig. 11 Simulated waveform during normal operation

多乐站的直流融冰装置带负载正常运行时的仿真波形如图 12，仿真时长为 14 s。



(a) 直流电压波形



(b) 直流电流波形

图 12 多乐站仿真波形

Fig. 12 Duole station simulation waveform

从图 12 中看出 1 s 时整流桥接收到触发脉冲导通，装置先以一个较小的电流启动，在 1.4 s 时直流电流开始增大，第 3 s 时达到稳定融冰电流 4.01 kA，此时三相线路的状态为“AB 并串 C 相”，对 C 相融冰 3 s，第 6 s 时停止施加触发脉冲进行倒闸切换，倒闸完成后，第 7 s 时再次对整流桥施加触发脉冲，此时三相线路的状态为“AC 并串 B 相”，对 B 相融冰 3 s，再次停止施加触发脉冲进行倒闸切换，倒闸完成后，第 11 s 时对整流桥施加触发脉冲，此时三相线路的状态为“BC 并串 A 相”，对 A 相融冰到仿真结束。图 12(a)为直流电压的瞬时波形，装置稳定运行时直流电压为 4.51 kV。图 12(b)为直流电流的瞬时波形，装置稳定运行时直流电流为 4.01 kA。

#### 4.2 仿真模型参数

本文使用溪洛渡右岸电站±500 kV 双回路直流输电工程参数在 PSCAD 仿真软件中建立直流融冰装置模型。直流融冰装置自带一台换流变压器，容量为 78 MVA，电压等级为 35 kV/16.35 kV/16.35 kV，装置输出的额定电流与额定电压分别为 1.5 kA 与 ±20 kV，融冰功率为 60 MW，直流融冰装置在溪洛渡右岸牛寨换流站站内。

直流融冰装置工作时接入变电站 35 kV 系统，所选取的待融冰地线的线路阻值约为 36.34 Ω，融冰电压 28.71 kV，融冰电流 0.79 kA，容量 22.7 MW。仿真过程中将目标电压设为 20 kV，模拟直流融冰

