

柔性直流换流站阀冷系统方案及其工程应用

阀冷系统是柔性直流换流站最重要的辅助系统之一，直接关系到换流阀的安全稳定运行。以厦门柔性直流工程为研究对象，对柔性直流换流站阀冷系统方案及其工程应用进行研究，包括阀冷系统的组成、主要回路及设备的作用、阀冷控制保护系统的结构、与极控制系统接口特性、控制逻辑及阀冷保护功能的配置情况。为了验证阀冷系统的冗余性能，提出了阀冷冗余试验方案。试验结果表明，阀冷参数设置不合理，并提出了改进措施，解决了阀冷冗余性能不足的问题。此外，漏水事故导致的阀冷泄漏保护跳闸也证明了阀冷保护动作的正确性，停运直流系统，确保了换流阀安全。

胡文旺 唐志军 林国栋 李 超 晁武杰/国网福建省电力有限公司电力科学研究院

0 引言

柔性直流输电是世界上最先进的输电技术之一，其在新能源并网、孤岛供电、异步联网和城市配电网供电等领域具有极大的技术应用优势^[1-7]。

换流阀是柔性直流输电工程中交直流转换的核心设备，在长期的运行过程中，其电力电子元器件会由于损耗而产生热量使得换流阀温度升高，若不能将这些热量及时释放，电力电子元器件将被烧坏，造成直流系统停运^[8]。

阀冷系统是柔性直流输电工程中最重要的辅助设备，其能将换流阀产生的热量通过冷却水排放到阀厅外，保证换流阀运行温度在正常范围内，因此阀冷系统安全稳定与否直接关系到柔性直流输电系统安全运行。

厦门柔性直流输电工程为真双极接线输电系统，直流电压为 ± 320 kV，直

流输送容量为1 000 MW，直流电流为1 600 A^[9-10]。新建浦园、鹭岛两个换流站，各站极1和极2配置两套完全相同且相互独立的阀冷却系统。单极500 MW的功率对阀冷系统的可靠性提出了更高的要求。

目前对阀冷系统的研究主要集中在两个方面：一是从隐患排查的角度对换流站现有阀冷系统存在的隐患风险进行分析并提出治理意见^[11-13]；二是针对阀冷事故导致的直流停运原因进行分析，指出薄弱环节，提出改进措施^[14-16]。然而少有文献能够结合实际工程对柔性直流输电阀冷控制保护技术进行系统的、详尽的分析与描述。

本文结合厦门柔性直流输电科技示范工程，详细论述了柔性直流输电阀冷系统的组成、主要回路及设备的作用、阀冷控制保护系统的结构、与极控制系统的接口特性、控制逻辑及保护功能的配置情况，为了验证阀冷系统的冗余性能，提出了阀冷冗余试验方案，试验中发现阀冷参数设置不合理，并提出了改进措施。

