

白山抽水蓄能电站机电设备国产化浅谈

李志远¹ 董金良² 陆军² 盛亚利²

(1.白山发电厂, 2.白山抽水蓄能电站建设处)

摘要: 白山抽水蓄能电站, 实现了水泵水轮机/电动发电机组主机及励磁系统、调速系统机电设备国产化, 本文初步总结了白山抽水蓄能电站引进国外关键技术, 在消化吸收的基础上, 由国内厂家设计制造抽水蓄能电站主机、励磁系统、调速系统机电设备的成功技术和经验, 介绍首台国产化150MW白山抽水蓄能机组主机、励磁系统、调速系统机电设备应用情况与国内同行进行交流。

关键词: 机电设备 国产化 白山抽水蓄能电站

1 概述

白山抽水蓄能电站以白山水电站水库为上库, 红石水电站水库为下库, 总装机容量300MW, 安装2台单机容量150MW可逆机组。平均每年运行2150h, 年抽水量约为 $19.26 \times 10^8 \text{m}^3$, 年平均抽水耗电量 $6.45 \times 10^8 \text{kW} \cdot \text{h}$, 年平均增加发电量 $5.223 \times 10^8 \text{kW} \cdot \text{h}$, 综合效率超过0.8, 保证出力增加54MW。白山抽水蓄能电站机组运行方式初步确定为: 在非汛期, 机组抽水填谷停机后, 主要作为事故备用容量, 可将白山常规机组承担的备用容量转换成调峰容量, 从而, 增加了电力系统的调峰容量; 在汛期, 当白山常规机组($5 \times 300 \text{MW}$)弃水时, 开始发电增加季节性电量。

白山抽水蓄能电站由“中水东北勘测设计研究有限责任公司”总体设计, 水泵水轮机/电动发电机组的设计制造由哈尔滨电机有限责任公司(以下称哈电)完成, 白山抽水蓄能机组的主机设备首次采用分离采购的模式完成。两台主机设备除第一台的转轮由日本制造外, 其余设备全部由哈电设计和制造。

两台机组调速系统、励磁系统配套设备是按照由国内设备生产厂家总承包的原则, 第一台套设备全部由国外引进, 第二台套设备是在全面消化吸收国外设备成熟技术情况下, 由国内厂家进行设计和制造, 实现设备全部国产化的目标, 如果第二台套国产化设备在各项性能上达不到国外设备的性能要求, 则由国内生产厂家提供国外全套设备。

2 主机设备国产化

2.1 白山抽水蓄能电站主机设备国内设计可行性

对于150MW抽水蓄能机组的设计制造, 虽然在此之前国内尚无先例, 但就电动发电机而言, 国内已有成熟经验, 完全有能力设计制造。对其关键性设备推力轴承, 国内目前还没有设计制造经验, 需要引进设计制造技术。

水泵水轮机的关键性部件转轮是设计制造的核心。国内制造大容量的水轮机已有成熟经验, 但尚无设计制造大型转轮的先例, 因此采取只进口转轮, 其它部件由国内制造厂设计制造的方式是可行的。这样既能保证技术和制造质量, 又能节省投资, 符合蓄能电站的利益。对于直径为4.2m的蝶阀, 国内已具备设计制造能力。

2.2 主机设备设计、制造、安装调试和运行

经过三次主机设备设计联络会, 建设单位、设计单位、主机设备厂等各方对设计要求达成一致意见, 并对存在的问题加以改进和完善, 为满足推力轴承、下导轴承、水导轴承的设备检修空间要求, 将主机大轴加长1.5米, 相应的厂房发电机层安装提高了1.5米; 根据发电机转子尺寸和结构特点确定了制动器布置在推力轴承箱体上; 发电机下机架为荷重机架, 其支墩为悬臂式, 机架承重通过在机架和基础立面加强板之间的角型支撑来实现。水轮机设计方面对导叶上、中、下轴领及转轮采用不锈钢材质, 对水轮机转轮的性能保证进行了转轮模型复核试验验收。总体上看该模型转轮水力性能较好。复核试验检测显示水泵在电网频率为50.2Hz以上时, 水泵入力均超出合同值, 导致电动机原设计入力不足, 哈电提出了修改电机设计, 使其最大入力满足水泵要求, 相应的增加了电动机容量, 抽水容量为167.5MW。

