



# 调相机除盐水系统设计问题分析与改进建议

程一杰<sup>1,2</sup>, 厚 谔<sup>2</sup>, 沈 阳<sup>2</sup>, 年长春<sup>3</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江杭州 310014; 2. 杭州意能电力技术有限公司, 浙江杭州 310012; 3. 国网浙江省电力有限公司检修分公司, 浙江杭州 311232)

**[摘要]** 换流站采用大型调相机作为无功补偿手段, 可加快电压恢复速率, 降低换相失败风险, 保障电网安全稳定。双水内冷调相机是目前广泛应用的大型调相机类型, 以除盐水作为其冷却介质。国内调相机工程中除盐水系统一般采用超滤+一级反渗透+二级反渗透+EDI的全膜法水处理工艺。国内首批建设的大型调相机除盐水系统运行过程中, 存在除盐水系统来水不稳定、超滤装置与反渗透装置流量不匹配、除盐水泵没有互为备用、反渗透加碱效果不满足要求、转子冷却水补水加碱不必要等问题, 会对除盐水系统的制水能力、产水品质、使用寿命、运行维护以及调相机的运行稳定性造成影响。针对上述问题, 深入分析了国内某调相机工程除盐水系统的设计和运行情况, 提出了调相机除盐水系统工艺设计的改进建议, 以期提升除盐水系统的稳定性和调相机运行的可靠性, 为同类型调相机工程除盐水系统的设计和改造提供一定参考。

**[关键词]** 调相机; 除盐水系统; 全膜法

**[中图分类号]** TM621 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1005-829X(2022)08-0178-04

## Analysis and improvement suggestions on design of demineralized water system in synchronous condenser

CHENG Yijie<sup>1,2</sup>, HOU Xu<sup>2</sup>, SHEN Yang<sup>2</sup>, NIAN Changchun<sup>3</sup>

(1. *Electric Power Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310014, China;*  
2. *EEnergy Technology Co., Ltd., Hangzhou 310012, China;* 3. *Maintenance Branch of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 311232, China*)

**Abstract:** The converter station adopts large synchronous condenser as a means of reactive power compensation to speed up the voltage recovery rate, reduce the risk of commutation failure, and ensure the safety and stability of power grid. Dual water intercooled synchronous condenser is a widely used type of large synchronous condenser, using demineralized water as its cooling medium. The demineralized water system of synchronous condenser projects in domestic adopts ultrafiltration+primary reverse osmosis+secondary reverse osmosis+EDI treatment process. In the operation of the first domestic construction of large synchronous condenser desalinization system, it is found that there exist some problems such as unstable water from the demineralized water system, unmatched ultrafiltration device and reverse osmosis device flow, non-standby each other for demineralized water pumps, dissatisfactory reverse osmosis alkali effect, unnecessary supplement water and alkali of rotor cooling water. These problems can affect the water production capacity, water quality, service life, operation and maintenance of demineralized water system and operation stability of synchronous condenser. Through an in-depth analysis of design and operation of the demineralized water system in domestic synchronous condenser project, the improvement suggestions of the demineralized water system were proposed, to improve the stability of demineralized water system and operation reliability of synchronous condenser. It can provide reference for the design and transformation of the same type demineralized water system project.

**Key words:** synchronous condenser; demineralized water system; whole membrane method

双水内冷调相机是目前广泛应用的大型调相机, 即定子绕组和转子绕组均采用水冷却。为保证调相机

的安全运行, 冷却水必须具有足够的绝缘性能, 一般采用除盐水作为冷却介质。随着水处理技术的发展与成

**[基金项目]** 国网浙江省电力有限公司科技项目(5211DS22000L)

熟,国内调相机除盐水系统均采用全膜法水处理工艺,具有无需酸碱再生、操作简单、出水水质稳定等优点<sup>[1-2]</sup>。

国内首批建设的大型调相机除盐水系统在设计中存在一些问题:(1)除盐水系统来水不稳定;(2)超滤装置与反渗透装置的流量不匹配;(3)除盐水泵没有互为备用;(4)反渗透加碱效果不满足要求;(5)转子冷却水补水加碱无必要。针对上述问题,笔者对国内某调相机工程的除盐水系统进行深入分析,对除盐水系统的设计提出改进建议,以期为同类型调相机除盐水系统的设计和改造提供一定参考。