1 阀冷系统的组成

阀冷系统由阀内冷系统和阀外冷系统两部分组成，其冷却回路如图1所示。

1.1 阀内冷系统

阀内冷循环系统主要由主循环泵、主循环过滤器、电加热器、脱气罐、膨胀罐、离子交换器、精密过滤器、原水罐、补水泵、原水泵、冷却介质及管路



胡文旺/工程师

关键词/Keywords

柔性直流 ·
换流阀 ·
阀冷系统 ·
冗余 ·
泄漏保护 ·

国家电网公司科技项目(52130415000U)。

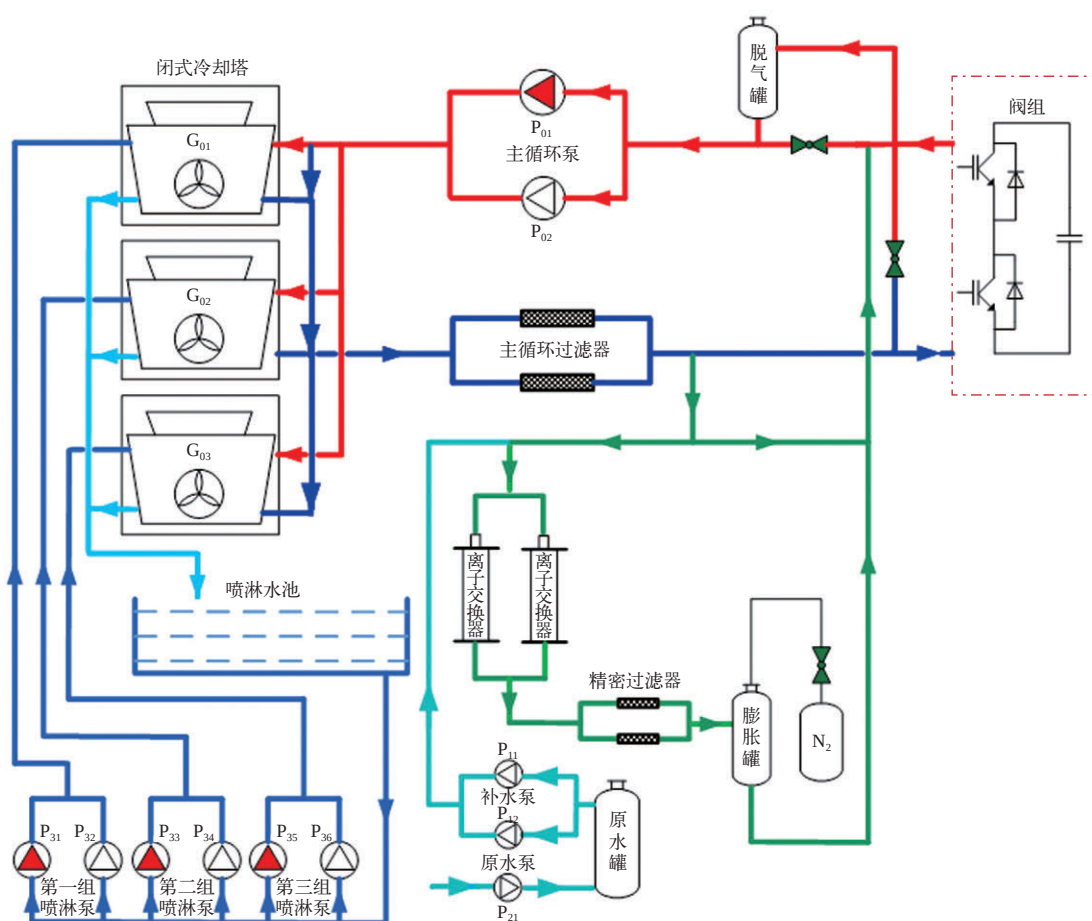


图1 阀冷系统冷却回路

等组成，通过以超纯水为冷却介质对换流阀进行冷却。

1.2 阀外冷系统

阀外冷循环系统主要由闭式冷却塔、喷淋泵组和喷淋水处理系统等组成，通过闭式冷却塔的风机和喷淋水对内循环水进行冷却。

1.3 阀冷系统工艺流程

阀冷系统工艺流程如下。

1) 冷却系统工作时，冷却水在阀塔内吸收换流阀的热量后温度将上升，升温后的热水由主循环泵驱动进入室外闭式冷却塔内的换热盘管。

2) 喷淋泵从水池中抽水后均匀持续喷洒到冷却塔内的换热盘管表面，同时风机吸入空气并通过换热盘管，使一部分喷淋水因蒸发作用变为气态，未能蒸发的喷淋水通过冷却塔集水箱回流到循环水池，再进入喷淋泵。喷淋水在蒸发过程中

将吸收大量的热量，换热盘管内的冷却水将得到冷却。

3) 降温后的冷却水由循环水泵送回到换流阀，经过脱气罐排气后回到主循环泵，如此周而复始地循环。

2 阀冷系统主要回路及设备

2.1 主循环冷却回路

通过主循环管道将换流阀、主循环泵、外冷系统、主循环过滤器和补水泵等串接成主循环回路。

(1) 主循环泵

提供密闭循环流体所需动力，一主一备，每台为100%容量，设过电流和过热保护，泵进出口设波纹补偿器减振。如果运行泵因异常或者故障而不能提供额定压力时马上切换至备用泵，并发

出报警信号。为了平衡磨损程度，一般运行泵连续运行一段时间（如168 h）后将自动切换，切换时系统流量和压力保持稳定。

（2）主循环过滤器

置于换流阀进水处，过滤器设置两套，一主一备，用于过滤刚性颗粒以防损伤阀体，过滤器前后设置检修阀门、压差表，顶部设手动排气阀，正常运行时，可对单台过滤器滤芯进行在线清洗。