白山抽水蓄能电站主机设备为国产抽水蓄能机组, 制造、安装、运行中不可避免的出现一些问题, 例如水轮机基础环外径超差、导叶预装后端面间隙过小, 部分零部件加工尺寸存在严重偏差, 定子鸽尾筋直线度超差、蜗壳盘型阀基础座材质裂纹和沙眼严重、座环灌浆前

水压试验出现从接水盒处串水、座环水平超差等。经过设计、制造厂、施工单位的共同努力都逐一得到很好的解决。安装投运后两台机组发电工况运行良好，各项技术指标达到要求，水泵工况运行时存在充气压水充气控制阀开启和关闭过缓以及关不严、造压后排气时厂房噪音过大等问题，目前已采取相应的改进措施进行完善，除此之外水泵工况运行各项性能和技术指标良好。1#蓄能机组于2005年11月19日完成发电工况连续72小时运行考验，于2006年6月20日首次抽水启动成功，并完成连续运行3小时的运行考验；2#蓄能机组于2006年6月9日完成发电工况连续72小时运行考验，于2006年6月27日首次抽水启动成功，并完成了连续运行1小时的运行考验。

2.3 主机试验结果

两台蓄能机组在水泵工况和发电工况100%额定容量下机组甩负荷各项指标满足设计要求。发电容量达到150MW，抽水功率为160MW时的抽水流量达到130 m³/s，机组发电和抽水容量均有一定的宽裕度，达到了设计要求。

主机发电工况额定容量稳定运行时各部Y方向摆度为：1#机上机架0.215mm、下机架0.162mm、水导0.187mm；2#机上机架0.081mm、下机架0.048mm、水导0.08mm；主机运行摆度均小于0.3mm，完全满足运行要求。

主机水泵抽水工况额定容量稳定运行时各部Y方向摆度为：1#机上机架0.05mm、下机架0.088mm、水导0.069mm；2#机上机架0.054mm、下机架0.035mm、水导0.100mm；主机运行摆度均小于0.3mm，完全满足运行要求。

由于水泵水轮机真机性能试验目前尚未进行，真机效率试验结果还有待试验后进一步校核。将水泵水轮机模型试验结果换算成原型机水泵最高效率为94.05%，高于合同值93.82%，原型加权平均效率为93.66%，高于93.3%，满足合同要求。抽水最大流量为138m³/s，高于合同值132.1m³/s，轴功率最大值为157.495MW，高于合同值150.8MW。水轮机最高效率值为93.59%，高于93.3%的合同保证值。加权平均效率大于90.29%，满足合同要求。

3 调速系统设备国产化

白山抽水蓄能电站调速器由武汉事达电气股份有限公司供货，其中第二台设备采用武汉事达电气自主研发的PFWT-150-6.3—STARS型调速器。

3.1 机械部分

调速器FC阀组的液压系统组成为：双精滤油器、双比例伺服阀、切换阀、电动紧急停机阀、手动紧急停机阀、主配位移传感器、主配压阀、以及管路等（见图1）。

靠近FC阀设有一个手动紧急停机阀和一个电动紧急停机阀。手动旋转（按照标牌所示方向）手动紧急停机阀，就能使FC阀控制腔的油通回油，继电器关闭。同样，电力操作电动紧急停机阀，也能使FC阀控制腔的油通回油，继电器关闭。因此在紧急情况下，不论处于何种工况，处于优先位置的任一紧急停机阀动作，均能实现导叶关闭，保证机组安全。

比例伺服阀的功能是把输入的电气控制信号比例转换成输出流量控制，调速系统处于自动运行工况，即是指系统被伺服比例阀控制的情况。阀芯装备了位置控制，使得滞环和重复性均很小。在电磁铁断电时，阀处于“故障保险”位置。

