



GAOYA ZHILIU SHUDIAN  
HUANLIUFA LENGQUE XITONG

# 高压直流输电

## 换流阀冷却系统

中国南方电网公司超高压输电公司 组编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

GAOYA ZHILIU SHUDIAN  
HUANLIUFA LENGQUE XITONG

# 高压直流输电 换流阀冷却系统

中国南方电网公司超高压输电公司 组编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书对高压直流输电工程的换流阀冷却系统进行了详细全面地介绍,并结合±800kV云广和糯扎渡特高压直流输电工程调试、验收、运行和日常维护工作的宝贵经验,对换流阀冷却系统的运行与维护工作进行了总结。

本书共分八章,分别为换流阀冷却系统的基本概念、换流阀的损耗与冷却、换流阀冷却系统主要设备、换流阀冷却系统电源结构配置、换流阀冷却控制保护系统、换流阀冷却系统控制与保护功能、换流阀冷却系统运行与维护、换流阀冷却系统典型故障分析。

本书可供高压直流输电运行、检修、试验专业技术和科研人员使用,可供从事换流阀冷却系统的设备制造厂家及设计单位专业技术人员使用,可作为高校相关专业师生学习、参考的资料,还可作为从事高压直流输电工程相关运维工作技术人员的培训教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

高压直流输电换流阀冷却系统/中国南方电网公司超高压输电公司组编. —北京:中国电力出版社, 2017. 5

ISBN 978-7-5198-0200-4

I. ①高… II. ①中… III. ①直流输电—冷却系统—研究 IV. ①TM721.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第088546号

---

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:岳璐(010-63412339)安鸿

责任校对:闫秀英

装帧设计:王英磊 左铭

责任印制:邹树群

---

印 刷:三河市航远印刷有限公司

版 次:2017年5月第一版

印 次:2017年5月北京第一次印刷

开 本:710毫米×980毫米 16开本

印 张:13.75

字 数:245千字

印 数:0001—1000册

定 价:59.00元

---

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

## ////// 编 委 会 //////////////

主 任 尚 涛

委 员 刘 森 周翔胜 罗敬华 李靖翔 张 蔓

主 编 李 兴 徐攀腾

副 主 编 江 一 宋述波 李 黎

参编人员 刘茂涛 张志朝 余荣兴 严海健 姚言超

何园峰 毛平涛 陆 锐 姚自林 耿贝贝

杨学广 李金安 邓光武 蒋峰伟 熊 杭

李双杰 熊双成 周登波 邓健俊 覃升浩

## 前 言

西电东送、南北互供的电网发展战略促使我国高压直流输电工程建设进入快速发展阶段。可以预见，高压直流输电技术以其远距离大容量输电和电网互联等方面的独特优势，将会在世界范围内得到越来越广泛地应用。换流阀冷却系统作为高压直流输电工程换流站中最重要的辅助设备，其主要作用是将换流阀中各元器件的功耗发热排放到室外环境，保证换流阀各元件在正常温度范围内工作，其直接影响到高压直流输电系统的安全可靠运行。然而，由于换流阀冷却系统在高压直流输电工程中处于辅助地位，一直以来缺乏系统完整的技术资料供运行维护和技术开发人员参考。这一局面影响着换流阀冷却系统的运行和维护工作，给高压直流输电系统的安全稳定运行带来了一定的隐患。

南方电网超高压输电公司所辖的前期投运高压直流输电工程均采用国外西门子换流阀冷却系统，后期投运的“两渡”（糯扎渡和溪洛渡）高压直流工程实现了换流阀冷却系统的国产化。基层生产单位经过多年的运行维护工作，对换流阀冷却系统已有了深入的认识，积累了丰富的运维经验。本书密切结合南方电网高压直流输电工程实际，依托工程验收、调试以及运行维护等各阶段积累的经验，对换流阀冷却系统的基本构成、工作原理及控制保护系统等方面进行了详细介绍，并对换流阀冷却系统的典型事故以及相应的处理方法进行了详细分析，力求为从事直流输电工程设备运行维护的一线技术人员和研究开发人员提供参考和指导。

