

±500 kV柔性直流换流阀冷却系统方案设计

杨柏森^{1,2}, 任海莹^{1,2}, 孔德卿^{1,2}, 徐善军^{1,2}

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 北京国电富通科技发展有限公司, 北京 100070)

摘要: 张北柔性直流输电工程是目前世界上电压等级最高、输送容量最大的柔性直流工程。以张北柔性直流±500 kV延庆换流站为研究对象, 详细论述了±500 kV柔性直流换流阀冷却系统的工艺流程、主要技术参数和设备特点, 介绍了阀冷控制保护系统的结构、与站控接口特性及控制策略等, 形成了±500 kV柔性直流换流阀冷却系统的整体方案, 对同类工程的方案设计提出了完整的设计思路和方法, 为我国柔性直流阀冷却技术发展及工程应用提供了有力支撑。

关键词: ±500 kV柔性直流输电; 换流阀; IGBT; 冷却系统; 方案设计

Scheme design for cooling system of ±500 kV flexible DC converter valve

YANG Baisen^{1,2}, REN Haiying^{1,2}, KONG Deqing^{1,2}, XU Shanjun^{1,2}

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China; 2. Beijing Guodian Futong Science and Technology Development Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: By now Zhangbei flexible HVDC power transmission project has the highest voltage and the largest power transmitting capacity in the world. Taking Zhangbei ±500 kV Yanqing converter station as the researching object, this paper presents in detail technological processes, main technical parameters and equipment features of ±500 kV flexible DC converter valve cooling system, as well as the structures of the controlling and protection system of the converter valve cooling system, interface characteristics with the converter station controlling system and the controlling strategies etc. Thus the overall technical scheme of ±500 kV flexible DC converter valve cooling system has been formed, which could provide completed design methods and ideas for the system design of similar projects. The presented integrated design method, including the tools required, provides a solid guidance in designing and promoting the flexible HVDC converter valve cooling systems.

Key words: ±500 kV flexible DC power transmission; converter valve; IGBT; cooling system; scheme design

0 引言

柔性直流输电技术是基于IGBT器件和电压源换流器的新一代直流输电技术, 与常规直流输电技术相比, 具有有功/无功灵活控制、可向无源网络或弱交流系统供电及不存在换相失败等优点, 在清洁能源并网、孤岛供电和城市异步电网互联等领域具有明显优势^[1-4]。

换流阀是柔性直流输电工程中实现交直流电能转换的核心设备, 其阀内的IGBT器件在运

行过程中因功率损耗所产生的热量会导致换流阀温度上升。温度一旦超过IGBT的最高结温, IGBT就会损坏。因此, 换流阀需要使用冷却介质循环吸热并排放到阀厅外, 确保IGBT结温保持在正常范围内。由此可见, 换流阀冷却系统是柔性直流输电系统安全可靠运行的重要保障之一^[5-8]。

张北柔性直流输电工程为真双极接线输电工程, 直流额定电压为±500 kV, 额定电流为

3 000 A, 输送容量为3 000 MW, 是目前世界上柔性直流电压等级最高、输送容量最大的工程^[9-11]。本文结合张北柔直±500 kV延庆换流站, 提出了±500 kV柔性直流换流阀冷却系统的整体方案, 研究并确定了系统主要设备和技术参数, 对同类工程的方案设计提出了完整的设计思路和方法, 为我国柔性直流换流阀冷却技术的进步及工程应用提供了有力支撑。

1 工程概况

1.1 水源条件

站址20 km范围内有官厅水库和妫水河等主要水库、河流, 其中官厅水库为北京饮用水源地, 妫水河北入官厅水库后入永定河, 均属水质较好的取水源。根据换流站用水量计算分析, 附近主要水库、河流的富余水量能够满足换流站的用水要求。