装置直流测电压从零开始上升到 20 kV。根据该工程的实际需求, 电压偏差保护定值中比例系数  $K$  取

0.075, 跳闸时延  $T$  取 200 ms。搭建的主电路仿真模型如图 13 所示。

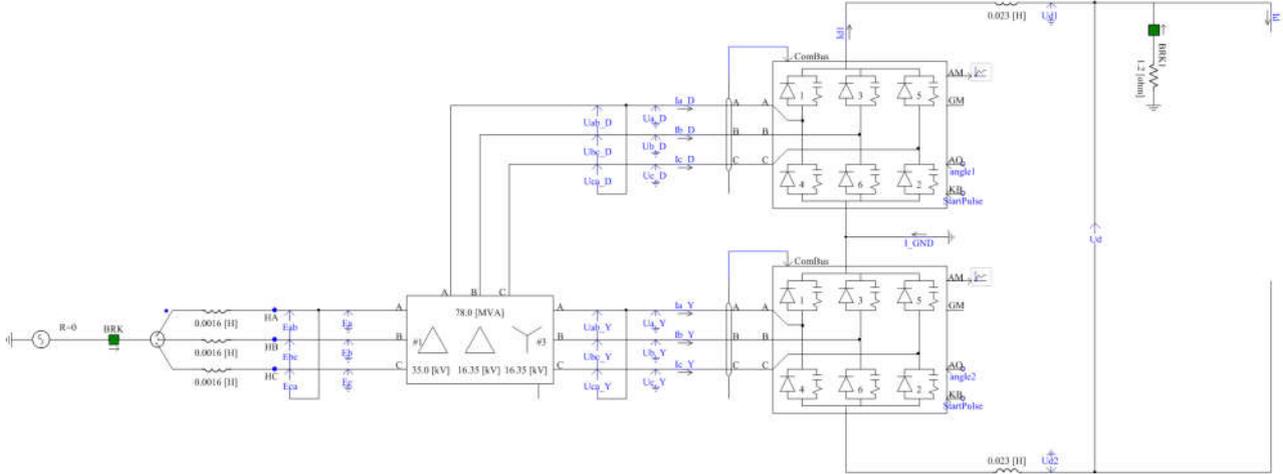


图 13 主电路仿真模型

Fig. 13 Main circuit simulation model

### 4.3 仿真结果分析

根据电压偏差保护判据, 在 PSCAD 仿真软件中搭建了电压偏差保护模型, 电压偏差保护模型如图 14 所示。

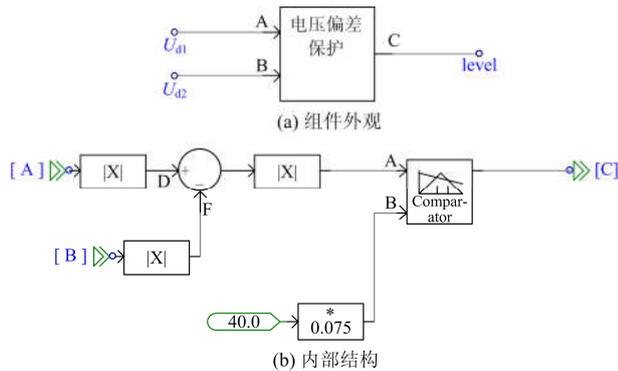


图 14 电压偏差保护模型

Fig. 14 Voltage deviation protection model

运行搭建的直流融冰装置模型, 当运行到 5.8 s 时在装置的正极桥臂加入接地故障, 之后电压偏差保护动作, 得到电压偏差保护仿真图。图 15 为两桥臂的电压之差; 图 16(a)和图 16(b)分别表示直流输出电压  $U_{d1}$  的整体波形和故障发生时  $U_{d1}$  的局部波形; 图 17(a)和图 17(b)分别表示直流输出电压  $U_{d2}$  的整体波形和故障发生时  $U_{d2}$  的局部波形。

从图 16 与图 17 中可以看出装置正常运行时输出的直流电压为 20 kV, 两个整流桥臂的直流电压  $U_{d1}$  与  $U_{d2}$  分别为 +10 kV 与 -10 kV。从图 15 中看出故障接入前两桥臂直流电压绝对值之差约为零, 故障接入之后正负

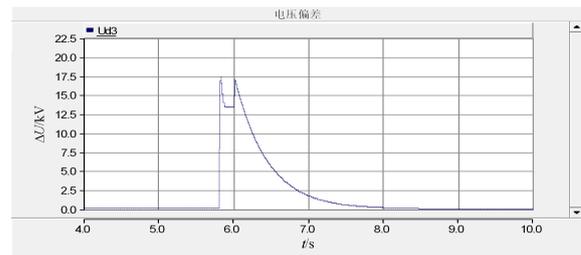
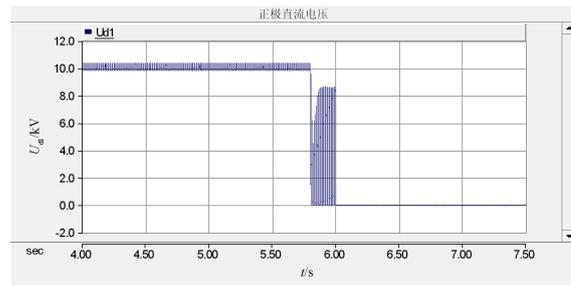
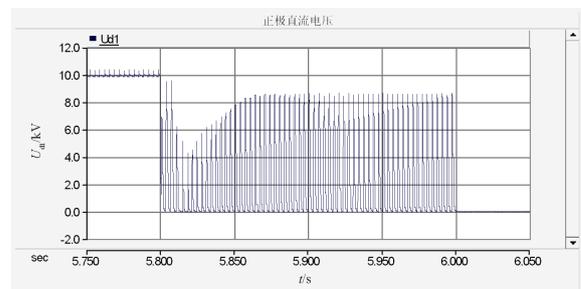


