

大型抽水蓄能电站励磁装置国产化研制与应用

熊巍 秦汉军 孙君光

(广州电器科学研究院 广州 510300)

摘要: 本文简要介绍了国内抽水蓄能电站励磁装置应用现状,结合白山抽水蓄能电站的顺利投运,介绍了国产化抽水蓄能励磁装置的组成、特点及应用。

关键词: 抽水蓄能 励磁系统 国产化 变频起动 现场总线 智能控制

一、概述

抽水蓄能发电是水力发电的一种特殊形式,它利用电力系统负荷低谷时的剩余电能,将水从高程低的水库抽到高程高的水库,以位能的形式储存起来,在电力系统用电高峰时,将水放下发电。

目前,我国电力系统使用的能源仍是以燃煤为主,很多电力系统的调峰能力还很差,加上我国水力资源分布不平衡,开发也不充分,电力负荷峰谷差问题随着系统容量增加和经济发展而显得更加突出。峰谷差大幅增加直接影响了电力系统的电能质量和运行经济效益。由于抽水蓄能机组具有如下显著特点:起动迅速,适用范围广,能有效代替火力机组担任调峰作用;具有很强的负荷跟随能力,在电网中起到调频作用;工况转换快,削峰填谷,造价低;降低运行消耗,改变电力系统能源结构。故抽水蓄能机组成为有效调整电力负荷峰谷差,提高电能质量和运行经济效益最为经济且运用最为方便的手段。

励磁系统是抽水蓄能电站中的重要辅助设备之一,是构成完整抽水蓄能系统不可分割的一部分。抽水蓄能机组运行工况多、转换频繁的特点,决定了所使用的励磁装置具有许多与常规发电励磁装置相比,具有许多不同的要求和功能,是集发电、电动、电制动等多功能于一身的综合性励磁装置。

二、项目背景

国内外研究表明,抽水蓄能电站容量占总装机容量的10%~15%是较为经济合理的电网结构形式。

从国内已建成投产的几个抽水蓄能电站,如天荒坪、广蓄、十三陵等来看,抽水蓄能机组的优越性和合理性已逐渐显露出来,取得了较好的运行经济效益。据不完全统计,目前待建和已规划的项目已达到三四十个,且多为大型机组,主

要分布和集中在水能资源相对贫乏的华北地区、华东地区。我们却不得不正视这么一个现实，那就是目前已建成投产的抽水蓄能电站机电设备绝大部分都采用进口设备，在主机方面，部分小型容量的抽水蓄能电站开始应用国产技术，但在励磁系统的应用方面，情形却不令人乐观，励磁国产化的步伐迟迟没能迈出。当前，广州抽水蓄能电站一期使用的法国阿尔斯通公司的产品，二期使用的德国西门子公司微机励磁装置；浙江天荒坪、湖北天堂、安徽琅邪山等抽水蓄能电站使用的是奥地利伊林公司的产品，山东泰安、河南回龙、浙江溪口等抽水蓄能电站采用的是ABB公司的产品。国内励磁制造商在采用异步起动方式的小型抽水蓄能电站方面，有些业绩；但在主要采用以变频启动方式和背靠背启动方式为主的大中型机组方面，可以说国产励磁制造商处于应用空白。

实际上，随着科技的发展以及国内外励磁控制技术的交流，国产励磁装置的整体制造技术水平较以前有了很大提高，虽与国外先进技术水平相比，仍然存在一定差距（主要体现在工艺及可靠性方面），但已完全具备制造大容量机组及抽水蓄能机组励磁装置的能力。由于国内一些大型抽水蓄能项目实现捆绑由外方供货和一些建设业主对国产励磁控制水平的担心以及国内励磁制造商缺乏运行业绩，造成国产励磁设备很难进入抽水蓄能市场。

在此背景下，东北电网公司敢于开拓，大胆创新，在其建造的东北地区第一座抽水蓄能电站——白山抽水蓄能电站上面，采取先引进消化吸收国外先进技术和制造经验，再应用国产机电设备的做法，为振兴民族工业，实现抽水蓄能机组机电设备国产化作出了重大贡献。

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台可逆机组，单机容量150MW。

2003年6月，广州电器科学研究院承接了吉林白山抽水蓄能电站150MW机组励磁装置的供货任务。这是国内励磁厂家中首次独立承接的单机容量最大的抽水蓄能机组励磁装置。该项目意义重大，机遇与风险并存。特别是该项目第一套设备采用ABB进口产品，第二套设备采用国产装置，国内外产品同台竞技，更显特色。