1.2 室外环境条件

站址室外主要环境条件如表1所示。

表1 站址室外主要环境条件

Tab. 1 Main outdoor environmental conditions of the converter station

项目	数值
多年平均气温/℃	9.7
年平均最高气温/℃	16.0
年平均最低气温/℃	4.3
多年极端最高气温/℃	39.2
多年极端最低气温/℃	-27.3
多年平均气压/Pa	959.5
多年最高气压/Pa	972.7
多年最低气压/Pa	948.2
多年平均相对湿度(%)	57
多年平均风速/(m·s ⁻¹)	2.4
平均最大风速/(m·s ⁻¹)	28.3
多年平均日照强度/(kW·m ⁻²)	0.57
最大冻土深度/cm	115
地震加速度/a/(m/s)	0.4

1.3 室内环境条件

阀冷却系统室内主要环境条件如表2所示。

2 ±500 kV柔性直流换流阀冷却系统工艺流程

±500 kV柔性直流换流阀采用密闭循环水

表2 阀冷却系统室内主要环境条件

Tab. 2 Main indoor environmental conditions of the valve cooling system

项目	主机设备间	控制屏柜间
夏季温度/℃	≤35	26~28
夏季相对湿度(%)	80	50~70
冬季温度/℃	≥10	16~18
冬季相对湿度(%)	80	20~70

冷却系统, 其主要由内冷却系统、外冷却系统和阀冷控制保护系统等组成。定流速的冷却介质经主循环泵的压力提升, 流经电动三通阀, 进入室外换热设备, 通过室外换热设备(采用空气冷却器和闭式冷却塔串联方式)将IGBT换流阀产生的热量排放到空气中。冷却后的介质再进入IGBT换流阀冷却发热元件, 吸收热量后回流到主循环泵进口, 形成密闭式循环阀冷却系统, 其系统工艺流程如图1所示^[12-13]。

张北柔性直流±500 kV延庆换流站输送容量为3 000 MW, 全站共设两个阀厅, 每个阀厅内3个桥臂设置一套阀冷却系统, 全站共四套系统, 四套系统的容量及配置完全相同, 其一套阀冷却系统主要技术参数如表3所示。

表3 ±500 kV换流阀冷却系统主要技术参数

Tab. 3 Main technical parameters of ±500 kV flexible DC converter valve cooling system

序号	项目	数值
1	阀冷却系统额定冷却容量/kW	7 200
2	内冷却水额定流量/(m ³ ·h ⁻¹)	643.8
3	进阀水最高运行温度/℃	40
4	进阀水温度高报警值/℃	42
5	进阀水温度高跳闸值/℃	44
6	进阀水最低运行温度/℃	20
7	进阀水温度低报警值/℃	15
8	进阀水温度低跳闸值/℃	10
9	阀体进出水温差/℃	≤10
10	阀体额定流量时压降/MPa	≤0.39
11	阀入口处最大压力/MPa	1.0
12	内冷却水电导率允许值/(μs·cm ⁻¹)	≤0.3
13	内冷却水含氧量/(μg·L ⁻¹)	<200