图 15 两桥臂的电压之差

Fig. 15 Voltage difference between two bridges



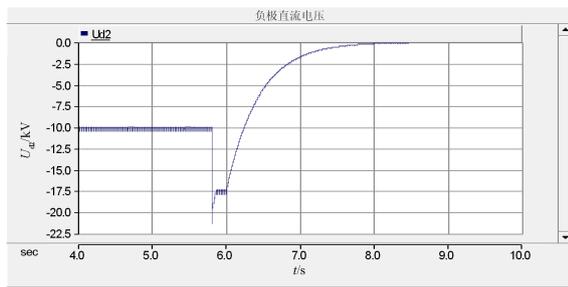
(a)  $U_{d1}$  整体波形



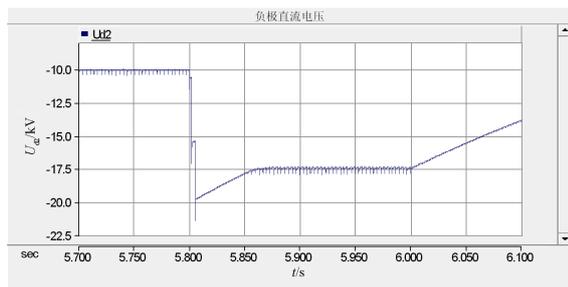
(b) 故障发生时  $U_{d1}$  的局部波形

图 16 正极直流电压  $U_{d1}$  波形

Fig. 16  $U_{d1}$  waveform of positive DC voltage



(a)  $U_{d2}$  整体波形



(b) 故障发生时  $U_{d2}$  的局部波形

图 17 负极直流电压  $U_{d2}$  波形

Fig. 17  $U_{d2}$  waveform of negative DC voltage

桥臂直流电压  $U_{d1}$  与  $U_{d2}$  发生变化, 这两个电压的绝对值之差不再为零, 当这个偏差大于电压偏差保护的设定值时, 电压偏差保护动作, 之后延时 0.2 s 之后交流断路器跳闸, 正极电压直接降为零, 负极电压逐渐降为零, 装置停运。

#### 4.4 系统应用实例

本文提出的电压偏差保护已经在牛寨换流站的直流融冰设备中得到验证。

对牛寨换流站牛从甲普通地线 2 分段进行带负载空载升压试验时, 发现直流融冰装置的两个三相全控桥运行不对称, 融冰装置的两个桥臂的电压之差达到 3.04 kV, 超过了电压偏差保护设定值 3 kV, 电压偏差保护动作, 动作延时 200 ms, 相关波形如图 18 所示, 该图显示牛从甲普通地线 2 分段空载升压试验电压偏差保护动作跳闸波形。

通过分析故障分析装置(ZH-5)记录的数据, 发现装置解锁之后, 整流桥的正极桥臂电压异常, 正极电压(与地线连接)约为 0 kV, 负极电压从零开始正常升压, 装置出现不对称运行故障。随着负极电压的正常升压, 正负极电压偏差逐渐增大, 当这个电压偏差超过电压偏差保护设定值 3 kV 之后, 电压偏差保护动作, 装置停运。经维护人员检修之后, 发现进行空载升压试验的牛从甲普通地线 2 分段中的地线因为绝缘强度不足, 导致直流融冰装置正极接地。

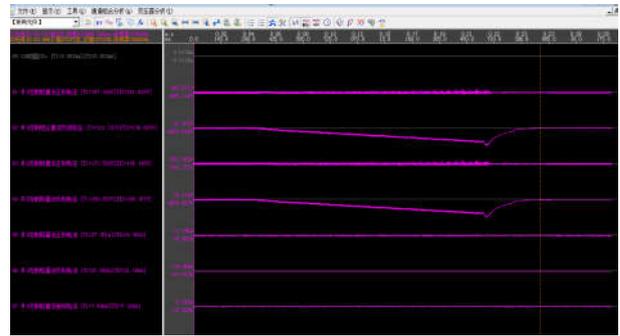


图 18 牛从甲普通地线 2 分段空载升压试验电压偏差保护动作跳闸波形

Fig. 18 Trip waveform of voltage deviation protection operation in no-load voltage boost test of cattle ground line 2 section from a common ground line

对牛寨换流站牛从甲普通地线 2 分段进行带负载空载升压试验时, 发现直流融冰装置的两个三相全控桥运行不对称, 融冰装置的两个桥臂的电压之差达到 12.6 kV, 超过了电压偏差保护设定值 3 kV, 电压偏差保护动作, 动作延时 200 ms, 相关波形如图 19 所示, 该图显示牛从甲普通地线 2 分段空载升压试验电压偏差保护动作跳闸波形。

