

## 特高压直流工程的融冰控制保护策略及试验分析

薛海平<sup>1</sup>, 赵森林<sup>1</sup>, 卢亚军<sup>2</sup>, 刘 凯<sup>1</sup>

(1.南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211100;

2.国网北京经济技术研究院, 北京 102209)

**摘要:**极端气候条件和输送功率的限制使得直流电流无法满足融冰要求,导致直流输电线路形成覆冰,这将严重影响特高压直流系统的稳定运行。本文结合酒湖直流工程的融冰功能,阐述了特高压直流输电工程中循环阻冰模式和并联融冰模式运行的主接线拓扑结构与特点,提出了循环阻冰模式下两极联跳的策略和并联融冰模式下直流控制保护功能的修改方案。通过RTDS闭环实时数字仿真验证了融冰功能的可行性和有效性,可为特高压直流输电工程融冰运行方式的直流控制保护系统设计提供参考。

**关键词:**特高压直流;循环阻冰;并联融冰;控制保护系统

**中图分类号:** TM73

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2017)01-0084-07

直流输电工程可实现远距离、大容量输电,高压直流线路可能穿越多个覆冰区域,为防止线路覆冰造成的停电事故<sup>[1]</sup>,在直流输电工程中采用线路融冰技术<sup>[2-4]</sup>。输电线路的冰害事故在一定范围内是可防治的<sup>[5]</sup>。为提高特高压直流线路融冰能力,特高压直流输电工程引入了融冰运行方式<sup>[6]</sup>。直流融冰是解决输电线路覆冰、缓解冰雪灾害的有效方案<sup>[7]</sup>。

目前国家电网公司已投运的向家坝—上海、锦屏—苏南和溪洛渡左岸—浙江金华±800 kV特高压直流输电工程均采用了融冰技术<sup>[8]</sup>,提高了直流线路的防冰、抗冰能力,对保障直流输电工程乃至整个电力系统的安全稳定运行具有重大意义。

在建的酒泉—湖南±800 kV特高压直流输电工程(简称“酒湖直流工程”)是首条直接为湖南供电的特高压直流输电工程,直流线路全长约2360 km,输送容量8000 MW。基于直流线路途径的地区和气候条件,酒湖直流工程设计了循环阻冰和并联融冰两种融冰模式。

循环阻冰是使特高压直流工程的双极功率方向相反,可以在直流双极总功率很小的情况下实现较大的线路电流,防止线路覆冰形成;并联融冰一般是将特高压直流换流器从串联接线方式转换为每站双极高端换流器并联运行,产生很大的融冰电流,可迅速融化已经形成的覆冰。

本文根据特高压直流控制保护系统的技术特点<sup>[9-10]</sup>,结合酒湖直流工程的融冰功能,阐述了特高

压直流工程的循环阻冰模式和并联融冰模式运行的主接线拓扑结构和特点,提出了融冰模式下两极联跳的策略和直流控制保护功能模块的修改方案,并对酒湖直流工程融冰功能的仿真试验及在试验中发现的技术问题进行了剖析,并提出了解决措施,从而为特高压直流输电工程融冰运行方式的直流控制保护系统设计提供参考。

### 1 特高压直流融冰方式和特点

特高压直流输电工程的融冰方法主要有以下几种:

- (1) 采用直流输电的正常运行方式融冰。
- (2) 采用双极反向送电方式融冰。
- (3) 采用双极两个换流器并联运行方式融冰。

以上的融冰方式均是利用电流在输电线路上的热效应来融化直流线路导线的覆冰。循环阻冰模式主要用于预防线路结冰,其原理如上述方法2,并联融冰模式主要用于融化输电线路已有的覆冰,其原理如上述方法(3)。

直流输电正常方式可采用双极平衡大电流运行或者单极金属回线大电流运行进行直流线路融冰,其特点是不需要对系统主接线做任何改动,且控制保护系统的软件也不需要修改,但若只能输送较小功率有可能使线路电流起不到融冰效果。

循环阻冰模式则是一极功率正送,另一极功率反送,可在零功率输送下将输送电流控制在接近额定电流运行。循环阻冰模式主接线如图1所示(图1所示黑色填充的一次设备表示其闭合或运行;无填充的表示其断开或停运),其特点是无需更改系统主接线,适用于较小输送功率下实现线路融冰,

收稿日期:2016-10-17;修回日期:2016-11-19

基金项目:国家电网公司科技项目(特高压直流故障分析及协同处置关键技术研究)

但是双极功率异向传输大电流运行时,若某一极故障跳闸后,健全极大功率传输对两端交流系统的冲击很大,直流控制保护系统软件需要提出切实可行的双极联动跳闸逻辑。

并联融冰模式将构成双极的两个高端换流器通过相应的刀闸、引线改造成相并联的换流系统,在输送相同功率时,可以提高直流线路融冰电流近一倍,但是主接线的更改需要增加额外的设备投资,并且需要修改相应的直流控制保护策略来实现该方式下的系统稳定运行。并联融冰模式整流侧主接线如图2所示(图2所示黑色填充的一次设备表示其闭合或运行;无填充的表示其断开或停运),逆变侧的主接线结构与整流侧相近。