（3）脱气罐

置于主循环泵进口处，罐顶设通体不锈钢自动排气阀，可自动排出冷却水中气体。脱气罐也作为加热罐使用，阀内冷系统电加热器安装于脱气罐内。

（4）电加热器

置于主循环冷却水回路脱气罐内，冬天室外环境温度极低或冷却水进阀温度下降至设定值时，起动电加热器，防止冷却水进阀温度过低导致沿程管路及换流阀元器件的损伤；冷却水进阀温度下降至接近露点时，也需起动电加热器，防止换流阀散热器或管路表面结露影响绝缘。

2.2 水处理去离子回路

水处理去离子回路并联于主循环回路，主要由离子交换器、精密过滤器及相关附件组成。

（1）离子交换器

离子交换器对主循环回路中的部分冷却介质进行纯化，达到长期维持极低电导率的目的。其中的离子交换树脂具有吸附容量大的特点，专用于微量离子的去除。离子交换器设两台，一主一备，当其中一台的树脂失效时，发出报警信号，提示更换离子交换树脂。手动切换后可在线更换而不影响阀冷系统运行。

（2）精密过滤器

用于拦截可能破碎流出的树脂颗粒，设置两套，一主一备，运行中可在线更换。

2.3 补水系统回路

补水系统由原水泵、原水罐和自动补水泵等组成。

（1）原水泵及原水罐

原水泵用于将外部水源补至原水罐内，原水罐设置高低液位开关，低液位时停止补水泵运行，防止补水泵吸入空气，高液位时原水泵停止运行。原水罐顶部设置通气电磁阀，当原水泵、补水泵运行时，电磁阀打开排气、进气。

（2）补水泵

补水泵设两台，一主一备，当冷却介质因少量外渗或电解损失，膨胀罐液位降低到补水液位时，补水泵自动起动，补至停泵液位时自动停止。

2.4 恒压系统回路

恒压系统回路主要由膨胀罐、N₂稳压装置及其他附件组成。

膨胀罐置于阀冷系统水处理回路，与N₂稳压装置联动以保持管路的压力恒定、与补水系统回路和去离子回路共同完成介质的补给。膨胀罐底部设置曝气装置，增加N₂溶解度，脱气时更有效地带走介质内氧气。膨胀罐可缓冲阀冷系统因温度变化而产生的体积变化。

2.5 外循环冷却回路

（1）闭式冷却塔

阀外冷系统对内冷却循环水进行降温是通过冷却塔实现，冷却塔同时具备外部水喷淋和风机空气冷却两种功能。前者通过外冷水热交换和蒸发的方式将热量吸走，后者根据进阀水温的不同控制风机起停和风机变频调速实现温度调节。每套外冷却系统包含三台冷却容量为总需求容量50%的冷却塔，即按照3×50%的容量配置。

（2）喷淋泵组

每两台喷淋泵形成一个泵组单元，每一个泵组单元对应一组闭式冷却塔，三个泵组单元相互独立，互不影响，提高了喷淋泵运行可靠性。

（3）喷淋水处理系统

喷淋水处理系统主要包括活性炭过滤器、全自动过滤器、软化装置、加药装置和排污系统等，具有过滤水中杂质、杀菌和阻垢及排污等功能。

3 阀冷控制保护系统

3.1 控制保护系统结构

如图2所示，阀冷控制系统采用CPU冗余设置。两套系统同时采样、同时工作，但只有一个在激活状态，双主机均故障时闭锁换流阀。阀冷控制保护系统按完全双重化配置，两套传感器交叉接入两套阀冷控制保护系统。每套完整、独立的阀冷控制保护装置能处理可能发生的所有类型的故障。正常情况下，双重化配置的阀冷控制保

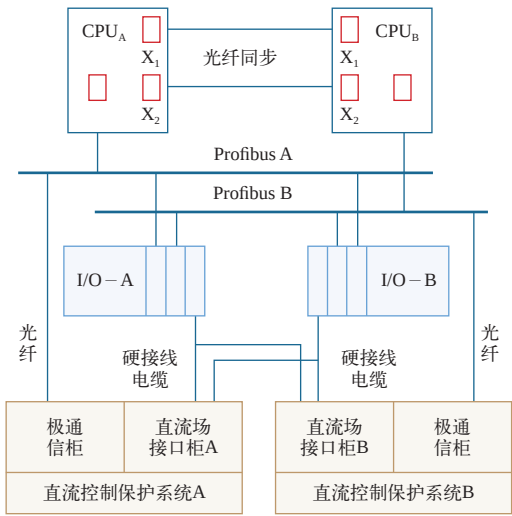


图2 阀冷控制保护系统结构

护系统均处于工作状态，允许短时退出一套。从一个系统转换到另一个控制系统时，不会引起高压直流输电系统输送功率的降低。同时当主控制保护系统保持在运行状态时，允许对备用系统进行维修和改进。