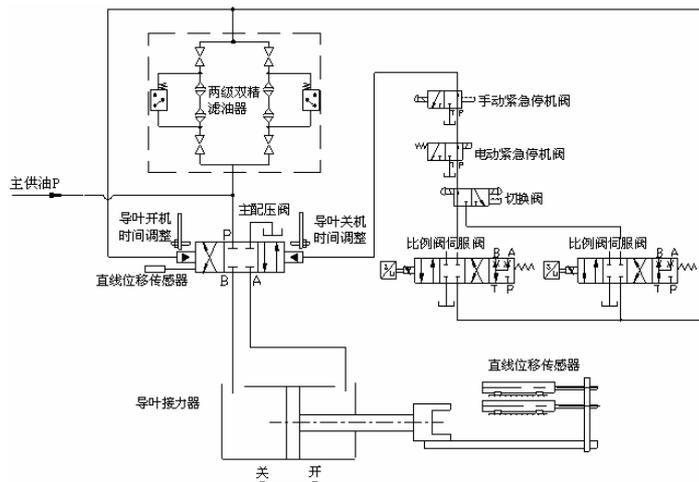


图 1 液压系统工作原理图

3.2 电气部分

3.2.1 系统设计

调速器为冗余式双可编程微机调速器，控制器由两套具有独立I/O通道及信号采集系统的PLC组成，两套PLC通过TCP/IP网络相互通讯（见图2）。

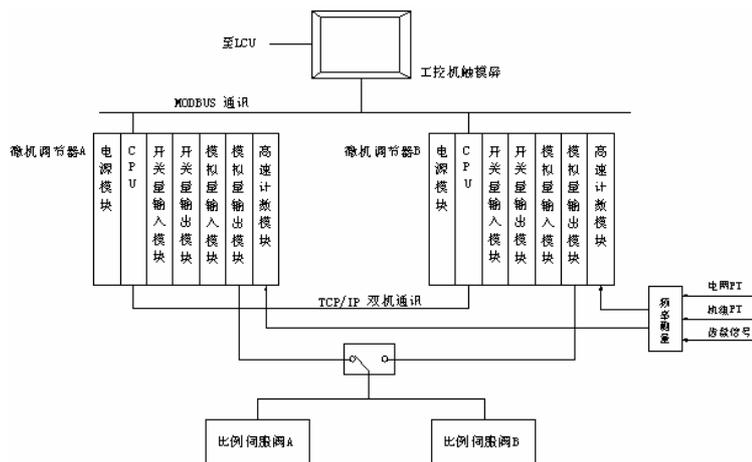


图 2 微机系统配置图

调速器采样机组频率（转速）、导叶开度等信号，通过D/A模块输出对比例阀的控制信号，其调节原理框图见图3。

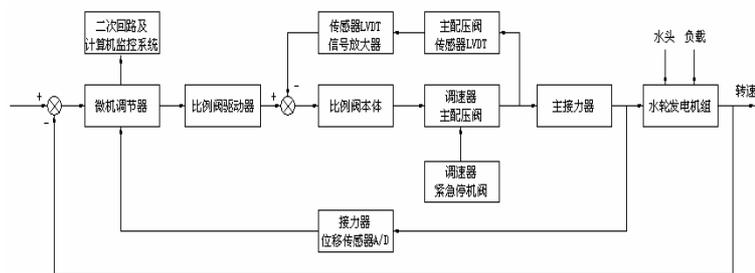


图 3 调节原理框图

调速器采用触摸式工控机作为主要人机界面，工控机采用德国西门子公司的SIMATIC Panel PC 670可触摸型一体机，使用DC24V供电。基本配置为：PIII 1G/128M/20G/1.44M，系统运行环境为Windows2000 Professional。应用软件为武汉事达电气股份有限公司自行开发的调速器监控软件。

A机、B机的程序运行CPU模块通过RS485串口与触摸屏通讯（MODBUS通讯协议），

在触摸屏上可显示及控制当前运行微机的数据及状态，并可显示后备机的数据及状态，且与上位机通讯接口。

3.2.2 调节模式

调速器有三种调节模式：频率（转速）模式、开度模式和功率模式。在机组并网发电运行状态下，调速器可运行于三种调节模式之一，运行人员在现地可通过触摸屏选择调节模式，也可在远方通过开关量输入选择调节模式（见图4）。在各种模式下均有对其它模式给定值的跟踪功能，所以在三种模式间切换时，调速器均无扰动。

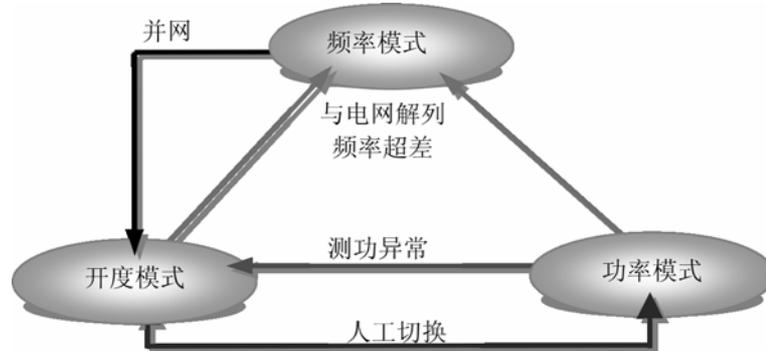


图 4

在水泵模式下运行时，调速器运行在开度调节模式下，导叶开度将完全由水头值所决定，此时任何增减导叶开度的命令将不予接受。该调节模式只有在机组与电网连接的情况下有效，机组与电网解列后，将导致机组进入停机流程，导叶全关。