3 内冷却系统方案设计

±500 kV柔性直流换流阀内冷却系统提供冷却介质运行的动力, 并对部分介质进行补充和纯化, 保证其低电导率的持续稳定运行。

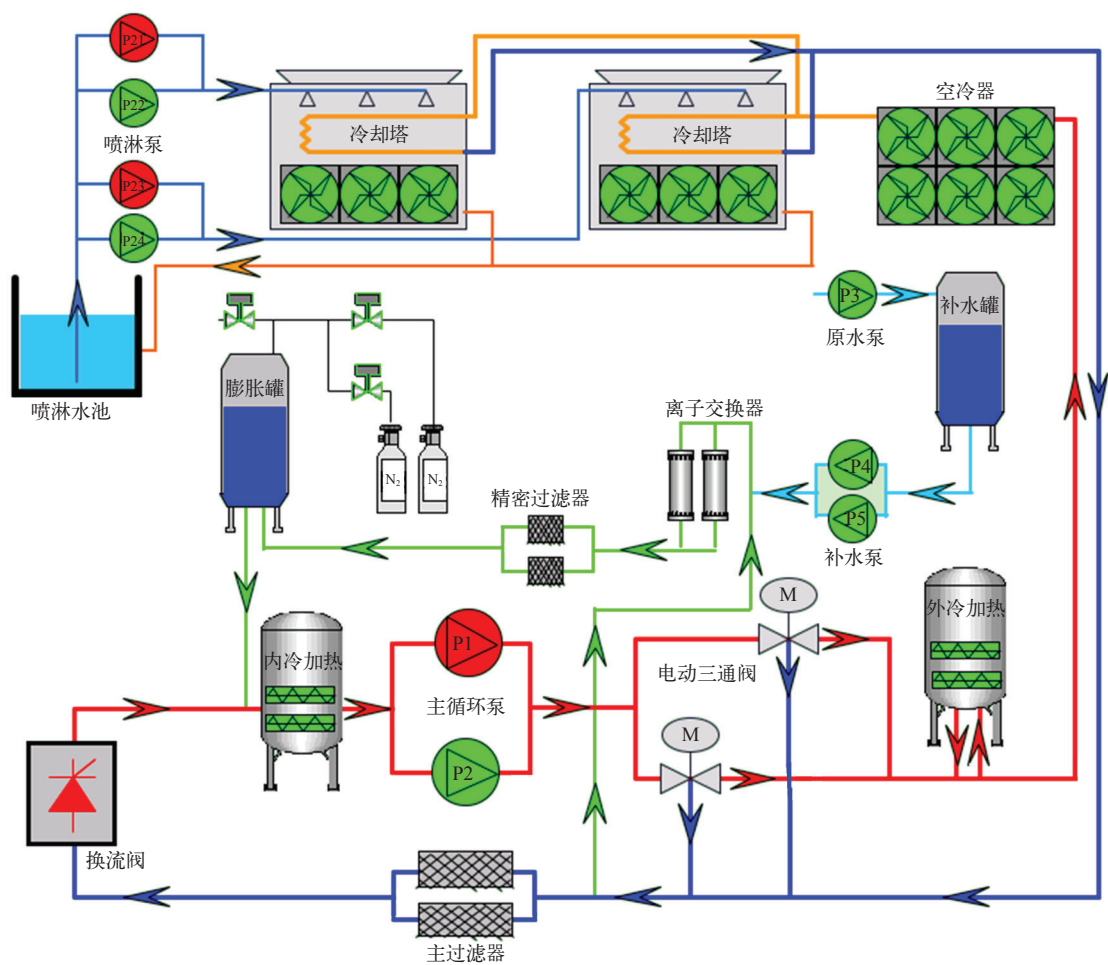


图 1 ±500 kV 柔性直流换流阀冷却系统工艺流程图

Fig. 1 Process flow chart of ±500 kV flexible DC converter valve cooling system

系统主要由主循环冷却回路、去离子水处理回路、稳压系统、补水装置以及各种管道、阀门和支吊架等组成。

3.1 主循环冷却回路

主循环冷却回路主要由主循环泵、电动三通阀、主过滤器和脱气罐等设备组成。

(1) 主循环泵

提供冷却系统流体运行所需动力，一用一备，100%冗余配置。主泵采用离心式结构，设有轴封漏水检测装置，其进出口采用柔性接头减振连接。工作时，如运行泵因故障不能提供额定出力时，系统立即切换至备用泵，同时发出报警信号；为平衡运行磨损，一般运行泵每隔一周将自动切换，切换过程中系统流量和压力保持稳定^[14]。

(2) 电动三通阀

置于室外换热设备进水侧，采用机械连杆式电动阀，一用一备，用于调节内冷却水和外冷却水的流量比例，避免冬天温度低及阀体低负荷运行时系统冷却水温度过低，稳定系统的换热模式。

(3) 主过滤器

置于换流阀进水处，一用一备，100%冗余配置，用于过滤系统刚性颗粒以免损伤阀体。主过滤器采用小水阻不锈钢滤芯，同时设有检修阀和压差表，根据滤芯污垢程度，可在线进行清洗。