3.2 与极控制保护接口

阀冷控制保护系统与换流阀直流控制保护系统（以下简称上位机）采用如图2所示方式进行通信。

1) 开关量干接点。上位机下行信号和阀冷系统上行信号。

2) 模拟量信号。冷却水进阀温度、冷却水出阀温度、阀厅温度、环境温度和冷却水流量。

3) Profibus报文。在线参数、设备状态及阀冷系统报警信息。（阀冷系统作为上位机的子站），Profibus总线与上位机通信采用光缆。

对信息量较大的在线参数、设备状态监测及阀冷系统报警信息报文，阀冷系统通过两路Profibus总线与直流控制保护系统进行通信。

对实时性要求较高的远程控制信号和阀冷系统报警信号，通过开关量接点与直流控制保护系统进行通信，具体信号如表1、表2所示。

表1 开关量干接点上行信号

序号	信号名称	说明
1	预警信号	一般警报
2	跳闸信号	严重警报，直流控保系统接收到此信号应立即停运直流系统
3	请求停运信号	接收此信号后，直流系统确认停运后延时10 s停运阀冷系统
4	运行状态信号	阀冷系统正在运行
5	功率回降信号	当阀冷系统出阀温度高和进出阀温差超过定值时发出
6	准备就绪信号	收到此信号方可投运直流系统，否则不可投运；常开接点；阀冷A系统或B系统准备就绪即阀冷系统准备就绪
7	失去冗余信号	常开接点；当外冷风机失去冗余冷却量时，接点接通
8	Active信号	阀冷控制系统正常

表2 开关量干接点下行信号

序号	信号名称	说明
1	远程起动信号	阀冷系统准备就绪信号有效时，方可下发远程起动信号
2	远程停止信号	停止阀冷系统，阀未闭锁时无法停止阀冷系统
3	远程切换主循环泵	实现两台主循环泵的切换
4	换流阀Block闭锁	换流阀是否闭锁状态
5	换流阀Deblock闭锁	换流阀是否解锁状态
6	阀控制保护系统Active信号	阀控制保护系统正常

3.3 控制逻辑

阀冷控制系统是阀内外冷控制的核心部件，基于温度控制的闭环控制模式，对换流阀实施有效的冷却，主要完成主循环泵、外冷水喷淋泵和补水泵等的起停/切换等控制功能，根据进阀水温的高低控制风扇的起停及转速实现对内冷水进水温度的调节，并控制阀门设备的位置、膨胀水箱及外冷水池的水位等。

下面以主循环泵 P_{01} 控制为例说明控制系统的逻辑。

(1) 正常切泵

当前泵工频运行时，当阀冷系统出现以下情况时，系统切换到备用泵软起动转工频运行，同时当前泵停止。情况包括：

1) 两台主循环泵可通过主泵切换周期（可设定）实现主泵周期切换功能。如 P_{01} 主泵连续无故障工频运行168 h后，启动主循环泵自动切换逻辑， P_{02} 主泵投入软起动转工频运行同时 P_{01} 主泵停止。