本书共分为八章，第一章讲解了换流阀冷却系统的基本概念；第二章对换流阀的损耗与冷却进行了理论分析；第三章对换流阀冷却系统的内冷水循环系统和外冷水循环系统的主设备进行了详细说明；第四章结合现场实际，对换流阀冷却系统电源结构及运行风险进行了分析；第五章和第六章结合国外换流阀冷却系统和国产化的换流阀冷却系统所采用的不同控制保护逻辑，对换流阀冷却保护系统进行了详细说明；第七章结合现场运行维护经验，对换流阀冷却系统巡视、操作、检修及事故处理等进行了重点介绍；第八章详细分析了换流阀冷却系统不同

类型设备的典型事故发生原因、处理方法及相关改进措施。通过本书既可深入了解换流阀冷却系统设计思路、工作原理、控制方法等方面的技术要求，也可了解换流阀冷却系统的运行维护、事故处理等方面的运维策略。

本书的编写得到了公司领导的高度重视，在编写过程中，得到了相关专业人员的指导、建议，并参考了相关文献资料，在此表示衷心的感谢。

由于水平和经验的限制，书中难免有不足和疏漏之处，望读者批评指正。

**编者**

2017年4月

# 目 录

前言	
<b>第一章 换流阀冷却系统的基本概念</b>	1
第一节 换流阀的冷却方式	1
第二节 换流阀冷却系统的构成	2
第三节 换流阀冷却控制保护系统	7
<b>第二章 换流阀的损耗与冷却</b>	10
第一节 换流阀的损耗	10
第二节 换流阀冷却器原理及冷却效果影响因素	17
<b>第三章 换流阀冷却系统主要设备</b>	30
第一节 旋转设备	30
第二节 水处理设备	34
第三节 冷却塔及其辅助设备	39
第四节 稳压、均压、漏水检测系统	43
第五节 传感器	45
第六节 阀门	55
第七节 管道回路	61
<b>第四章 换流阀冷却系统电源结构配置</b>	64
第一节 换流阀冷却系统交流电源	64
第二节 换流阀冷却系统直流电源	67
第三节 站用电备自投对换流阀冷却系统运行可靠性的影响	70
第四节 站用电备自投对换流阀冷却系统运行可靠性影响试验	72
<b>第五章 换流阀冷却控制保护系统</b>	85
第一节 换流阀冷却控制保护系统构成	85
第二节 换流阀冷却控制保护系统人机接口及信号回路	92

<b>第六章 换流阀冷却系统控制与保护功能</b> .....	96
第一节 国外换流阀冷却系统控制功能 .....	96
第二节 国产换流阀冷却系统控制功能 .....	109
第三节 国外换流阀冷却系统保护功能 .....	118
第四节 国产换流阀冷却系统保护功能 .....	123
第五节 国内外换流阀冷却系统控制与保护功能对比 .....	130
<b>第七章 换流阀冷却系统运行与维护</b> .....	136
第一节 换流阀冷却系统设备巡视 .....	136
第二节 换流阀冷却系统设备操作 .....	151
第三节 换流阀冷却系统设备维护 .....	161
第四节 换流阀冷却系统事故处置预案 .....	168
<b>第八章 换流阀冷却系统典型故障分析</b> .....	182
第一节 内冷水循环系统设备故障 .....	182
第二节 外冷水循环系统设备故障 .....	189
第三节 控制系统传感器设备故障 .....	199
第四节 其他设备故障 .....	204
<b>参考文献</b> .....	209



## 换流阀冷却系统的基本概念

### 第一节 换流阀的冷却方式

换流阀是实现高压交直流电能转换的核心设备。晶闸管（又称为可控硅）是组成换流阀的基本元件，它是由一个P-N-P-N 4层的半导体构成的，中间形成了3个PN结，同时具有3个极（阳极、阴极和控制极）。晶闸管的PN结和3个极示意图如图1-1所示。

换流阀内的晶闸管电子元件在通流过程中，由于载流子的运动，会造成晶闸管PN结产生大量的热量，如果散热不良，将导致晶闸管PN结的温度超过其所能承受的最高温度，换流阀的换流性能将会恶化甚至会导致PN结的损坏。因此，换流阀的冷却能力是影响高压直流输电系统安全可靠运行的重要因素。只有选择适当的冷却方式、合理的设计工艺，才能充分发挥换流阀的换流能力，提高高压直流输电系统工作的可靠性。