三、励磁系统介绍

1. 电站相关参数及特点

额定功率：发电工况：145.2 MW； 电动工况：167.5 MW；

额定电压： 13.8 kV

额定电流：发电工况：6903 A； 电动工况：7818 A；

额定功率因数：发电工况：0.88(滞后)； 电动工况：0.91；

额定励磁电流：发电工况:1537A ； 电动工况：1603A；

额定励磁电压：发电工况：232V； 电动工况：242V；

空载励磁电压：发电工况：94 V； 电动工况： 94 V；

空载励磁电流：发电工况：909A； 电动工况：909A；

强励最大电流： 3074 A

白山抽水蓄能电站安装两台可逆式机组，运行工况多样，包括发电、抽水等合计共有 17 种之多。抽水工况下，以 SFC 变频启动为主，低压背靠背方式为辅。两机共用一台 SFC，根据需要启动各个机组。机组停机采用柔性电制动方式，加快发电抽水等多工况的转换。

2. 励磁系统的总体设计方案

励磁系统以 EXC9000 型励磁系统作为平台研制，其主要特点是功能软件化、系统数字化。该系统的数字化不仅体现在调节器，也体现在功率柜和灭磁柜。励磁系统的各个部分均能实现智能检测、智能显示、智能控制、信息智能传输和智能测试，极大地提高了装置的可靠性和工艺水平。

励磁系统吸收了目前数字控制领域先进的研究成果和工艺，增添了新的精巧的解决方案和手段，如 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等。CAN 现场总线技术也被用于励磁系统的各个部分进行控制和信息交换，使励磁装置成为一个有机的、完整的整体。

整套励磁装置由调节柜、功率柜（两面）、灭磁柜、交流进线柜组成，依次从左到右排列。

3. 励磁调节器

3.1 通道配置

励磁调节器由两个完全独立的调节和控制通道（通道 1 和通道 2）组成，2

个通道完全一样，通道 1 为主通道，通道 2 为运行通道，备用通道（非运行通道）总是自动的跟踪运行通道；在运行通道中检测到故障，自动切换到第二通道运行。在故障排除之前不能切换到原通道运行。

每个通道内包含一个 AVR 自动电压调节单元（自动方式）和一个 FCR 励磁电流调节单元（手动方式）。在自动方式下，励磁系统自动调节机端电压，最大限度的维持机端电压恒定。在手动方式下，励磁系统自动维持发电机恒定励磁电流。备用调节方式总是自动跟踪运行调节方式。根据工况的不同，调节器自动选择手动方式或自动方式，并能根据实际情况进行工况的切换。例如在发电工况下，选择自动方式运行，在电制动或抽水工况启动下选择手动方式运行。