2) 两台主循环泵可通过阀冷就地操作面板实现主泵就地切换功能。

3) 两台主循环泵可通过主控系统操作面板实现主泵远程切换功能。

图3为正常切泵逻辑。

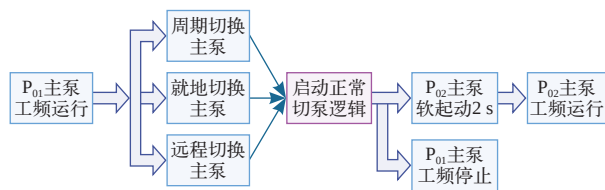


图3 正常切泵逻辑

(2) 故障切泵

当前泵工频运行时，当阀冷系统出现以下故障时，系统均自动切换到备用泵软起动转工频运行，同时当前泵停止。故障情况包括：

1) 主泵过热报警。主循环泵轴承设置热敏电阻实时进行温度检测，当温度传感器检测值超过主泵过热保护定值时，控制系统报出相应“主循环泵过热”。

2) 主循环泵故障报警。主循环泵工频回路设置断路器保护和热继电器保护，当断路器脱扣或热继电器动作时，控制系统报出相应“主循环泵工频回路故障”。

图4为故障切泵逻辑。

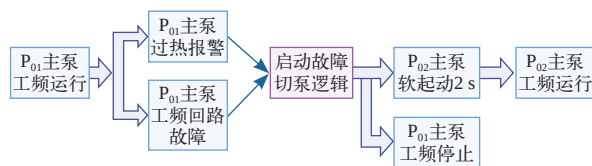


图4 故障切泵逻辑

(3) 压力低切泵

系统压力低报警。阀冷系统主循环泵出口设置两台压力变送器，进阀压力变送器设置三台。当任意一台主泵出水压力变送器测量值低于保护定值与任意一台进阀压力变送器测量值低于保护定值时，延时3 s后，切换备用泵工频直接运行，同时控制系统报出“阀冷系统压力低切换主泵，请检查并确认”报警。此报警存在时，系统压力低主泵不再执行切换。图5为压力低切泵逻辑。

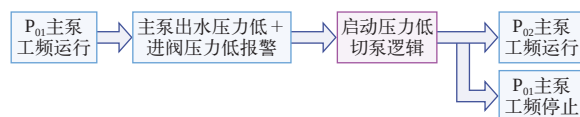


图5 压力低切泵逻辑

(4) 切泵失败回切

当前主循环泵正常切换至备用泵运行失败时，控制系统检测出相关报警后回切到原运行主泵运行。回切情况包括：当前运行主泵过热报警、主循环泵故障报警和“主泵出水压力低 + 进阀压力低”报警。图6为切泵失败回切逻辑。

3.4 保护类型及逻辑

阀冷控制保护系统通过监视内冷水的进阀温度、流量、压力、电导率以及膨胀水箱的水位判断系统的运行状态。当出现运行不正常或阀冷控制电源掉电、阀冷双CPU故障时，换流阀继续运行有损害危险，阀冷系统会发跳闸信号，换流阀需立即停运。具体保护类型及其逻辑如下。

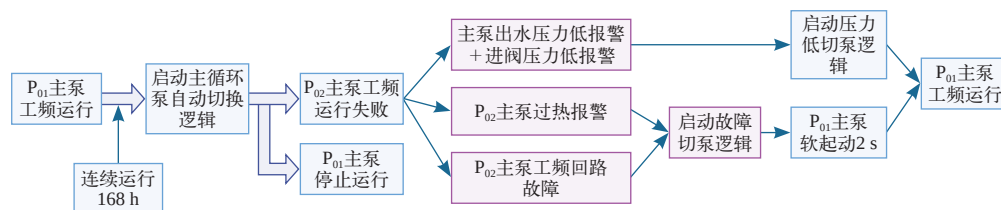


图6 切泵失败回切逻辑

(1) 冷却水温度保护

在换流阀进口处安装独立冗余配置的三台温度变送器，阀冷保护系统采用三取二原则计算三台冷却水进阀温度变送器之间的偏差，如偏差值不相等，则取偏差值较小的两仪表进行控制；如偏差值相等，则取在线值较大的两仪表

再进行控制。当三选二后的二台冷却水进阀温度变送器检测值同时超过进阀温度超高设定值时，阀冷控制保护系统发出跳闸保护。保护逻辑原理如图7所示。

1) 当一台冷却水进阀温度变送器故障，同时另两台中任一冷却水进阀温度变送器检测值超

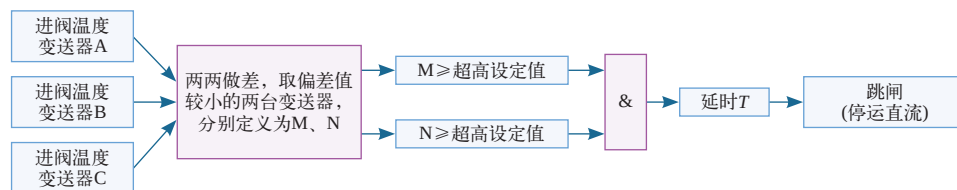


图7 冷却水温度保护逻辑

过进阀温度超高设定值时，阀冷控制系统发出跳闸保护。

2) 当二台冷却水进阀温度变送器故障，同时第三台冷却水进阀温度变送器检测值超过进阀温度超高设定值时，阀冷控制系统发出跳闸保护。

3) 当三台冷却水进阀温度变送器故障，阀冷控制系统发出跳闸保护。

(2) 流量及压力保护

流量变送器及进阀压力变送器均为三重化冗余配置，设有流量超低和进阀压力超高报警，其逻辑原理与图7类似，出现其中一个时仅为报警。当两者在逻辑上出现以下组合时，阀冷控制系统发出跳闸保护。