(4) 脱气罐

置于主泵进口处，罐内装有电加热器，用于对内冷却水温度的调节；罐顶设自动排气

阀,可自动排出溶解在水中的氧气,使冷却水含氧量控制在 200×10^{-9} 以下,防止冷却元件被氧化腐蚀,保证系统的稳定运行。

3.2 去离子水处理回路

去离子水处理回路与主循环回路并联,主要由离子交换器、精密过滤器等组成,通过对主循环回路中的介质进行纯化,使冷却系统长期维持在极低电导率运行。

(1) 离子交换器

离子交换器为一用一备,可在线更换而不影响系统运行。离子交换树脂采用核级非再生树脂,有吸附容量大、耐高温和高流速等优点,有利于系统微量离子的去除。

(2) 精密过滤器

精密过滤器置于离子交换器出口,以拦截可能破碎流出的树脂颗粒。其一用一备,如出现堵塞时,去离子水流量计发出报警信号,手动切换至另一台运行,方便在线更换滤芯。

3.3 稳压系统

稳压系统与去离子水处理回路串联,主要由膨胀罐和 N_2 瓶等组成。在膨胀罐的顶部充有稳定压力的高纯 N_2 ,当冷却介质因少量外渗或电解而损失时, N_2 自动扩张,把冷却介质压入循环管路系统,以保持管路的压力恒定和冷却介质的充满。同时,膨胀罐可缓冲冷却水因温度变化而产生的体积变化。

3.4 补水装置

补水装置主要由原水泵、补水罐和补水泵等组成。原水泵可将外部水源补至补水罐内储存,补水罐设有高低液位开关,当补水罐液位低于设定值时,启动原水泵补水,处于高液位时原水泵停止运行。补水泵一用一备,其根据膨胀罐液位高低自动进行补水和停泵,保持膨胀罐液位始终处于正常工作状态。

3.5 内冷却系统主要参数设计

(1) 主要管径和流速计算

管径与流速的关系式为

$$d_j = 18.81 \times (Q/v)^{1/2} \quad (1)$$

式中, d_j 为管道计算内径,mm; Q 为系统流量, m^3/h ; v 为介质流速, m/s 。

(2) 系统水力计算

根据海澄威廉公式可得

$$i = 105 \times (Q/C)^{1.85} \times (d_j)^{-4.87} \quad (2)$$

式中, i 为比摩阻, kPa/m ; Q 为水流量, m^3/s ; C 为海澄威廉系数(不锈钢管 $C=130$)。

通过式(2)计算系统的外部管道水阻。

根据达西公式可得

$$h = \xi \cdot v^2 / 2g \quad (3)$$

式中, ξ 为局部阻力系数; v 为管内流速, m/s 。

通过式(1)设计校核系统的主管径和流速;通过式(2)和式(3)计算系统的内部和外部水阻,同时根据设计参数进行系统总水阻的计算校核。

(3) 阀内冷却系统主要技术参数

根据系统方案、设备布局和设计参数进行计算,得到一套阀内冷却系统主要技术参数,如表4所示。

表4 内冷却系统主要技术参数

Tab. 4 Main technical parameters of internal cooling system

序号	项目	数值
1	主循环泵流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	660
2	主循环泵扬程/m	70
3	主循环泵电动机功率/kW	200
4	主循环回路管路公称直径/mm	300
5	去离子回路管路公称直径/mm	50
6	主循环回路冷却水流速/($m \cdot s^{-1}$)	2.24
7	去离子回路冷却水流速/($m \cdot s^{-1}$)	2.71
8	冷却介质	去离子水
9	内冷却水电导率允许值/($\mu s \cdot cm^{-1}$)	≤ 0.3
10	内冷却水含氧量/($\mu g \cdot L^{-1}$)	< 200

4 外冷却系统方案设计

± 500 kV柔性直流换流阀外冷却系统需对阀组提供足够的冷却容量,以保证系统的安全可靠运行。根据站址气象条件和IGBT换流阀进水温度,考虑热岛效应,本次阀外冷却系统采用空气冷却器和闭式冷却塔串联的换热方式,将IGBT换流阀产生的热量传递给室外大气^[15]。

4.1 空气冷却器

室外气温较低时，IGBT换流阀冷却介质主要通过空气冷却器进行换热降温。一般情况下，空气冷却器所有管束均投入运行，在最高的历史温度条件和最大的负荷情况下，空气冷却器仍保持30%以上的冗余容量，并能保证任意一台管束故障时仍能满足最大运行工况，即“N+1”运行模式。在室外气温降低或换流阀负荷较小的情况下，可以首先调节空气冷却器运行台数，再通过调节变频调速风机的转速或调节空气冷却器百叶窗来实现对水温的控制。