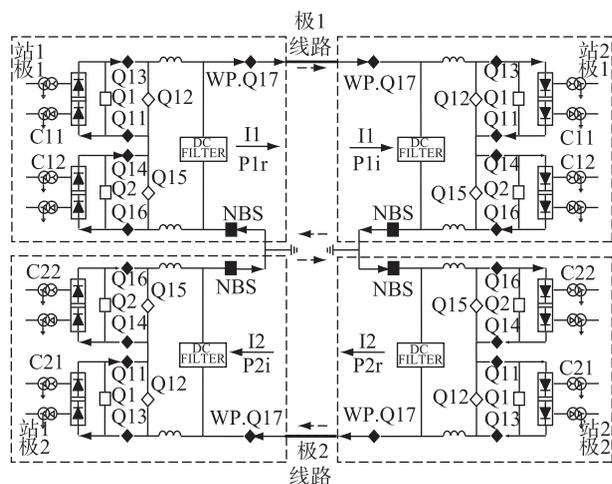


图1 特高压直流循环阻冰模式主接线图

采用直流输电正常方式进行线路融冰,不涉及系统主接线和直流控制保护软件的修改,下面基于酒湖直流工程介绍特高压直流工程的循环阻冰模式与并联融冰模式下两极联跳的策略和直流控制保护功能模块的修改方案。

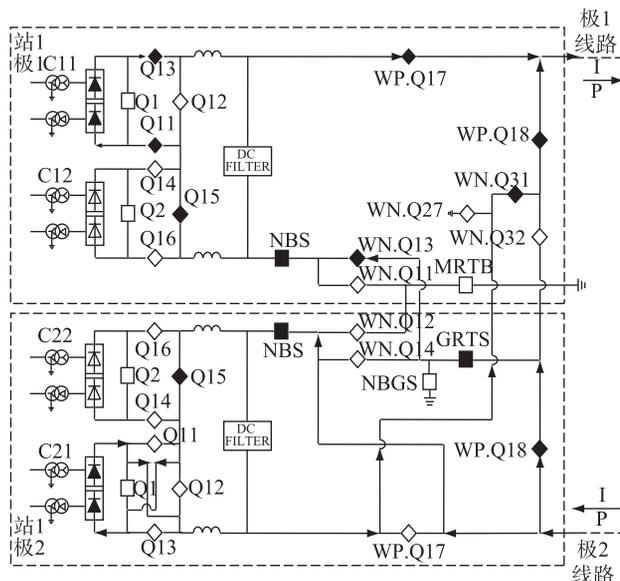


图2 特高压直流并联融冰模式整流侧主接线图

## 2 融冰方式控制与保护策略

特高压直流控制保护系统在整体结构、分层及冗余、功能配置、控制保护策略等方面均与常规直流工程有所区别<sup>[11]</sup>。酒湖直流工程的极控制保护系统按分层冗余原则<sup>[12,13]</sup>进行配置,换流站内的控制系统按功能分为双极控制层、极控制层和换流器控制层等3个层次,如图3所示。

极1与极2的系统配置完全相同且相互独立。双极层控制与极层控制系统一体设计,不设置独立的双极控制主机,将无功控制等双极层功能配置在两极的极控制主机PCP中实现。对功率/电流指令的计算和分配、站间电流指令协调、无功设备投切控制、直流顺序控制等功能,由PCP主机实现。对直流电流、直流电压、熄弧角等闭环控制,以及换流器的解、闭锁等功能,由换流器控制主机CCP实现。

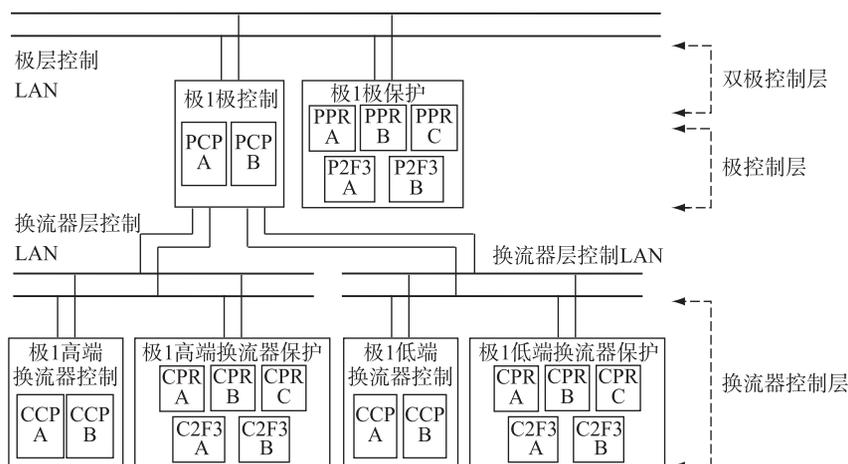


图3 酒湖直流工程极1控制保护系统结构图

PCP 与 CCP 间主要传递电流指令和控制信号。

与直流控制分层相对应,直流保护系统由极保护主机 PPR 和换流器保护主机 CPR 组成,采用三重化配置,通过三取二逻辑确保每套保护单一元件损坏时保护不误动,保证安全性。双极保护功能在 PPR 主机中实现。

