

国内图书分类号: TM744

国际图书分类号: 621.3

学校代码: 10079

密级: 公开

## 专业硕士学位论文

# 国内核电厂反应堆冷却剂泵及控制逻辑研究

硕士研究生: 车皓

导师: 王永强副教授

企业导师: 费云艳

申请学位: 工程硕士

专业领域: 电气工程

培养方式: 在职

所在学院: 电气与电子工程学院

答辩日期: 2013年3月

授予学位单位: 华北电力大学



Classified Index: TM744

U.D.C: 621.3

Thesis for the Master Degree

**The Research of China Nuclear Power Plant Reactor  
Coolant Pump and Control Logic**

<b>Candidate:</b>	Che Hao
<b>Supervisor:</b>	Associate Prof. Wang Yongqiang
<b>Academic Degree Applied for:</b>	Master of Engineering
<b>Speciality:</b>	Power System and Automation
<b>School:</b>	School of Electrical and Electronic Engineering
<b>Date of Defence:</b>	March, 2013
<b>Degree-Conferring-Institution:</b>	North China Electric Power University

## 华北电力大学工程硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的工程硕士学位论文《国内核电厂反应堆冷却剂泵及控制逻辑研究》，是本人在导师指导下，在华北电力大学攻读工程硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签名：车皓

日期：2013年3月9日

## 华北电力大学工程硕士学位论文使用授权书

《国内核电厂反应堆冷却剂泵及控制逻辑研究》系本人在华北电力大学攻读工程硕士学位期间在导师指导下完成的工程硕士学位论文。本论文的研究成果归华北电力大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解华北电力大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的复印件和电子版本，允许论文被查阅和借阅。本人授权华北电力大学，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

本学位论文属于（请在以上相应方框内打“√”）：

保密□，在          年解密后适用本授权书

不保密☒

作者签名：车皓

日期：2013年3月9日

导师签名：王永强

日期：2013年3月9日

## 摘 要

伴随着核电的发展,全国各地的核电项目陆续上马,越来越多的核电设备供货商加入到中国的这场核电盛宴中。国内核电项目的设备供应已经由原来的尽量选择单一原供方向百花齐放的方向发展。但是由于核电项目的以安全为主导的保守性设计,即使较小的设备变动也可能引起整个电厂相关辅助系统及控制上的巨大变化。而主泵作为核电厂内最重要的设备之一,它的变化对核电厂整体设计的影响是不可忽视的。

本文即是通过分析比较目前国内在役电厂和在建电厂不同厂家的主泵,分析由于其结构的不同引起的辅助系统的变化,以及控制逻辑有哪些不同。同时在本文中还对在建电厂采用不同于 M310 原型泵的新型主泵做了较为详细的介绍,对于由于设备换型引起的操作模式和控制逻辑的变化进行了深入的探讨。通过比较和研究国际上不同的设备厂家供货的主泵及其控制逻辑,掌握主泵的控制原则,将对国家核电发展过程中尽早实现重要设备国产化的目标具有重要的意义。

**关键词:** 核电; 主泵; 联锁; 控制逻辑

## Abstract

With the development of nuclear power, the country 's nuclear power project launched one after another, more and more nuclear power equipment suppliers to join the feast of China Nuclear power. Domestic nuclear power project equipment supply already from the single original choice as far as possible for direction in the direction of the development of all flowers bloom together. But as a result of nuclear power projects to safety as the leading conservative design, even smaller variation of equipment can also be caused by the power plant auxiliary system and control the dramatic changes. While the RCP pump is one of the most important equipment in nuclear power plant, which changes for nuclear power plant on the overall design of the impact can not be ignored.

This article is through the analysis and comparison of the current domestic existing and in construction of power plant RCP pump of different manufacturers, analysis because its structure is caused by the different changes of auxiliary system, and control logic which have different. At the same time in this paper also on the construction of power plant using different from the M310 prototype pump RCP pump of the model in detail, due to changing equipment type caused by operation mode and control logic changes were discussed.

**Keywords:** Nuclear power, Main pump, Interlock, Control logic

# 目 录

摘    要 .....	I
Abstract .....	II
<b>第 1 章 绪论 .....</b>	<b>1</b>
1.1    选题的背景和意义 .....	1
1.2    国内外研究现状 .....	2
1.3    本文的主要工作 .....	3
<b>第 2 章 反应堆冷却剂泵及电机介绍 .....</b>	<b>4</b>
2.1    引言 .....	4
2.2    阿海珐公司主泵及电机介绍 .....	4
2.2.1 水力部件 .....	4
2.2.2 热屏 .....	4
2.2.3 轴承 .....	5
2.2.4 轴密封系统 .....	5
2.2.4 结构性部件 .....	5
2.2.5 泵流体系统 .....	5
2.2.6 电机 .....	5
2.2.7 与 M310 原型泵的差异分析 .....	6
2.3    KSB 公司主泵及电机介绍 .....	6
2.3.1 水力部件 .....	6
2.3.2 轴承 .....	7
2.3.3 轴密封系统 .....	7
2.3.4 独立供油系统 .....	7
2.3.5 泵流体系统 .....	7
2.3.6 “Hirth” 连接 .....	8
2.3.7 飞轮 .....	8
2.3.8 与 M310 原型泵的差异分析 .....	8
2.4    Andritz 公司主泵及电机介绍 .....	8
2.4.1 水力部件 .....	9
2.4.2 密封系统 .....	10
2.4.3 电动机部分 .....	12
2.4.4 与 M310 原型泵的差异分析 .....	12

2.5	三菱公司 (MHI) 主泵及电机介绍.....	13
2.5.1	水力部件.....	13
2.5.2	热屏.....	13
2.5.3	轴承.....	14
2.5.4	轴密封系统.....	14
2.5.5	结构性部件.....	14
2.5.6	泵流体系统.....	14
2.5.7	与 M310 原型泵的差异分析 .....	15
2.6	美国 EMD 主泵及电机介绍.....	15
2.6.1	水力部件.....	15
2.6.2	热屏.....	16
2.6.3	轴承.....	16
2.6.4	轴密封系统.....	16
2.6.5	耐高温 O 形圈.....	16
2.6.6	结构性部件.....	17
2.6.7	泵流体系统.....	17
2.6.8	电机.....	17
2.6.9	与 M310 原型泵的差异分析 .....	17
<b>第 3 章</b>	<b>主泵的控制联锁逻辑.....</b>	<b>18</b>
3.1	引言.....	18
3.2	岭澳项目主泵的控制联锁逻辑.....	18
3.2.1	启泵信号.....	18
3.2.2	停泵信号.....	18
3.3	方福项目主泵的控制联锁逻辑.....	19
3.3.1	主泵的典型控制.....	19
3.3.2	主泵的操作模式.....	20
3.3.3	主泵控制联锁逻辑 .....	20
3.3.4	主泵辅机的控制联锁逻辑.....	22
3.4	海南项目主泵的控制逻辑.....	23
3.4.1	启泵条件.....	23
3.4.2	启动电机的条件.....	24
3.4.3	手动停泵条件.....	24
3.4.5	手动停电机条件.....	24
3.4.6	自动停泵条件.....	24
3.4.7	自动停电机条件.....	25

<b>第 4 章 主泵电机控制逻辑的研究</b>	<b>26</b>
4.1 主泵操作模式的研究	26
4.2 主泵电机控制逻辑中参与设备保护信号的研究	27
4.2.1 关于保护信号中“与”和“或”的应用	27
4.2.2 关于卡转子及超速保护停泵的研究	28
4.2.3 关于停机密封位置信号用于停泵的研究	28
<b>第五章 主泵控制逻辑图</b>	<b>30</b>
5.1 岭澳项目主泵控制图	30
5.1.1 启泵逻辑	30
5.1.2 停泵逻辑	30
5.1.3 主泵辅机的控制逻辑	31
5.2 方福项目主泵控制图	32
5.2.1 启泵逻辑	32
5.2.2 停泵逻辑	32
5.3 海南项目主泵控制图	35
5.3.1 启泵逻辑	35
5.3.2 停泵逻辑	35
6.1 结论	35
6.2 展望	38
<b>附录 主泵控制逻辑最终实施方案</b>	<b>39</b>
附录 1 岭澳项目主泵控制逻辑实施方案	39
附录 2 方福项目主泵控制逻辑实施方案	41
附录 3 海南项目主泵控制逻辑实施方案	50
<b>参考文献</b>	<b>55</b>
<b>攻读工程硕士学位期间发表的学术论文和参加科研情况</b>	<b>57</b>
<b>致 谢</b>	<b>58</b>
<b>作者简介</b>	<b>59</b>



# 第 1 章 绪论

## 1.1 选题的背景和意义

随着核电在国内能源结构中的地位日趋重要，新的核电厂的批复步伐也在 2007-2010 年期间达到一个高峰，我国核电建设正以世界上绝无仅有的速度突飞猛进，每年上马七八座核电站。2007 年正式颁布的《核电中长期发展规划》所确定的目标“2020 年核电装机达到 4000 万千瓦”，到 2010 年已激增至 8600 万千瓦，之后核电业界又力挺 1 亿千瓦。

但是日本福岛事故给了世界范围内的核电工作者一个冷静的机会，自日本福岛核事故以来，中国暂停了核电项目的审批。国内核电业经过福岛事故的反思和核安全大检查，在经过一年半的停顿后，中国决定重启核电建设。2012 年 10 月 24 日国务院常务会议讨论并通过了《核电安全规划(2011-2020 年)》(下称“核安全规划”)和《核电中长期发展规划(2011-2020 年)》(下称“核长期规划”)。会议明确，“十二五”时期只在沿海安排少数经过充分论证的核电项目厂址，不安排内陆核电项目。除上述的布局要求外，此次国务院常务会议对当前和今后一个时期的核电建设措辞谨慎，并作出三点部署。国务院常务会议称，在建设节奏上要“合理把握”、“稳步推进”，“稳妥恢复正常建设”；在准入门槛上，“新建核电机组必须符合三代安全标准”，“按照全球最高安全要求新建核电项目”。这两个规划出台的意义就在于，以后核电的发展规模和速度都会放缓，国家在很短时间内批 1000 万千瓦或者 2000 万千瓦的时代已经过去了。

截止到 2011 年底，我国核电机组已建 15 台、在建 26 台（两者累计装机达 4141 万千瓦），拟建机组 21 台（累计装机 2272 万千瓦），上述运行以及在建核电站都只限于沿海地区。在核电规划的白皮书里，2015 年要达到装机 4000 万千瓦，现在已经在运行的有 1300 万千瓦，在建是 3100 万千瓦，还有规划中的 3300 万千瓦，全部数字加起来已经超过了 7000 万千瓦。

核电的发展，伴随的是国际先进核电技术和核电设备的引进。在这个过程中，国内核电以市场换取技术的策略，引进国际上先进的核电设备。在引进过程中消化吸收国际的先进核电技术。而反应堆冷却剂泵的生产制造以及控制运行，作为核电厂内最重要的设备之一，是我国成为一个核电大国必须要学习和掌握的关键。本文即是通过国内在运行和在建电厂中，比较和研究国际上不同的设备厂家供货的主泵的控制逻辑，掌握主泵的控制原则，将对国家核电发展过程中尽早实现重要设备国产化的目标具有重要的意义。

## 1.2 国内外研究现状

反应堆冷却剂系统（RCP）又称为核蒸汽供应系统（NSSS）或一回路供应系统（Primary System）。其主要功能是把堆芯正常运行时产生的热量传输给蒸汽发生器，将蒸汽发生器二回路侧的给水加热并转化为驱动汽轮发电机组的饱和蒸汽。其辅助功能包括：反应性控制、压力控制、裂变产物的放射性屏障等。

RCP 系统由核反应堆和与其相连的三条输热环路组成；每条环路包含一台蒸汽发生器、一台反应堆冷却剂泵以及相应的管道和阀门。在其中的一个环路上连接一台稳压器。

其中反应堆冷却剂泵，即主泵，是由水泵部分和电机部分组成，主泵电机位于水泵之上，为立式电机，通过连接法兰及联轴器和泵体相连接。

目前国内核电厂的主泵包括在运行的参考电站中由阿海珐和三菱供货的 100D 型主泵，在建电厂中包括 ANDRITZ 公司和 KSB 供货的主泵。

1. 基于 M310 原型泵 100D 型主泵，进行部分化和调整，但总体结构和对辅助系统的接口要求基本保持不变。控制逻辑也跟 M310 原型泵类似，较为简单和精炼。

如美国 EMD 公司，通过改进主泵的水力效率及电机效率，使泵组效率提高到 79.5% 以上，超过原型泵。在 1# 密封室使用耐腐蚀螺栓、螺母，提高可靠性。EMD 具有独特的 O 形圈技术，用于轴封系统部件上，即使在密封注入水及设备冷却水都失去的事故工况下，O 形圈仍能保证正常功能，保持轴密封的良好密封性。

2. 基于 KSB 设计的三轴承泵，Andritz 公司主泵即是在此基础上改进而来。这种泵型在外形尺寸，辅助系统、轴密封等方面存在与原型泵有很大差异。

如 KSB 公司的主泵，轴封系统与 M310 原型泵完全不同，三级密封采用流体动压密封，并且取消了原有的热屏设计，而增加了高压冷器，在轴封注入水上采取两种模式，正常时来自 RCV 系统，应急工况下应急注入水系统可以从泵壳内吸取部分冷却剂，通过高压冷却器冷却后进入轴封系统。除了三级密封之外，此种类型的主泵还设有单独的停车密封。

Andritz 公司的主泵与 KSB 的主泵大致结构相同，但是在油循环系统上，又增加了两台泄漏油泵，以满足电机和泵轴油路循环的要求。

正是由于上述结构上的不同，以及供货商对自身设备的保护理念不同，导致了主泵的控制实施过程中存在很大的差异。

由于在建电站的主泵在结构、轴密封以及辅助系统等方面与已运行的参考电站主泵相比都有较大的差别，从而导致主泵及其电机的启停控制逻辑与参考电站主泵有较大的改变。通过对供货商提交的主泵联锁保护文件的消化吸收，同时结

合国内主泵运行的经验,我方与供货商就主泵的控制逻辑进行了多次讨论并最终达成一致意见。本文通过分析双方在讨论过程中出现的典型问题,总结出主泵控制逻辑所发生的变化以及不同供货商之间的差异,并提出最终的解决方案。

### **1.3 本文的主要工作**

本文的研究内容如下:

1. 比较和研究了应用在国内核电厂中不同的设备厂家供货的主泵设备,比较其相似性和结构差异。
2. 比较和研究各个设备厂家供货的主泵控制逻辑,掌握主泵的控制原则,分析了主泵在运行过程中必要的参数。
3. 了解这些不同的设计理念,从而为核电厂中主泵的控制逻辑提供更加可靠的方案。

## 第 2 章 反应堆冷却剂泵及电机介绍

### 2.1 引言

反应堆冷却剂泵简称主泵。每条环路有一台主泵，用于驱动冷却剂在 RCP 系统内循环流动，连续不间断的把堆芯中产生的热量传递给蒸汽发生器二次侧给水。主泵是空气冷却、立式、电动、单级离心泵，带可控泄漏轴封装置。正常运行时，主泵在 15.5MPa 绝对压力和 292℃ 温度下工作，为防止高温、高压、带放射性的冷却剂泄漏，设置了特殊的轴封装置和停机密封。为了便于检修和更换泵轴承和轴封装置，电动机与水泵泵体分开组装，中间以联轴器相连接。电动机下部装有飞轮，它在断电时可延长泵的惰转时间，以带出堆芯剩余功率。由于供货商及设计理念的不同，国内核电厂中的主泵在结构上也有些各自的特点及差异。

### 2.2 阿海珐公司主泵及电机介绍

东方阿海珐为东方电气与法国阿海珐合资公司，所提供主泵方案为 100D 型，为 M310 机组原供机型，且该公司正在为岭澳 4# 机组供货。具体方案描述如下：

#### 2.2.1 水力部件

##### 2.2.1.1 泵壳

泵壳为奥氏体不锈钢铸件，可直接与冷却剂主管道焊接。

##### 2.2.1.2 叶轮

叶轮为 7 叶片式奥氏体不锈钢铸件，通过锥面热套配合、键和锁定的叶轮螺母固定到泵轴下端。

##### 2.2.1.3 导叶

导叶为 12 片式不锈钢铸件。

##### 2.2.1.4 前密封环

前密封环为不锈钢铸件。

#### 2.2.2 热屏

100D 型主泵带有热屏蔽，用于阻止冷却剂热量向主泵上部部件传递。热屏蔽由一组热交换冷却盘管组成，内部通过设备冷却水以阻止冷却剂热量上传。

### 2.2.3 轴承

整个泵组有三套轴承支撑，泵轴上一套径向轴承，正常工况下，由 1# 密封注入水润滑并冷却。

电机上有两处径向轴承，并在上部轴承处有一双向推力轴承。电机上的轴承均为油润滑，上部轴承润滑油通过油冷却器冷却和供油，下部轴承油冷却布置在油槽内。

### 2.2.4 轴密封系统

轴密封系统是主泵机组的关键部件，直接影响到机组的正常/安全运行，对整个反应堆的安全可靠运行至关重要。

东方阿海珐提供轴密封形式与参考电站主泵轴密封相同，为三级密封。

1# 密封为流体静力平衡、液膜支撑密封（非接触式），承担主泵密封的主要压差，只要维持最基本的操作参数，动、静环之间就不会有直接的表面接触。其密封水由 RCV 系统注入，压力稍高于主冷却剂压力。1# 密封泄漏小部分供给 2# 密封作为其润滑水，其余一部分通过 1# 密封水出口返回 RCV 系统，一部分直接混入主冷却剂。

2# 密封为摩擦密封，动、静环直接接触，静环为不锈钢基环复合石墨，动环上有碳化铬涂层。2# 密封水来自 1# 密封泄漏，通过 2# 密封水排出口送到核岛排气及疏排水系统的排水箱。当 1# 密封失效时，2# 密封将由摩擦密封转换为液膜支撑密封（非接触）。

3# 密封结构相似，静环为不锈钢基环复合石墨，动环上有碳化铬涂层。3# 密封有注入的除盐水润滑。3# 密封注入水分成基本等量的两部分，一部分沿 2# 密封排出，一部分沿 3# 密封排出。

### 2.2.4 结构性部件

包括联轴器、中间轴（spool piece）、电机支撑、主法兰等。

### 2.2.5 泵流体系统

主泵机组流体系统可分为 4 种：主冷却剂系统、1# 密封水系统、热交换器冷却水系统（包括热屏冷却水，电机油冷却器冷却水及空气冷却器冷却水）及 3# 密封水系统。

### 2.2.6 电机

电机为鼠笼式感应电动机，定子、转子都进行特殊处理。在电机侧设置了油

顶起系统，在电机启动前和启动过程中，可以在推力轴承的推力头和推力瓦之间产生一层油膜，同时能够将油注入到上导轴承中，以保证电机的安全启动。

电机上方安装了飞轮以获得足够的转动惯量，在飞轮上设置了防反转装置，以防止主泵停机时电机的反转。

电机空冷式，被加热了的冷却空气进入空冷器，空冷器由设备冷却水冷却。

## 2.2.7 与 M310 原型泵的差异分析

该供货商提供方案与 M310 原型泵方案是相同的，但有下面偏离项。

### 3.1 关于轴封更换时间

技术规格书提出，轴封更换时间应在 7 小时内完成，东方阿海珐方案中认为 7 小时更换机械密封对于 100D 型主泵而言难以完成，20 小时限值为合理值。M310 原型泵规格书要求 20 小时内完成，秦山二期工程主泵规格书要求 7 小时。事实上，更换机械密封的时间长短，除了与主泵结构设计有关外，还与操作工人的熟练程度有关，因此，该值对于实际运行维护、维护而言，仅供参考。