4.2 闭式冷却塔

闭式冷却塔采用诱导式设计，垂直排风，气水逆向流动的结构形式。当室外气温接近或者高于换流阀的进水温度要求时，空气冷却器将无法冷却要求，此时闭式冷却塔投入使用。介质进入闭式冷却塔内的换热盘管，通过喷淋水热交换和蒸发的方式将热量排至大气。每极换流阀冷却系统配置4台冷却容量为总需求容量50%的闭式冷却塔，即按照4×50%的容量配置，根据进阀水温不同，自动调节各冷却塔的运行模式，有效保障系统运行的稳定性。

4.3 喷淋泵组

每2台喷淋泵共用1根进水母管形成1个泵组单元，每1个泵组单元对应1组闭式冷却塔，每极换流阀冷却系统共4个泵组单元，相互独立运行，同时喷淋水池液位与工业补水泵形成控制联锁，能够自动进行补水和停泵，提高了系统运行的可靠性。

4.4 外冷加热器

外冷加热器位于设备间，用于冬天温度极低及阀体停运时的冷却水温度调节，避免进阀冷却水温度过低或产生结露现象。加热器运行时IGBT换流阀冷却系统不能停运，必须保持管路内冷却水的流动，防止干烧现象的发生。

4.5 外冷却系统主要参数设计

根据换流站环境条件及阀冷却系统设计参

数进行计算，得到一套阀外冷却系统主要技术参数，如表5所示。

表5 外冷却系统主要技术参数

Tab. 5 Main technical parameters of external cooling system

序号	项目	数值
1	冷却水额定流量/(m ³ ·h ⁻¹)	660
2	外冷回路管路公称直径/mm	300
3	空气冷却器额定冷却能力/kW	7 200
4	空气冷却器流体入口温度/℃	49.7
5	空气冷却器流体出口温度/℃	40
6	入口空气温度(干空冷)/℃	35
7	出口空气温度(干空冷)/℃	42.2
8	闭式冷却塔额定冷却能力/kW	7 200
9	设计湿球温度/℃	26.4
10	闭式冷却塔进口温度/℃	44.8
11	闭式冷却塔出口温度/℃	39
12	喷淋系统补水量/(m ³ ·h ⁻¹)	8.49
13	换热冗余量	100%

5 阀冷控制保护系统方案设计

5.1 阀冷控制系统

阀冷控制系统设计两套，互为冗余设置。两套系统同时采样、同时运行，但只有一套在主用状态，双主机均故障时闭锁换流阀；两套系统各自配备同步模块，通过同步光纤进行程序和数据的交互。

阀冷控制系统I/O模块，通过冗余DP扩展模块将冗余I/O组态到冗余DP网络上，同时通过以太网与两套阀冷控制系统CPU进行数据通信。

5.2 阀冷保护系统

阀冷保护系统设计三套，相互独立，分别处理三套冗余传感器信号中的一套。系统收到传感器信号后，分别对其进行诊断和处理：判定该信号是否正常；判断该信号是否存在超高、高、低和超低预警；同时将判断结果通过以太网发送至两套阀冷控制系统。

5.3 控制保护系统间通信

阀冷控制与保护系统间通过以太网进行数据交互。阀冷保护系统将三套冗余传感器判定结果发送至阀冷控制系统，阀冷控制系统经逻辑处理后对现场设备进行自动化控制，同时将结果通过光纤发送至站控后台。每套阀冷控制