### 2.1 循环阻冰模式

循环阻冰模式下两个极的功率方向相反,极 1 功率正送,则极 2 功率反送,反之亦然。酒湖直流工程单极输送的功率为 4000 MW 时可得到额定的直流电流 5000 A,直流系统循环阻冰模式运行的总传输功率很小,甚至可以通过调整电压参考值使某一端换流站总交换功率为 0,而另一端的功率全部用于线路融冰损耗。

直流系统循环阻冰模式运行时,一旦故障造成一极停运,直流系统会转入单极大地回线运行,系统将会出现大功率传输的运行工况,给两侧交流系统造成冲击。为避免这种情况,在极控制主机 PCP 中为这种融冰模式配置了一极闭锁另一极联跳的保护功能,即判断对极故障停运时,立即将本极闭锁跳闸,相应的策略如图 4 所示。

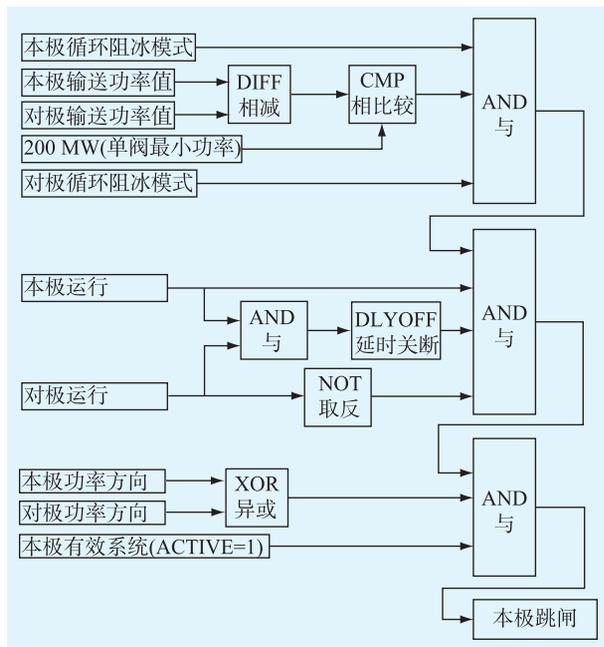


图 4 循环阻冰模式下的两极联跳策略

当两极都处于循环阻冰模式运行,一极因故障停运,另一极判断出本极与对极的功率值差大于 200 MW(单阀组的最小运行功率),则由有效系统(即 ACTIVE 值班系统)执行本极的闭锁跳闸逻辑,实现两极联跳功能。

### 2.2 并联融冰模式

酒湖直流工程的并联融冰模式运行,即通过在

两端换流站增加少量连接线和隔离开关将两个极的高端换流器并联连接,并采用金属回线方式运行。直流输电线路两端的 4 个换流器在同一个直流电压下运行,换流器间的有功调节和分配主要是依靠控制改变换流器的直流电流来实现。酒湖直流系统的 4 个换流器的控制方式分别为:酒泉换流站极 1 高端换流器定电压控制、极 2 高端换流器定电流控制;湘潭换流站双极高端换流器均为定电流控制。

直流控制系统针对并联融冰模式运行需调整以下控制功能(下面提及的开关/刀闸设备的所在位置可参见图 2)。

(1) 直流功率和电流控制:正常运行时整流侧控电流,逆变侧控电压。因并联融冰模式下两站换流器的控制方式发生了改变,需屏蔽电流裕度补偿功能模块 CMR;直流线路电压随着融冰电流的升高而降低,调整低电压限流功能 VDCL 的电压高点值  $U_{D\_High}$ ;直流系统控制方式设定为单极电流控制。

(2) 直流电压控制:正常运行时采用大地回线或金属回线方式,并联融冰模式下主接线拓扑结构发生改变,需修正直流线路电压降计算方法;双极两换流器并联运行,修正极 2 直流电压  $U_D$  的极性。

(3) 直流开关场和模式顺序控制:在正常运行回路中通过设置断口连接形成极 1/极 2 并联金属回线的融冰回路,因极连接和金属回线的状态判断需对 WN.Q14、极 1 的 WP.Q18、极 2 的 Q11、Q13、WP.Q17 进行处理;酒湖直流工程设计的融冰刀闸 WN.Q31、WN.Q32 和 WN.Q27,增加融冰方式接线的开关场顺序控制和融冰模式顺序控制。

(4) 换流变分接头控制:增加融冰方式的分接头控制策略。正常运行时逆变侧的分接头控制关断角  $\gamma$  在  $17^\circ$  左右,因直流系统运行模式的改变,需调整逆变侧分接头调节  $\gamma$  的范围。

(5) 过负荷控制:考虑逆变侧电压不应小于正常方式下 80% 降压水平所对应的逆变侧电压,  $\gamma$  不应大于  $40^\circ$ ,核算后的最大融冰电流限制为 7 300 A,即酒湖直流工程的最大融冰电流为额定电流的 1.46 倍。