1 系统简介

调相机工程的除盐水系统水源一般为市政自来水,系统采用全膜法水处理工艺,其工艺流程为超滤+一级反渗透+二级反渗透+EDI,还包括完整的反洗、加药、化学清洗等辅助系统<sup>[3-4]</sup>。系统工艺流程如图1所示。

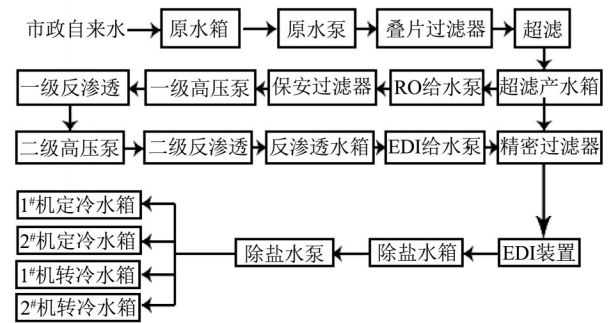


图1 除盐水系统工艺流程  
Fig. 1 Process of desalinated water system

该系统中的超滤装置、一级反渗透装置、二级反渗透装置、EDI装置均采用一对一运行方式,无备用。所有水泵、加药泵及参与控制的仪表均为1用1备。系统设计产水流量为6.0 m<sup>3</sup>/h,产水电导率<0.10 μS/cm (25℃)。除盐水系统各装置的性能如表1所示<sup>[5-6]</sup>。

表1 除盐水系统各装置的性能指标

Table 1 Performance of each device in demineralized water system		
装置	项目	数值
超滤	单套净连续出力/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	3.5
	水利用率/%	≥90
	出水SDI	≤3
一级反渗透系统	出力/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	7.85
	水回收率/%	≥80
二级反渗透系统	出力/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	6.67
	水回收率/%	≥85
EDI系统	出力/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	6.0
	水回收率/%	≥90
	产水电导率/(μS·cm <sup>-1</sup> )	<0.10

2 问题分析与改进建议

2.1 来水稳定性不足

除盐水系统由市政自来水供水,与外冷水系统补水共用来水管道。为防止市政自来水供水压力低,另设计有工业水池作为备用水源,可补水至外冷水系统。调相机供水流程如图2所示。

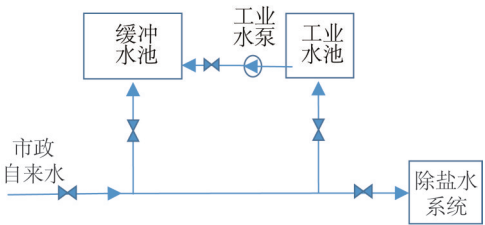


图2 调相机供水流程

Fig. 2 Water supply process of synchronous condenser

因除盐水系统侧压力高于外冷水系统缓冲水池侧的压力,当外冷水系统补水或市政自来水供水压力较低时,无法对除盐水系统进行补水,严重影响调相机运行的稳定性<sup>[7]</sup>。此外,市政自来水供水稳定时,工业水池和工业水泵长期处于停运状态,会影响工业水池的水质和工业水泵的使用寿命。

为提高除盐水系统的来水稳定性,并保证工业水池和工业水泵的有效使用,提出以下设计改进建议:(1)取消市政自来水至外冷水系统供水管道,由工业水池直接对外冷水系统进行供水。除盐水系统侧压力低于工业水池侧压力,即使工业水池和除盐水系统同时补水,市政自来水也会优先供水至除盐水系统,杜绝出现因外冷水补水而导致的除盐水系统无法补水问题。此外,保证工业水池和工业水泵的正常使用,提升设备使用寿命。(2)增加由工业水池至除盐水系统的供水管道,将工业水池水源作为除盐水系统的备用水源,当市政自来水压力低时,可由工业水池对除盐水系统进行补水。改进后的调相机供水流程如图3所示。