常见的冷却方式根据冷却介质分为：空气冷却、油冷却、水冷却和氟利昂冷却等。水冷却的散热效率最高，它的换热系数是空气自然对流冷却的150~300倍，可大大提高被冷却器件的通流容量，相比较油冷却方式，水的比热容几乎比油的比热容大一倍。同时，因水的热容量大、黏度小，具有良好的冷却效果，有利于减少单位容量所占的体积和损耗，且水冷却结构检修、维护方便，制造技术成熟，运行经验丰富，不会引起爆炸和火灾，不存在环境污染情况。

然而，水冷却方式也有一定的弊端，比如室外换热设备（闭式冷却塔）内的换热盘管在长期喷水运行过程中，容易滋生藻类等微生物，并且由于水中各类杂质的存在，会在热交换盘管外表面产生较严重的结垢现象，影响换热能力。目前可采取的解决方案是对喷淋水进行处理：在喷淋水进入水池之前先进行软化处理；此外还应设置利用砂滤器进行喷淋水自循环水处理的旁通回路；同时为了控

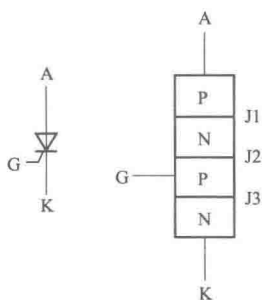


图1-1 晶闸管的PN结和3个极示意图

制喷淋水水质，还需定期添加缓蚀阻垢剂、氧化性杀菌剂等药剂；另外，在年度检修时，对室外换热设备内的换热盘管进行人工清洗除藻除垢。

综合考虑冷却效果、运维成本和环境影响等因素，水冷却相对其他冷却方式依然具有优势。

## 第二节 换流阀冷却系统的构成

### 一、换流阀冷却系统的要求

换流阀作为高压直流输电系统核心设备，其冷却系统采用典型的水冷却方式。与一般化学工业循环内冷水系统相比，换流阀冷却系统对温度、压力、流量等性能要求更高。因此，对换流阀冷却系统中水的杂质含量、氧气含量、电导率、水温、水压和流速等都要进行严格控制，同时，为保证换流阀内冷水的纯度，高压直流输电工程换流站内换流阀的冷却均采用密闭式循环水冷却系统。因此，换流阀冷却系统的总体设计应满足以下要求：

(1) 冷却系统能长期稳定运行，不允许有变形、泄漏、异常振动和其他影响换流阀正常工作的缺陷。

(2) 冷却系统管路的设计应保证其沿程水阻<sup>①</sup>最小。

(3) 冷却回路材料的选择应考虑冷却系统在长期高电压运行环境下产生的腐蚀、老化、损耗的可能性。

(4) 冷却系统必须具有足够的冷却能力，以保证在各种运行条件下，都能够有效冷却换流阀。

(5) 为降低阀塔承压，提高换流阀的运行安全程度，应将阀塔布置在内冷水回路中循环水泵的入口端。

(6) 冷却系统的重要设备应实现冗余配置，当失去一个单一的主要部件时，对于任何规定的环境条件，都不应导致换流阀额定连续负荷能力或短时负荷能力的降低。

(7) 换流阀冷却系统的机械结构必须合理，应当简单、坚固、便于检修。

### 二、换流阀冷却系统的结构

换流阀冷却系统一般由内冷水循环系统和外冷水循环系统组成，它们的冷却

---

<sup>①</sup> 沿程水阻：由于流体本身黏性作用以及在管壁对水流的阻滞影响下，呈一定流量分布，水流内部就会产生反抗相对运动的内摩擦力，它表现为作用在整个管道上的流动阻力。

介质（水）是相互独立不连通的，且各自拥有一套主设备，相互配合分工完成整个换流阀的冷却任务。

### 1. 内冷水循环系统

内冷水循环系统简称为内冷水系统，主要设备包括内冷水主循环回路、去离子水处理回路和稳压补水系统，由主循环泵、离子交换器、主过滤器、补水泵、高位水箱、补水箱、自动排气阀、阀门、仪表、管道及控制设施等组成，其结构如图 1-2 所示。内冷水系统的主要功能是为换流阀提供内冷水，吸收换流阀工作中产生的热量，维持阀厅换流设备正常工作温度，确保设备可靠运行。由于内冷水是在一个密闭的循环回路里运行，自然消耗的水量微乎其微，但考虑到检修需要或者设备故障导致漏水情况的出现，因此需要为内冷水系统设计在线补水回路。此外，内冷水补水对水质要求较高，必须为纯水，且纯水电导率不高于  $0.5\mu\text{S}/\text{cm}$ ，纯水比热容为  $4.2\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，水中含氧量小于  $200\text{nL}/\text{L}$ 。