(6) 测量接口与监视:因极 2 所采集的直流线路电流  $I_{DNC}$ 、直流中性母线电流  $I_{DNE}$  与正常运行时的极性发生了改变,测量接口需进行相应转换;并联融冰模式采用双极金属回线方式运行,调整对中性母线电压  $U_{DN}$ 、金属回线电流  $I_{DME}$  的监视。

直流保护系统针对并联融冰模式运行需调整以下保护功能。

(1) 极母线保护:正常运行时极母线差流计算

根据换流器的运行状态选择  $I_{DCP}$  (换流器极线侧直流电流)。因主接线拓扑结构的改变,并联融冰模式下极 2 极母线差动保护计算需采用  $I_{DCN}$  (换流器中性线侧直流电流)。

(2) 中性母线保护:正常运行时,中性母线差流计算根据换流器的运行状态选择  $I_{DCN}$ ,而在并联融冰模式下,极 2 中性母线差动保护计算需采用  $I_{DCP}$ 。

(3) 金属回线保护:正常金属回线方式运行时,只允许一个极运行而另一个极处于隔离状态,金属回线接地保护功能在站 2 针对运行极生效。并联融冰模式下两极都处于金属回线方式运行,金属回线接地保护功能在站 2 的两极都生效,检测直流场区域及线路区域的接地故障;退出金属回线纵差保护功能。

(4) 直流线路保护:调整直流线路纵差保护的功能逻辑,采用两极线电流和与对站电流和作差;屏蔽直流线路重启逻辑,一极线路故障联跳对极。

并联融冰模式下两站换流器的控制方式与正常运行时(酒泉站换流器的控制方式为定电流控制,湘潭站换流器的控制方式为定电压控制)差异很大,所以在并联融冰模式运行时设置了两极联跳逻辑,如图 5 所示。

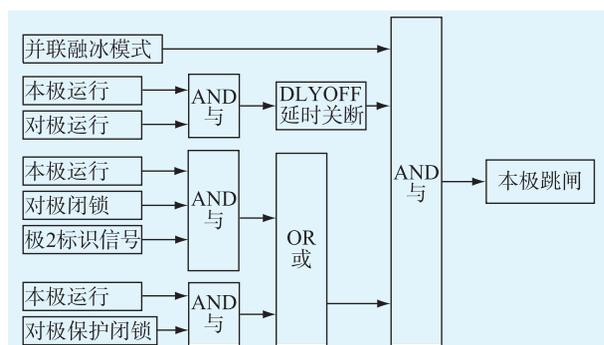


图 5 并联融冰模式下的两极联跳逻辑

当直流系统处于并联融冰模式时,一极因保护性闭锁,另一极将执行并联融冰模式闭锁跳闸;因酒泉站极 1 高端换流器的控制方式为“定电压控制”,其余 3 个换流器的控制方式为“定电流控制”,若先闭锁极 1 高端换流器则极 2 直流系统将失去电压控制,导致极 2 直流系统运行不稳定,因此即使极 1 正常停运,极 2 也将执行闭锁跳闸。

### 3 仿真试验分析

采用先进的 RTDS 仿真试验手段<sup>[14]</sup>,在实验室通过搭建的闭环实时数字仿真系统进行一系列试验,以验证酒湖直流系统融冰方式的控制保护策略。特高压直流系统故障种类较为复杂,根据换流

阀闭锁时是否投旁通对,可以将特高压直流保护闭锁分为 3 种<sup>[15]</sup>:

(1) X 闭锁:不投旁通对闭锁,通常用于阀故障。

(2) Y 闭锁:有条件投旁通对闭锁,通常用于不会对设备施加严重压力的直流侧故障、交流侧故障和极手动闭锁。

(3) Z 闭锁:投旁通对闭锁,通常用于接地故障或直流侧的过电流故障。

### 3.1 控制功能试验

#### 3.1.1 并联融冰模式的起极

将两站直流场设备操作至并联融冰模式(参见图 2 的主接线),待满足直流系统起极条件后,在联合控制模式下以最小电流指令 500 A(0.1 p.u.)进行解锁,先解锁极 1,再解锁极 2。直流系统解锁时两站直流电流、电压的波形见图 6 和图 7。

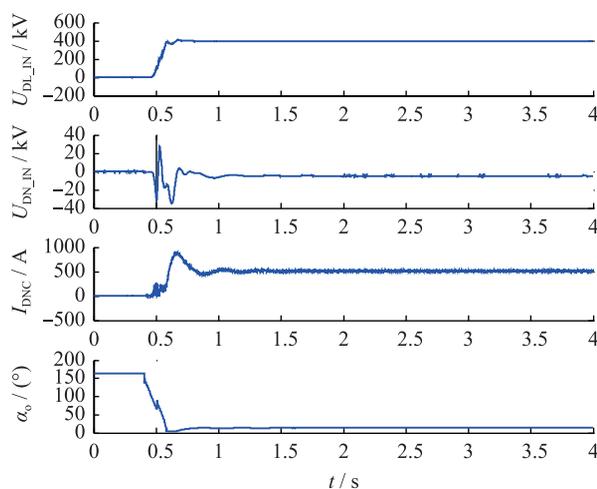


图 6 酒泉站极 1 解锁波形  
 $U_{DL\_IN}$  为直流线路电压; $U_{DN\_IN}$  为直流中性母线电压;  
 $I_{DNC}$  为直流线路电流; $\alpha_0$  为触发角指令