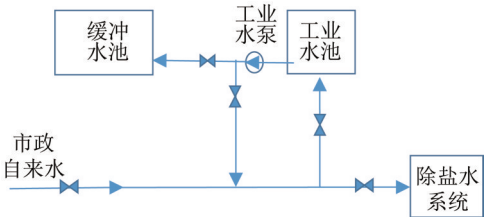


图3 改进后的调相机供水流程

Fig. 3 Modified water supply process of synchronous condenser

## 2.2 超滤装置与反渗透装置流量不匹配

设计除盐水系统时,考虑转子冷却水回水至超滤水箱流量(2台机组,共 $5.0\text{ m}^3/\text{h}$ ),设计超滤装置来水流量为 $3.5\text{ m}^3/\text{h}$ ,一级反渗透进水流量为 $9.8\text{ m}^3/\text{h}$ 。此时超滤水箱的进出流量基本处于平衡状态。超滤水箱的水量平衡情况如图4所示。

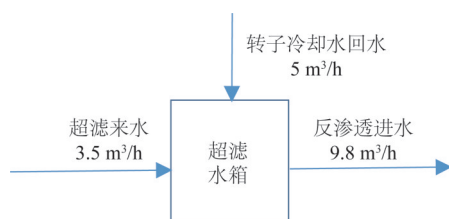


图4 超滤水箱的水量平衡

Fig. 4 Water balance of ultrafiltration water tank

调相机运行过程中转子冷却水无回水至超滤水箱,使得超滤产水箱的进出流量不匹配,且超滤水箱容积为 $3.0\text{ m}^3$ ,导致制水时超滤水箱液位下降过快;反渗透装置单次运行时间约为 $9\sim 12\text{ min}$ ,装置在制水周期内会启停 $2\sim 3$ 次,对反渗透装置的制水能力、产水品质及使用寿命造成不利影响<sup>[6-7]</sup>。

为使超滤装置与反渗透装置的流量相匹配,提出以下修改建议:(1)更换超滤膜组件,提升超滤装置来水量至 $9.0\sim 10.0\text{ m}^3/\text{h}$ ,使超滤水箱的进出口流量相匹配。(2)更换原水泵和超滤反洗水泵,提升原水泵、超滤反洗水泵的额定流量分别为 $9.0\sim 10.0$ 、 $36.0\sim 40.0\text{ m}^3/\text{h}$ 。(3)增加转子冷却水回水直接排放至排水地沟的管道,满足转子冷却水在水质恶化的极端情况下的排放要求。

## 2.3 除盐水泵没有互为备用

除盐水泵将合格除盐水由除盐水箱输送至定子水系统和转子水系统,以满足调相机内冷水补水需求。原设计中除盐水泵出口联通阀门为常闭阀门,设定除盐水泵运行方式:除盐水泵A泵为1#、2#机的定子冷却水系统补水,除盐水泵B为1#、2#机的转子冷却水系统补水,若某台除盐水泵出现故障时,开启除盐水泵出口联通门。内冷水系统补水流程如图5所示。

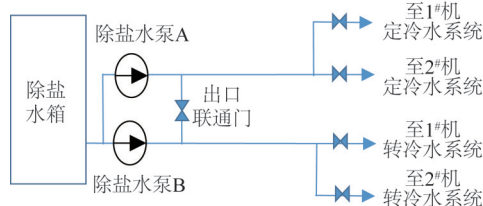


图5 内冷水系统补水流程

Fig. 5 Filling water process of internal cooling water system

除盐水泵采用上述运行方式时,2台除盐水泵无法互为备用,对设备的稳定性要求高;当某台除盐水泵出现故障,会导致定子冷却水或转子冷却水无法及时补水,存在因断水而导致调相机跳机的风险<sup>[8]</sup>。