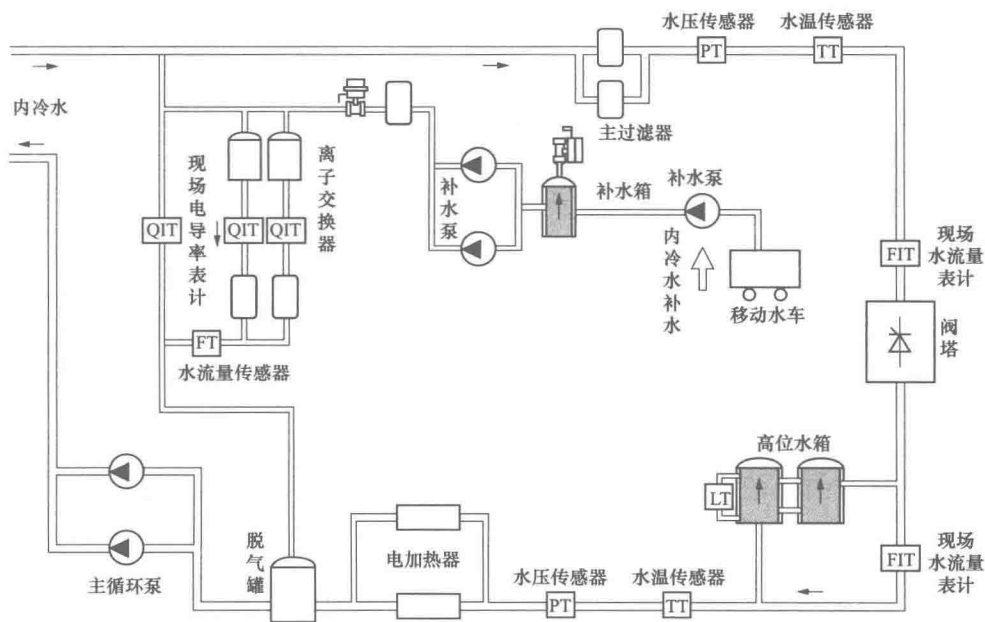


图 1-2 换流阀内冷水循环系统结构

### 2. 外冷水循环系统

外冷水循环系统简称为外冷水系统，主要设备包括外冷水池、闭式冷却塔、喷淋泵、全自动软化水设备、管道、阀门及控制设施等，其结构如图 1-3 所示。外冷水系统的主要功能是对内冷水回路进行冷却。由于喷淋水吸热后形成水蒸气

通过风机排至大气，因此外冷水是在持续地消耗的，需要及时补充水源；又由于外冷水并不直接接触换流阀，对其水质要求较低，因此外冷水补水采用自来水，其水质符合 GB 5749—2016《生活饮用水卫生标准》即可。