系统设置3个以太网通信模块，每套阀冷保护系统设置2个以太网通信模块，每套阀冷控制系统

都可以独立与三套阀冷保护系统进行通信，具体如图2所示。

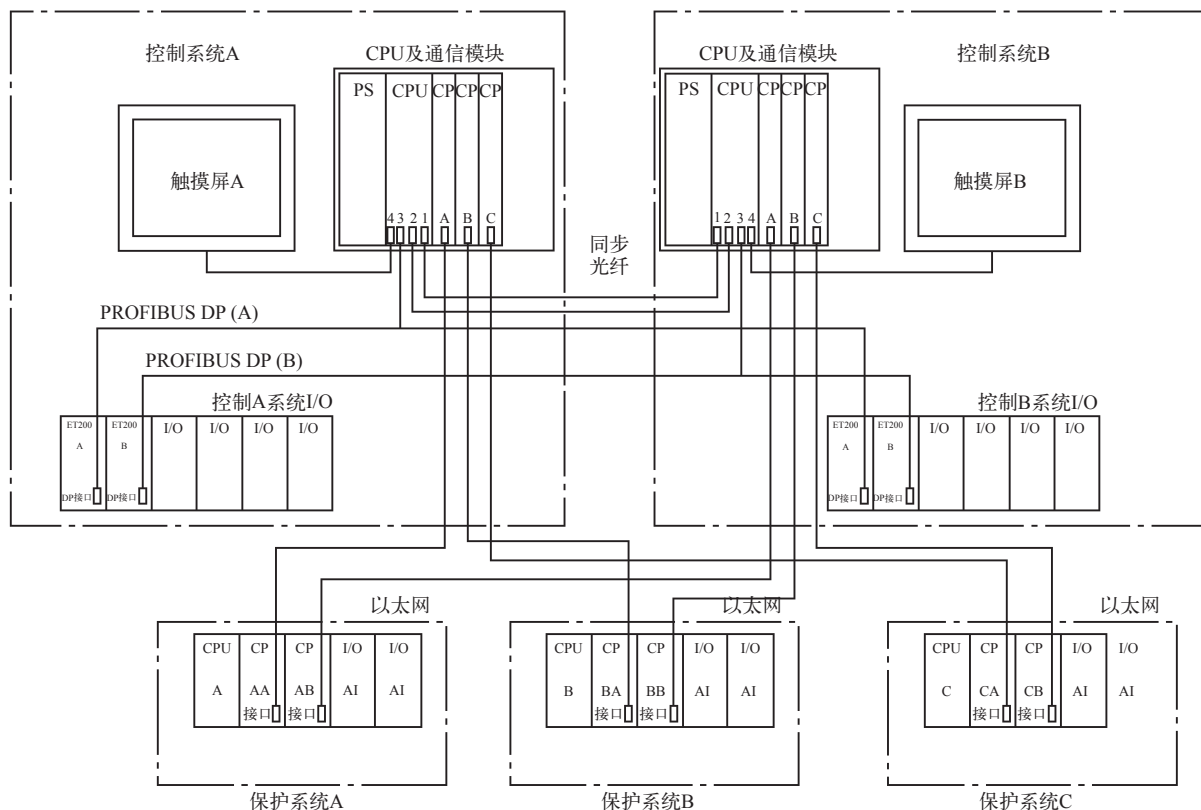


图2 阀冷控制保护系统工作原理图

Fig. 2 Working principle diagram of controlling and protection of converter valve cooling system

5.4 阀冷控制系统与站控间通信接口

(1) IEC 60044-8通信

阀冷控制系统与站控间通过IEC 60044-8协议进行光纤通信，交互VCCP_TRIP、VCCP_OK等重要信号。每套控制系统设置2台IEC 60044-8协议转换模块，分别与两套VCT进行通信，交叉冗余。

(2) PROFIBUS报文通信

阀冷系统设备状态、运行参数和预警信息等通过PROFIBUS协议经光纤发送给后台OWS。通信链路为两路，阀冷控制系统A对VCTA，阀冷系统B对VCTB，冗余备用。

5.5 阀冷系统控制策略

阀冷系统控制策略是换流阀安全运行的关键之一，其通过对冷却介质温度的闭环控制，

实现对换流阀的有效保护。下面以主循环泵控制为例说明阀冷系统的控制策略。

(1) 主循环泵正常启动

每套阀冷系统布置2台主循环泵（一用一备），每台主泵电气回路完全独立，设置软起及工频旁路。正常启动过程为软起驱动器方式启动，启动后延时切换至工频长期运行，2台主循环泵定时切换，故障备用，具体过程如图3所示。