3.3 国产调速器系统设备试验结果

通过现场调试、试验，国产调速器设备各性能指标均达到并优于国家标准，符合合同和技术条款的规定，满足抽水蓄能机组的运行控制要求。并且部分指标优于第一台进口调速器，如甩负荷的不动时间国家标准要求小于0.20s，国产调速器实测值为0.14s，进口调速器为0.18s；国产调速器转速死区1.00%，进口调速器为1.80%。

4 励磁系统设备国产化

目前，国内蓄能电站励磁装置均成套引进国外设备，白山抽水蓄能电站1#机采用瑞士ABB UNITROL5000励磁系统，2#机在消化吸收ABB UNITROL5000基础上采用广州电器科学研究院自主研发的EXC9000励磁系统，填补了国产化空白。

4.1 技术先进

EXC9000系统是具有完全自主知识产权的国产化产品，在系统数字化、功能软件化，DSP数字信号处理技术、可控硅整流桥智能均流技术、高频脉冲列触发技术、低残压快速起励技术、完善的通讯功能和智能化的调试手段、PSS 2A模型的应用等方面均处于国内领先水平。

4.2 励磁系统

基本配置如表1所示。

表 1 励磁系统配置

名称	数量	尺寸(宽×深×高)(mm ³)	基本描述
励磁调节柜	1台	800×1000×2260	独立的双微机通道调节器、智能检测、智能接口、智能触摸屏
灭磁开关柜	1台	800×1000×2260	灭磁开关、跨接器、出线母排、直流变送器、非线性电阻
励磁功率柜	2台	1000×1000×2260	智能化、现场总线、单柜额定输出1500A，液晶显示屏
进线柜	1台	1000×1000×2260	进线母排、进线刀闸开关、起励单元
励磁变压器	1套	3×450kVA	三个单相环氧干式变压器组及其附件

4.3 系统设计

白山抽水蓄能电站在主回路设计上具有自己的特点：主变高、低压侧均配备有并网开关，发电工况时先合低压开关，高压开关并网方式，水泵工况时先合高压开关，低压开关并网方式，停机时先分低压侧，停机终了后再分高压侧，励磁系统采用自并激励磁方式，励磁变压器取自主变低压侧（低压侧开关上端，即使在电机转子处于静止状态时亦保证提供励磁电源

要求)。全厂另设置一个它励变(电源取自厂用电6.3kV),用于水泵工况的背靠背启动时被拖动机组的初始励磁电流提供及机组的电气制动停机,完全满足发电、水泵起、停及运行工况要求。

4.4 励磁系统工作运行方式

由于励磁电源取自机端断路器外侧,即主变高压开关在合位时励磁变始终带电,励磁变兼做启动变压器和电制动变压器,励磁系统在调节器及控制回路中设置适当功能就能满足机组的多工况运行,相对逻辑控制较为复杂,但在启停和工况转换过程中不需切换励磁功率电源。同时满足了各种运行方式的要求。

在常规发电工况,主变低压侧开关闭合,励磁变压器接在机端,以常规自并励方式运行。

在电制动停机时,分主变低压侧开关,励磁变压器仍然带电,以它励方式提供制动电流。

在SFC启动方式以及背靠背电动方式下,先合主变高压侧开关,励磁变带电,在转子静止状态时向机组提供恒励磁电流方式。并网后自动切换至恒电压自动调节方式,

在背靠背启动时,由于被拖动机组励磁变不带电,通过它励变压器向转子提供励磁电流(励磁装置内设有交流切换开关),拖动机组励磁采用背靠背发电方式调节,被拖动机组励磁采用背靠背电动调节方式。

4.5 励磁调节器组成

EXC9000励磁调节器硬件方框图如图5所示,调节器主要由A、B两个调节通道、模拟量总线板、开关量总线板、人机界面、接口电路等组成。其硬件包括:

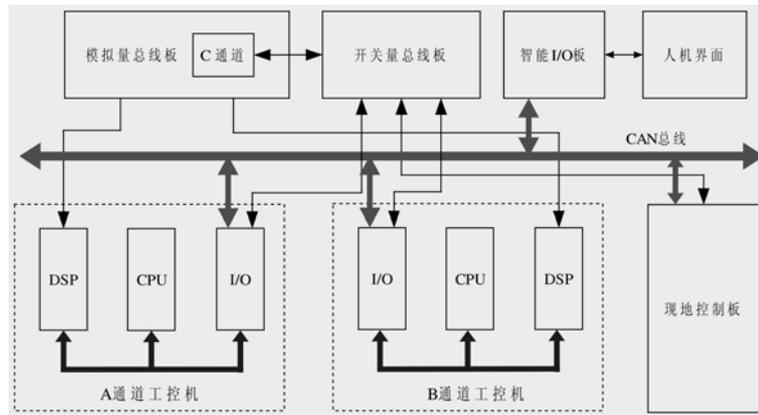


图5 调节器硬件方框图

两个微机调节通道,每个调节通道包括:一块CPU板、一块DSP测量板、一块I/O板;一块开关量总线接口板;一块模拟量总线接口板;一块现地操作单元板;一块智能I/O板;一套人机界面。

如图1所示,微机调节通道主要由工控机组成,它采用多CPU工作模式,几个CPU协同工作,各有分工。调节、控制逻辑等由CPU板上的INTEL80486完成;采样由DSP完成;故障检测、脉冲及整流桥控制等功能由通道接口板上的单片机完成。具体如下:

其核心控制器件为COMPACT PCI32位总线工控机,该工控机由三块独立的板卡组成:CPU板是一块高集成化的的单板计算机,核心器件为486DX5-133,主要用于实现励磁系统的调节、逻辑控制功能。DSP板实现34路模拟量输入的同步采集和高速转换,以及16位数字量输出。主要用于模拟量信号的采集及处理。I/O板主要用于励磁系统开关量信号的采集及输出。

4.6 调节器的功能

调节规律:采用PID+PSS控制模式

主要功能:电功率型PSS,交流采样算法,余弦移相,定时调节,运行方式,恒发电机机端电压的自动调节功能,恒发电机转子电流的手动调节功能,叠加的恒无功调节,叠加的恒功率因数调节,限制功能,V/f限制,过励限制,欠励限制,定子电流限制,最大磁场电流限制,最小磁场电流限制。

监测功能:PT断线,电源故障,调节器软件故障,调节器硬件故障,脉冲故障,整流桥故障报警,转子过热报警,励磁变超温报警,通讯故障报警。

保护功能：V/f保护，转子过流保护，失磁保护，励磁变过流保护，励磁变超温跳闸。

其它功能：软起励，残压起励，有功和无功补偿，调差，系统电压跟踪，通道之间自动跟踪，故障智能检测和自动切换，容错控制，故障录波和故障记录，辅助调试和试验功能，智能均流，智能封脉冲。

4.7 国产化励磁系统设备试验结果

本套励磁系统充分吸收了国外励磁系统的先进技术和理念，应用了现场总线、智能均流、残压起励、高频脉冲列触发等新技术，励磁调节器的性能指标满足国家相关励磁标准要求，励磁系统的对外接口及内在逻辑控制规律均与进口设备保持一致，在发电、水泵、背靠背、电制动工况的起停、运行等全部试验合格，结果表明，国产化励磁系统完全能满足抽水蓄能电站多工况运行的要求，其具备的性能指标与控制技术完全可以与进口设备相比。

5 结语

主机、调速系统、励磁系统机电设备通过安装后的现场调试、试验，各性能指标均达到并优于国家标准，符合设备合同要求和相关技术条款的规定，满足白山抽水蓄能机组的运行要求。对于主机、调速系统、励磁系统机电设备运行性能指标时间上的检验，需要在两台机组全部投产运行一年的考核期内进行实际的考验，国产化机电设备主要性能完全满足使用要求的情况下，一些高新技术的指标应该说距离国外成型技术还存在一定的差距和不足，如在设备加工精度、密封性、速动性、可靠性、美观性、高技术指标等方面，需要进一步去探索 and 解决。

白山抽水蓄能电站机组的应用，第一次成功实现了国产化设计制造150MW抽水蓄能机组的发电和抽水，填补了国内水电史上的空白，第一个实现了东北电网系统内抽水蓄能机组的运行，填补了东北电网系统无抽水蓄能电站的空白。白山发电厂作为东北地区电网内主要调峰厂，达到了发电总装机容量2000MW、抽水总装机容量300MW的能力，为东北电网系统的经济运行创造了条件。