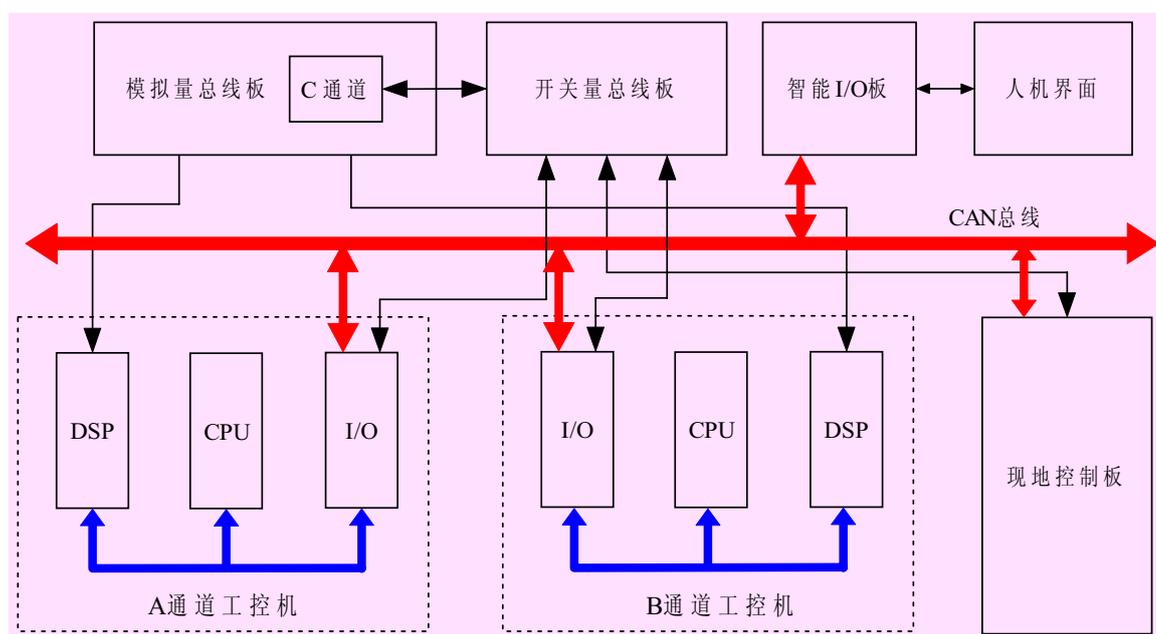


图 1-1 调节器硬件方框图

3.2 励磁控制规律

基本调节运行方式为自动方式和手动方式，控制规律为 PID+PSS2A 模式，PSS2A 能有效克服反调问题。

3.3 调试软件

Debug 软件利用 EXC9000 励磁调节器提供的通讯接口，为用户提供一个与调节器进行交互的可视化接口，方便用户对调节器进行参数整定和对调节器、励磁系统进行试验。

特征如下：

A 软件具备完善的示波器功能。可以同时显示 11 路模拟信号，每一路信号可以独立进行开关操作、颜色设置、缩放、平移等操作；每个模拟通道具备 6500 点的存储深度和 10ms/点的分辨率；丰富的波形转储功能，可以将波形存储为数据文件、单色波形和彩色波形的 BMP 文件。

B 参数操纵功能。可以上载、下载 EXC9000 励磁调节器的参数表；参数表具备版本控制功能，可以自动验证参数的有效性；每个参数都具备一组约束条件，可以有效防止错误参数的输入；参数表分组功能，方便用户从数量众多的参数表中寻找特定的参数；参数对比功能，可以将当前参数表中的参数与默认值或者存储在文件中的参数表进行对比；参数转储功能，可以将参数转存为数据文件或者文本文件。

C 命令接口。使用 Debug 软件，用户可以方便地控制 EXC9000 励磁调节器执行各种操作。包括执行各种模式切换、阶跃试验、设置 EXC9000 励磁调节器事件记录和录波功能的触发条件等。

D 更新程序功能。通过与 EXC9000 励磁调节器配合，可以下载各种文件到励磁调节器，执行调节器软件的更新操作。

E 采用 C++语言编写，使用面向对象的设计方法，提高了程序的可读性和可维护性。

3. 4 人机界面

选用带全屏触摸功能的显示器（Proface 触摸屏）作为人机界面，其优点是功能齐全，不仅用于运行操作，也可用于试验和维护，画面丰富，视觉效果良好，操作简便，同时具有数字量、模拟量、通讯状态和系统运行状态显示，设备运行状况一目了然。

3. 5 对外接口

对外接口采用常规 I/O 与串行通信相结合的方式。

重要的控制接点通过 I/O 硬接点传送；

串行通讯采用 MODBUS 规约，实现状态量的上传和无功给定数值的下发。

3. 6 起励

配备有交流起励、直流起励及残压起励三种方式。

4. 励磁功率柜

功率柜采用进口晶闸管，双整流桥并联运行，实现智能显示与智能控制。在每个功率柜内设计有一套智能控制系统，该系统包括智能检测单元、通讯接口、传感器、LCD 显示器、以及相应的输入输出接口电路等。由于引入了智能控制系统，取消了常规表计和指示灯，功率柜的操作、控制、状态监视、信息传递、信息显示等均实现了智能化。