(2) 主循环泵正常轮换

主循环泵工频运行，当满足以下条件时，系统自动切换至备用泵运行，同时停止当前工作泵。主泵正常轮换条件主要包括：主泵运行时间达到正常轮换时间；就地触摸屏强制轮换主泵；站控远程控制轮换主泵。具体过程如图4所示。

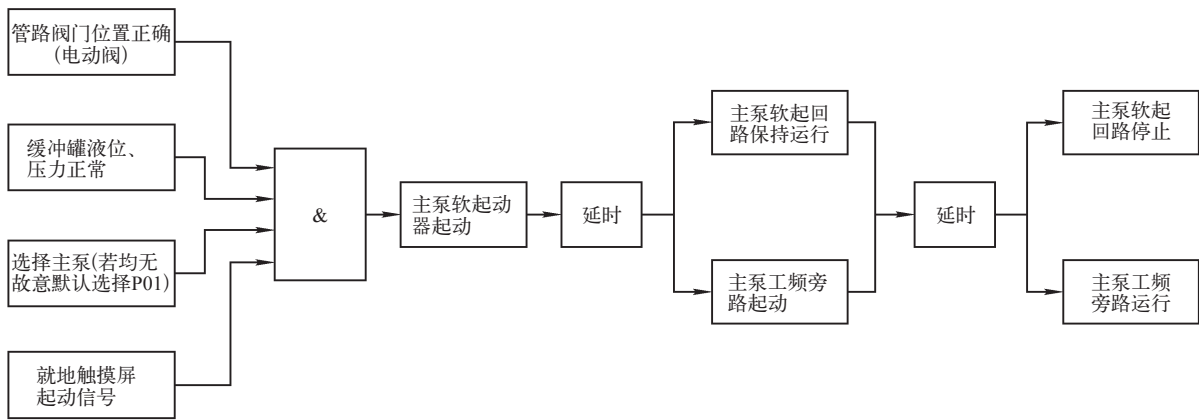


图 3 主循环泵正常起动控制逻辑
Fig. 3 Normal start control logic of main circulating pump

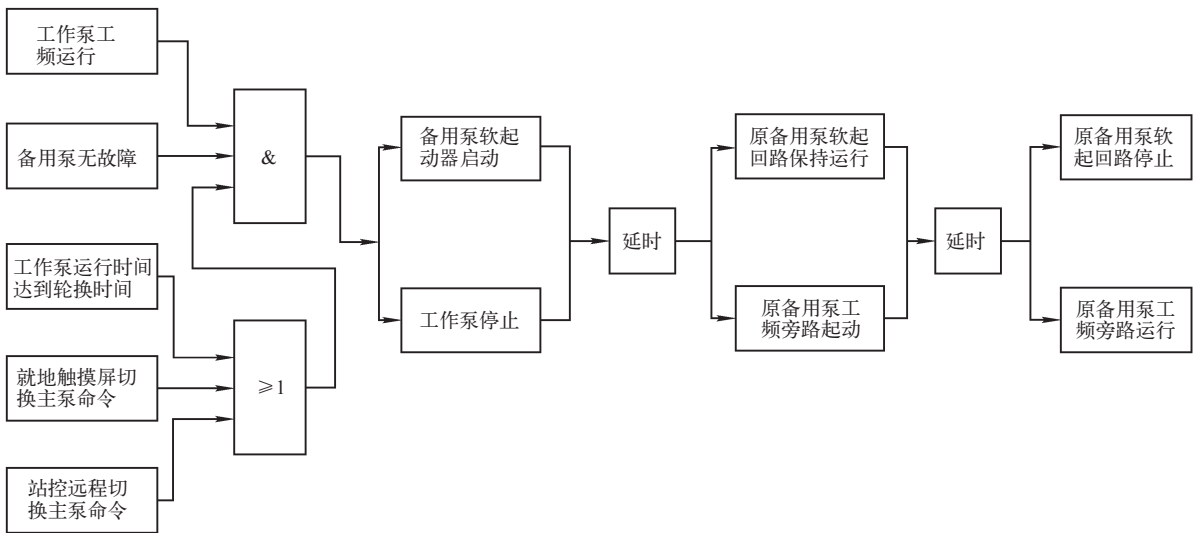


图 4 主循环泵正常轮换控制逻辑
Fig. 4 Normal rotation control logic of main circulating pump

（3）主循环泵故障轮换

主循环泵正常起动后为工频旁路运行，工作过程中，若一个主泵出现运行故障，系统将自动切换至备用泵运行，保证系统的安全运转。

故障情况主要包括：工作泵工频旁路热继电器动作；工作泵工频旁路断路器脱扣；工作泵过热；主泵出口压力低且进阀压力低；系统流量低且进阀压力低；系统流量低且进阀压力高；主泵轴封漏水；主泵进出口压差低等。

（4）切换不成功回切

主循环泵切换后，备用泵故障或仍存在切泵判据的情况下，控制系统检测出相关报警后

回切至原工作泵运行，保持系统的平稳运转。

6 结束语

结合张北柔性直流±500 kV延庆换流站，对±500 kV柔性直流换流阀冷却系统整体方案进行了研究，确定了系统的主体结构和主要技术参数。

1) 阀冷却系统主要由内、外冷却系统和控制保护系统等组成，内、外冷却系统之间协同配合形成了特有的冷却系统工艺流程，系统通过对冷却介质温度的闭环控制，实现对换流阀温度的柔性调节，保证电网的平稳运行。

2) 设计确定了内、外冷却系统的主要回路

和主要设备功能,根据换流阀运行和换热量要求,通过系统水力和换热模型分析计算,明确了设备的主要运行参数。系统设备有效、合理的冗余配置为柔性直流换流阀的连续、稳定运行提供了技术保障。

3)研究了阀冷控制保护系统的总体架构特性,通过阀冷控制保护系统实现了运行温度、流量和压力等主要参数的有效选取和平滑调节,较强的控制策略为柔性直流换流阀安全、稳定运行提供了有力保证,为其产品的技术升级奠定了基础。

4)作为目前世界上柔性直流电压等级最高、输送容量最大的工程,张北柔性直流 ± 500 kV阀冷却系统整体技术方案的研究及相关结论为同类工程设计提供了借鉴和参考。

参考文献