1) 当有两台流量变送器检测值同时低于流量超低设定值，并且有任意一台进阀压力变送器检测值低于压力低设定值，或者高于压力高设定值时，阀冷控制系统发出跳闸保护。

2) 当有一台流量变送器故障，另两台中任一流量变送器检测值低于流量超低设定值，并且

有任意一台进阀压力变送器检测值低于压力低设定值，或者高于压力高设定值时，阀冷控制系统发出跳闸保护。

3) 当有两台流量变送器故障，另一台流量变送器检测值低于流量超低设定值，并且有任意一台进阀压力变送器检测值低于压力低设定值，或者高于压力高设定值时，阀冷控制系统发出跳闸保护。

4) 当两台进阀压力变送器检测值同时低于进阀压力超低设定值，并且有一台流量变送器检测值低于流量低设定值时，阀冷控制系统发出跳闸保护。

5) 当一台进阀压力变送器故障，另两台中任一进阀压力变送器检测值低于压力超低设定值，并且有一台流量变送器检测值低于流量低设定值时，阀冷控制系统发出跳闸保护。

6) 当两台进阀压力变送器故障，另一台进阀压力变送器检测值低于压力超低设定值时，并且有一台流量变送器检测值低于流量低设定值时，阀冷控制系统发出跳闸保护。

(3) 液位保护

膨胀罐液位变送器也是采用三台冗余配置，其保护动作原理与冷却水温度保护类似，当检测值超过膨胀罐液位超低设定值时，阀冷控制系统

发出跳闸保护。

(4) 泄漏保护

类似图7原理选取两台液位变送器M、N后，执行如图8所示的保护动作原理。

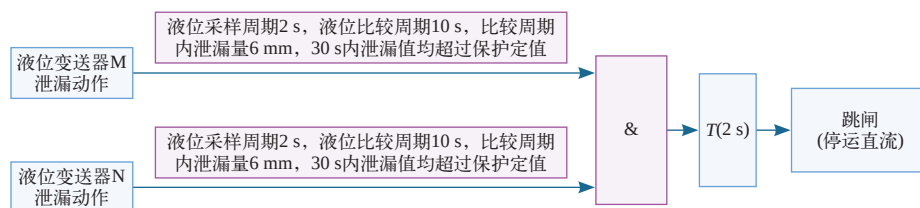


图8 泄漏保护逻辑

冷却系统对膨胀罐液位连续监测，每个扫描周期都对当前值进行计算和判断。扫描周期为2 s，液位比较周期为10 s，比较周期内泄漏量为0.3%，延时30 s后泄漏保护动作。

如图9所示，CPU开始扫描后每2 s为一个扫描周期。如零为CPU扫描开始，0 s与10 s进行比较，2 s与12 s进行比较，每隔10 s为一次液位比较。当液位连续下降30 s每10 s均大于设定值（0.3%）时，并且进出阀温度变化小于0.2 ℃，泄漏保护开始动作，延时30 s泄漏保护出口，30 s内任意一次小于设定值，泄漏延时重新开始计算。