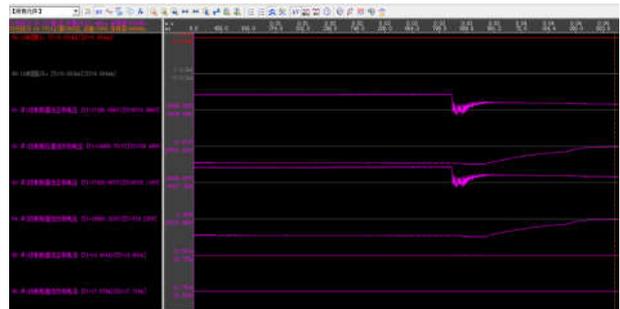


图 19 牛从甲普通地线 2 分段空载升压试验电压偏差保护动作跳闸波形

Fig. 19 Trip waveform of voltage deviation protection operation in no-load voltage boost test of cattle ground line 2 section from a common ground line

通过分析故障分析装置(ZH-5)记录的数据, 发现装置解锁后, 整流桥的正极桥臂电压异常, 正极电压(与地线连接)从 15 kV 上升到 20 kV 过程中, 在电压达到 17.5 kV 时, 正极电压瞬间跌落, 装置出现故障。故障出现时正负极电压偏差超过电压偏差保护设定值 3 kV, 电压偏差保护动作, 装置停运。经维护人员检修之后, 发现进行空载升压试验的牛从甲普通地线 2 分段中的地线因绝缘强度不足, 导致直流融冰装置正极接地。

## 5 结语

本文提出了 12 脉动融冰控制保护系统,可以保证直流融冰装置安全稳定运行,具有完善的触发脉冲产生与反馈流程,可以实时检测到阀组的工作状态,当阀组正常导通时,通过控制保护系统产生所需的融冰电流满足融冰需求,当阀组被击穿时将击穿状态反馈到主控单元,主控单元发出命令,整流器移相闭锁,交流断路器跳闸,之后装置停运。

使用恒电流控制策略确保直流融冰装置稳定运行时输出线路所需的融冰电流。使用溪洛渡右岸牛寨站的地线参数搭建了地线融冰模型,使用云南省多乐站的三相导线参数搭建了三相导线融冰模型。通过对三相导线融冰的仿真验证了本文提到的恒电流控制策略与三相倒闸切换策略配合使用的合理性。

使用直流融冰装置对架空地线进行融冰之前必须进行空载升压试验,空载升压试验的结果是直流融冰装置能否正常使用的依据。本文提出的电压偏差保护可以保护换流站设备安全。利用 PSCAD 仿真软件搭建了直流融冰装置模型与电压偏差保护模型,通过仿真验证了提出的电压偏差保护可以保护换流站设备安全。

本文设计的直流融冰装置控制保护系统在牛寨换流站现场得到了验证,可以保护融冰装置正常运行,满足融冰需求。

## 参考文献

- [1] 谭艳军, 方针. 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, FANG Zhen. 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.
- [2] FIKKE S M, KRISTJÁNSSON J E, NYGAARD B E K. Modern meteorology and atmospheric icing[M]. Netherlands: Springer, 2008.
- [3] 潘家兵, 杨远光, 余洋. 直流融冰装置保护配置[J]. 贵州电力技术, 2011(2): 21-23.  
PAN Jiabing, YANG Yuanguang, YU Yang. DC melting ice device protection configuration[J]. Guizhou Electric Power Technology, 2011(2): 21-23.
- [4] JOURDEN S. 魁北克水电公司高压电网 Lévis 变电站的融冰装置[J]. 南方电网技术, 2009, 3(1): 1-6.  
JOURDEN S. De-icer installation at Lévis substation on hydro Québec's high voltage system[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(1): 1-6.
- [5] 敬华兵, 年晓红, 罗文广. 一种兼具融冰功能的柔性直流输电换流站的研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 65-73.  
JING Huabing, NIAN Xiaohong, LUO Wenguang. Research on a flexible HVDC converter station with ice melting function[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 65-73.
- [6] 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. Control 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.
- [7] 程改红, 康义. 直流融冰装置应用对电力系统运行影响[J]. 南方电网技术, 2014, 8(5): 47-50.  
CHENG Gaihong, KANG Yi. Impact of DC deicer installation upon power system operation[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(5): 47-50.
- [8] 陆佳政, 张允. 基于 12 脉动整流技术的 500 kV 输电线路融冰装置实现[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 3041-3047.  
LU Jiazheng, ZHANG Yun. Realization of de-icing device based on 12-pulse rectification for 500 kV transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 3041-3047.
- [9] 张志强, 周云峰. 基于 6RA80 整流装置的 12 脉动并联整流技术及其应用[J]. 中国高新技术企业, 2016(17): 44-45.  
ZHANG Zhiqiang, ZHOU Yunfeng. 12 pulsating parallel rectifier based on 6RA80 rectifier and its application[J]. China High-Tech Enterprises, 2016(17): 44-45.
- [10] 刘凯, 李明勇. 多相整流谐波抑制技术[J]. 船电技术, 2005, 25(3): 26-29.  
LIU Kai, LI Mingyong. Multiphase rectification technology[J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2005, 25(3): 26-29.
- [11] 陆佳政, 吴传平, 李波, 等. 直流融冰装置拓扑结构的比较研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 83-88.  
LU Jiazheng, WU Chuanping, LI Bo, et al. Comparative research on topology of DC de-icing equipment[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 83-88.
- [12] 张迅, 陈沛龙, 马晓红. 架空地线直流融冰接线方式浅析[J]. 贵州电力技术, 2015, 18(3): 59-61.  
ZHANG Xun, CHEN Peilong, MA Xiaohong. Analysis on the connection mode of DC-ice melting of overhead