### 3.2 关于温度传感器

关于温度传感器，规格书要求使用 4 线制传感器，东方阿海珐提供方案中为 3 线制，岭澳 I 期、II 期及大亚湾电站主泵采用了 3 线制。

### 3.3 关于试验

规格书要求每台泵应进行至少 50 小时的全流量性能试验，东方阿海珐认为，仅仅第一台泵应进行全流量试验，其他泵进行小流量试验。

## 2.3 KSB 公司主泵及电机介绍

KSB 是德国的大型成套机械技术设备跨国集团，是全球核电主泵主要供货商之一。

KSB 提供的主泵方案与 M310 原型主泵方案有较大差别，在外形尺寸，辅助系统、轴密封等方面也存在很大差异。KSB 所提供技术方案如下：

### 2.3.1 水力部件

#### 1. 泵壳

泵壳为奥氏体不锈钢铸件。

#### 2. 叶轮

材料为 SA743 CA6NM(1.4317,EN10283)。

#### 3. 导叶

导叶为铸件，加工成两段，组装在一起安装在泵壳内。

### 2.3.2 轴承

整个泵组上有 4 套径向轴承及 1 套双向推力轴承,在水泵上有两套径向轴承。

#### 1. 泵下部轴承

泵下部轴承为水润滑式径向轴承,属于传统的水润滑轴承。泵轴上加装轴套,润滑水来自密封注入水。

#### 2. 泵上部轴承

泵上部轴承为油润滑径向轴承,润滑油通过独立供油系统提供。

#### 3. 推力轴承

在泵上部有双向推力轴承,油润滑,润滑油也通过供油系统提供。

### 2.3.3 轴密封系统

轴密封系统是主泵机组的关键部件,直接影响到机组的正常/安全运行,对整个反应堆的安全可靠运行至关重要。

该供货商提供轴密封也为 3 级密封,但结构与参考电站主泵轴密封不同。三级密封结构均相似,表面上覆镀碳化硅,均属于流体动压密封(非接触式)。压力分配方式:从 1#~3# 分别承担 42%, 42%, 16% 压差。

与 100D 型主泵不同,轴密封注入水有两种模式:

#### 1) 正常工况

轴密封水来自 RCV 系统,在注入轴密封系统前,先经过高压冷却器 (hp-cooler), (冷却器内通过设备冷却水作为冷源),密封水在冷却到要求温度后进入轴密封系统,一部分向下流动作为泵下部轴承润滑水,一部分向上流动经过各级密封,通过各级密封后的泄漏水出口返回辅助系统。

#### 2) 应急工况

当失去 RCV 系统密封注入水后,应急供水系统启动。该系统从泵壳内吸取部分冷却剂,进入高压冷却器 (hp-cooler) 冷却到要求温度后进入轴密封系统,代替 RCV 注入水作为泵下部轴承润滑水及三级密封密封水。

该供货商提供的机械密封具体工作原理,结构,材料,运行参数,冷却水参数等均未提供,需其进一步提供相关技术文件。

### 2.3.4 独立供油系统

该方案水泵上有独立的供油系统,为泵轴承提供润滑油。

### 2.3.5 泵流体系统

主泵机组流体系统可分为 3 种:主冷却剂系统、密封水系统、冷却水系统。

### 2.3.6 “Hirth” 连接

为了方便主泵轴密封及泵上部轴承的检修，泵轴部分设计成两段，两段轴间的连接形式区别与其他主泵厂商方案，采用了独特的“Hirth”连接（一种特殊的花键连接），该连接可以保证很好的轴线对中性，有利于转动部件的动平衡。

### 2.3.7 飞轮

与 100D 型，Andritz 型主泵相比，泵组飞轮不是安装在电机上方，而是装在电机下方。

### 2.3.8 与 M310 原型泵的差异分析

M310 原型泵为电机、水泵一体式设计，该供货商方案为电机、水泵独立设计，在外形尺寸上有很大差别，该供货商提供主泵方案主泵高度要高于 M310 原型泵。泵组支撑也与参考电站有较大差别。

#### 1. 辅助系统及接口

M310 原型泵机型有成熟的、较为固定的辅助系统解决方案，该供货商所提供主泵方案所需辅助系统及接口均与 M310 原型泵方案有较大区别。

#### 2. 轴封系统

该供货商轴封系统虽然也为三级密封，但结构与工作方式均与 M310 原型泵轴封系统有较大差别，所需密封水接口与密封水参数也不同。

#### 3. 轴承

M310 原型泵水泵部分仅有一处径向水润滑轴承，该供货商技术方案水泵上有两处径向轴承，一处推力轴承，且泵上部轴承需要单独供油系统提供润滑油。

#### 4. 电机与泵连接形式

M310 原型泵电机与泵的连接采用联轴器刚性连接，该供货商主泵方案电机与泵连接通过齿式联轴器连接，需要有润滑有注入润滑。

## 2.4 Andritz 公司主泵及电机介绍

Andritz 公司创立于 1852 年，是奥地利最大的大型成套机械技术设备跨国集团，全球有 35 个生产基地，超过 10000 名员工。自 20 世纪 70 年代开始为民用核电站提供反应堆冷却剂主泵，第一台主泵是为阿根廷 CAN1 设计，目前已安全运行超过 180000 小时。Andritz 与沈泵合作为中国海南项目提供过主泵。

Andritz 为方家山/福清项目提供的主泵方案与 M310 原型泵方案有较大差别，其电机与水泵独立设计、制造，在辅助系统、轴密封等方面也存在很大差异。根据 Andritz 发来技术文件，所提供技术方案如下：



主泵总体结构可分为三大部分。

- 1) 水力机械部件：包括泵体、泵轴承和轴封水注入接口。
- 2) 轴封系统：轴封系统由三级工作密封组成，是主泵的精密部件。这三级密封具有相同的结构并可互换，三级密封之后还有停机密封。
- 3) 电动机部分：包括电动机主体（定子和转子），电动机上部径向轴承，电动机下部径向轴承，飞轮。

## 2.4.1 水力部件

### 1. 叶轮

叶轮设计为轴流式。叶片型线由一整锻件经精确机械加工而成。由于主泵高温运行，叶轮与泵轴的连接是热弹性的连接。力矩由径向圆柱来传递。

### 2. 导叶体组件

导叶体组件由导叶与支撑管组成，均为锻件，外侧为导叶外，支撑管内部装轴承，以承受泵轴径向力。

### 3. 泵壳

泵壳为马氏体不锈钢锻件。

### 4. 支撑管

带支撑管的导叶体组用来对导轴承进行定位。而主泵内部部件（如隔热体）则装配在支撑管上。

### 5. 隔热装置

在支撑管和泵轴之间设有一块隔热体，以阻止热量向泵轴的传递。

### 6. 泵轴

泵轴设计有可移动的轴段，能在不拆除电机的情况下拆卸泵轴密封。

### 7. 轴承

整个泵组上有 3 套径向轴承及 1 套推力轴承，在水泵上有两套径向轴承。

#### 1) 泵下部轴承

泵下部轴承为水润滑式径向轴承，由特殊石墨材料制造，泵轴上加装轴套，润滑水来自密封注入水。

#### 2) 泵上部轴承

泵上部轴承为油润滑径向轴承，润滑油通过安装在电机支座上的独立供油系统提供。

这个径向轴承也作为电机下部径向轴承，油润滑推力轴承用来承受轴向推力。因此也叫做双向轴承。

#### 3) 电机上部轴承

电机上部轴承为油润滑径向轴承。

## 2.4.2 密封系统

轴密封系统是主泵机组的关键部件，直接影响到机组的正常/安全运行，对整个反应堆的安全可靠运行至关重要。

主泵轴密封为3级密封，结构与参考电站主泵轴密封不同。三级密封结构均相同，其位置可互换，均属于流体动压密封（非接触式）。

密封室的接口分别为一个密封注入水接口，一个高压泄漏管线接口，一个低压泄漏管线接口，一个停机密封用的氮气补给接口。

### 1. 工作密封

反应堆冷却剂泵在正常运行时，其泵轴由三级动压密封来密封，这样通过三步将系统压力（注入水压力）分别降低到高压和低压泄漏的压力值，如图 2-1 所示。

在密封室内，注入水流分成 3 个主要支流：

- 注入水的一部分（在正常运行期间，大约是 1115 l/h）冷却一级密封，然后顺着泵轴润滑和冷却下部径向轴承。这部分注入水经过下部轴承后与反应堆主冷却剂汇合。

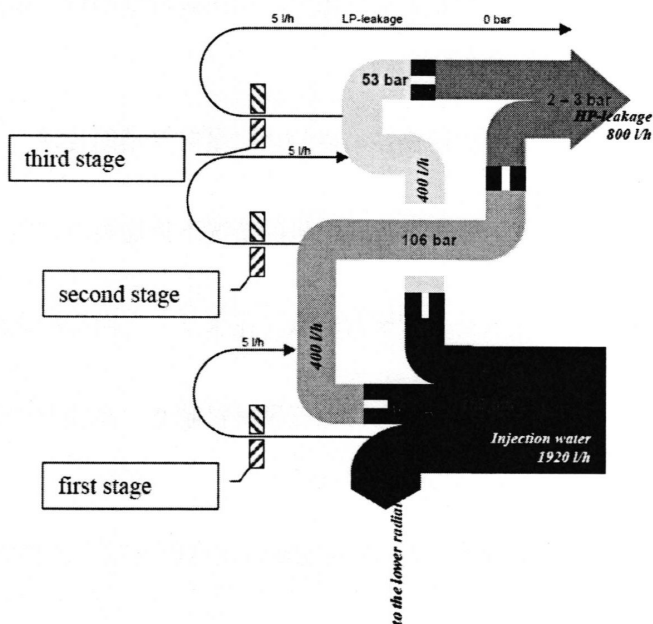


image 1

图 2-1 主泵轴封水流量分布

- 注入水的第二部分通过一个节流阀将压力从大约 159bar 降低到 106bar, 然后进入第二级密封腔, 冷却二级密封。然后再次通过一个节流阀将压力从 106bar 降低到 3bar, 在离开主泵后成为高压泄漏的一部分。

- 注入水的第三部分通过一个节流阀将压力从大约 159bar 降低到 53bar, 然后冷却三级密封, 之后再次通过一个节流阀将压力从 53bar 降低到 3bar, 与第二部分注入水一样, 成为高压泄漏的一部分。

除了这三条主要支流外, 每级密封的泄漏很小。在正常运行工况下, 每级密封的泄漏大约为 5-10l/h。

第一级密封的泄漏水与第二级密封的冷却水汇合, 因此经过第一级密封后, 其压力从 159bar 降低到 106bar。

同样的, 第二级密封的泄漏水与第三级密封的冷却水汇合, 因此, 经过第二级密封后, 其压力从 106bar 降低到 53bar。

第三级密封的泄漏水离开密封室时, 叫做低压泄漏。因为经过第三级密封后, 其压力从 53bar 降低到 0bar。

#### 密封注入水的两种模式

##### • 正常工况

轴密封水来自 RCV 系统, 在注入轴密封系统前, 先经过一个高压冷却器, (冷却器内通过设备冷却水作为冷源), 密封水在冷却到要求温度后进入轴密封系统, 一部分向下流动作为泵下部轴承润滑水, 一部分向上流动经过各级密封, 通过各级密封后的泄漏水出口返回辅助系统。

##### • 应急工况

当失去 RCV 系统密封注入水后, 应急供水系统启动。该系统从泵壳内吸取部分冷却剂, 进入高压冷却器过滤并冷却到要求温度后进入轴密封系统, 代替 RCV 注入水作为泵下部轴承润滑水及三级密封的密封水。

## 2. 停机密封

停机密封是一个特别的活塞, 置于上述轴封的第三级密封之上。如果发生密封损坏或者严重的注入水故障, 停机密封作为最后的屏障, 将起到防止核反应堆主冷却剂泄漏的作用。停机密封必须与高压泄漏管路、低压泄漏管路以及注入水管路的电动阀相配合操控。万一第三级密封发生严重的故障, 低压泄漏升至一定数值, 这样就不可能通过低压泄漏管路来排出。

此时主泵必须停下, 在以上提到的三条管路中的电动阀必须关闭。在主泵的转子停下后, 停机密封的活塞向上移动, 直到活塞中的 O 型环压住泵转子联轴器的下半部分, 这样就避免主冷却剂流出一回路。通过氮气压力移动活塞, 来关闭停机密封。为了关闭停机密封, 电动阀[RCP908VP]必须关闭, 电磁阀[RCP909VP]必须打开使管路充压直至活塞顶住。

### 2.4.3 电动机部分

主泵电机是鼠笼式异步电动机，通过电动机支架和泵的法兰环连接，通过联轴器将泵轴和电机轴连接。

电机定子和转子用空气冷却，装在转子两端的风叶通过电动机体的冷却孔吸入空气，流过电动机，然后回到装在电动机机架外的空气冷却器冷却。每台电动机有两个彼此正好相对安装的空气冷却器，冷却器管内流动的是 RRI 系统的冷却水。

为防止主泵停止运转后电动机绕组受潮，安置了电动机绕组电加热器。主泵停运后，电加热器自动投入运行；主泵启动时，电加热器自动断开。

#### 1) 飞轮

在发生主泵断电的情况下，反应堆紧急停堆。停堆后反应堆剩余功率呈指数下降，故短时间内必须保持有较高的冷却剂流量通过反应堆堆芯。每台主泵电机装有一个飞轮，固定在电机的下端。飞轮增加了泵的转动惯量，可延长泵的惰转时间。它与反应堆保护系统配合，保证在紧急停堆和泵断电时有充分的排热能力。飞轮提供的惰转流量也有助于自然循环流动。

#### 2) 防逆转装置

如果一台主泵断电而其余主泵仍在运行，在断电主泵的环路中将发生流体逆向流动。这一逆向流动对冷却堆芯是不利的，因为它绕过了堆芯而旁路。逆流还会引起泵的反转，虽然这不会造成机械损伤，但是如果再次启动该泵，就会产生过大的电流，而可能使电动机过热或引起其他损坏。为了防止泵反转，装设了防逆转装置。

#### 3) 油提升系统

设置油提升系统是为了在泵启动和停运时减小启动电流和防止推力轴承损坏（因为推力轴承只在较高泵转速下才是自润滑的）。在主泵启动和停运前要先启动顶轴油泵，在推力瓦和推力盘之间产生一层油膜，这样避免推力轴承损坏，并使主泵较容易的加速到额定转速。

#### 4) 泄漏油系统

主泵设置两个泄漏油泵，在主控制室可以选择两台泄漏油泵的运行方式。泄漏油泵的设置，是为了将下油槽中的油抽入上油槽，以保证主泵电机油路系统的循环。

### 2.4.4 与 M310 原型泵的差异分析

M310 原型泵为 100D 型。ANDRITZ 公司所提供主泵技术方案与 M310 原型泵方案有较大差别，主要区别如下：

1) M310 原型泵为电机、水泵一体式设计，ANDRITZ 公司的方案为电机、

水泵独立设计，在外形尺寸上有很大差别，泵组支撑也与参考电站有较大差别。

2) M310 原型泵有成熟的、较为固定的辅助系统解决方案，ANDRITZ 公司所提供主泵方案所需辅助系统及接口均与 M310 原型泵方案有较大区别。

3) M310 原型泵泵壳与叶轮均为奥氏体不锈钢铸件，该供货商技术方案中泵壳与叶轮均为马氏体锻件。锻件相对于铸件力学性能更为优越，同时能避免铸造工艺中易出现的缺陷及裂纹问题。

4) ANDRITZ 公司的主泵轴封系统虽然也为三级密封，但结构与工作方式均与 M310 原型泵轴封系统有较大差别，所需密封水接口与密封水参数也不同。

5) M310 原型泵电机与泵的连接采用联轴器刚性连接，该供货商主泵方案电机与泵连接通过齿式联轴器连接，需要有润滑有注入润滑。

## 2.5 三菱公司（MHI）主泵及电机介绍

三菱公司（MHI）自 20 世纪 70 年代起就开始从事主泵的研究、设计与制造，在全球已有超过 50 台各类主泵的供货业绩，是世界上核电站主泵的主要供货商之一。

三菱公司提供的主泵型号为 100D 型，所采用的技术是由西屋公司转让，是 M310 机组原供机型，且三菱与西屋公司合作为秦山 II 期及扩建工程供货。具体方案描述如下：

### 2.5.1 水力部件

#### 1. 泵壳

泵壳为奥氏体不锈钢铸件，可直接与冷却剂主管道焊接。

#### 2. 叶轮

三菱建议采用 7 叶片式奥氏体不锈钢锻件叶轮，秦山 II 期扩建工程主泵叶轮也是锻件。采用锻件叶轮能够避免铸造工艺中容易产生的铸造缺陷和裂纹，更容易保证叶轮的力学性能。同时，三菱能够提供铸造叶轮，具体制造工艺可根据具体要求执行。

叶轮通过锥面热套配合、键和锁定的叶轮螺母固定到泵轴下端。

#### 3. 导叶

导叶为 16 片式不锈钢铸件。

#### 4. 前密封环

前密封环为不锈钢铸件。

### 2.5.2 热屏

100D 型主泵带有热屏蔽，用于阻止冷却剂热量向主泵上部部件传递。热屏

蔽由一组热交换冷却盘管组成，内部通过设备冷却水以阻止冷却剂热量上传。

### 2.5.3 轴承

主泵有径向轴承支撑。三菱在原 100D 型轴承的基础上进行了改进，使该轴承能够降低主泵机组的“轴振”(whirl vibration)，且该轴承性能已在日本本国核电站上得到验证。

正常工况下，由 1#密封注入水润滑并冷却。

### 2.5.4 轴密封系统

轴密封系统是主泵机组的关键部件，直接影响到机组的正常/安全运行，对整个反应堆的安全可靠运行至关重要。

该供货商提供轴密封形式与参考电站主泵轴密封相似，是三菱根据原 100D 型轴密封进行的改进，为三级密封。

1#密封为流体静力平衡、液膜支撑密封（非接触式），承担主泵密封的主要压差，只要维持最基本的操作参数，动、静环之间就不会有直接的表面接触。其密封水由 RCV 系统注入，压力稍高于主冷却剂压力。1#密封泄漏小部分供给 2#密封作为其润滑水，其余一部分通过 1#密封水出口返回 RCV 系统，一部分直接混入主冷却剂。

2#密封为摩擦密封，动、静环直接接触，静环为不锈钢基环复合石墨，动环上有碳化铬涂层。2#密封水来自 1#密封泄漏。当 1#密封失效时，2#密封将由摩擦密封转换为液膜支撑密封（非接触）。2#密封后有除盐水注入，由于该部分除盐水的注入，2#密封背压提高，2#密封泄漏量相对参考电站主泵 2#密封泄漏量降低，甚至为 0。2#密封泄漏水与注入的除盐水混合后，一部分由 2#密封水排出口送到核岛排气及疏排水系统的排水箱，一部分供应给 3#密封。

3#密封结构相似，静环为不锈钢基环复合石墨，动环上有碳化铬涂层。3#密封水来自 2#泄漏及注入的除盐水，经过 3#密封后，通过 2#密封水排出口（该处需要澄清是 2#还是 3#密封水排出口）排入核岛排气及疏排水系统的排水箱。

