

大中型抽水蓄能电站控制与保护设备的国产化研究

汪军 张红芳 张启明

国电自动化研究院

摘要: 简述国内外抽水蓄能电站的发展情况,分析了抽水蓄能电站国产化的技术现状,指出:鉴于当前抽水蓄能电站国产控制与保护设备的经验和较好的技术水平,计算机监控系统最有可能首先实现国产化,并提出了实施中可供参考的建议。

关键词: 抽水蓄能电站;控制与保护设备;规划;国产化

1 抽水蓄能电站国内外发展情况

抽水蓄能电站从 1882 年在瑞士苏黎世问世以来,已有 100 多年的历史。由于抽水蓄能机组灵活多样的运行方式和利用低谷剩余电能抽水蓄能在尖峰时发电的重要作用,在国内外受到了广泛的重视。

国际上电力建设处于先进水平的国家,抽水蓄能电站发展步伐较快。国外抽水蓄能电站占总装机容量情况为:美国 4.5%、英国 2.06%、挪威 4.6%、德国 4.87%、奥地利 16.27%、瑞士 12.06%、法国 18.67%。

我国抽水蓄能电站建设起步较晚,但在短短的三十几年时间里,已有了飞速进展。我国 80 年代开工兴建 1200MW 的广州抽水蓄能电站,90 年代兴建了 800MW 的十三陵抽水蓄能电站、1800MW 的天荒坪蓄能电站及 1200MW 的广蓄二期工程。近些年又着手筹建和兴建桐柏、泰安、宜兴和琅琊山等大中型抽水蓄能电站。

到 2002 年底,全国已建成投产的蓄能电站装机容量达到 575 万 kW。

已建抽水蓄能电站装机容量

时间	地点	容量(万 kW)	机组生产厂商
1968 年	河北岗南	1.1	日本富士电机厂
1973 年	北京密云	2.6	中国天津发电设备总厂
1992 年	河北潘家口	27	意大利 TIBB
1992 年	四川寸塘口	0.2	中国四川东风电机厂
1993 年	广东广蓄(一期)	120	法国 CEGELEC
1995 年	北京十三陵	80	美国 VOITH 奥地利 ELIN
1996 年	西藏羊湖	9	美国 VOITH 奥地利 ELIN
1998 年	浙江溪口	8	瑞士 SEM、ABB
1998 年	广东广蓄(二期)	120	德国 SIEMENS VOITH
1998 年	浙江天荒坪	180	加拿大 GE-挪威 KE-奥地利 ELIN
1999 年	安徽响洪甸	10	中国东方电机厂
2000 年	湖北天堂	7	中国杭州发电设备公司
2001 年	江苏沙河	10	法国 ALSTHOM

目前我国已经建成投产的蓄能电站装机容量占全国总发电装机容量的比例约为 1.6%,与国外相比,总体容量水平仍然较低。

当前在建的蓄能电站有 10 座,装机规模为 762 万 kW。

根据水规总院提供的研究成果，国家电网公司所属各区域（省）电网和南方电网在 2010 年、2015 年和 2020 年 3 个水平年的抽水蓄能需建设的参考数量见下表。

单位：万 kW

水平年	国家电网	南方电网	合计
2010 年	537	130	667
2015 年	1497	280	1777
2020 年	2377	510	2887

2 我国抽水蓄能电站国产化技术现状分析

到目前为止，我国利用外资的已建和在建抽水蓄能电站主要机电设备均采用国际公开招标方式进行采购或国外厂家直接供货，集资兴建的几座中型抽水蓄能电站的关键技术和部件全部或部分由国外进口。抽水蓄能机组设备国产化能力不足加大了电站的投资，影响了抽水蓄能电站的发展。由于备品备件供应问题和技术服务问题，影响了抽水蓄能电站的高效运行。因此，抽水蓄能电站设备国产化势在必行。

抽水蓄能电站的主要设备包括主机和控制保护设备两大部分。

2.1 主机设备方面

主机设备包括水泵水轮机、发电电动机等部件。抽水蓄能机组需完成抽水和发电两项任务，工况转换频繁，在水力设计、结构设计、部件制造、质量控制和调试等方面比常规水电机组复杂。我国尚不具备独立设计和制造大型抽水蓄能主机的能力，但从厂房、设备、制造和运输等条件分析，东方电机股份公司、哈尔滨电机厂和上海福伊特西门子水电设备有限公司等单位都具备加工、制造高水头、大容量抽水蓄能机组的硬件条件。国家有关部门正在组织进行抽水蓄能主机设备的国产化攻关工作，相信在不远的将来就会出现国产大容量抽水蓄能机组。