- ground wire[J]. Guizhou Electric Power Technology, 2015, 18(3): 59-61.
- [13] 孙棚, 王明新. 交流输电线路大容量固定式直流融冰装置的设计方案[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(12): 102-105.  
SUN Xu, WANG Mingxin. Design scheme of large-capacity fixed DC de-icing device for AC transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(12): 102-105.
- [14] WANG P. Distribution network reconfiguration to prevent wires from icing[C] // Power Engineering Society General Meeting, June 6-10, 2004, Denver, CO, USA.
- [15] 廖峥, 熊小伏, 李新, 等. 基于 BP 神经网络的输电线路舞动预警方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 154-161.  
LIAO Zheng, XIONG Xiaofu, LI Xin, et al. An early warning method of transmission line galloping based on BP neural network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 154-161.
- [16] 李再华, 白晓民, 周子冠, 等. 电网覆冰防治方法和研究进展[J]. 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[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 7-13.
- [17] 周晓华, 张银, 刘胜永, 等. 静止无功补偿器新型自适应动态规划电压控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 77-84.  
ZHOU Xiaohua, ZHANG Yin, LIU Shengyong, et al. Voltage control of static var compensator based on novel adaptive dynamic programming[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 77-84.
- [18] 尹晖, 王晶晶. 输电线路覆冰与微气象参数和覆冰时间的研究[J]. 高压电器, 2017, 53(12): 145-150.  
YIN Hui, WANG Jingjing. Research on transmission line icing and micro-meteorological parameters and icing time[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(12): 145-150.
- [19] PERSONNE P, GAYET J. Ice accretion on wires and anti-icing induced by joule effect[J]. Journal of Applied Meteorology, 2010, 27(2): 101-114.
- [20] 徐彬. 高海拔地区输电线路覆冰机理及除防冰技术研究[J]. 低碳世界, 2017(36): 126-127.  
XU Bin. Research on icing mechanism and de-icing technology of transmission lines in high altitude area[J]. Low Carbon World, 2017(36): 126-127.
- [21] 祁欢欢, 陆振纲, 陈静, 等. 基于模块化多电平的统一潮流控制器换流器和直流侧故障特征分析及保护配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 59-68.  
QI Huanhuan, LU Zhengang, CHEN Jing, et al. Converter and DC side fault characteristics and protection scheme of the unified power flow controller based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 59-68.
- [22] 陈博. 高压直流输电线路继电保护技术的分析[J]. 科技风, 2017(26): 157-158.  
CHEN Bo. Analysis of relay protection technology for HVDC transmission lines[J]. Technology Wind, 2017(26): 157-158.
- [23] XU Yan, LIU Jingyan, FU Yuan. Fault-line selection and fault-type recognition in DC systems based on graph theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 267-276. DOI: 10.1186/s41601-018-0098-9.

收稿日期: 2019-02-25; 修回日期: 2019-05-29

作者简介:

常凤筠(1964—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制(直流融冰设备的控制与保护、光伏发电技术、高压SVC过电压抑制技术、SVC控制策略优化); E-mail: cc.cfj@163.com

景炜(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 2045671425@qq.com

崔旭东(1963—), 男, 硕士研究生, 副教授, 研究方向为计算机软件. E-mail: cui\_xudong@sohu.com

(编辑 葛艳娜)