### 2.5.5 结构性部件

包括联轴器、中间轴（spool piece）、电机支撑、主法兰等。

### 2.5.6 泵流体系统

主泵机组流体系统可分为 4 种：主冷却剂系统、1#密封水系统、热交换器冷却水系统及 2#密封水系统（除盐水）。

## 2.5.7 与 M310 原型泵的差异分析

M310 原型泵由法国日蒙（阿海珐）公司提供，泵型为 100D 型。热蒙公司采用的主泵技术是由西屋公司转让，同样，三菱公司所采用的主泵技术也是由西屋公司提供的 100D 型，因此，三菱所提供的技术方案与参考电站主泵方案相同，只是在其基础上进行了部分改进。

### 1. 提高效率

改进了主泵的水力效率，使泵效率达到 85% 以上。

### 2. 锻造叶轮

三菱建议采用 7 叶片式不锈钢锻件叶轮，秦山 II 期扩建工程主泵叶轮也是锻件。采用锻件叶轮能够避免铸造工艺中容易产生的铸造缺陷和裂纹，更容易保证叶轮的力学性能。同时，三菱能够提供铸造叶轮。

### 3. 改进轴封系统

三菱主泵与 M310 原型泵轴封有较大区别，是根据原 100D 型主泵轴密封进行的改进。1#密封与 M310 原型泵 1#密封相似；2#密封与 M310 原型泵 2#密封结构相似，但在 2#密封后有除盐水注入，同时取消了 3#密封的除盐水注入。由于 2#密封后除盐水的注入，其被压升高，减小了 2#密封的泄漏，甚至泄漏量为 0，因此，减少了带有放射性的冷却剂向疏排系统的排放。

## 2.6 美国 EMD 主泵及电机介绍

美国 EMD 公司（Curtiss-Wright Electro-Mechanical Corporation）前身为美国西屋公司的一个事业部（Westinghouse Electro-Mechanical Division），自 1952 年起就开始从事主泵的研究、设计与制造，在全球已有超过 350 台各类主泵的供货业绩，在主泵领域处于世界领先地位。

美国 EMD 公司提供的主泵型号为 100D 型，是 M310 机组原供机型，且曾与三菱合作为秦山 II 期及扩建工程供货。具体方案描述如下：

### 2.6.1 水力部件

#### 1 泵壳

泵壳为奥氏体不锈钢铸件，可直接与冷却剂主管道焊接。

#### 2 叶轮

叶轮为 7 叶片式奥氏体不锈钢铸件，通过锥面热套配合、键和锁定的叶轮螺母固定到泵轴下端。

#### 3 导叶

导叶为 16 片式不锈钢铸件。

#### 4 前密封环

前密封环为不锈钢铸件。

### 2.6.2 热屏

100D 型主泵带有热屏蔽，用于阻止冷却剂热量向主泵上部部件传递。热屏蔽由一组热交换冷却盘管组成，内部通过设备冷却水以阻止冷却剂热量上传。

### 2.6.3 轴承

整个泵组有三套轴承支撑，泵轴上一套径向轴承，正常工况下，由 1# 密封注入水润滑并冷却。

电机上有两处径向轴承，并在上部轴承处有一双向推力轴承。电机上的轴承均为油润滑，上部轴承润滑油通过油冷却器冷却和供油，下部轴承油冷却布置在油槽内。

### 2.6.4 轴密封系统

轴密封系统是主泵机组的关键部件，直接影响到机组的正常/安全运行，对整个反应堆的安全可靠运行至关重要。

该供货商提供轴密封形式与 M310 原型泵轴密封相同，为三级密封。

1# 密封为流体静力平衡、液膜支撑密封（非接触式），承担主泵密封的主要压差，只要维持最基本的操作参数，动、静环之间就不会有直接的表面接触。其密封水由 RCV 系统注入，压力稍高于主冷却剂压力。1# 密封泄漏小部分供给 2# 密封作为其润滑水，其余一部分通过 1# 密封水出口返回 RCV 系统，一部分直接混入主冷却剂。

2# 密封为摩擦密封，动、静环直接接触，静环为不锈钢基环复合石墨，动环上有碳化铬涂层。2# 密封水来自 1# 密封泄漏，通过 2# 密封水排出口送到核岛排气及疏排水系统的排水箱。当 1# 密封失效时，2# 密封将由摩擦密封转换为液膜支撑密封（非接触）。

3# 密封结构相似，静环为不锈钢基环复合石墨，动环上有碳化铬涂层。3# 密封有注入的除盐水润滑。3# 密封注入水分成基本等量的两部分，一部分沿 2# 密封排出，一部分沿 3# 密封排出。

### 2.6.5 耐高温 O 形圈

EMD 具有独特的 O 形圈技术，用于轴封系统部件上，耐热温度可达 550. F，即 287.78℃。即使在密封注入水及设备冷却水都失去的事故工况下，O 形圈仍能保证正常功能，保持轴密封的良好密封性。



## 2.6.6 结构性部件

包括联轴器、中间轴（spool piece）、电机支撑、主法兰等。

## 2.6.7 泵流体系统

主泵机组流体系统可分为 4 种：主冷却剂系统、1# 密封水系统、热交换器冷却水系统（包括热屏冷却水，电机油冷却器冷却水及空气冷却器冷却水）及 3# 密封水系统。

## 2.6.8 电机

电机为鼠笼式感应电动机，定子、转子都进行特殊处理。在电机侧设置了油顶起系统，在电机启动前和启动过程中，可以在推力轴承的推力头和推力瓦之间产生一层油膜，，同时能够将油注入到上导轴承中，以保证电机的安全启动。

电机上方安装了飞轮以获得足够的转动惯量，在飞轮上设置了防反转装置，以防止主泵停机时电机的反转。

电机空冷式，被加热了的冷却空气进入空冷器，由设备冷却水冷却。

## 2.6.9 与 M310 原型泵的差异分析

M310 原型泵有法国热蒙（阿海珐）公司提供，泵型为 100D 型。热蒙公司采用的主泵技术是由西屋公司转让，因此，EMD 所提供的技术方案与 M310 原型泵方案相同，且在其基础上进行了改进。

### 2.1 提高效率

通过改进主泵的水力效率及电机效率，使泵组效率提高到 79.5% 以上，超过参考电站主泵。

### 2.2 耐腐蚀螺栓、螺母

在 1# 密封室使用耐腐蚀螺栓、螺母，提高可靠性。

## 第 3 章 主泵的控制联锁逻辑

### 3.1 引言

岭澳项目的主泵采用的是 M310 机组的原型泵，即 100D 型主泵。其控制逻辑经过多年运行经验的积累和反馈，做到了相当的简化和精炼，是我们在做后续电站的重要参考样本。但是由于后续电站的主泵供货商不同，设计理念不同，导致控制逻辑最终实施起来跟原型泵的差别很大。本章即是列举了几个不同电站的控制逻辑，比较其存在的共同点和差异，为以后的工程提供借鉴。

### 3.2 岭澳项目主泵的控制联锁逻辑

岭澳项目的主泵采用的是手动控制的模式，当主泵的启泵信号全都满足时，在主控室会看到启泵指示灯 513KS 亮起，此时操作员可以操作控制台上的启泵按钮启动主泵。

#### 3.2.1 启泵信号

1. 主泵油压[RCP105SP]大于 4.2mpa。
2. 主泵密封注入水和一级密封泄漏水管线的压差[RCP109MP]大于 1.5mpa。
3. 一级密封泄漏流量[RCV036MD]大于低低值。
4. 主泵顶轴油泵[RCP011PO]运行。

上述条件满足时即可启动主泵。

#### 3.2.2 停泵信号

1. 当主泵的上部轴承或下部轴承的温度 [RCPMT110/MT111/MT112/MT113/MT130/MT131/MT132/MT133]大于等于 80 度时，主泵应立即停泵。
2. 一级密封泄漏流量[RCV037MD]高高且  $P > P_s$  时，主泵应立即停泵。

### 3.3 方福项目主泵的控制联锁逻辑

#### 3.3.1 主泵的典型控制

对于主泵及电机，供货商推荐的典型的控制逻辑如图 2-1 所示：

其中左图为电机控制的标准输入信息，右图为电机控制的详细原理图。

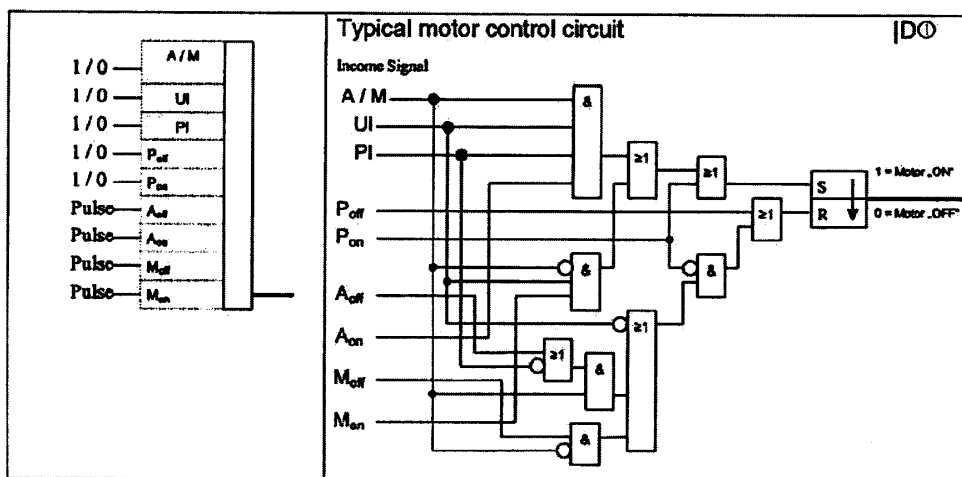


图 3-1 电机控制典型图

输入信号的优先级如下所示，其中优先级高的信号会将优先级低的信号屏蔽掉。

##### 1) P-Off(Protection Off)

P-Off 信号是优先级最高的信号，在任何情况下只要出现 P-Off 信号，即可直接将电机停止。P-Off 信号可以由优先级较高的联锁控制逻辑发出，也可以由紧急停机按钮发出，用于避免人员伤害或设备损坏。

##### 2) P-On(Protection On)

P-On 信号可以由优先级较高的反应堆保护逻辑发出，但是在目前核电站的系统设计中，系统不会发出 P-On 信号以启动主泵，故此信号在逻辑控制中始终置为 0。

##### 3) UI(Unconditional Interlock)

UI 条件分为用于运行主泵的 UI 条件和用于启动主泵的 UI 条件，运行主泵时只需满足运行主泵的 UI 条件，而启动主泵时，运行主泵的 UI 条件和启动主泵的 UI 条件都是必要条件。

##### 4) M-Off(Manual Off)

在主泵处于手动-维修模式下 (A/M=0)，该信号用于手动停泵。

### 5) M-On(Manual On)

在主泵处于手动-维修模式下 ( $A/M=0$ )，该信号用于手动启泵。

### 6) PI(Process Interlock)

在主泵处于手动正常-模式下 ( $A/M=1$ )，PI 条件为启动主泵的必要条件。

### 7) A-Off(Automatic Off)

在主泵处于手动-正常模式下 ( $A/M=1$ )，该信号用于停泵。

### 8) A-On(Automatic On)

在主泵处于手动-正常模式下 ( $A/M=1$ )，该信号用于启泵。

## 3.3.2 主泵的操作模式

以输入信号优先级的设置为基础，主泵及其辅助系统操作模式分为如下两种：

### 1) 手动-维修模式

手动-维修模式只能用于试运行或者维修目的，并应该在经过特殊培训的人员监督下进行操作。主泵采用手动-维修模式操作的必要条件是 UI 条件都满足，即  $UI=1$ 。在此种操作模式下，主泵及其辅助系统通过手动开关分别启动或停止。

### 2) 手动-正常模式

在正常情况下，主泵采用手动-正常模式运行。此种运行模式的必要条件是 UI 条件和 PI 条件必须同时满足，即  $UI=1$  同时  $PI=1$ 。按照预先设定的启动步骤，操作员确认所有条件都满足的情况下，通过主控室 KIC 工作站或 BUP 后备盘发出主泵的启动命令以启动主泵。

## 3.3.3 主泵控制联锁逻辑

### 1. 运行主泵所需的 UI 条件

#### 1) 密封注入水压力[RCP 601/602MP]大于 2.5MPa。

密封注入水的压力用于显示管道的破损情况，以检测阀门处的压力是否低于系统压力。为了将密封注入水压入主泵，密封注入水的压力必须大于系统压力。

### 2. 启动主泵所需要的 UI 条件

#### 1) 顶轴油泵[RCP 011PO]运行（顶轴油泵后的油压 $RCP\ 606MP > 1.5MPa$ ）。

顶轴油泵的作用就是控制管路内的压力。

#### 2) 轴承油箱的温度[RCP 614MT]大于 20℃。

为了在泵推力轴承间建立起有效的油膜，油膜必须有适当的粘性，而只有当油温大于 20℃时，油的粘性才是合适的。

#### 3) 低压泄漏阀[RCP 902VP]打开，同时位于循环密封注入水管路上的两个阀门[RCP 906VP]和[RCP 912VP]关闭。

如果低压泄漏阀门关闭,密封水则有可能通过打开的停机密封泄漏,因此打开停机密封前必须将低压泄漏阀门打开。

启动主泵时必须提供有效的密封注入水流,而这个密封注入水流在启动主泵期间不能由其自身的循环密封注入水提供。

4) 下油箱油位[RCP 603MN]大于最低值且小于最高值。

5) 上油箱油位[RCP 605MN]大于最低值。

上下油箱的油位处于合适的位置,是为了保证充足的油量对轴承进行润滑。油位偏离正常值即意味着油系统的故障。可能的起因是:

- 油泄漏
- 水浸入

上述条件是主泵启动时必须满足的最小条件,但这些条件对泵的进一步运行不会产生影响,故当主泵运转起来以后控制逻辑可以将上述条件屏蔽。

### 3. 启动主泵所需的 PI 条件

1) 密封注入水流量[RCV 021/121MD]大于 1800l/h。

如果不能提供足够的密封注入水,可能出现下部导轴承润滑水不够充足的危险。

2) 从泄漏油泵到上部径向轴承的油流量[RCP 606MD]大于 1000l/h。

为了润滑上部径向轴承,从下油箱到上油箱的油循环是必要的。

3) 通过高压冷却器以后的密封注入水温度[RCP 606/607MT]低于 57℃。

如果密封注入水温度过高,动压密封可能会损坏或者寿命可能会减少。

当上述条件都满足且 UI 条件同时满足时,主泵可以在手动-正常模式下启动,而当主泵运行以后,上述条件可以被屏蔽掉,并且不会对主泵的进一步操作产生影响。

### 4. 保护停泵的条件 Poff

1) 高压节流阀泄漏的温度[RCP 609/610MT]大于 95℃。

如果高压节流阀泄漏的温度太高,动压密封将会损坏。当高压泄漏流温度高于 82℃时,密封系统的寿命会减少。

2) 泵推力轴承温度[RCP 611/612MT]大于 110℃。

轴承温度过高会导致轴承损坏。

3) 高压冷却器后的密封注入水的温度[RCP 606/607MT]大于 95℃。

如果密封注入水的温度太高,动压密封将会损坏。当密封注入水温度高于 95℃时,密封系统的寿命会减少。

4) 密封注入水流量[RCV 021MD/121MD]小于 1320l/h 超过 45 秒且 RCP 906VP 没有打开。

下导轴承没有充足的水来润滑是危险的。

5) 高压节流阀泄漏流[RCV 036MD/037MD]大于 1100l/h 超过 4 秒或者高压节流阀泄漏流[RCV 036/137MD]小于 200l/h 超过 4 秒。

高压泄漏流量超过 1100l/h 表明密封系统损坏, 通过每级密封的压力探测可以检测每级密封是否故障。

高压泄漏流量低于 200l/h, 动态密封可能损坏。造成高压泄漏流过低的原因可能是:

- 密封注入水流量过低
- 动压密封故障

6) 静态密封[RCP 601SM/602SM]处于关闭状态。

主泵运转时, 静态密封没有打开可能会被损坏, 并且可能会造成环绕泵轴的部件严重损坏。

7) 轴承箱油位[RCP 601MN/602MN]低于于最低值并保持 4 秒以上。

油位的降低意味着主泵油系统可能泄漏。而油泄漏可能导致泵系统中摩擦表面过热。

8) 主泵 ON 反馈发出超过 9 秒, 而速度检测[RCP 160MC]小于  $300\text{min}^{-1}$  或者速度检测[RCP 140MY/160MC]大于  $1750\text{min}^{-1}$ 。

主泵的堵转保护和超速保护。

9) 电机推力轴承的温度[RCP 615/616MT]大于  $93^{\circ}\text{C}$ 。

电机轴承温度过高则可能被损坏。

10) 电机绕组 U 或者 V 或者 W 相的温度高于  $160^{\circ}\text{C}$ 。

绕组绝缘温度过高, 绕组绝缘可能被损坏。

在主泵启动或运行过程中, 上述工况之一出现时, 主泵即停止运行。

### 3.3.4 主泵辅机的控制联锁逻辑

#### 1. 顶轴油泵[RCP 011PO]的控制逻辑

当轴承油箱油位[RCP 601MN]高于低油位时, 顶油泵可以启动。在启动反应堆冷却剂泵之前 20s 必须将相应的顶轴油泵投入运行, 以保证轴承的提升和形成轴承润滑所必需的油膜。

反应堆冷却剂泵启动 20s 后顶轴油泵自动关闭, 轴承润滑油膜的保持则由泵的转速来保证。

反应堆冷却剂泵停止运行(断路器打开) 500s 后, 自动关闭顶轴油泵。

顶轴油泵的启停同主泵的启停逻辑联锁, 也可在主控室 KIC 工作站手动进行。

#### 2. 泄漏油泵[RCP 012/013PO]的控制逻辑

每台主泵有两台泄漏油泵, 任意一台泄漏油泵都可完成收集下部轴承油箱内

多余润滑油的功能。在主泵启动前，两台泄漏油泵都将自动启动 20s 以确认油路系统正常。两台泄漏油泵有自动和手动两种运行方式，还有一个选择开关对两台泄漏油泵的运行进行选择。

自动运行：当泄漏油泵处于自动运行模式时，若下部轴承油箱油位[RCP 603MN]过高，则被选择运行的泄漏油泵将启动运行 30s，若油位仍高，则发出黄色报警，同时自动启动另一台泄漏油泵并停运之前运行的泄漏油泵，30s 后若油位仍高则停运第二台泄漏油泵，同时发出红色报警。

手动运行：KIC 上分别设有两台泄漏油泵的手操按钮，当切换至手动运行模式时，可手动启停两台泄漏油泵。

泄漏油泵的启停同主泵的启停逻辑联锁，也可在主控室 KIC 工作站手动进行。

### 3. 主泵电机绕组加热器[RCP 008RS]控制逻辑

空冷器入口温度[RCP 621MT]低于 53℃时，电动机绕组加热器就自动投入运行，以防止电动机绕组受潮。空冷器入口温度[RCP 621MT]高于 58℃或主泵投入运行(主泵断路器闭合)，加热器就自动停止工作。

## 3.4 海南项目主泵的控制逻辑

### 3.4.1 启泵条件

- 1) 可控泄漏流流量[MD01/MD02]应大于或等于报警曲线中的启泵曲线。
- 2) 密封注入水的流量[MD40/MD41]大于 1.2m<sup>3</sup>/h。
- 3) 高压冷却器入口和出口的截止阀[S01/S02]打开。
- 4) 一级密封前的压力[MP01/MP02]大于 20 bar 小于 160 bar。
- 5) 二级密封前的压力[MP03]小于 113 bar。此条件不与主泵自动启泵联锁，但是当压力大于 113 bar 时应检查密封腔。
- 6) 三级密封前的压力[MP04]小于 38 bar。此条件不与主泵自动启泵联锁，但是当压力大于 38 bar 时应检查密封腔。
- 7) 可控泄漏温度[MT04/MT05]小于 80℃。此条件不与主泵自动启泵联锁。
- 8) 流经高压冷却器的冷却水流量[MD42]大于等于 15m<sup>3</sup>/h。此条件不与主泵自动启泵联锁。
- 9) 启泵之前将氮气密封关闭。首先监测主泵转速[MC61]为零，氮气密封阀[S60]关闭（约 2 秒），氮气密封阀[S62]打开（约 6 秒），氮气密封位置指示开关[SM01/SM02]显示关闭状态。