2.2 控制保护设备方面

控制保护设备包括调速器、励磁系统、变频启动装置、继电保护和计算机监控系统等。我国已建和在建的抽水蓄能电站的调速、励磁和计算机监控等系统基本都是随机组捆绑进口。国外抽水蓄能机组的制造厂家，其二次设备和控制系统并不是国际最高水平，基本属于配套销售。从已建项目的运行情况看，大都存在着抽水蓄能机组控制方式不完全符合中国电网安全稳定运行的需要、技术服务跟不上、备品价格高等问题。由于经济利益关系，国外厂家在引进技术或安装设备时，在技术上对中国实行技术封锁。此外，技术捆绑进口的国内依托单位主要是主机设备的制造厂家，由于专业领域的不同，在客观上限制了对二次设备和控制系统在技术、制造工艺等方面进行深入的研究，使二次设备的技术也未达到国内最好水平。目前国内所有的大型抽水蓄能电站控制系统都是引进外国公司的产品，国产化的大型抽水蓄能电站控制系统还没有应用实例。

计算机监控系统是电站控制的核心，除完成监视和控制功能外，还要实现对上一级调度自动化系统的数据传输，准确无误地执行上一级系统发来的控制命令。国内研制水电厂计算机监控系统的厂家主要有：南瑞集团和水科院。国内外厂商监控系统软硬件结构基本相同，所提供系统的硬件在可靠性方面没有明显差别，从软件方面看，国内厂家具有明显的优势。因此，在监控系统领域，中国已具有很高的系统开发水平，并占据了常规水电厂计算机监控系统的主要市场。

调速器是水轮发电机组的主要辅机之一，国内已具备常规水轮发电机组调速器的设计、研究、开发和制造的完整体系，在产业上也已形成一定的规模。此外，我国调速器在性能指标方面与国外没有太大差别，并且在控制理论和方法上具有一定的独到之处。

励磁系统由励磁调节器、功率柜、励磁变压器和过电压保护及灭磁柜等装置组成。励磁系统也是水轮发电机组的主要辅助设备之一。国内励磁调节器在技术上完全能够实现各种控制、保护、限制、监视、记录等功能。从控制原理和功能而言，国产微机励磁调节器优于国外。

继电保护主要由线路保护、母线保护、主变压器保护和发电-电动机组保护四个部分组成。

3 大中型抽水蓄能电站控制与保护设备的国产化研究

3.1 大型抽水蓄能电站机组测控装置的研究

大型抽水蓄能机组测控装置除了能够执行主控级的命令，同时应该能够独立完成电站机组、开关站、公用设备的监控任务。各装置应采集生产过程的信息，实时更新数据库，并对生产过程中出现的事故和报警信号进行处理，启动语音报警、推光字画面、事故追忆等功能，同时进行控制调节操作，并与其他智能设备通讯。除此之外，由于大型抽水蓄能电站的运行复杂性特点，对机组测控装置的要求更高，装置之间应该能够直接交换信息以满足各种控制的协联要求。

3.2 大型抽水蓄能电站计算机监控系统的研究

监控系统由现地层和电站层构成，现地层和电站层之间通过计算机网络连接并进行监控数据交换。现地层由带有人机界面的现地控制单元（可能含有分布式 I/O）构成，电站层由操作员站、站级主机（可能包含实时数据服务器、历史数据服务器）、通信站、维护站、培训站等构成。完成的主要功能有：

3.2.1 数据采集和处理。包括现地各传感器、变送器、智能测量装置的信号和数据以及调速、励磁、保护、变频器控制装置等传送的数据。

3.2.2 运行监视。包括数据库处理，电站的主要设备及辅助设备、公用设备的运行工况、运行状态、运行参数、运行操作的实时监视，高压母线电压、频率监视，各种自动过程监视，输电线潮流监视等运行参数监视和异常报警，通过屏幕显示，打印或拷贝输出，事故或故障的音响、语音、电话报警，模拟屏或大屏幕投影显示等给运行人员提供足够的手段和信息。