定子冷却水系统为密闭式系统,补水量极小;转子冷却水系统正常运行时单日补水量约为 $1.5\text{ m}^3$ ,单台除盐水泵完全能够满足同时为定子冷却水和转子冷却水补水的要求。建议将除盐水泵出口联通门设计更改为常开状态,同时优化除盐水泵逻辑。当除盐水泵主泵运行出现故障时,自动切换至备用泵运行,满足除盐水泵互为备用的要求,提升调相机组供水的可靠性。国网金华、鄱阳湖公司的调相机在除盐水泵系统调试期间按该建议进行整改,目前除盐水泵运行正常,满足互为备用的要求。

## 2.4 反渗透加药效果不满足要求

因一级反渗透产水呈酸性,易产生二氧化碳气体,投加NaOH调整二级反渗透进水的pH处于 $8.0\sim 9.0$ 范围内,使进水中的二氧化碳形成碳酸盐,以提高二级反渗透膜的脱盐率<sup>[9]</sup>。反渗透加碱工艺如图6所示。

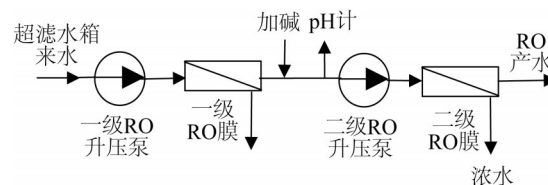


图6 反渗透加碱工艺

Fig. 6 Adding alkali process of reverse osmosis

在反渗透装置启动和停运时,二级反渗透入口流量先减小后增加再逐渐稳定,而二级反渗透进水加碱计量泵无变频调节功能,使得二级反渗透入口pH呈先增大后减小再稳定的趋势。二级反渗透入口pH变化曲线如图7所示,可见该变化不利于二级反渗透膜的使用寿命和产水电导率的稳定<sup>[10]</sup>。

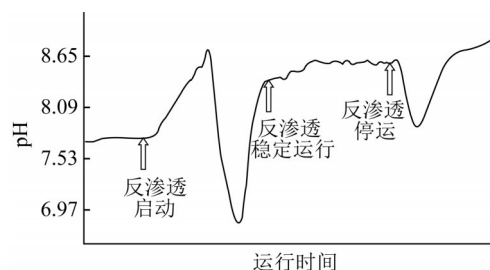


图7 二级反渗透入口pH的变化曲线

Fig. 7 Change curve of inlet pH of secondary reverse osmosis

为控制二级反渗透进水 pH 稳定在 8.0~9.0, 保证反渗透系统的产水水质和使用寿命, 提出设计修改建议: (1) 将二级反渗透进水加碱计量泵优化为变频泵, 并设计自动加药程序。加碱计量泵的频率可根据进水流量自动调节, 保证反渗透启动和停运时 pH 的稳定。(2) 降低反渗透投加 NaOH 溶液的浓度, 提升加药量对 pH 调节的缓冲能力, 降低反渗透启动和停运阶段的波动幅度。

## 2.5 转子冷却水补水加碱非必要

除盐水泵将除盐水输送至转冷水箱完成转子冷却水的补水。在转子冷却水补水管中设有加碱管, 投加分析纯 NaOH, 配制质量分数为 1%, 控制补水 pH 在 8~9。为监控转子冷却水补水的 pH 及电导率, 在除盐水泵至转子冷却水系统出水管处配置有 pH 计和电导率表。但在转子冷却水实际补水过程中, 因单次补水量仅为 0.5 m<sup>3</sup> 左右, 补水时间较短且加药管道较长, 补水 pH 极难控制。同时, 配置的 pH 计和电导率表常处于干燥状态, 仪表维护困难, 电极易失效。

鉴于转子冷却水膜净化碱化装置带有加碱功能, 可有效调节转冷水 pH 至 7~9。而转子冷却水单次补水量为 0.5 m<sup>3</sup>, 补充的除盐水 pH 约为 6.0, 直接补充未加碱的除盐水不会对转冷水的 pH 造成影响。因此无需配置转冷水补水加碱装置和在线化学仪表, 且目前调相机的转子冷却水补水加碱装置也处于未投运状态。建议在新建调相机站设计中, 取消转子冷却水补水加碱装置及配套检测的在线化学仪表, 有效降低设备成本及运维成本。