图 6 酒泉站极 1 解锁波形

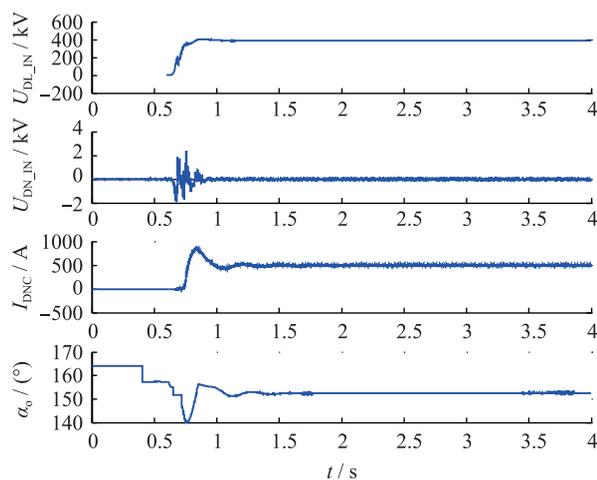


图 7 湘潭站极 1 解锁波形

因两站的极 2 高端换流器都为定电流控制,若

先解锁极 2 则将导致极 2 运行不稳定,所以必须先解锁极 1。

### 3.1.2 并联融冰模式的停极

两极直流电流降至 500 A 后,将控制模式由“联合控制”切换至“独立控制”,待闭锁整流站极 2 后闭锁极 1,再闭锁逆变站的极 2 和极 1。直流系统闭锁时两站直流电流、电压的波形见图 8 和图 9。

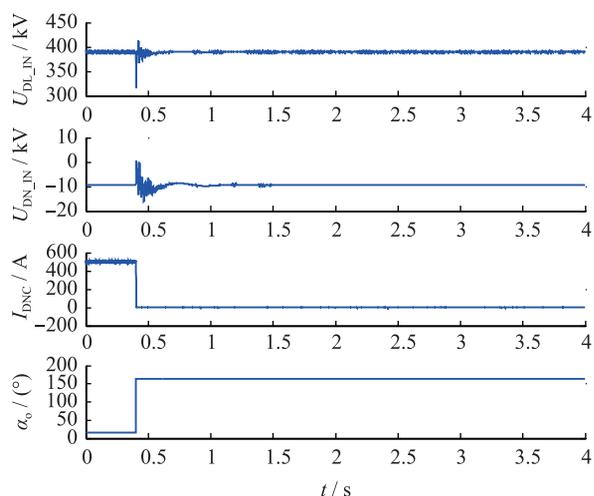


图 8 酒泉站极 2 闭锁波形

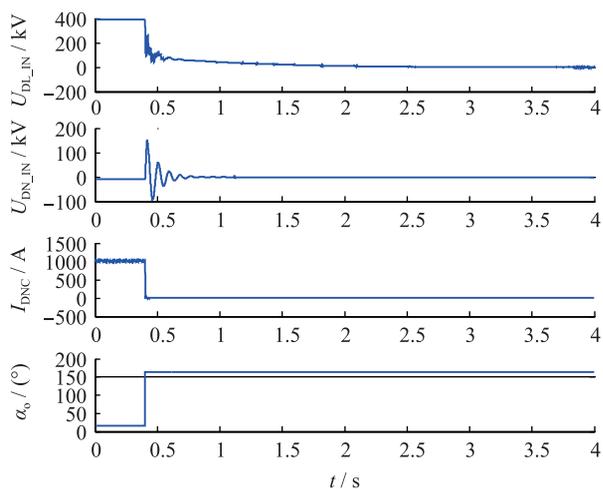


图 9 酒泉站极 1 闭锁波形

若  $I_{R1}, I_{R2}$  表示为整流站极 1、极 2 高端换流器的直流电流,  $I_{I1}, I_{I2}$  表示为逆变站极 1、极 2 高端换流器的直流电流,忽略直流线路的电流损失,根据电流平衡原理:

$$I_{R1} + I_{R2} = I_{I1} + I_{I2} \quad (1)$$

每个换流器的最小运行电流为 0.1 pu,所以当整流站极 2 闭锁后,各换流器的直流电流关系转变为:

$$I_{R1} = I_{I1} + I_{I2} \quad (2)$$

所以整流站极 2 闭锁后,整流侧极 1 的直流电流会迅速升至 1000 A。

若在联合模式下闭锁极,则整流站和逆变站同时闭锁,逆变站的阀组旁路开关 Q1 将自动合上,则

逆变侧将通过 Q1 使极线路短路,导致直流线路低电压保护跳闸。所以在退出并联融冰模式运行需切换至独立控制模式,而且按照先闭锁极 2 再闭锁极 1 的顺序操作。

### 3.1.3 并联融冰模式电流的提升

并联融冰模式下两极解锁成功运行稳定后,可将直流电流提升至最大融冰电流 7300 A,如图 10 所示。酒湖直流工程并联融冰模式运行时最小融冰电流和最大融冰电流所对应的相关参数见表 1。