### 3.4.2 启动电机的条件

- 1) 操作员检查飞轮是否在正常位置[MC20/MC21]。
- 2) 电机的上下机架空气入口温度[MT43/MT44]应低于 60℃，正常温度在 15℃到 50℃之间。
- 3) 操作员检查电机的上下轴承油箱油位[MN22/MN23/MN24/MN25]在正常范围内。
- 4) 电机的加热器[S11]应关闭。

### 3.4.3 手动停泵条件

- 1) 一级密封前的压力[MP01/MP02]大于等于 160bar 或小于 20bar 时会有报警产生。
- 2) 二级密封前的压力[MP03]大于等于 113bar 时会有报警产生。
- 3) 三级密封前的压力[MP04]大于 38bar 时会有报警产生。
- 4) 如果注入水流量[MD40/MD41]小于等于 0.5m<sup>3</sup>，并且设备冷却水流量正常，则产生一个报警。只要在正常工况下设备冷却水可用，主泵可以正常运行 24 小时，之后应手动停运主泵。如果设冷水不正常，则立即手动停运主泵。
- 5) 在任何工况下只要当三级密封低压泄漏流[MD03]大于 0.09m<sup>3</sup>/h，应立即手动停运主泵此时密封腔需要全部检查。
- 6) 如果泵轴振幅[MV01/MV02]大于等于 381μm，应手动停运主泵。同时建议对电机轴承进行检查。
- 7) 如果机架振动[MV10/MV11]大于等于 76.2μm，应手动停运主泵。同时建议对电机轴承进行检查。

### 3.4.5 手动停电机条件

- 1) 如果电机定子绕组温度大于等于 150℃，应手动停止电机。
- 2) 如果电机轴振幅大于等于 381μm，应手动停止电机。
- 3) 如果电机上下导轴承温度[MT21/MT22/MT39/MT40]大于 80℃，会发出一个报警。
- 4) 如果电机轴承油箱油位高于正常油位 5mm[MN22/MN23]或者低于正常油位 5mm[MN24/MN25]，会发出报警。

### 3.4.6 自动停泵条件

- 1) 如果可控泄漏流量[MD01/MD02]高于停泵上限曲线或低于停泵下限曲线则自动停泵。



2) 如果设冷水流量[MD42]大于  $26\text{m}^3$ , 阀门 S01 和 S02 会自动关闭。S01 和 S02 的关闭会导致密封注入水丧失, 主泵会由于可控泄漏流温度[MT04/MT05]大于等于  $95^\circ\text{C}$  而自动停泵。

如果设冷水量[MD42]小于等于  $5\text{m}^3$  同时密封注入水正常的情况下, 主泵电机可以持续运行。当设冷水量[MD42]小于等于  $5\text{m}^3$  同时密封注入水温度大于等于  $57^\circ\text{C}$  时会产生报警。

而当设冷水量[MD42]小于等于  $5\text{m}^3$  同时密封注入水流量小于等于  $1.5\text{m}^3$  时, 主泵自动停泵。

3) 可控泄漏流温度[MT04/MT05]大于等于  $95^\circ\text{C}$ , 主泵会自动停泵。

4) 如果主泵转速探测器 MC61 显示主泵转速高于  $1/\text{h}$ , 同时停车密封检测 SM01/SM02 指示停车密封位于关闭位置, 则主泵应立即自动停泵。

### 3.4.7 自动停电机条件

1) 如果电机导轴承 [MT18/MT19/MT20/MT36] 或推力轴承 [MT37/MT38/MT41/MT42] 温度大于等于  $90^\circ\text{C}$ , 会发出报警, 此时需要检查设备冷却水系统和电机油位指示。

当电机导轴承 [MT18/MT19/MT20/MT36] 或推力轴承温度 [MT37/MT38/MT41/MT42] 大于等于  $95^\circ\text{C}$  时, 电机自动停止运行。

2) 飞轮位置显示异常, 电机自动停止运行。

3) 如果泵组启动 6 秒钟后转速仍低于  $250\text{rpm}$ , 则可能发生堵转事故, 电机自动停止运行。

注意, 如果电机停运, 顶油系统应立即启动, 直到电机转速小于  $1/\text{h}$ 。电机停运后, 可控泄漏阀 S47 将延时 120 秒关闭。

## 第 4 章 主泵电机控制逻辑的研究

### 4.1 主泵操作模式的研究

经过设计院包括业主在内的中方人员，同供货商进行数次沟通，最终讨论确定出一种基本不改变供货商原设计意图，同时还兼顾国内核电站操作习惯的主泵操作模式。

由于方福主泵的供货商 ANDRITZ 来自欧洲国家奥地利，其主泵控制逻辑的设计理念及核电站的操作习惯同中国有些差异，主要是计算机化的操作在整个控制流程中占据很大的比重，而国内的核电站，操作人员的判断和人为干预更多一些，所以最初供货商提供的主泵控制逻辑，采用的是由计算机控制整个泵组启动的一整套顺控模式。从操作员在主控室发出泵组的启泵命令开始，泵组的后续启动全部由计算机系统控制完成。当计算机系统检查下列参数满足要求时，主泵即可自动启动：

- 密封注入水流量大于 1800l/h
- 密封注入水温度经高压冷却器后小于 52℃
- 低压泄漏阀打开
- 高压泄漏阀打开
- 高压泄漏流小于 1100l/h
- 高压泄漏流大于 200l/h
- 停车密封打开
- 一级密封前压力大于 2.5MPa
- 启动泄漏油泵
- 轴承油箱油位大于最低值
- 下油箱油位大于最低值
- 上油箱油位大于最低值
- 轴承油箱油位大于 20℃
- 启动顶油泵
- 顶轴油泵油压大于 1.5MPa
- 主泵电机启动
- 主泵运转 20s 后顶轴油泵停止运行

在上述的自动操作流程中，供货商认为不考虑传感器故障的前提下，由计算机系统检测所有的参数并完成泵组的启动，可以大大简化操作人员的工作量，并且保证不会由于人员误操作导致泵组误启动，发生损坏设备或威胁核电站安全的

事故。而中方的设计人员及业主认为，传感器的故障不可避免同时不能忽略，如果整个流程都由计算机控制，有可能出现由于传感器的故障导致泵组无法启动或者泵组反复启停，降低电站的可用率并造成巨大的经济损失，因此应该在泵组启动过程中增加人员的干预，对于某些启泵信号，可以由操作员去判断是否满足启泵条件，当所有的启泵条件确认无误后，再手动发出启动泵组的命令。

经过中方同供货商的数次讨论，在互相理解双方设计理念的差异之后，对于主泵的操作模式达成下述一致意见：

主泵电机的操作分为两种模式，手动-维修模式和手动正常模式。

#### 1) 手动-维修模式

手动-维修模式只能用于试运行或者维修目的，并应该在经过特殊培训的人员监督下进行操作。主泵采用手动-维修模式操作的必要条件是 UI 条件都满足，即  $UI=1$ 。在此种操作模式下，主泵及其辅助系统通过手动开关分别启动或停止。

#### 2) 手动-正常模式

在正常情况下，主泵采用手动-正常模式运行。此种运行模式的必要条件是 UI 条件和 PI 条件必须同时满足，即  $UI=1$  同时  $PI=1$ 。按照预先设定的启动步骤，操作员确认所有条件都满足的情况下，通过主控室发出主泵的启动命令以启动主泵。

## 4.2 主泵电机控制逻辑中参与设备保护信号的研究

主泵电机的操作模式确定以后，关系到主泵启停的保护信号即成为整个控制逻辑中最重要的部分。供货商从保护其设备的角度出发，希望在保护逻辑中设置尽量多的保护信号，以便主泵设备在尽可能好的环境下运行，使其设备本身及部件尽可能减少损耗。而设计院和业主，站在整个电站的角度，不单单要考虑对主泵这一个设备的保护，还会兼顾到整个核电站的安全运行以及核电站的可用率和运行的经济性等多方面的问题。因此对于一些不是必须的保护信号，希望可以减少或者降低保护信号的级别。对于每个信号，双方都进行过深入的讨论，双方给出需要或者不需要该信号的理由并进行多次沟通，最终将所有涉及启停泵的信号达成共识。下面即列出双方探讨过的几个典型问题。

### 4.2.1 关于保护信号中“与”和“或”的应用

在供货商提供的原始保护逻辑中，除了绕组及轴承温度以外，所有涉及到保护启停主泵及辅助油泵的信号都设置两个传感器，并且均为“与”逻辑。在理想的状况下，假设每个传感器都不会故障，这样的冗余设置确实可以保证每个信号的准确性，但是实际情况是有些部分的传感器故障率较高，如果所有的逻辑都简

单的用“与”逻辑，可能由于传感器的故障导致主泵的频繁启停，不利于主泵设备的保护，甚至会对核电站的安全运行产生影响。因此，双方讨论并确定的“与”和“或”的原则是：

- 对于涉及主泵启停的冗余信号用“与”逻辑，涉及主泵辅助油泵的启停的冗余信号，只将其中一个传感器的信号引至控制逻辑中，另一个只接到 DCS 端备用。
- 对于轴承和绕组温度传感器信号，原始保护逻辑中 14 个传感器的信号通过“或”逻辑停泵，任意一个出现温度高值即可发出停泵信号，由此造成的停泵几率很高。最终此处逻辑修改为：12 个绕组温度传感器取其中 6 个的信号，另外六个做备用，每两个传感器信号做“与”逻辑，再做“或”逻辑停泵。

#### 4.2.2 关于卡转子及超速保护停泵的研究

根据供货商提供的原始保护逻辑，当主泵启动 8 秒钟以后如果转速仍然小于每分钟 200 转，即认为发生卡转子故障，此时保护逻辑会发出停泵信号。而业主认为卡转子保护在启泵阶段应该设置，可以起到保护主泵，防止在启泵阶段由于卡转子而烧毁电机事故。但是在主泵达到额定转速以后，转速不可能再低于每分钟 200 转，如果再出现低转速信号，则只可能是该信号传感器出现误信号，有可能造成误停泵。因此经过讨论，双方确定卡转子保护只在启泵前一个小时有效，一个小时以后该保护解除。保护解除的时间也可以在现场进行整定。

关于主泵的超速保护，供货商认为由于存在主回路破口导致一回路冷却剂外泄，拖动主泵及电机超过额定转速，可能会烧毁主泵电机的风险，因此坚持主泵的保护逻辑中设置超速保护。

#### 4.2.3 关于停机密封位置信号用于停泵的研究

在供货商提供的保护逻辑中，停机密封的位置指示用于主泵的运行逻辑，即当两个限位开关均显示停机密封打开时，主泵可以启动并正常运行，而当其中一个限位开关指示异常，则会导致停泵。而业主认为，将此条件用于停泵逻辑中，既可以保证在启泵过程中停机密封处于打开位置，又可以降低误停泵的概率，提高电站的可用率。通过下面的真值表，可以很清楚的看到这两种逻辑作用于停泵时的差异。

停机密封用于 UI for operation				停机密封用于 Poff			
SM 801 (OPENED=1)	SM802 (CLOSED=1)	启泵 (与)	停泵 (非)	SM 801 (OPENED=1)	SM802 (CLOSED=1)	启泵 (非)	停泵 (与)
1	0 (取反)	1	0	1 (取反)	0	1	0
1	1 (取反)	0	1	1 (取反)	1	1	0
0	0 (取反)	0	1	0 (取反)	0	1	0
0	1 (取反)	0	1	0 (取反)	1	0	1

表 4-1 停机密封位置真值表

当停机密封的指示信号用于 UI for operation 时，只有两个限位开关同时指示正确时主泵才能启动，而当任意一个限位开关指示异常时，主泵即停止运行，此时有可能造成因为某一个限位开关指示异常导致误停泵。

而当停机密封的指示信号用于 Poff 时，只有当两个限位开关的指示都异常时才会发出停泵命令，其他时候主泵均可正常运行。停机的概率较上一种情况降低了 50%。

## 第五章 主泵控制逻辑图

### 5.1 岭澳项目主泵控制图

#### 5.1.1 启泵逻辑

1. 主泵油压[RCP105SP]大于 4.2mpa。
2. 主泵密封注入水和一级密封泄漏水管线的压差[RCP109MP]大于 1.5mpa。
3. 一级密封泄漏流量[RCV036MD]大于低低值。
4. 主泵顶轴油泵[RCP011PO]运行。

根据如下描述的主泵启泵逻辑，可按照下述逻辑图纸的形式实现。

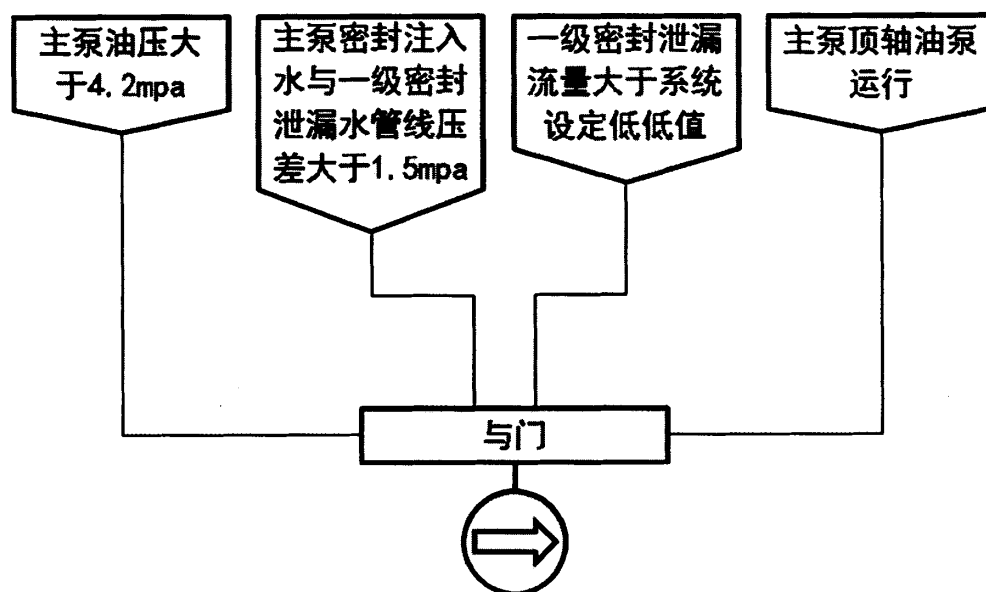


图 5-1 100D 型主泵启泵逻辑图

#### 5.1.2 停泵逻辑

1. 当主泵的上部轴承或下部轴承的温度大于等于 80 度时，主泵应立即停泵。
2. 一级密封泄漏流量[RCV037MD]高高且  $P > P_s$  时，主泵应立即停泵。