工况检测实现智能化

智能控制系统对功率柜的检测是全方位的，检测功能包括：

- 桥臂电流和单桥总输出电流
- 快熔状态（包括阻容保护用快熔）
- 风道温度检测
- 风机开停状态
- 风压检测
- 本功率柜投退状态

工况显示实现智能化

在每个功率柜柜门上，安装了一个带触摸键的 LCD 显示器，用于显示该功率柜的各种状态及实现相关操作，见如下图所示。



信息传输实现智能化

将 CAN 总线技术用于智能化功率柜，功率柜的开关量信号和模拟量信号均通

过现场总线传递到调节柜，也可直接传递到电站控制系统。这不仅提高了信息传输量，也大大减少了柜间接线，提高了系统运行可靠性，提高了装置的整体工艺水平。

风机控制实现智能化

当智能控制系统检测到励磁系统有“开机令”或本柜输出电流大于 100A 时，自动启动风机；无“开机令”且本柜输出电流小于 50A 时，自动停止风机。

智能均流

采用智能均流技术，不需要其它任何辅助措施（如长电缆、硅元件参数选配等）可以保证均流系数大于 97%。

智能均流方法立足于控制回路，通过自动调节实现柜间及相间均流。用这种方法均流，主回路可不串任何均流器件，因此它不仅克服了传统均流方法的缺点，而且能有效地实现高水平均流系数，一致性也很好。

5. 灭磁系统

励磁系统正常停机采用逆变灭磁，事故停机跳磁场断路器，并将磁场能量转移到灭磁电阻，由其耗能灭磁。

非线性电阻采用 ZnO。

灭磁开关采用 ABB E 系列开关。

6. 电制动

采用柔性电制动技术，不需电制动变压器。整个电制动流程通过单片机实现控制。本系统不操作机端电制动开关。

四、励磁控制特点

白山抽水蓄能电站使用了两套具有不同风格的励磁系统，通过对进口励磁设备设计原理的学习、调试的掌握以及国产励磁设备的研制和投运，使得我们对抽水蓄能励磁控制的特点有了较为深入的认识。

1. 抽水蓄能励磁装置相比较于常规励磁系统而言，涉及的运行工况多，集发电、变频、背靠背、电制动等多功能于一身，是最为复杂的励磁系统。

2. 抽水蓄能励磁装置系统方案的设计与电站主回路紧密相关。在不同的主接线方式下，励磁装置的主接线和逻辑控制则完全不同。

例如在白山抽水蓄能项目中，电气主回路设计是励磁变压器位于主变低压

侧，水泵工况以变频起动为主，低压背靠背起动方式为辅。在背靠背方式下，由于背靠背发电机组无励磁电源，故必须另外提供励磁电源，励磁系统必须装设可切换的交流进线开关。

3. 抽水蓄能励磁装置 I/O 信号众多，在常规励磁装置的基础上必须考虑留有适当的资源，便于信号扩展，既可利用已有的硬件资源，也可通过总线扩展。本项目国产励磁装置实现了对外输出信号组态控制，方便地实现了两套励磁系统对外输出信号保持一致。

4. 抽水蓄能励磁装置运行工况多，不同的工况要求应用不同的运行模式，工况的转换及功能的切换需要有严密的逻辑。如果考虑不周，则会时时出现问题。

5. 抽水蓄能励磁装置在励磁参数的测量、在调节器参数整定上，同常规励磁系统有区别。由于需要调整的参数多，调试时为便于观察调节器内部运行状态，需要一款操作简单方便，界面友好，功能强大的调试软件十分有必要。

五、应用

2003 年 6 月，广科院承接了白山抽水蓄能电站两套励磁系统的供货任务。2005 年 6 月，2006 年 1 月，两套设备分别交付业主进行安装。在现场指挥部的领导下，各方人员的通力协作，#1 机励磁系统于 2005 年 11 月完成了发电状态的调试工作及试运行，2006 年 6 月份成功完成了 SFC 启动，背靠背发电、背靠背电动、电制动等多工况的试验，交付系统。#2 机励磁系统于 2006 年 7 月份完成了发电、电动、电制动等多工况的试验，投入商业运行，设备运行情况良好，成功实现了国产化励磁设备在 10 万千瓦以上级的抽水蓄能机组上首次投运。

励磁系统现场投运试验包括装置/单元检查试验、电源回路检查、操作回路及信号回路检查、静态开环试验、空载闭环试验、负载闭环试验、SFC 工况试验、背靠背工况试验、电制动试验。

试验结果表明，设备参数理想，两套系统各项技术指标均达到或超过国家和部颁标准的要求，国产励磁装置完全能够满足抽水蓄能电站多工况运行的要求。本项目的成功实施，提升了国产化励磁装置在抽水蓄能领域同进口设备的市场竞争力，积累了经验，节约了外汇，具有重要的现实意义，我们相信，在不久的将来，将会有更多的国产励磁装置应用到抽水蓄能领域中。