- [1] 汤广福.基于电压源换流器的高压直流输电技术[M].北京:中国电力出版社,2010.
- [2] 王一振,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.
- [3] 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.
- [4] 汤广福,贺之渊,庞辉.柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J].电力系统自动化,2013,37(15):3-14.
- [5] 马为民,蒋维勇,李亚男.大连柔性直流输电工程的系统设计[J].电力建设,2013,34(5):1-5.
- [6] 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.
- [7] 李亚男,蒋维勇,余世峰,等.舟山多端柔性直流输电工程系统设计[J].高电压技术,2014,

40(8):2490-2496.

- [8] 徐政.柔性直流输电系统[M].北京:机械工业出版社,2012.
- [9] 郭贤珊,周杨,梅念,等.张北柔直电网的构建与特征分析[J].电网技术,2018,42(11):3698-3707.
- [10] 韩雪,杨鸣,司马文霞,等.500 kV柔性直流电网直流断路器操作过电压研究[J].高电压技术,2019,45(1):72-81.
- [11] 王炳辉,郝婧,黄天啸,等. ± 500 kV柔直电网与新能源和常规发电机组的协调控制研究[J].全球能源互联网,2018,1(4):471-477.
- [12] 胡文旺,唐志军,林国栋,等.柔性直流换流站阀冷系统方案及工程应用[J].电气应用,2018,37(5):92-100.
- [13] 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.
- [14] 孔德卿,刘营,任青亭,等.换流阀水冷系统关键元器件可靠技术研究[J].电力电子技术,2017,51(9):113-115.
- [15] 阮卫华,王大伟,张民幸. ± 800 kV哈密换流站阀外冷技术方案的比较与选择[J].电网技术,2013,37(7):1820-1826.

作者简介



杨柏森

杨柏森(1981—),男,本科,高级工程师,从事特高压直流输电换流阀水冷系统、大功率电力电子冷却设备的研究及开发工作。

(收稿日期:2020-08-06)EA