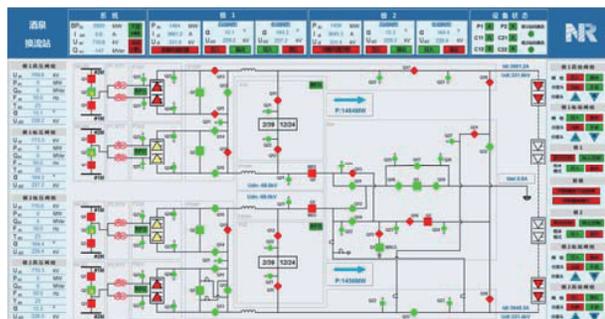


图 10 酒泉站 7300 A 融冰电流运行界面

表 1 酒湖直流工程并联融冰模式运行参数

$I_{de}/A$	$\alpha_r/(^\circ)$	$\gamma_i/(^\circ)$	$U_{dr}/kV$	$U_{di}/kV$	TCr	TCi	$P_r/MW$	$P_i/MW$
1000	15	23.8	400	381	13	17	400	377
7300	15	34.2	400	264	23	1	2920	1924

注:  $I_{de}$  为融冰电流;  $\alpha_r$  为整流侧触发角;  $\gamma_i$  为逆变侧熄弧角;  $U_{di}$  为整流侧直流电压;  $U_{dr}$  为逆变侧直流电压; TCr 为整流侧分接头档位; TCi 为逆变侧分接头档位;  $P_r$  为整流侧输送功率;  $P_i$  为逆变侧接收功率。

### 3.1.4 循环阻冰模式两极联跳

将直流系统操作至循环阻冰模式(参见图 1 的主接线),待满足起极条件后以最小电流指令 0.1 p.u. 分别解锁两极。循环阻冰模式下,两极解锁的顺序没有影响。当两极解锁成功运行稳定后,模拟站 1 极 1 母线 100 ms 接地故障。站 1 极 1 极母线差动保护动作,执行 Z 闭锁;站 1 极 2 通过循环阻冰模式下两极联跳逻辑跳闸,执行 Y 闭锁。站 1 极 1 故障动作后极 2 联跳的波形见图 11。

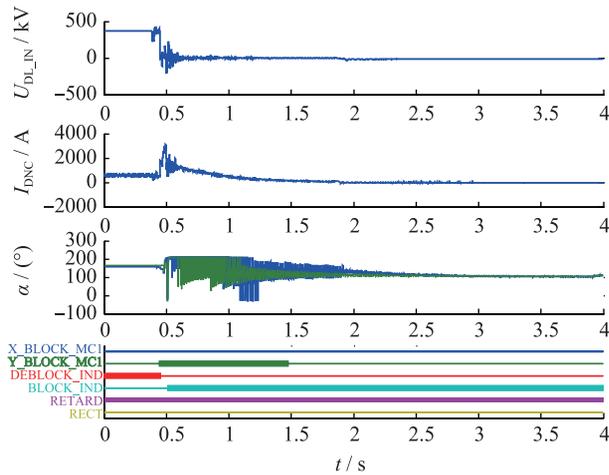
## 3.2 保护功能试验

所有保护功能试验都在并联融冰模式下双极最小电流运行的工况下开展。

### 3.2.1 整流侧换流器故障

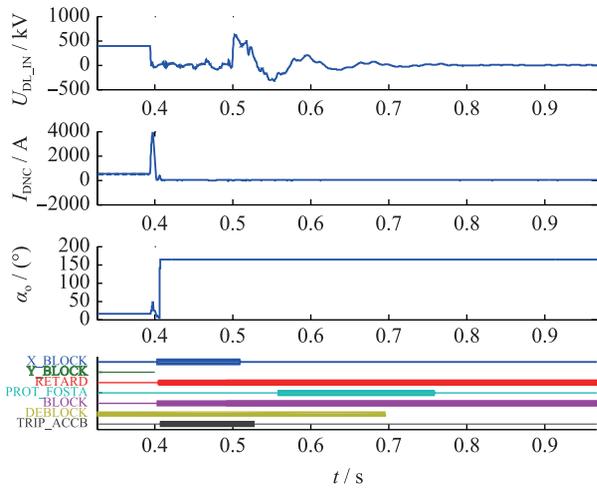
模拟整流站极 1 高端换流器高压侧接地故障。故障动作时的波形见图 12 和图 13。

当整流站极 1 高端换流器发生接地故障后,换流器差动保护动作,执行 X 闭锁。根据两极联跳逻辑,整流站极 2 高端换流器通过并联融冰模式跳闸,执行 Y 闭锁。



—为高端换流器触发角;—为低端换流器触发角;X\_BLOCK为X闭锁;Y\_BLOCK为Y闭锁;DEBLOCK为解锁;BLOCK为闭锁;RETARD为移相;RECT为整流侧