## 3 结论

近年来, 随着特高压直流输电工程的投运, 大型调相机被广泛应用。然而大型调相机配套的除盐水系统在设计上未完全成熟。对除盐水系统的工艺设计提出改进建议, 确保除盐水系统的稳定运行, 并提升调相机的可靠性, 为今后调相机工程的除盐水系统设计与改造提供了一定借鉴和参考。

### 参考文献

- [1] 袁德玉. 全膜分离法脱盐水处理系统设计[J]. 给水排水, 2014, 50(2): 62-65.
- YUAN Deyu. Design of desalted water treatment system by membrane separation[J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 50(2): 62-65.
- [2] 何健康, 郑彩平. 全膜水处理技术在锅炉补给水处理系统中的

应用[J]. 热力发电, 2013, 42(7): 142-143, 146.

HE Jiankang, ZHENG Caiping. Application of Integrated membrane water treatment technology in boiler make-up water treatment system of Shaoguan Power Plant[J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(7): 142-143, 146.

- [3] 范唯, 郑得鸣. 全膜法在湖南某发电厂锅炉补给水处理中的应用[J]. 工业水处理, 2019, 39(4): 109-112.

FAN Wei, ZHENG Deming. Application of the full membrane method to the treatment of boiler feed water in a power plant in Hunan Province, China[J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(4): 109-112.

- [4] 常莺娜, 梁宗俊, 王红燕. 全膜法在西北地区制备锅炉补给水工程实例[J]. 水处理技术, 2019, 45(1): 128-130, 133.

CHANG Yingna, LIANG Zongjun, WANG Hongyan. Engineering project of boiler supply water preparation by total membrane method in the northwest region[J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45(1): 128-130, 133.

- [5] 吕南南, 姜思洋, 徐仕先, 等. 全膜法水处理技术在调相机内冷水处理中的应用[J]. 清洗世界, 2019, 35(2): 7-9, 11.

LÜ Nannan, JIANG Siyang, XU Shixian, et al. Application of membrane water treatment technology in cold water treatment of camera[J]. Cleaning World, 2019, 35(2): 7-9, 11.

- [6] Q/GDW 12024.6—2019 快速动态响应同步调相机组验收规范第 6 部分: 除盐水系统[S].

Q/GDW 12024.6—2019 Specification of acceptance for fast dynamic response synchronous condenser unit—Part 6: External water cooling system[S].

- [7] 纪鹏. 调相机开式循环水系统两种补水模式的比较分析[J]. 电机技术, 2020(6): 39-41.

JI Peng. Comparative analysis on two water supply modes in the open-type water-circling system of condensers[J]. Electrical Machinery Technology, 2020(6): 39-41.

- [8] 魏文宇, 杨军. 延长反渗透运行周期案例分析[J]. 工业水处理, 2016, 36(7): 108-110.

WEI Wenyu, YANG Jun. Case analysis of extending reverse osmosis operation cycle[J]. Industrial Water Treatment, 2016, 36(7): 108-110.

- [9] 陈增润. 一起跳机未遂事件原因分析及预防措施[J]. 河南电力, 2020(S2): 89-91.

CHEN Zengrun. Cause analysis and preventive measures of an attempted jump[J]. Henan Electric Power, 2020(S2): 89-91.

- [10] 许红军, 张成军. 发电机冷却系统维护中的事故及处理[J]. 设备管理与维修, 2009(9): 58.

XU Hongjun, ZHANG Chengjun. Accident and treatment in maintenance of generator cooling system[J]. Plant Maintenance Engineering, 2009(9): 58.

[作者简介] 程一杰(1989—), 硕士研究生, 高级工程师。电话: 18358161994, E-mail: 364149941@qq.com。

[收稿日期] 2022-07-12(修改稿)