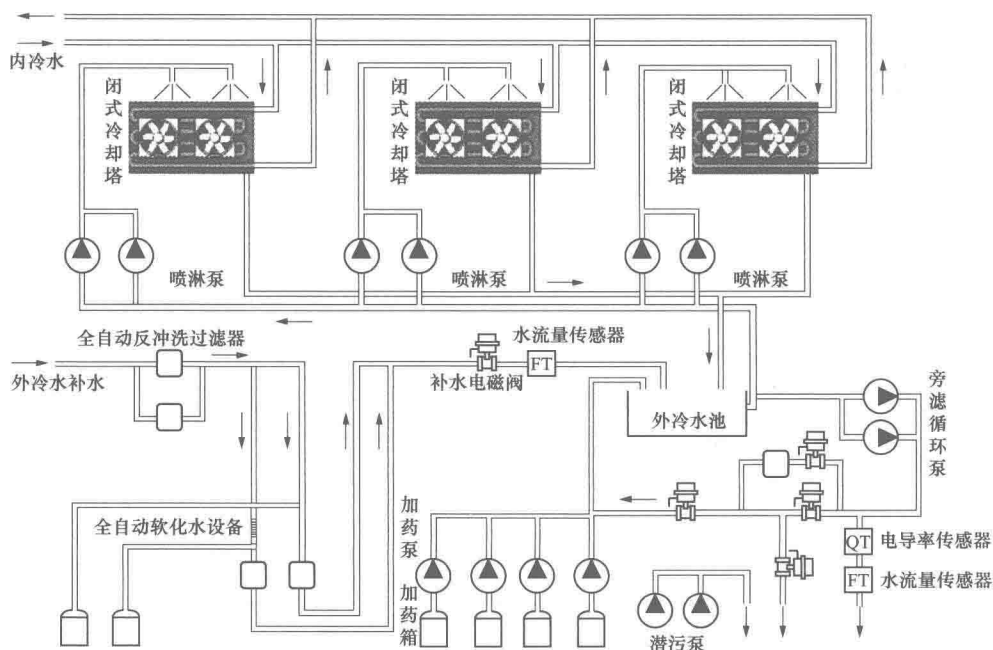


图 1-3 换流阀外冷水系统结构

### 3. 整体结构

内冷水在换流阀内吸热升温后，回流到内冷水循环冷却系统中，并由主循环泵驱动进入室外闭式冷却塔内的换热盘管，喷淋泵从室外的外冷水池中抽水均匀喷洒到闭式冷却塔的换热盘管表面，使换热盘管内的内冷水得到冷却，降温后的内冷水由主循环泵再送至换流阀进行冷却，如此周而复始。内冷水系统与外冷水系统整体结构如图 1-4 所示。

### 4. 换流阀冷却系统各类设备介绍

(1) 主循环泵。主循环泵是内冷水循环系统中，促使内冷水不断循环的总动力源，内冷水在主循环泵的动力作用下，通过被冷却器件吸收热量，然后通过室外换热设备，进行二次散热后，直接回流至主循环回路。内冷水系统装有两台主循环泵，互为备用，正常情况下，仅有一台循环泵运行，两台泵按设置的时间周期进行切换。

(2) 离子交换器。离子交换器采用非再生阴阳混床离子交换树脂，吸附容量

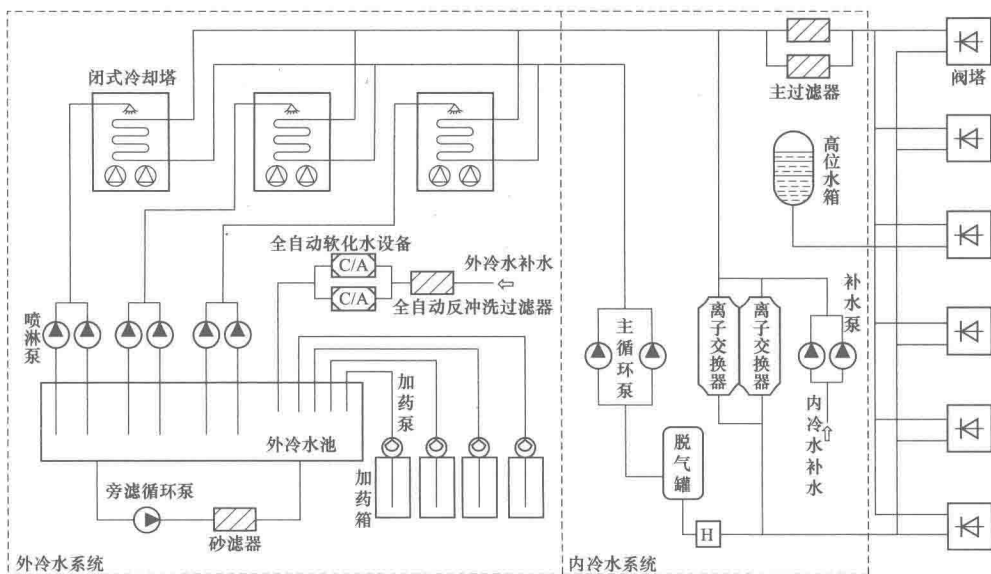


图 1-4 内冷水系统与外冷水系统整体结构

大，耐高温、高流速，是专用于去除微量离子的吸附树脂。离子交换器前后均设置微细过滤器，前过滤器孔径为 $3\mu\text{m}$ ，以滤除水中杂质，后过滤器孔径为 $50\mu\text{m}$ ，用以防止树脂进入主水回路。离子交换器的主要作用是进行内冷水的离子交换（主要是交换 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ ），确保内冷水电导率处于较低水平，根据以往工程的运行经验认为，内冷水电导率应该在 $0.1\mu\text{S}/\text{cm}$ 左右，当离子交换器出水电导率超过 $0.3\mu\text{S}/\text{cm}$ 时，即认为离子交换器需要更换新的离子交换树脂。