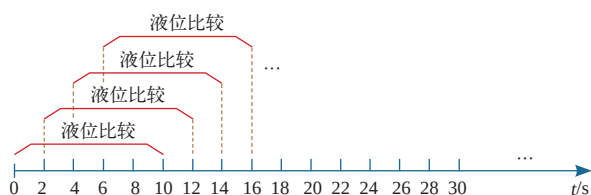


图9 泄漏检测原理

两台液位变送器同时检测液位。当一台液位变送器的液位变化满足跳闸逻辑时，泄漏保护无效。当两台液位变送器的液位变化均满足跳闸逻辑时，泄漏保护动作出口。

(5) 控制保护系统故障跳闸

1) 直流控制电源均掉电。当阀冷控制保护系统A、B四路直流控制电源均掉电时，阀冷系统发出“跳闸”硬接点信号。

2) 双CPU均故障。当阀冷控制保护系统A、B的CPU均故障时，阀冷系统发出“跳闸”硬接点信号。

4 现场实测

4.1 阀冷冗余试验

(1) 概述

厦门柔性直流工程极1和极2共有两套完全相同且相互独立的阀冷却系统，阀冷却系统室外换热设备采用密闭蒸发式冷却塔，每套系统配置3×50%容量的冷却塔。一般情况下，三台冷却塔均投入运行，如某台冷却塔发生故障退出运行，则另两台冷却塔将提高其冷却风机的转速以确保冷却效果。每台冷却塔设置2×100%喷淋水泵，定期可自动切换。下面以浦园变电站极2阀冷冗余试验为例检验阀冷冗余性能。

(2) 试验方案

1) 试验目的。检验阀冷系统在失去50%冗余能力情况下是否能够保证换流阀的冷却效果。

2) 试验条件。①浦园站向鹭岛站输送极2额定功率500 MW；②紧急停运功能正常；③已采取安全措施以防止直流甩负荷时对交流系统的冲击；④极2满功率运行一段时间后进出阀温度稳定平衡。

3) 试验步骤。①记录试验前进出阀温度；②断开第三组冷却塔两台风机及对应外冷回路中的两台喷淋泵的工作电源，每隔5 min记录进出阀温度；③当进出阀温度处于稳定平衡状态时，恢复第三组冷却塔两台风机及对应喷淋泵的工作电源；④待阀冷系统再次处于一个新的稳态平衡状态后，记录此时的进出阀温度、水流量及压力；

⑤将内冷循环回路连通第三冷却塔的阀门关闭，记录水流量、进阀压力，每隔5 min记录进出阀温度；⑥当进出阀温度处于稳定平衡状态时，开启关闭的阀门，恢复阀冷系统正常运行状态；⑦试验结束。

(3) 试验过程异常现象分析及改进措施

1) 现象描述。试验前进出阀温度分别为36.2℃和40.8℃，断开第三组冷却塔两台风机及对应外冷回路中的两台喷淋泵的工作电源后，内冷水进出阀温度在10 min内迅速上升，分别达到43.4℃和47.0℃，并且继续呈上升趋势，为了避免温度进一步升高导致阀冷保护动作停运直流系统，立即将风机及喷淋泵恢复到工作状态。

2) 现象分析。关闭一组冷却塔两台风机及对应外冷回路中的两台喷淋泵的工作电源后，阀冷系统失去50%冗余后，按照设计规范的要求，此时进出阀温度应重新过渡到一个新的稳定平衡状态。然而上述试验现象却说明了阀冷系统在失去50%冗余能力后不能满足冷却能力。

在试验过程中阀内冷水流量及压力均未发生变化，且另外两组冷却塔风机均在最大转速且对应的喷淋泵均正常运行，经过对内外冷各环节参数进行分析发现在外冷喷淋泵出水压力为0.17 MPa的情况下喷淋水流量偏小，不能满足在失去50%冗余能力情况下的冷却能力。

3) 改进措施。将三组外冷水喷淋泵出水压力减小至0.15 MPa，增大外冷水的流量。为了便于监视，建议加装外冷流量监视变送器并将实时数据上传至监控后台。

(4) 试验结果

增大外冷水流量之后再次开展试验，试验结果分别如表3、表4所示。试验结果表明改进后阀冷系统在失去50%冗余能力后进出阀温度均能稳定在一个新的稳定平衡状态，满足了阀冷冗余性能设计规范的要求。

表3 关风机及喷淋泵冗余试验

项目	进阀温度/℃	出阀温度/℃
初始值	32.1	36.8
稳定值	33.6	38.3

表4 关闭连通冷却塔阀门的冗余试验

项目	进阀温度/℃	出阀温度/℃	冷却水流量/(L/s)
初始值	30.9	35.5	157.9
稳定值	33.3	37.8	150.4

4.2 阀冷泄漏保护

在换流站调试的过程中出现过因换流阀子模块IGBT爆裂引起冷却水管脱落并出现大面积漏水，导致阀冷系统膨胀罐液位降低，最终上报阀冷泄漏故障，申请跳闸，停运直流系统。报文如表5所示。