图11 极2阻冰模式跳闸波形



PROT\_FOSTA 为对站保护闭锁;TRIP\_ACCB 为跳进线开关

图12 酒泉站极1高端换流器故障波形

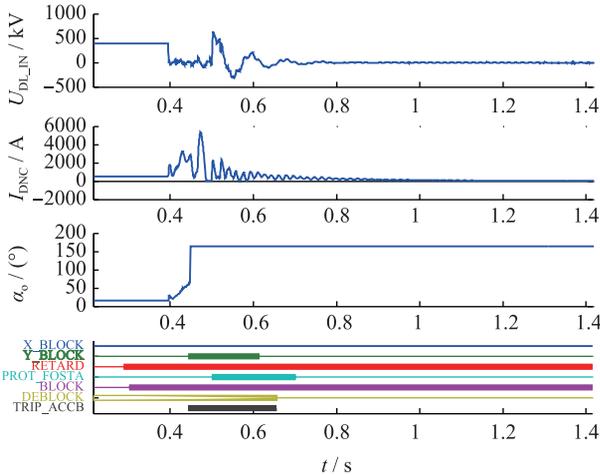
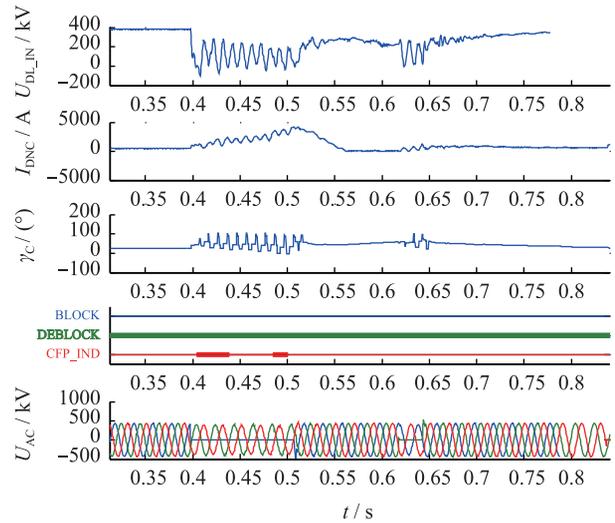


图13 酒泉站极2高端换流器跳闸波形

### 3.2.2 逆变侧交流系统故障

模拟逆变侧交流系统 100 ms 单相接地故障。故障动作时的波形见图 14。



$\gamma_c$  为关断角;—为交流 A 相电压;  
—为交流 B 相电压;—为交流 C 相电压

图14 湘潭站交流系统故障波形

当逆变侧交流系统发生短时故障后,通过换相失败预测增加 GAMMA 角,稳定直流系统。

### 3.2.3 直流线路故障

模拟极 1 直流线路中点 100 ms 接地故障。故障动作时的波形见图 15 和图 16。

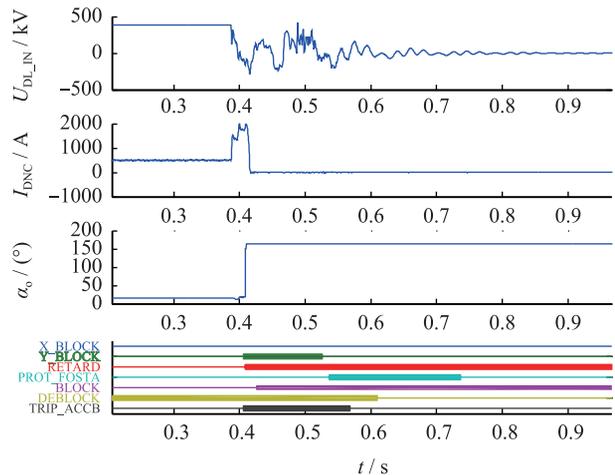


图15 酒泉站极1直流线路故障波形

并联融冰模式下,整流侧控制直流电压,屏蔽直流线路重启策略。当直流线路故障后,整流侧电压突变量保护动作,经直流线路保护重启动跳闸,执行 Y 闭锁。逆变侧接收到对站保护动作信号,通过并联融冰模式跳闸逻辑执行 Y 闭锁。

### 3.2.4 金属返回线/极中性线故障

若极 2 直流线路(并联融冰模式下极 2 直流线路为金属返回线)发生接地故障,逆变侧两极的金属回线接地保护请求移相,整流侧接收对站请求移相命令后,通过直流线路保护重启动跳闸,执行 Y 闭锁。逆变侧再通过并联融冰模式跳闸逻辑执行 Y 闭锁。