### 3. 来自保护组的停泵信号也会导致主泵自动停泵

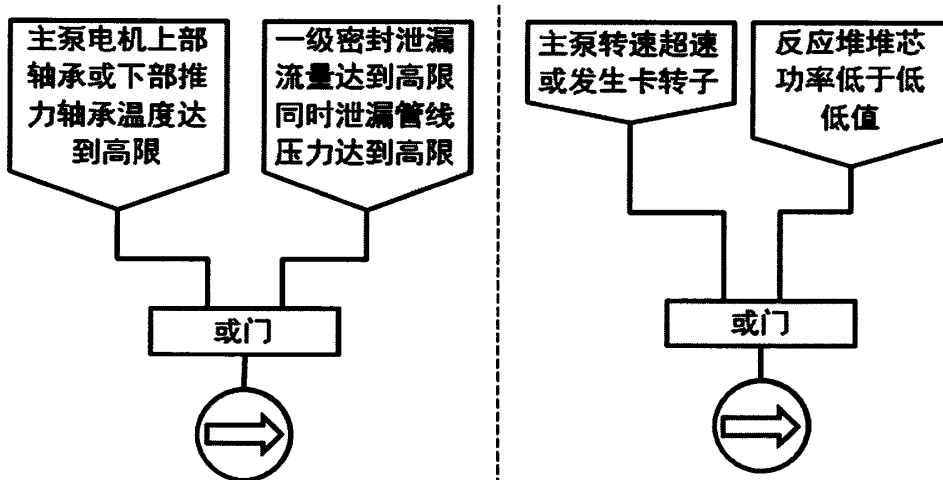


图 5-2 100D 型主泵停泵逻辑图

### 5.1.3 主泵辅机的控制逻辑

主泵加热器的运行与主泵的运行状态相反，及当主泵运行时，加热器可以停止工作，当主泵停运以后，加热器才开始工作。

而主泵顶轴油泵则有操作人员根据主泵的运行工况手动启停。

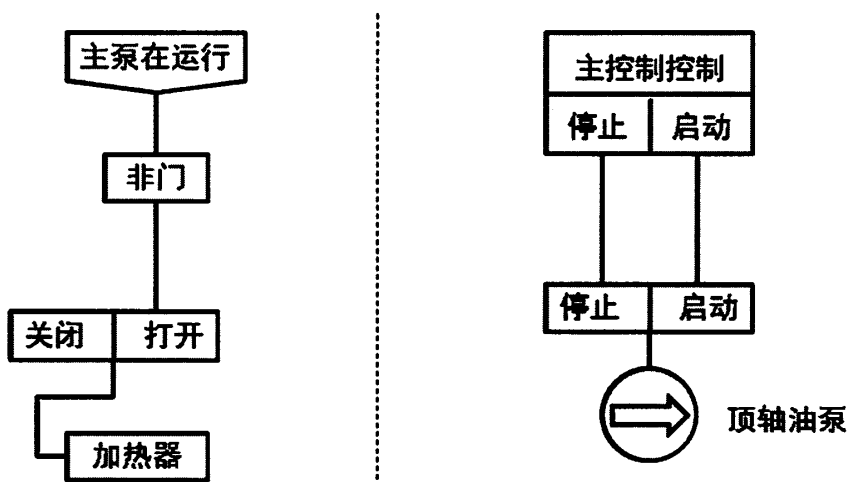


图 5-3 100D 型主泵辅机控制逻辑图

## 5.2 方福项目主泵控制图

### 5.2.1 启泵逻辑

#### 1. 运行主泵所需的 UI 条件

- 1) 密封注入水压力[RCP 601/602MP]大于 2.5MPa。

密封注入水的压力用于显示管道的破损情况，以检测阀门处的压力是否低于系统压力。为了将密封注入水压入主泵，密封注入水的压力必须大于系统压力。

#### 2. 启动主泵所需要的 UI 条件

- 1) 顶轴油泵[RCP 011PO]运行（顶轴油泵后的油压 RCP 606MP>1.5MPa）。  
顶轴油泵的作用就是控制管路内的压力。

- 2) 轴承油箱的温度[RCP 614MT]大于 20℃。

为了在泵推力轴承间建立起有效的油膜，油膜必须有适当的粘性，而只有当油温大于 20℃时，油的粘性才是合适的。

- 3) 低压泄漏阀[RCP 902VP]打开，同时位于循环密封注入水管路上的两个阀门[RCP 906VP]和[RCP 912VP]关闭。

如果低压泄漏阀门关闭，密封水则有可能通过打开的停机密封泄漏，因此打开停机密封前必须将低压泄漏阀门打开。

启动主泵时必须提供有效的密封注入水流，而这个密封注入水流在启动主泵期间不能由其自身的循环密封注入水提供。

- 4) 下油箱油位[RCP 603MN]大于最低值且小于最高值。

- 5) 上油箱油位[RCP 605MN]大于最低值。

上下油箱的油位处于合适的位置，是为了保证充足的油量对轴承进行润滑。油位偏离正常值即意味着油系统的故障。可能的起因是：

- 油泄漏
- 水浸入

上述条件是主泵启动时必须满足的最小条件，但这些条件对泵的进一步运行不会产生影响，故当主泵运转起来以后控制逻辑可以将上述条件屏蔽。

#### 3. 启动主泵所需的 PI 条件

- 4) 密封注入水流量[RCV 021/121MD]大于 1800l/h。

如果不能提供足够的密封注入水，可能出现下部导轴承润滑水不够充足的危险。

- 5) 从泄漏油泵到上部径向轴承的油流量[RCP 606MD]大于 1000l/h。

为了润滑上部径向轴承，从下油箱到上油箱的油循环是必要的。

- 6) 通过高压冷却器以后的密封注入水温度[RCP 606/607MT]低于 57℃。



如果密封注入水温度过高，动压密封可能会损坏或者寿命可能会减少。

当上述条件都满足且 UI 条件同时满足时，主泵可以在手动-正常模式下启动，而当主泵运行以后，上述条件可以被屏蔽掉，并且不会对主泵的进一步操作产生影响。

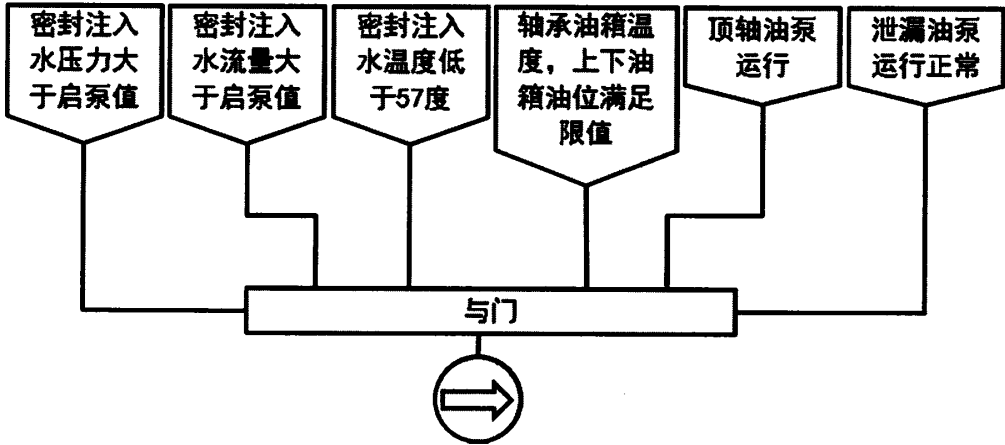


图 5-4 Andritz 主泵启泵逻辑图

## 5.2.2 停泵逻辑

### 1. 保护停泵的条件 Poff

1) 高压节流阀泄漏的温度[RCP 609/610MT]大于 95℃。

如果高压节流阀泄漏的温度太高，动压密封将会损坏。当高压泄漏流温度高于 82℃时，密封系统的寿命会减少。

2) 泵推力轴承温度[RCP 611/612MT]大于 110℃。

轴承温度过高会导致轴承损坏。

3) 高压冷却器后的密封注入水的温度[RCP 606/607MT]大于 95℃。

如果密封注入水的温度太高，动压密封将会损坏。当密封注入水温度高于 95℃时，密封系统的寿命会减少。

4) 密封注入水流量[RCV 021MD/121MD]小于 1320l/h 超过 45 秒且 RCP 906VP 没有打开。

下导轴承没有充足的水来润滑是危险的。

5) 高压节流阀泄漏流[RCV 036MD/037MD]大于 1100l/h 超过 4 秒或者高压节流阀泄漏流[RCV 036/137MD]小于 200l/h 超过 4 秒。

高压泄漏流量超过 1100l/h 表明密封系统损坏，通过每级密封的压力探测可以检测每级密封是否故障。

高压泄漏流量低于 200l/h，动态密封可能损坏。造成高压泄漏流过低的原因可能是：

- 密封注入水流量过低
- 动压密封故障

6) 静态密封[RCP 601SM/602SM]处于关闭状态。

主泵运转时，静态密封没有打开可能会被损坏，并且可能会造成环绕泵轴的部件严重损坏。

7) 轴承箱油位[RCP 601MN/602MN]低于于最低值并保持 4 秒以上。

油位的降低意味着主泵油系统可能泄漏。而油泄漏可能导致泵系统中摩擦表面过热。

8) 主泵 ON 反馈发出超过 9 秒，而速度检测[RCP 160MC]小于  $300\text{min}^{-1}$  或者速度检测[RCP 140MY/160MC]大于  $1750\text{min}^{-1}$ 。

主泵的堵转保护和超速保护。

9) 电机推力轴承的温度[RCP 615/616MT]大于  $93^{\circ}\text{C}$ 。

电机轴承温度过高则可能被损坏。

10) 电机绕组 U 或者 V 或者 W 相的温度高于  $160^{\circ}\text{C}$ 。

绕组绝缘温度过高，绕组绝缘可能被损坏。

在主泵启动或运行过程中，上述工况之一出现时，主泵即停止运行。

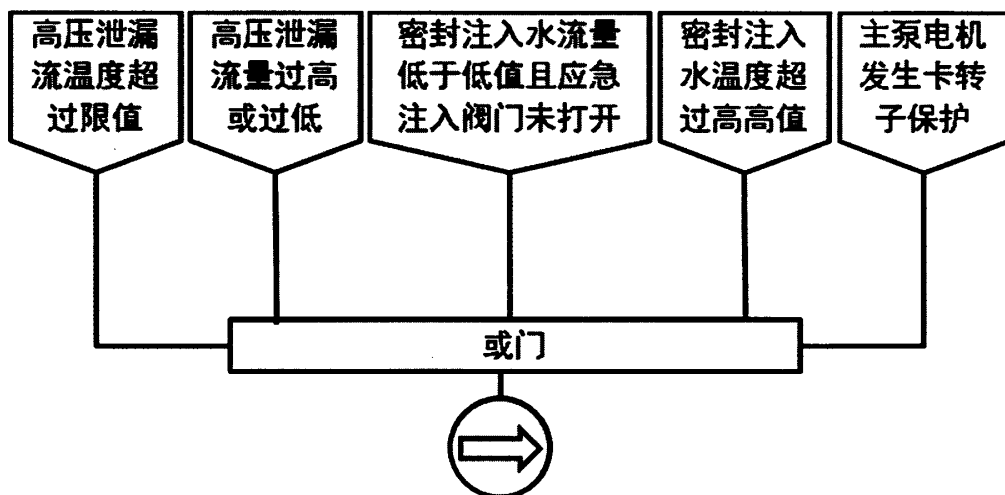


图 5-5 Andritz 主泵停泵逻辑图

## 5.3 海南项目主泵控制图

### 5.3.1 启泵逻辑

- 1) 可控泄漏流流量[MD01/MD02]应大于或等于报警曲线中的启泵曲线。
- 2) 密封注入水的流量[MD40/MD41]大于 1.2m<sup>3</sup>/h。
- 3) 高压冷却器入口和出口的截止阀[S01/S02]打开。
- 4) 一级密封前的压力[MP01/MP02]大于 20 bar 小于 160 bar。
- 5) 启泵之前将氮气密封关闭。首先监测主泵转速[MC61]为零，氮气密封阀[S60]关闭（约 2 秒），氮气密封阀[S62]打开（约 6 秒），氮气密封位置指示开关。

根据上述逻辑，可以得到下列逻辑图。

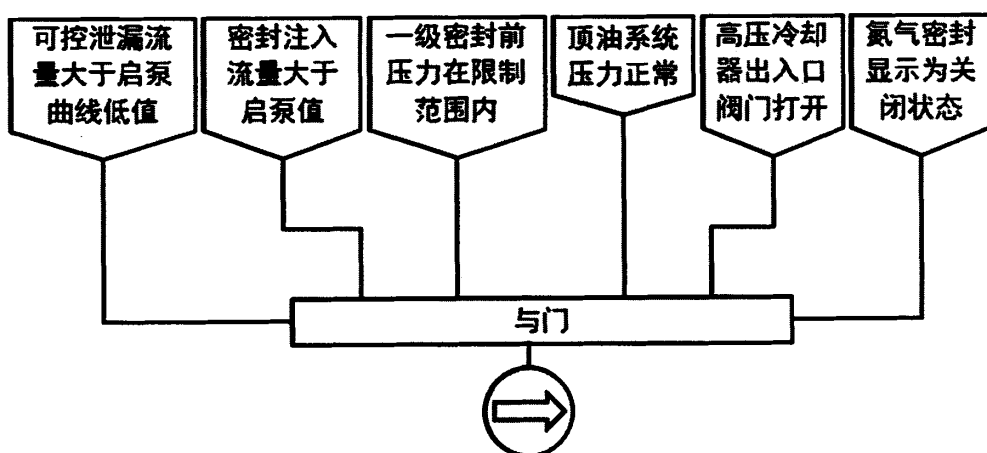


图 5-6 KSB 主泵启泵逻辑图

### 5.3.2 停泵逻辑

- 1) 如果可控泄漏流量[MD01/MD02]高于停泵上限曲线或低于停泵下限曲线则自动停泵。
- 2) 如果设冷水量[MD42]大于 26m<sup>3</sup>，阀门 S01 和 S02 会自动关闭。S01 和 S02 的关闭会导致密封注入水丧失，主泵会由于可控泄漏流温度[MT04/MT05]大于等于 95℃而自动停泵。
- 3) 而当设冷水量[MD42]小于等于 5m<sup>3</sup>同时密封注入水流量小于等于 1.5m<sup>3</sup>时，主泵自动停泵。
- 4) 可控泄漏流温度[MT04/MT05]大于等于 95℃，主泵会自动停泵。

- 5) 如果主泵转速探测器 MC61 显示主泵转速高于 1/h，同时停车密封检测 SM01/SM02 指示停车密封位于关闭位置，则主泵应立即自动停泵。
- 6) 当电机导轴承 [MT18/MT19/MT20/MT36] 或推力轴承温度 [MT37/MT38/MT41/MT42] 大于等于 95℃ 时，电机会自动停止运行。
- 7) 飞轮位置显示异常，电机会自动停止运行。
- 8) 如果泵组启动 6 秒钟后转速仍低于 250rpm，则可能发生堵转事故，电机自动停止运行。

根据上述逻辑，可以得到下列逻辑图。

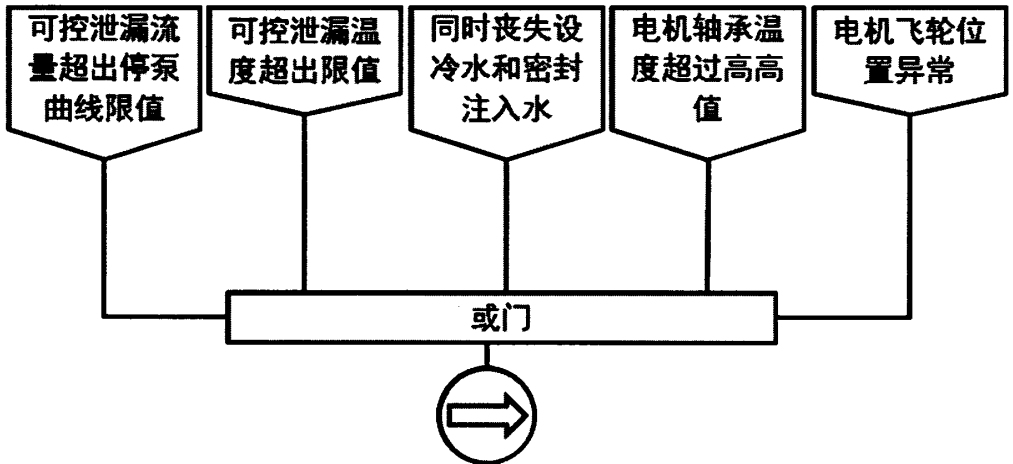


图 5-7 KSB 主泵停泵逻辑

## 第六章 结论与展望

### 6.1 结论

本文通过对在役电站和在建电站的核电厂主泵的结构及控制逻辑进行比较分析,对在建电厂采用不同于 M310 原型泵的新型主泵做了较为详细的介绍,对于由于设备换型引起的操作模式和控制逻辑的变化进行了深入的探讨,并最终得出主泵控制逻辑图。

目前国内所有核电厂内使用的主泵主要分为两种:

1. 基于 M310 原型泵 100D 型主泵,进行部分化和调整,但总体结构和对辅助系统的接口要求基本保持不变。控制逻辑也跟 M310 原型泵类似,较为简单和精炼。

如美国 EMD 公司,通过改进主泵的水力效率及电机效率,使泵组效率提高到 79.5% 以上,超过原型泵。在 1# 密封室使用耐腐蚀螺栓、螺母,提高可靠性。EMD 具有独特的 O 形圈技术,用于轴封系统部件上,即使在密封注入水及设备冷却水都失去的事故工况下,O 形圈仍能保证正常功能,保持轴密封的良好密封性。

2. 基于 KSB 设计的三轴承泵,Andritz 公司主泵即是在此基础上改进而来。这种泵型在外形尺寸,辅助系统、轴密封等方面存在与原型泵有很大差异。

如 KSB 公司的主泵,轴封系统与 M310 原型泵完全不同,三级密封采用流体动压密封,并且取消了原有的热屏设计,而增加了高压冷器,在轴封注入水上采取两种模式,正常时来自 RCV 系统,应急工况下应急注入水系统可以从泵壳内吸取部分冷却剂,通过高压冷却器冷却后进入轴封系统。除了三级密封之外,此种类型的主泵还设有单独的停车密封。