表5 阀冷泄漏保护动作报文

时间/ms	系统	报文
965	阀冷A	阀冷系统泄漏报警
1 045	阀冷B	阀冷系统泄漏报警
1 395	阀冷A	阀冷系统泄漏跳闸
1 475	阀冷B	阀冷系统泄漏跳闸
1 971	极控系统B	水冷控制保护系统永久闭锁命令 发出
1 972	极控系统B	保护出口闭锁换流阀 出现
1 972	极控系统B	请求联跳对站命令 发出

此次泄漏事故验证了阀冷泄漏保护动作的正确性，确保了换流阀的安全。

5 结束语

结合厦门柔性直流输电科技示范工程，对柔性直流阀冷系统方案及其工程应用进行了研究，为检验阀冷冗余性能，提出了阀冷冗余试验方案。

1) 阀冷系统是由内冷系统和外冷系统构成的，内外冷之间的协同配合形成了特有的工艺流程。

2) 论述了阀冷系统的主要回路及其主要设备的功能。

3) 研究了阀冷控制保护系统的构成、与极控系统接口特性，控制逻辑及保护配置情况。

4) 阀冷冗余试验方案成功应用于厦门工程中，发现了阀外冷参数设置不合理问题，并提出了改进措施，确保了换流阀的安全及直流系统的稳定运行。

5) 一次阀冷泄漏事故证明了阀冷泄漏保护动

作的正确性。

6) 如何根据阀冷进出阀温度、水流量、水压力、室外温湿度和风机转速等参数建立阀冷控制系统数学模型以优化控制保护系统参数, 实现阀冷却效果最佳是需要进一步研究的问题。

参考文献

- [1] 王—振, 赵彪, 袁志昌, 等. 柔性直流技术在能源互联网中的应用探讨 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (14): 3351-3360.
- [2] Mitra P, Zhang L D, Lennart H. Offshore wind integration to a weak grid by VSC-HVDC links using power-synchronization control: a case study [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29 (1): 453-461.
- [3] 李树鹏, 徐振宇, 孙刚, 等. MMC直流配电网的最优潮流控制策略 [J]. 电气应用, 2016, 35 (19): 18-23.
- [4] 李岩, 罗雨, 许树楷, 等. 柔性直流输电技术: 应用、进步与期望 [J]. 南方电网技术, 2015, 9 (1): 7-13.
- [5] 陈福锋, 杨阳, 宋国兵, 等. 单端量行波保护在中压柔性直流配电网的适应性分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44 (26): 50-55.
- [6] 白雪松, 袁绍军, 王轶, 等. 柔性直流输电技术综述 [J]. 电气应用, 2015, 34 (21): 78-83.
- [7] Yao Zhiqing, Zhang Qun, Chen Peng, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC systems [J]. Protection and Control of Modern Power

Systems, 2016, 1 (1): 1-7.

- [8] 曾建兴. 柔性直流输电换流阀冷却系统研究 [J]. 自动化应用, 2014 (12): 89-91.
- [9] 胡文旺, 唐志军, 林国栋, 等. 柔性直流控制保护系统方案及其工程应用 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40 (21): 27-33, 46.
- [10] 严有祥, 方晓临, 张伟刚, 等. 厦门±320 kV柔性直流电缆输电工程电缆选型和敷设 [J]. 高压技术, 2015, 41 (4): 1147-1153.
- [11] 洪乐洲, 江一, 翁洪志, 等. 换流站阀冷系统设计缺陷与改进措施 [J]. 南方电网技术, 2013, 7 (1): 44-46.
- [12] 段涛, 杨斌, 李贤庆, 等. ±500 kV 换流站阀水冷系统隐患分析治理 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42 (18): 132-138.
- [13] 杨光亮, 邵能灵, 郑晓冬. 换流站阀水冷系统导致直流停运隐患分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (18): 199-203.
- [14] 赖皓, 李靖翔, 梁天明. 换流站阀冷系统轻微漏水检测方法研究 [J]. 电气自动化, 2016, 38 (1): 106-108, 112.
- [15] 余荣兴, 张志朝, 刘茂涛, 等. 云广特高压直流阀冷控制保护逻辑的改进 [J]. 电力建设, 2012, 33 (5): 90-92.
- [16] 刘森, 宋述波, 刘俊, 等. 贵广直流肇庆换流站阀冷切换控制系统浅析 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (12): 109-111, 117.

(收稿日期: 2017-08-29) EA

.....

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告