(3) 主过滤器。在内冷水主循环回路中的离子交换器出口处安装主过滤器作为保安过滤器，用于防止离子交换器中的树脂或其他杂质进入主循环回路。

(4) 补水泵。补水泵主要用于给内冷水补水系统提供动力，当内冷水系统中的高位水箱液位低于补水泵启动液位值时，补水泵自动启动，给内冷水系统进行补水。内冷水系统配置两台补水泵，两台泵互为备用。

(5) 高位水箱。在阀厅最高处设置了高位水箱，以容纳全温度变化范围内，因温度升高而引起的内冷水体积膨胀，并使内冷水与空气充分接触，保证内冷水中氧含量处于饱和状态。高位水箱进口端与泵的出口段相连，同时高位水箱出口端与泵的入口段相连，这样在高位水箱进口与出口之间即形成一定压力差，从而使水箱中的水始终处于流动状态，保证内冷水水质不会因长期与大气连通、接触而恶化或受到污染。

(6) 补水箱（补水罐或原水罐）。主要用于存放内冷却蒸馏水。为了保持补水水质稳定，需采取密封设计，一般可通过人工注入的方式对补水箱进行补水，也可通过原水泵对补水箱进行补水。内冷水系统配有一个补水箱。

(7) 自动排气阀。冷却回路中固有的和运行中产生的气体，聚集在管路中会产生诸多不良影响，如污染水质、减小流道截面积、增大管道压力，甚至会导致支路断流，因此，管道回路的最高位置设有自动排气阀，能自动有效地进行气水分离和排气，保证最少的液体泄漏。

(8) 外冷水池。主要用于存放和自然冷却外冷水。外冷水池有水位监视装置，当水位低于一定值时，自动打开进水电磁阀进行补水；当水位达到某定值时，停止补水。

(9) 闭式冷却塔。闭式冷却塔是利用水和空气的接触，通过蒸发作用来散去内冷水系统中热量的一种设备，每套外冷水系统都配有冷却塔，内冷水和外冷水的热量交换主要在闭式冷却塔内进行。

(10) 喷淋泵。喷淋泵的主要作用是给外冷水系统提供循环动力。每台闭式冷却塔均配置两台喷淋循环水泵，互为备用，每台水泵均为 100% 的容量，两台泵按设置的时间周期进行切换。

(11) 全自动软化水设备。全自动软化水设备一般由软水器、盐箱、控制器等设备组成。为了避免或减少换流阀外冷水系统沉积物的产生，防止降低传热效率，延长冷却塔的使用寿命，必须防止污垢的产生和微生物的滋生，因此，需要对喷淋水进行水质软化处理。

换流阀冷却系统部分主要设备的冗余配置如表 1-1 所示。

表 1-1 换流阀冷却系统部分主要设备的冗余配置情况表

主设备名称	冗余配置情况
主循环泵	2 台，一备一用
离子交换器	2 台，一备一用
主过滤器	2 只，一备一用
补水泵	2 台，一备一用
高位水箱	2 个
补水箱	1 个
冷却塔	3 台，50% 冗余（2 台即可满足最大负荷冷却容量）
喷淋泵	共 6 台，每组 2 台，一用一备
全自动软化水设备	2 套，一备一用

### 第三节 换流阀冷却控制保护系统

换流阀冷却控制保护系统可实现对内冷水循环系统与外冷水循环系统的监视、控制和保护，同时完成与高压直流控制系统信息的交换。换流阀冷却系统设备运行信息数据上传到换流阀冷却控制保护系统，控制保护单元对信息数据进行逻辑性分析判断，从而对换流阀冷却系统设备进行控制保护。同时，运行人员还可以通过控制保护单元的人机接口界面，实时监控设备的工作状态、传感器测量值、报警信号灯等重要信息。

#### 一、结构

换流阀冷却控制保护系统作为换流阀冷却系统的神经中枢，其可靠性、稳定性及精确性是换流阀冷却系统安全运行的重要保障，应能在各种运行条件下，确保换流阀冷却系统安全、正确、可靠地运行。因此，换流阀冷却控制保护系统采用完全双重化的设计，无论是主系统还是备用系统，均采用两套原理完全相同的控制和保护逻辑。主系统故障时，可自动切换到备用系统，并且控制保护系统切换不会引起换流阀冷却系统的稳定运行。当一套换流阀冷却控制保护系统保持在运行状态时，允许对另一套系统进行维护或检修。换流阀冷却控制保护系统总体结构如图 1-5 所示。