3.2.3 控制和调节。完成水泵水轮机组的各种方式的启动（同步变频器启动、同步背靠背启动、异步全压或降压启动等）、停止以及发电、抽水等各种运行工况的转换。完成在发电、抽水不同工况下的自动调节功能和优化控制（AGC、AVC、PJC）。完成站内开关站、变压器、厂用电、油、水、风系统等主辅设备的自动控制操作。

3.2.4 历史数据和运行管理。完成电站运行数据的统计、归档，提供历史数据查询、报表生成等功能。

3.2.5 通信功能。实现与站内通信（调速、励磁、保护、电能量采集、MIS 等）以及与上级调度通信。

3.3 大型抽水蓄能电站机组励磁调节系统的研究

一般采用自并励励磁系统，系统配置与常规水、火电机组自并励励磁系统基本一致，由以下几个主要部分组成：

3.3.1 励磁变压器

励磁变压器提供抽水蓄能机组电动发电机正常运行时所必需的励磁电源。需要专门注意的是：励磁变压器应接至发电机和主变压器的连接部分，且在断路器内侧，换相开关的外侧，如果系统主接线不是如此，则必须考虑在发电和抽水工况下的励磁电源的相序变化。对于抽水蓄能机组，为了保证有较快的工况转换速度，应使用电气制动，为此需设置电气制动变压器，提供机组电气制动停机制动电流。

3.3.2 可控硅整流装置

可控硅整流装置通过三相全控整流桥向电动发电机转子提供可控直流，满足各种工况（包

括强励)运行的需求。此部分与常规水电机组励磁系统完全相同。

3.3.3 灭磁装置及转子过电压保护

灭磁装置一般由磁场断路器和灭磁电阻组成。保证抽水蓄能机组电动发电机内部及外部发生诸如短路及接地等事故时迅速跳开磁场断路器,切断电动发电机励磁回路,并将储蓄在励磁绕组中的磁场能量快速消耗在灭磁电阻中。转子过电压保护接在励磁绕组两端,限制励磁绕组过电压。这部分与常规水电机组完全相同。

3.3.4 励磁调节器

励磁调节器完成抽水蓄能机组各种运行工况下励磁电流的调节和控制。

对于这部分,其基本的励磁电流调节控制功能与常规的相同,不同的是机组工况转化,励磁调节器随之有相应的起停逻辑。

3.4 大型抽水蓄能机组调速设备的研究

抽水蓄能电站的调速设备主要由以下几个部分组成:

3.4.1 调速器电气控制柜

主要采集机组的转速、开度、水位等信息,接受监控系统命令,输出控制信号到液压执行机构,完成开、停机、发电、抽水等任务。

3.4.2 电气转速测量、信号及保护装置(有时也含在电气控制柜中)

测量机组转速,根据设定值输出相应动作接点,提供超速保护输出。

3.4.3 调速器液压控制执行机构

主要和电气控制柜配合,推动接力器,控制导叶开度以调节机组转速和功率。

3.4.4 集油槽、压力罐及漏油箱等油压装置

主要为调速器液控装置和接力器等液压系统提供操作油压和储能装置。

3.4.5 油压装置油泵、补气等控制设备

采集油压装置压力、液位等,控制油泵起停、补气阀操作等,保持油压恒定。

3.4.6 机械超速保护机构

利用离心飞摆的原理,输出机组超速自动停机信号,以保护机组。

3.5 大型抽水蓄能电站机组保护系统的研究

抽水蓄能电站的继电保护中线路保护、母线保护、主变压器保护的要求与常规电力系统的保护是完全一致的,而发电-电动机保护部分主要包括:

3.5.1 纵差保护:作为发电-电动机定子绕组和引出线回路相间短路故障的主保护。

3.5.2 定子匝间短路保护(横差保护):作为发电-电动机定子绕组内部匝间短路故障的主保护。

3.5.3 100%定子接地保护:作为检测包括发电-电动机中性点在内的整个定子绕组的接地故障。

3.5.4 低励与失磁保护:作为检测机组在各种运行工况下发生低励与失磁故障。

3.5.5 转子接地保护:作为检测发电-电动机励磁回路的接地故障。

3.5.6 过励磁保护:作为防止发电-电动机因铁芯饱和而过热的保护。

3.5.7 负序过流保护:作为发电-电动机因外部故障或不平衡负荷引起的负序电流过热现象保护以及发电-电动机与相邻设备不对称短路的后备保护。

3.5.8 失步保护:作为发电-电动机因轴负荷过大,电压过低或其它故障等引起机组失步的保护。

3.5.9 过电压保护:作为防止发电-电动机出现危及绝缘安全的过电压保护。

3.5.10 逆功率保护:作为检测从系统流向发电-电动机的有功功率,作为发电机工况下的有功消失保护。

- 3.5.11 复合电压闭锁过流保护：作为发电-电动机组和相邻设备相间短路的后备保护。
- 3.5.12 轴电流保护：作为发电-电动机组的转轴轴颈的滑动表面和轴瓦损坏的保护。
- 3.5.13 启动和停机保护：作为发电-电动机组在机组启动与停止过程中定子绕组接地故障和相间短路故障的保护等。

上述这些保护类型与常规机组保护的配置与要求也是基本一致的。只是抽水蓄能机组保护针对抽水蓄能机组的特殊运行工况需要另外配置个别特殊的保护类型，例如：抽水工况的低功率保护、水泵工况下的溅水功率保护、低频过电流保护、相序监视保护等。考虑到大型抽水蓄能机组不仅容量大、设备造价昂贵，而且起停机频繁、运行工况多。还必须着重研究以下几个方面的问题：

- 1) 提高保护动作的速动性、可靠性和灵敏性
- 2) 提高保护装置本身的可靠性尤其是提高电磁兼容性水平
- 3) 解决差动保护各侧 TA 的暂态特性差异对差动保护的影响
- 4) 解决水泵工况启动过程中频率对蓄能机组继电保护的影响
- 5) 解决换相操作对蓄能机组继电保护的影响

4 积极创造外部条件，尽快推动国产化的抽水蓄能电站控制系统的应用

为了我国抽水蓄能事业的健康发展，保证电站长期稳定运行，将重要关键技术掌握在自己手中，打破国外技术的垄断，降低抽水蓄能电站造价的目标，尽快实现抽水蓄能电站设备的国产化是非常必要的。针对抽水蓄能电站建设和发展的现状，在广泛吸收国外先进科学技术成果的基础上，完全可以在具有相对优势的关键技术领域取得突破，并形成具有自主知识产权的核心技术，逐步占据抽水蓄能电站关键技术的制高点。

根据对二次控制设备方面的技术分析，我国已经完全有能力实现抽水蓄能电站二次控制设备的国产化。有关方面已开始安排国产化的工作并建议：

4.1 应对国产化的抽水蓄能电站控制与保护设备充满信心，我国在常规机组的实践已经证明了这一点。

新建电站主机、控制保护设备应分开招标。为了提高我国机电装备工业的水平，促进我国抽水

4.2 蓄能电站建设的健康发展，国家发改委已经决定以河南宝泉和广东惠州抽水蓄能电站为依托工程，通过统一招标和技贸结合的方式，引进抽水蓄能电站机组设计和制造技术，逐步实现我国机组设备制造的自主化。鉴于国产抽水蓄能电站控制和保护设备现有的技术水平，最有可能首先应用于实际工程，打破国外技术的垄断，降低抽水蓄能电站造价。建议国内大型抽水蓄能电站设备将主机设备与部分控制保护设备分开招标，国内具有相关大型水电站或抽水蓄能电站的制造经验和运行业绩的单位均可以参加投标。

4.3 已建成电站的国产化改造。国内早期引进的抽水蓄能电站自动化监控系统都存在着系统老化，备件不足，功能不足等问题，急需改造升级，如天荒坪、十三陵及广蓄一期等抽水蓄能电站自动化监控系统等。我们已经有了潘家口抽水蓄能电站改造的经验，其他电厂改造时应给国内厂家创造机会积极参与。

抽水蓄能电站的建设，已列入国家电网公司发展的重要组成部分。国家电网公司科技发展规划（2003-2010）中，已将“抽水蓄能电站机组控制技术的研究”列为重要的内容，使抽水蓄能电站相关研究工作步入一个崭新的轨道。我们坚信，在国家电网公司的指导下，在各有关部门和领导的支持下，实现抽水蓄能电站关键技术的新跨越，抽水蓄能设备国产化一定能尽快实现。让我们共同努力，为促进我国蓄能电站的建设与发展做出积极的贡献。