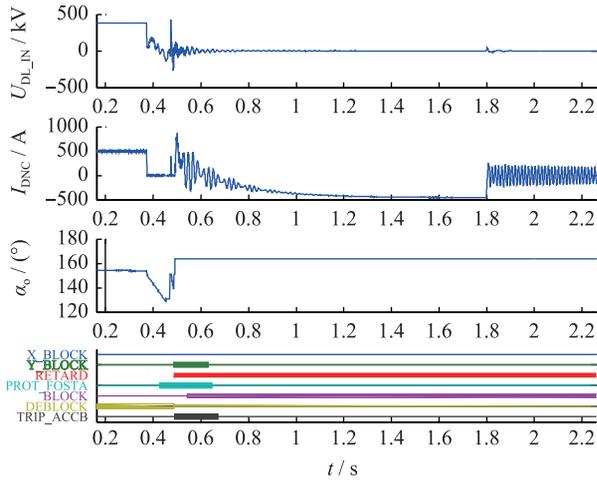


图 16 湘潭站极 1 直流线路故障波形

若整流侧极 2 极中性线发生接地故障,动作后果与金属返回线接地故障相同。

#### 4 结束语

特高压直流工程的额定输送电流大、输送距离远,当处于大电流运行时,电流在导线上产生的热量可以缓解线路覆冰,达到一定的融冰效果。但冰雪灾害易发时期且输电系统难以安排足够功率使直流输电系统运行大电流工况,则容易发生覆冰倒塔。基于特高压直流工程的特点,研究直流线路融冰方案和相关的控制保护策略具有重要意义。

本文结合酒湖直流工程阐述了循环阻冰模式下双极联跳的策略和并联融冰模式下的直流控制保护功能的修改方案,通过 RTDS 实时数字仿真验证了融冰策略的有效性,并将在现场调试时进一步测试融冰功能的可靠性,对今后特高压直流工程融冰运行方式的控制保护系统设计具有一定的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] 李庆峰, 范 峥, 吴 穹, 等. 全国输电线路覆冰情况调研及事故分析[J]. 电网技术, 2008, 32(9): 33-36.
- [2] 马玉龙, 徐玲玲, 石 岩, 等. 三广直流工程融冰运行方式仿真试验[J]. 电网技术, 2008, 32(19): 22-25.

- [3] 常 浩, 石 岩, 殷威扬, 等. 交直流线路融冰技术研究[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 1-6.
- [4] 张 帆, 徐桂芝, 荆 平, 等. 直流融冰系统保护配置与操作策略[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 170-174.
- [5] 吴元华. 输电线路覆冰的潜在危害及对策研究[J]. 江苏电机工程, 2008, 27(6): 18-21.
- [6] 庞广恒, 曾南超, 杨万开. 特高压直流系统融冰运行方式试验与工程调试[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 22-27.
- [7] 吴林平, 田 杰, 李长伟, 等. 大容量直流融冰系统在 500 kV 康定变的应用[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(3): 26-30.
- [8] 杨万开, 吴庆范, 庞广恒. 特高压直流融冰方式控制策略及试验分析[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3313-3319.
- [9] 李立涅. 特高压直流输电的技术特点与工程应用[J]. 电力设备, 2006, 7(3): 1-4.
- [10] 刘宝宏, 殷威扬, 杨志栋, 等.  $\pm 800$  kV 特高压直流输电系统主回路参数研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 17-21.
- [11] 陈小军, 何露芽, 孙 杨, 等.  $\pm 800$  kV 特高压直流与  $\pm 500$  kV 常规直流控制保护系统比较分析[J]. 华东电力, 2012, 40(3): 462-466.
- [12] 陶 瑜, 韩 伟. 高压直流输电控制保护技术及其应用[J]. 电力设备, 2004, 5(11): 4-8.
- [13] 石 岩, 韩 伟, 张 民, 等. 特高压直流输电工程控制保护系统的初步方案[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 11-15.
- [14] 卢志良, 刘 涛, 赵青春. 直流融冰运行模式下直流故障对交流保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 112-175.
- [15] 孙 文, 禹 佳, 腾予非.  $\pm 800$  kV 特高压直流输电工程保护闭锁策略分析[J]. 四川电力技术, 2014, 37(6): 73-77.

#### 作者简介:



薛海平

薛海平(1980—),男,江苏江阴人,工程师,从事直流输电控制保护、电力系统自动化的开发和研究;

赵森林(1981—),男,安徽桐城人,工程师,从事直流输电控制保护的开发和研究;

卢亚军(1982—),男,河南虞城人,工程师,从事特高压直流成套设计及仿真分析;

刘 凯(1986—),男,江苏宿迁人,工程师,从事特高压直流控制保护的开发和研究。

### Analysis of Control and Protection Strategy and Test for De-icing mode in UHVDC Project

XUE Haiping<sup>1</sup>, ZHAO Senlin<sup>1</sup>, LU Yajun<sup>2</sup>, LIU Kai<sup>1</sup>

(1. Nanjing Nari-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211100, China;

2. State Grid Economic Research Institute, Beijing 102209, China)

**Abstract:** Because of extreme weather conditions and the limitation of the transmission power, the DC current can not meet the requirement of de-icing. And it will lead to the formation of the DC transmission line icing, affecting the stability of the UHVDC system seriously. Combined with the de-icing function in Jiuquan-Hunan UHVDC project, the main connection topological structure and characteristics of the round resistance ice mode and hybrid de-icing mode for the UHVDC project is described in this paper, and then the strategy of bipolar synchronous tripping in round resistance ice mode and the modified scheme of UHVDC control and protection function in hybrid de-icing mode are proposed. At last, the feasibility and effectiveness of the de-icing function are verified by RTDS closed loop real-time digital simulation. Reference is provided for the design of UHVDC control and protection system for the de-icing operation mode.

**Key words:** UHVDC; round resistance ice; hybrid de-icing; control and protection system