#### 二、功能

换流阀冷却控制保护系统主要是对换流阀冷却系统的各类设备进行监视和控制，对高压直流系统进行保护，其包含的各项功能为：

(1) 监视功能。换流阀冷却控制保护系统可收集各类传感器及继电器的模拟量或数字量信号，并通过人机接口界面将所需要的信息提供给运行人员，便于运行人员对换流阀冷却系统各项参数进行实时监视。需要进行监视的信息有：

- 1) 环境温度监视。
- 2) 内冷水温度、压力、流量、流速及电导率监视。
- 3) 高位水箱、外冷水池水位监视。
- 4) 设备运行状态监视。
- 5) 设备故障监视。
- 6) 参数超限值报警和跳闸。

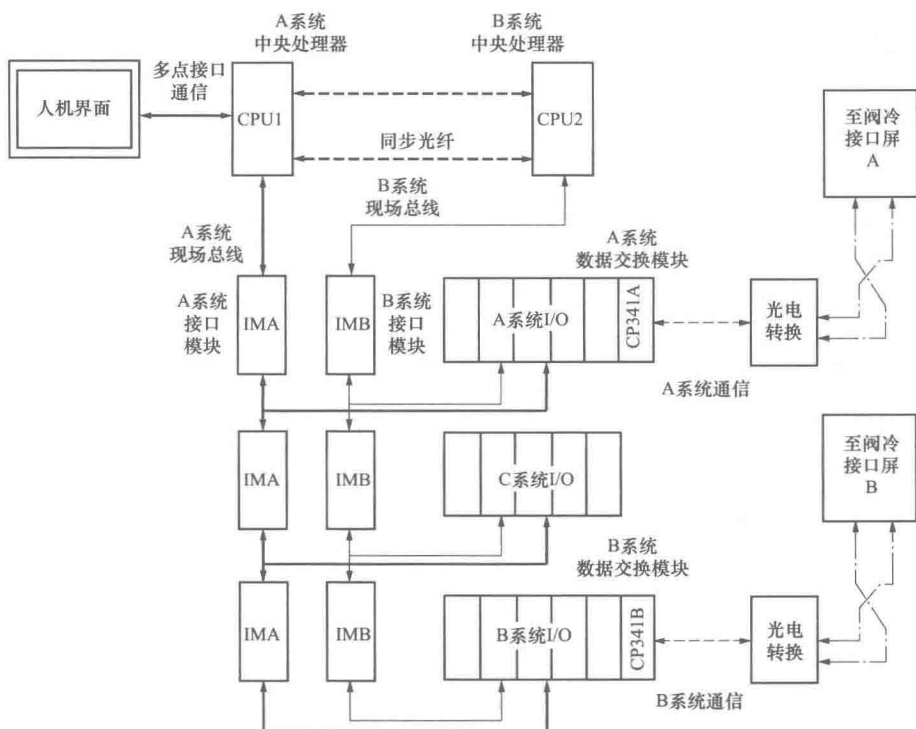


图 1-5 换流阀冷却控制保护系统总体结构图

- 7) 中央处理器（CPU）模块故障报警。
- 8) 可编程逻辑控制器（PLC）模块故障报警。
- 9) 可编程逻辑控制器（PLC）模块输入、输出通道故障报警等。

(2) 控制功能。换流阀冷却控制保护系统可对以下设备进行控制：

- 1) 内冷水主循环泵控制。
- 2) 冷却塔喷淋泵控制。
- 3) 冷却塔风机控制。
- 4) 外冷水旁滤循环泵控制。
- 5) 补水泵控制。
- 6) 阀门控制等。

(3) 保护功能。当出现以下故障时，换流阀冷却控制保护系统将和高压直流控制系统配合，作用于高压直流输电系统的紧急停运。

- 1) 换流阀冷却控制保护系两路交流电源故障。
- 2) 换流阀冷却控制保护系全部直流电源故障。



- 3) 两套换流阀冷却控制保护系统单元故障。
- 4) 内冷水温度高于限值。
- 5) 内冷水电导率高于限值。
- 6) 内冷水流量和压力高于限值。
- 7) 内冷水回路泄漏。