Andritz 公司的主泵与 KSB 的主泵大致结构相同,但是在油循环系统上,又增加了两台泄漏油泵,以满足电机和泵轴油路循环的要求。

正是由于上述结构上的不同,以及供货商对自身设备的保护理念不同,导致了主泵的控制实施过程中存在很大的差异。

1. M310 原型泵及其改进型的主泵,控制逻辑相对简单,只要满足密封水压力,流量,顶轴油泵工作等基本条件后即可启动。停泵逻辑也较少,只有在轴承温度过高或泄漏流量过大,判断密封失效导致放射性外泄的情况下才会停运主泵。

2. KSB 和 Andritz 类型的主泵,由于泵本身结构就相对复杂,导致控制逻辑也要增加很多条件。除了必须检测的密封注入水流量,温度,密封泄漏水的流量,温度等参数之外,还要同时检测高压冷却器进出口阀门状态,停车密封位置,

轴承箱的温度，油位等众多辅助系统参数。同样在停泵逻辑中，上述任意参数不满足，都有可能导致停泵。

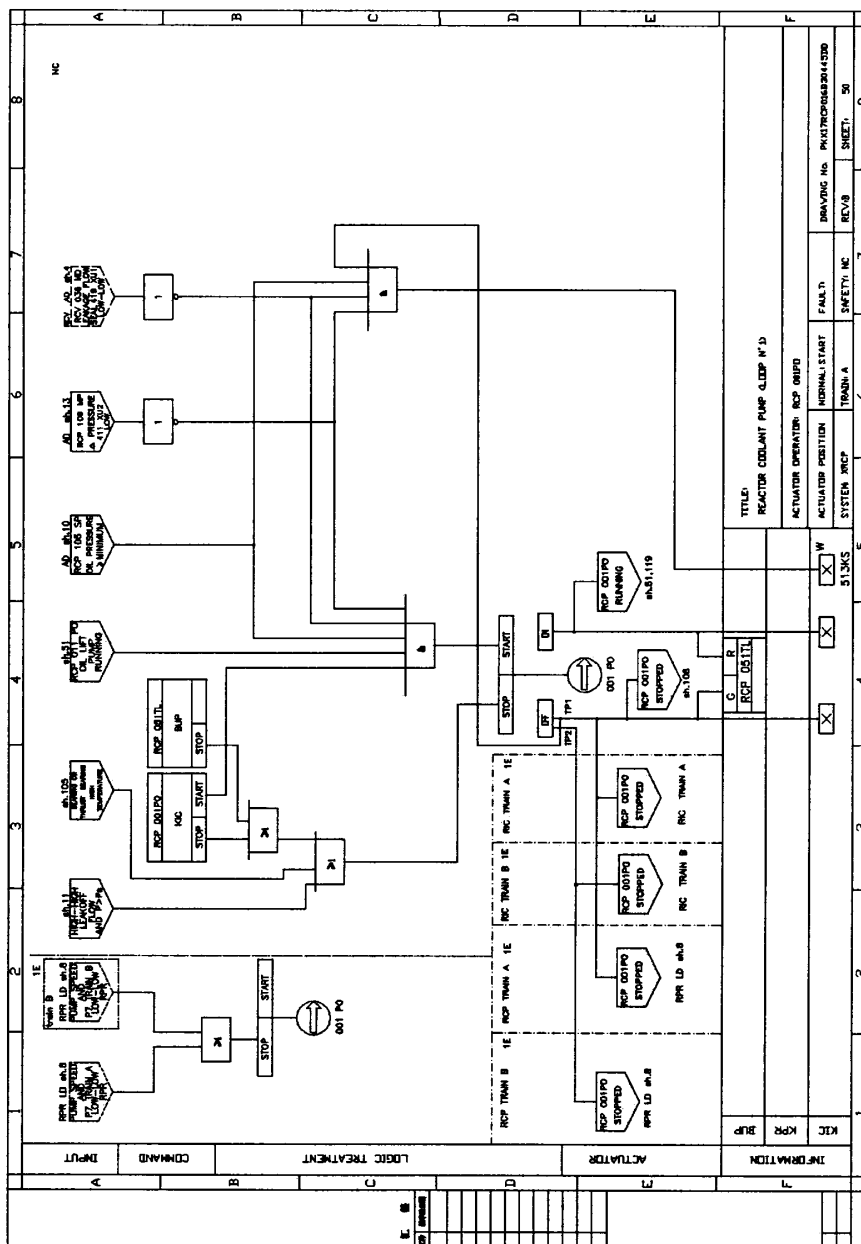
## 6.2 展望

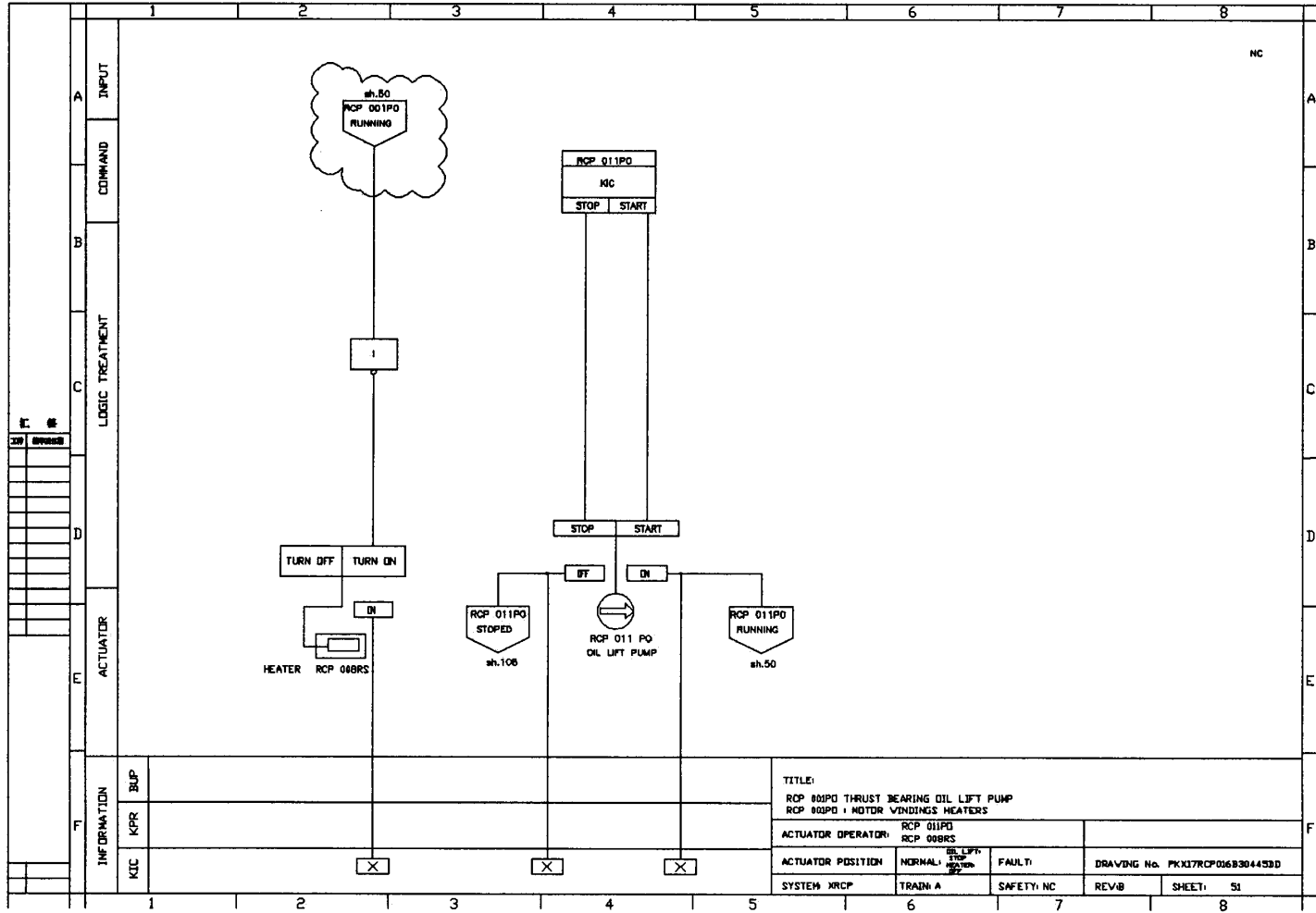
本文通过分析比较目前国内在役电厂和在建电厂不同厂家的主泵，分析由于其结构的不同引起的辅助系统的变化，以及控制逻辑的不同，还对在建电厂采用不同于 M310 原型泵的新型主泵做了较为详细的介绍。通过比较和研究国际上不同的设备厂家供货的主泵及其控制逻辑，掌握主泵的控制原则，了解哪些参数是在主泵的设计和 control 过程中必须的，而哪些又是可以忽略的，只有真正了解这些先进的设计理念，才有可能核电厂的设计中提供更可靠同时也更简练的方案，并且对国家核电发展过程中尽早实现重要设备国产化的目标具有重要的意义。

# 附录 主泵控制逻辑最终实施方案

## 附录 1 岭澳项目主泵控制逻辑实施方案

岭澳项目的主泵由于多年的运行经验，控制逻辑的实施方案精炼而且简单。如下所示。

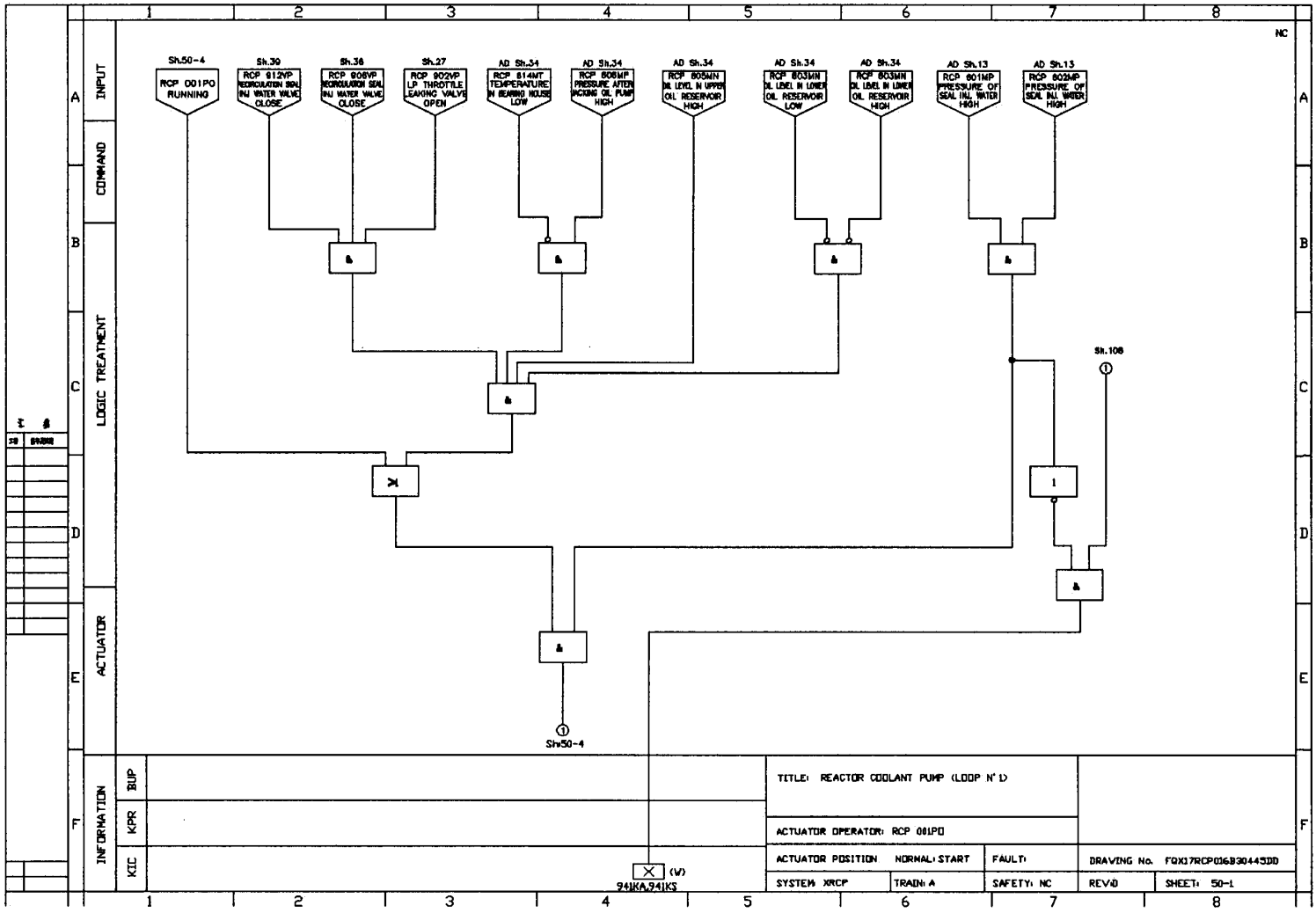


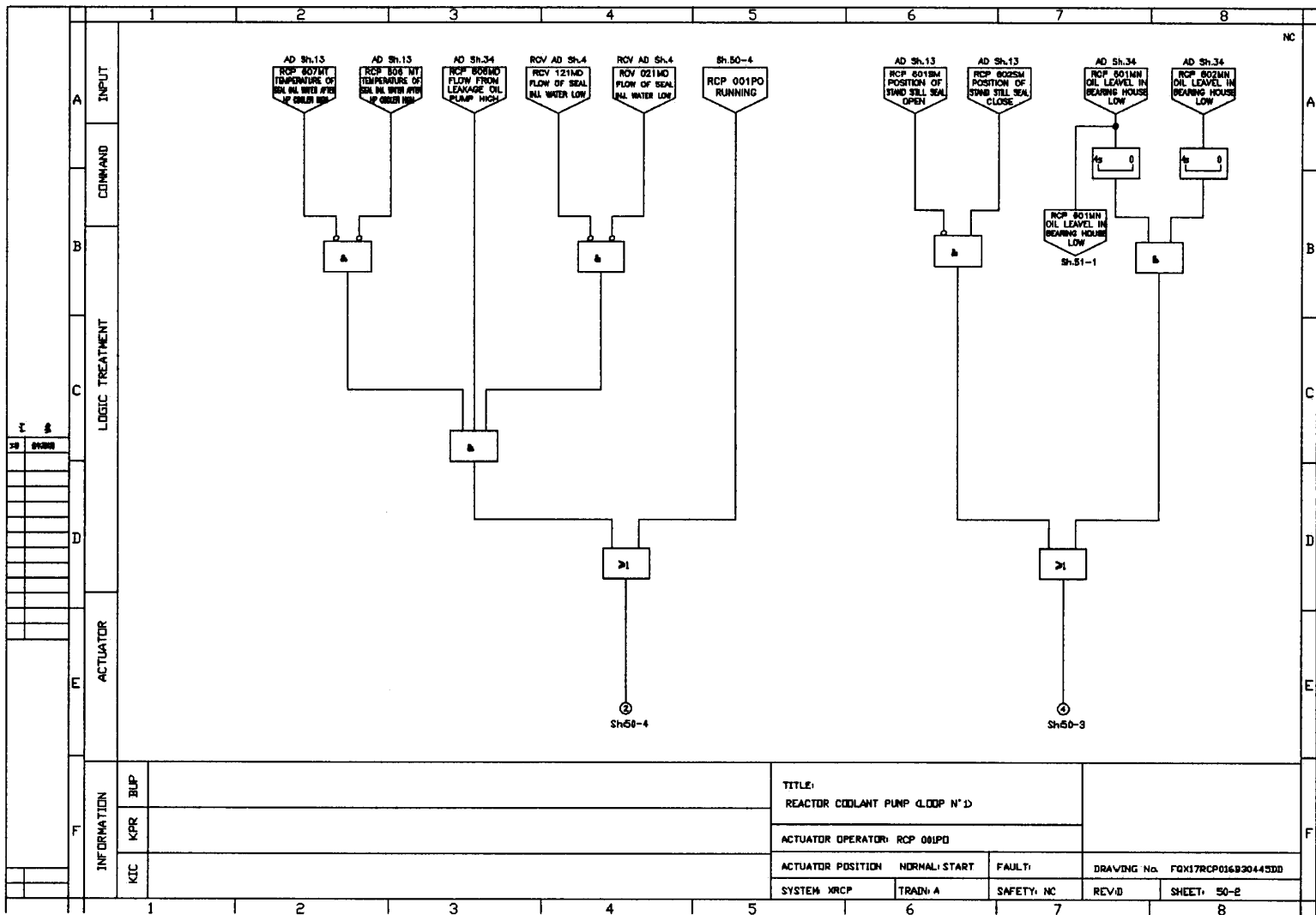


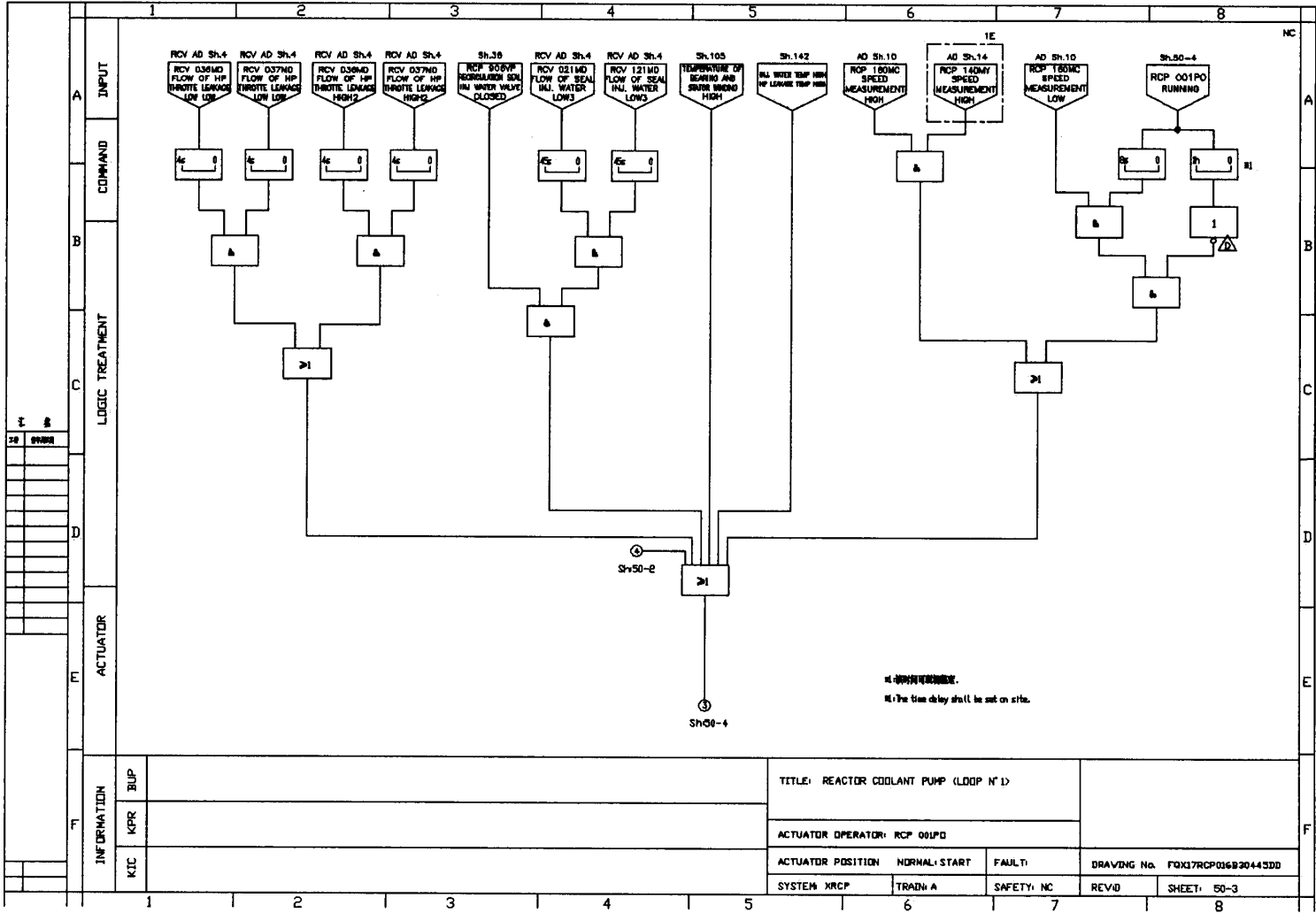


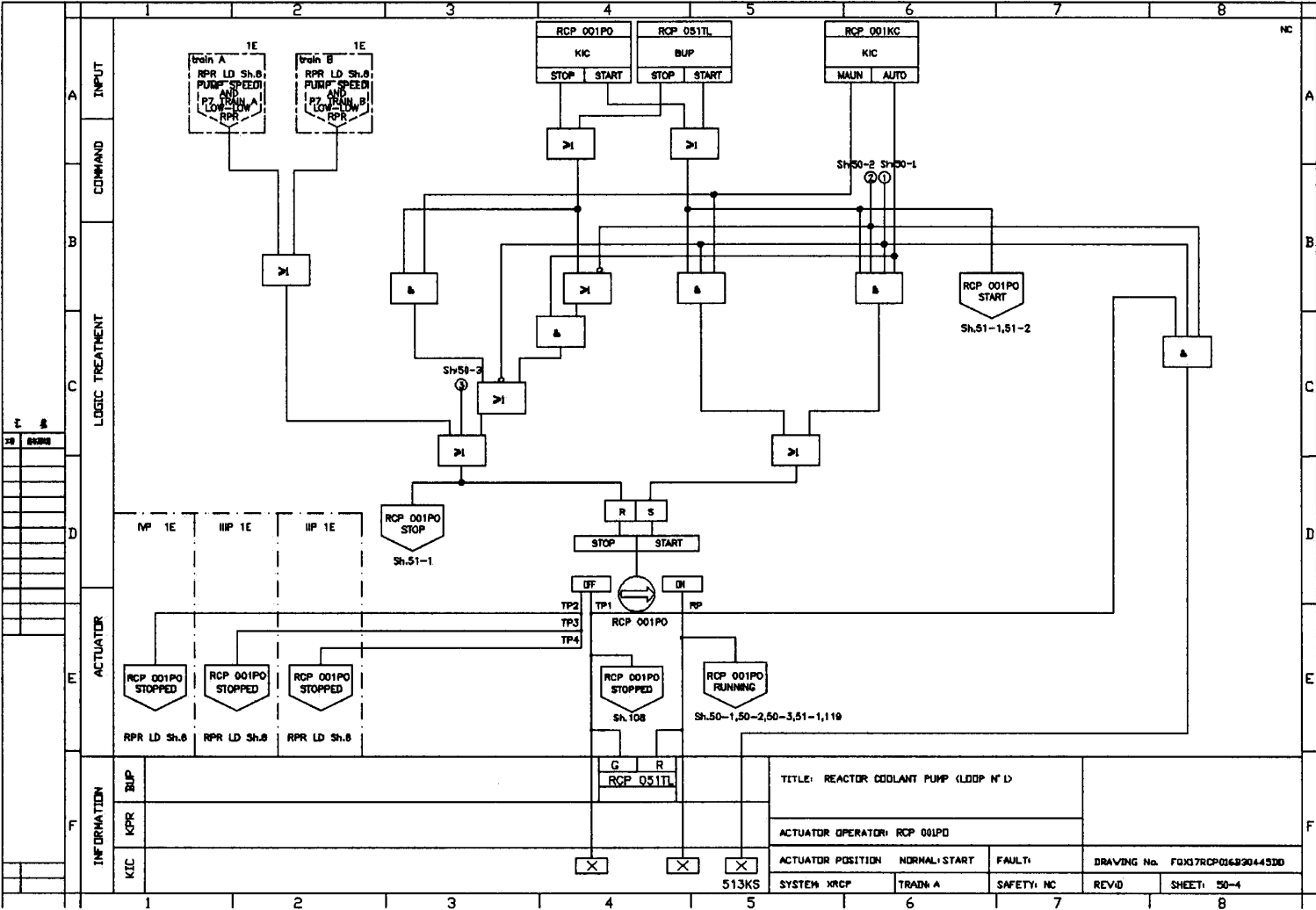
## 附录 2 方福项目主泵控制逻辑实施方案

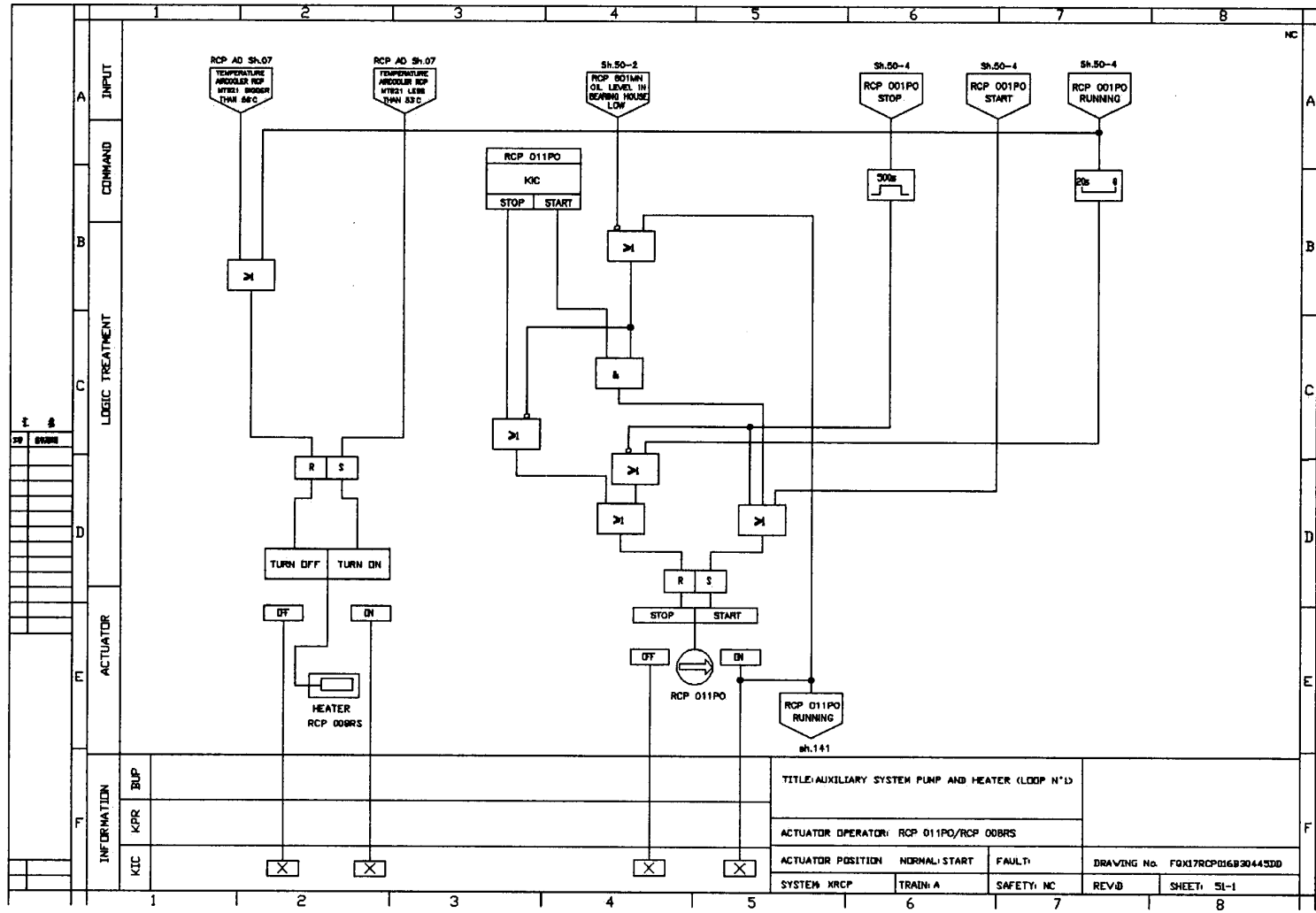
在了解了主泵及其辅助系统的结构功能的基础上，再经过上述讨论和分析，最终确定了主泵的控制逻辑采用主泵与辅助电机顺序控制，相关阀门单独控制的联锁模式。在正常操作模式下，主泵的启泵需满足 UI/PI 条件，顶轴油泵和泄漏油泵同主泵联锁启动，停泵由 Poff 条件控制。在维修模式下，启泵需满足 UI 条件，顶轴油泵和泄漏油泵，单独启动，停泵由 Poff 条件控制。参与启停主泵的冗余信号采用“与”逻辑，而参与辅助油泵启停的信号为一用一备的关系。综上所述，主泵控制逻辑的最终实施方案如下所示。

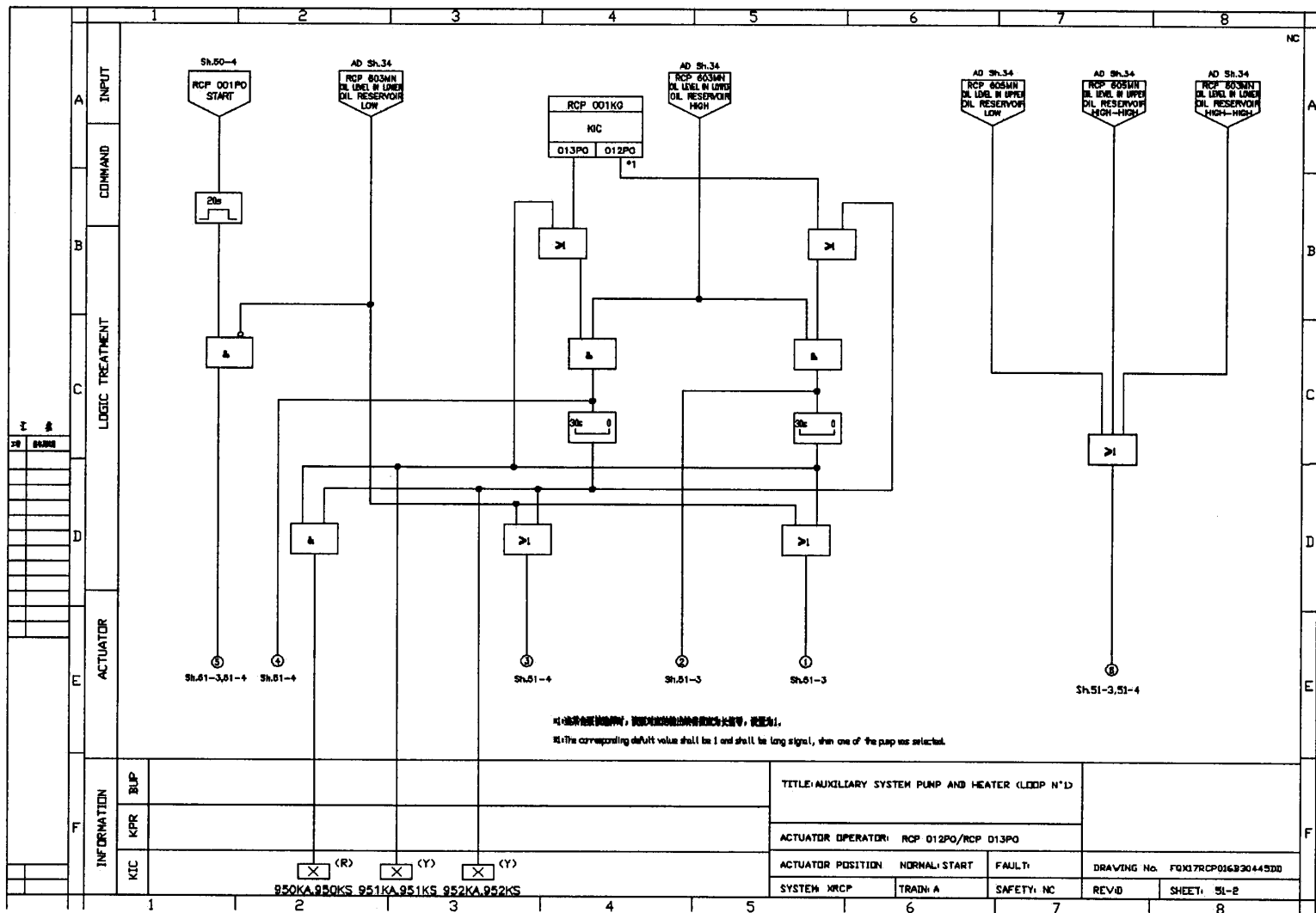


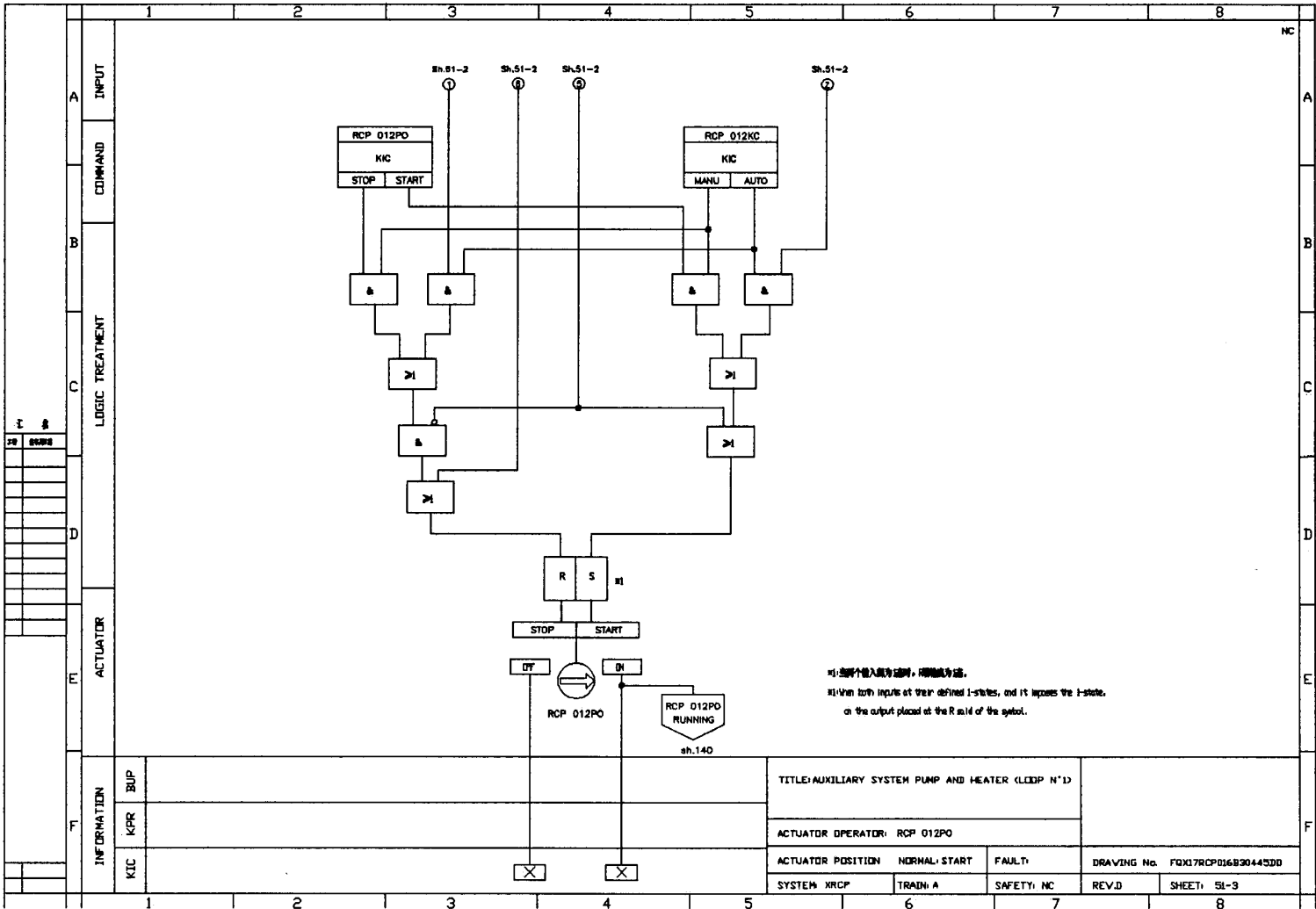




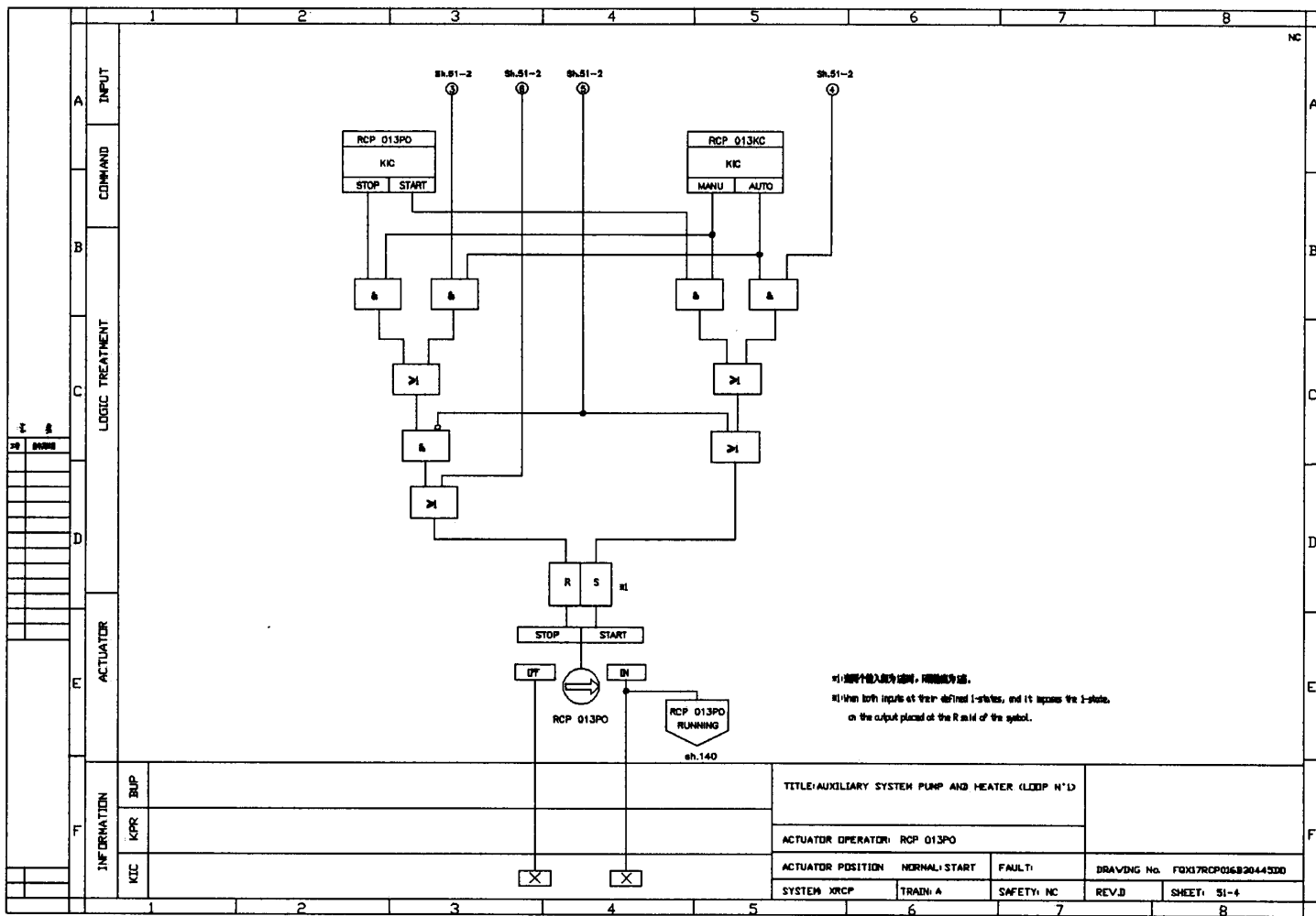




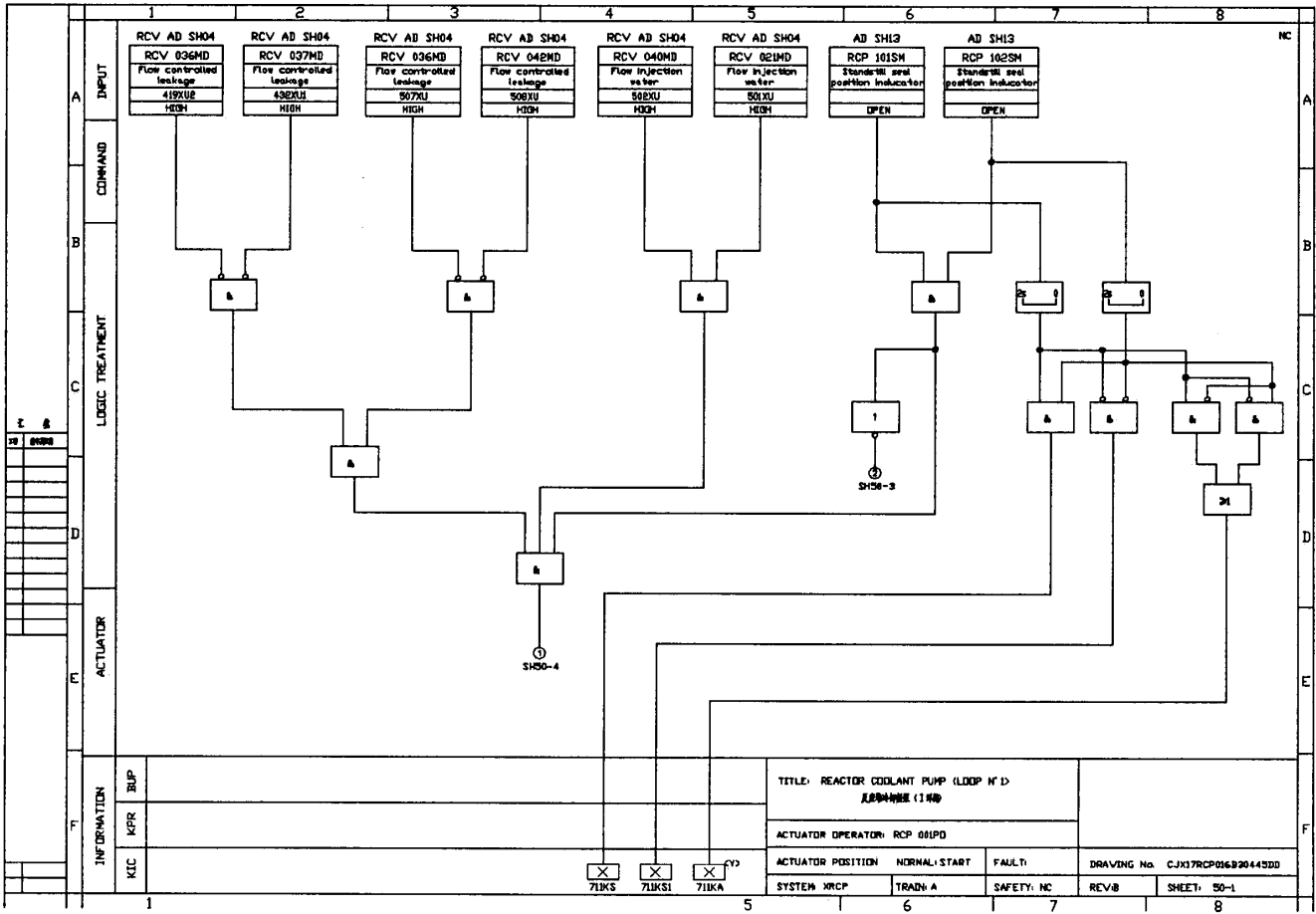


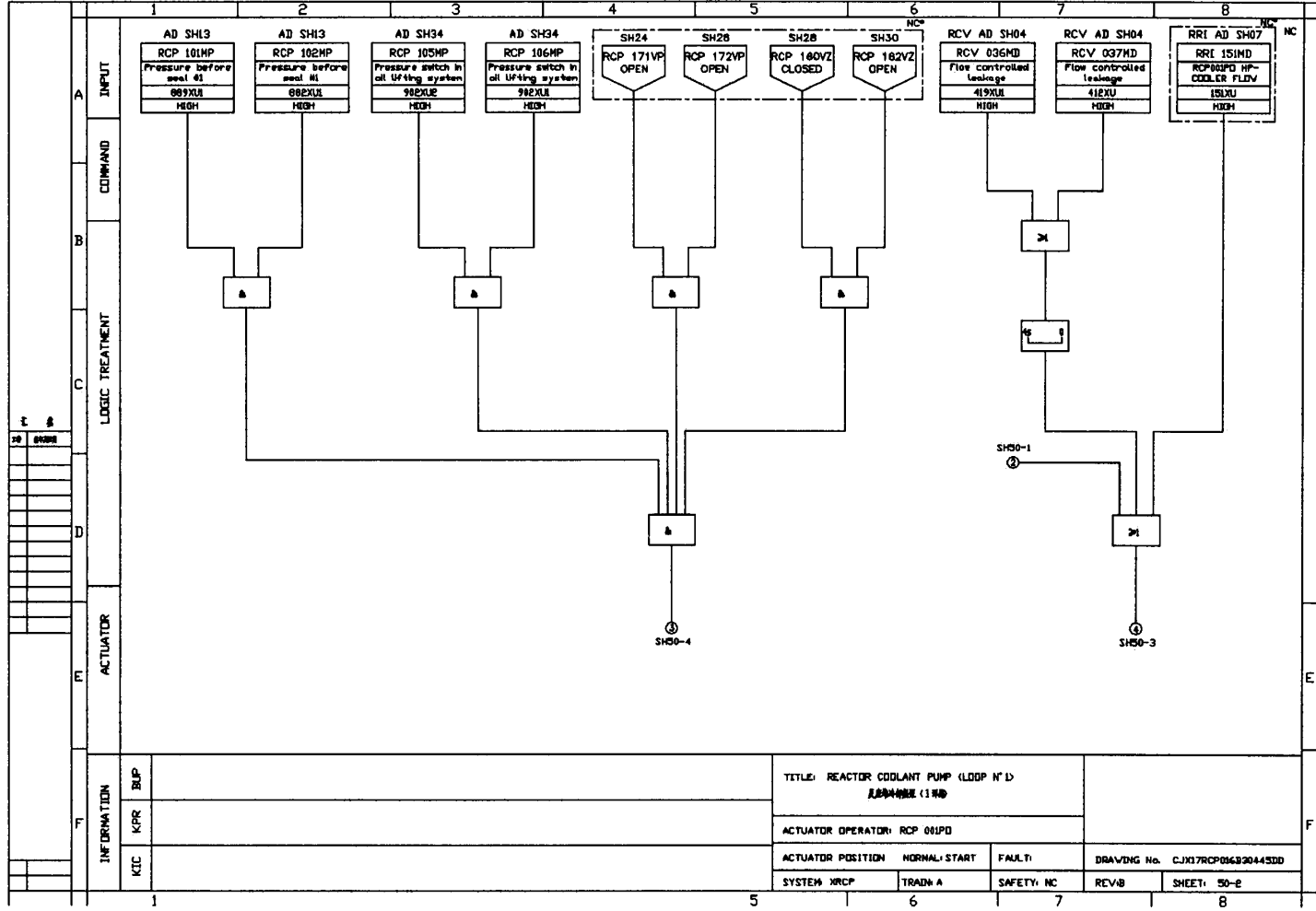


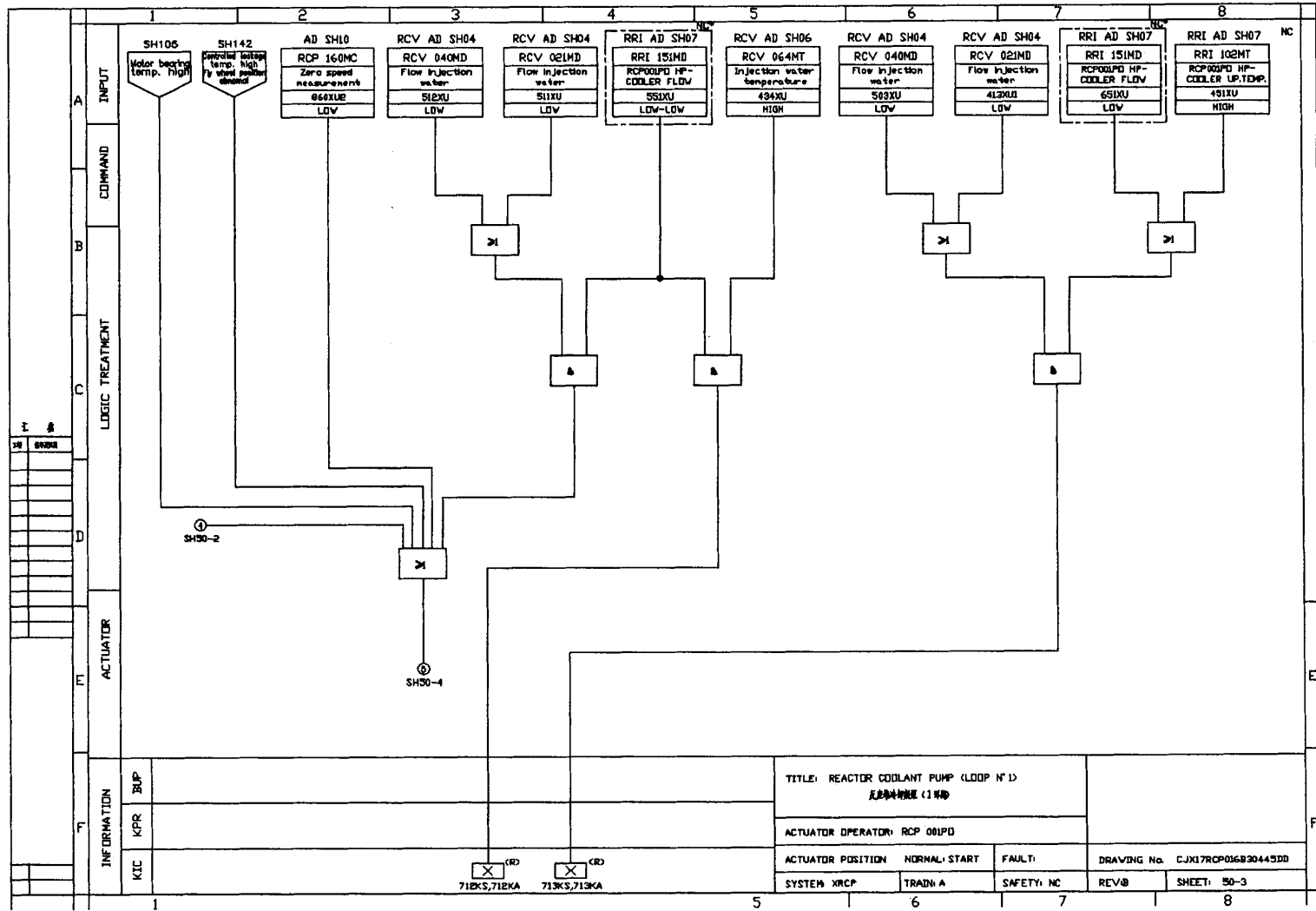


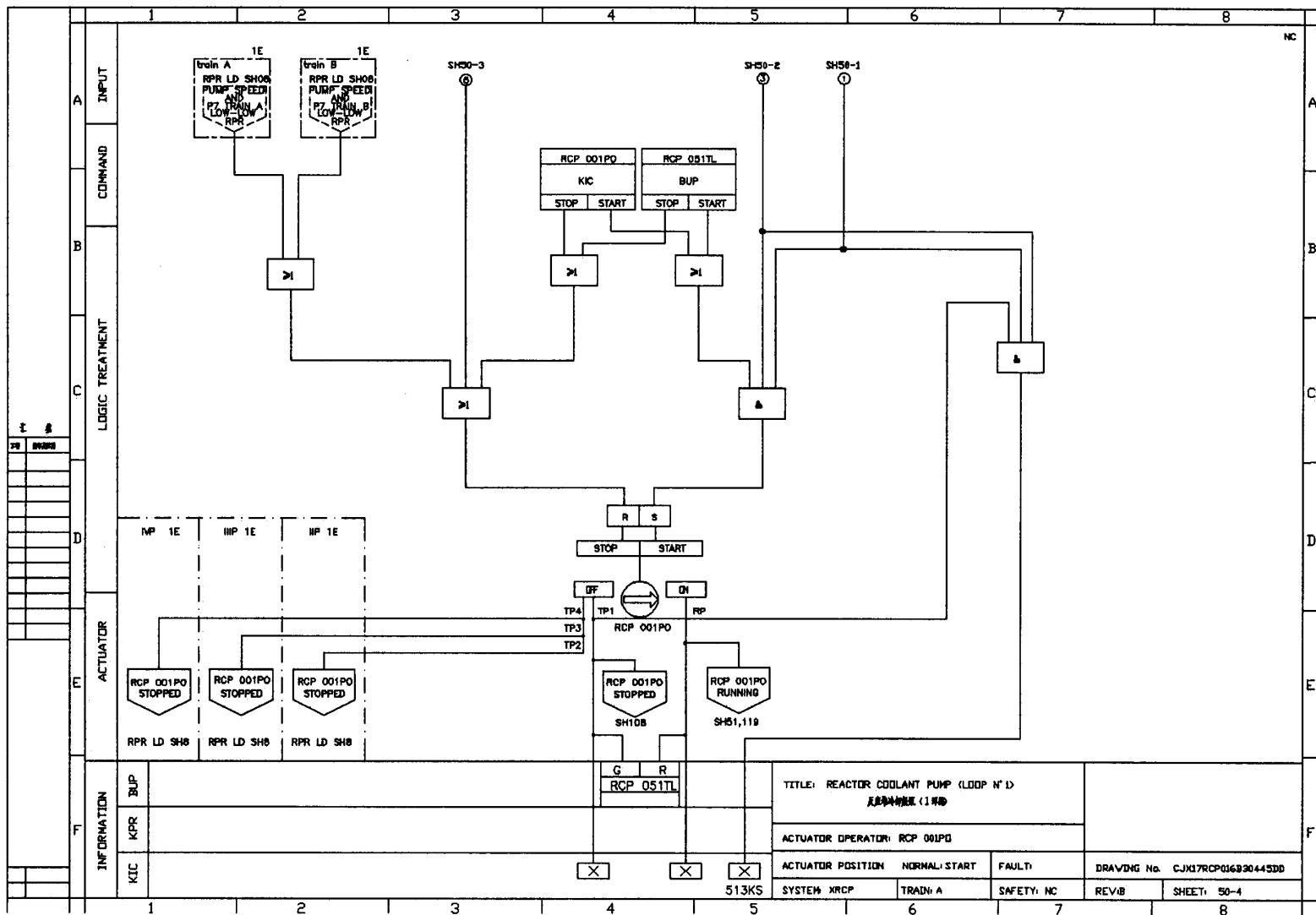


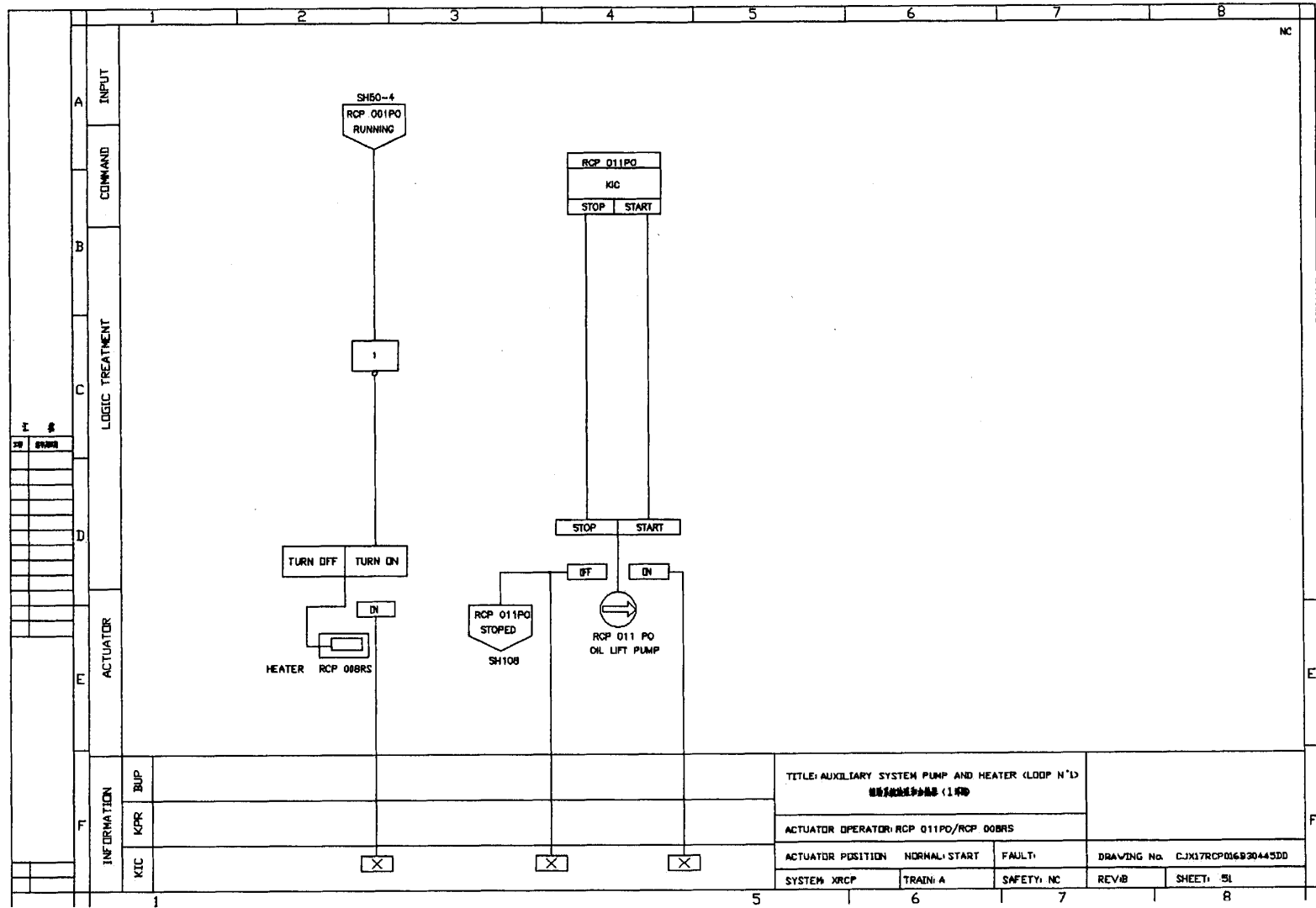
附录 3 海南项目主泵控制逻辑实施方案











## 参考文献

- [1] 压水堆核电站核岛电气设备设计和建造规则 RCC-E 法国核岛设备设计和建造规则协会 1993 年 1 月版
- [2] 系统逻辑图绘制的基本规则 ENGQ-407 中国核电工程有限公司 2007 年 12 月 31 日出版
- [3] 900MW 压水堆核电站系统与设备 原子能出版社 2005 年 3 月第 1 版
- [4] Description of interlock for RCP FQX44400211100D44SS ANDRITZ Hydro 2010 年 10 月出版
- [5] Description for Auxiliary System for Reactor Coolant Pump FQX44400256100D44DS ANDRITZ Hydro 2010 年 2 月 19 日出版
- [6] Interlocking Description CJX4400051100D04DD KSB 2012 年 10 月 26 日出版
- [7] Regulation on the safety supervision and control for civilian nuclear installation of the People's Republic of China. HAF001 (1986)
- [8] Code on the safety of Safety of Nuclear Power Plant Quality Assurance. HAF003 (1991)
- [9] Code on Safety of Nuclear Power Plant Design. HAF102 (2004)
- [10] Code on the safety supervision and control for civilian nuclear pressure retaining components. HAF601 (1992)
- [11] Control method for training, examination and getting certification of the non-destructive examination personnel of nuclear pressure-retaining components. HAF603 (1995)
- [12] Thermocouples—Part1:Reference tables IEC60584-1(1995)
- [13] Thermocouples—Part1:Tolerances tables IEC60584-2(1982)
- [14] 三相异步电动机试验方法 GB/T 1032—2012
- [15] 轴中心高为 56mm 及以上电机的机械振动 振动的测量、评定及限值 GB 10068—2008
- [16] 旋转电机噪声测定方法及限值 第 1 部分:旋转电机噪声测定方法 GB/T 10069.1—2006

- [17] 旋转电机噪声测定方法及限值 第3部分:噪声限值 GB/T 10069.3—2008
- [18] 电机在一般环境条件下使用的湿热试验要求 GB/T 12665—2008
- [19] 核电厂安全系统电气设备质量鉴定 GB/T 12727—2002
- [20] 核电厂安全系统电气设备抗震鉴定 GB/T 13625—1992
- [21] 大型三相异步电动机基本系列技术条件 GB/T 13957—2008
- [22] 旋转电机 线端标志与旋转方向 GB 1971—2006
- [23] 电器设备外壳对外界机械碰撞的防护等级 (IK 代码) GB/T 20138—2006
- [24] 旋转电机绝缘电阻测试 GB/T 20160—2006
- [25] 交流电机定子成型线圈耐冲击电压水平 GB/T 22715—2008
- [26] 高压电机绝缘结构耐热性评定方法 GB/T 22718—2008
- [27] 电工电子产品环境试验概述和指南 GB/T 2421.1—2008
- [28] 电工术语 旋转电机 GB/T 2900.25—2008
- [29] 旋转电机整体结构的防护等级 (IP 代码) 分级 GB/T 4942.1—2006
- [30] 电气装置安装工程 电气设备交接试验标准 GB 50150—2006
- [31] 旋转电机 定额和性能 GB 755—2008
- [32] 核电厂安全级电气设备质量鉴定试验方法与环境条件 EJ/T 1197—2007
- [33] 核电厂安全级连续工作制电动机的质量鉴定 EJ/T 628—1999
- [34] YR 系列高压绕线转子三相异步电动机技术条件 JB/T 7594—2006
- [35] 核电厂安全级电气设备抗震鉴定试验规程 NB/T 20040—2011



## 攻读工程硕士学位期间发表的学术论文和参加科研情况

- [1] 车皓, 费云艳, 王永强. 国内某核电站主泵的控制联锁逻辑. 电气应用. 已录用.
- [2] 肖孟男, 车皓. 消弧线圈暂态特性方针研究. 电气应用. 2009, 8. 已发表

## 致 谢

衷心感谢我的导师王永强教授的悉心指导！

三年以来,在导师的细心关怀和精心指导下,我完成了电力系工程硕士的学业。导师严谨求实的治学态度,诲人不倦的育人精神和不辞辛劳、精益求精的工作态度给学生留下了深刻的印象,是学生永远学习的楷模。导师工作繁忙,百忙之中仍时刻关心本论文的研究进展,指导学生的工作也一丝不苟。本论文从选题到论文的完成无不凝聚着恩师的心血和辛劳。谁言寸草心,报得三春晖,语言文字实难表达自己对导师的感激之情,唯有在今后的学习工作中兢兢业业,方不负恩师的谆谆教诲。

同时,论文的完成还得到了单位领导费云艳、王淑玉的指导以及陈超,王晋等同事的热情帮助和支持,在此表达我最诚挚的诚意。在攻读工程硕士期间还得到了李晓泉,祁红等同门兄弟姐妹的关系和帮助,在此深表感谢。

另外,我还要深深地感谢我的父母和亲人,他们付出巨大的艰辛才促使我有了今天的成绩。正是他们的理解与支持,正是他们深沉而无私的爱,激励着我奋发向上,自强不息,使我能顺利地走完这段求学之路。我衷心地感谢我的父母以及所有关心我的人。

谨以此文献给所有关心我和爱护我的老师、亲人、同学与朋友！

## 作者简历

1984年11月8日出于河北省定州市。

2002年9月考入华北电力大学电力工程学院电气系统及其自动化专业,2006年7月本科毕业并获得工学学士学位。

2006年7月——2007年12月在核工业第二研究设计院工作。

2008年1月——至今在中国核电工程有限公司工作。