

大型抽水蓄能电站自动控制技术

北京中水科水电科技开发有限公司（自动化）

刘晓波、张毅、赵勇飞

1 调研背景概述

随着我国电网规模的不断扩大，电网缺少调峰调频容量和调峰手段的矛盾日益突出。从目前技术手段看，解决这一矛盾的较经济的方案就是建设一系列大型抽水蓄能电站实现调峰填谷。在当前电网向坚强智能方向发展的环境下，各大电力公司正在加快大型抽水蓄能电站建设的步伐，可以预见大型抽水蓄能电站在提高电网电能质量、保障火电站和核电站运行效率、提升电网运行的经济与可靠性方面将发挥着越来越重要的作用。

从 1968 年，我国首次在河北省石家庄附近的岗南水库安装一台由日本引进的抽水蓄能机组，容量为 11 万 MW^[1]。1996 年开始陆续在西藏拉萨建成羊卓雍抽水蓄能电站，在浙江宁波建成溪口抽水蓄能电站，在安徽建成响洪甸混合式抽水蓄能电站，在北京密云建成混合式抽水蓄能电站。这些电站的容量虽小，但启停灵活，为地区电网服务发挥了可观的效益^{[1][80][89]}。

为配合大亚湾核电站和岭澳核电站而建设的广州蓄能一期工程（4×300MW）（1993 年建成）、二期工程（4×300MW）（1999 年建成），为两个核电站的安全运行起了重要作用，也在一定程度上缓解了广东电网缺电状况。

据不完全统计，至 2011 年底我国大陆地区已建成的抽水蓄能电站共 23 座，总容量 15767 MW，其中大型纯抽水蓄能电站 16 座总装机容量 15390MW，在建的 10 座，装机容量 10940MW，拟建 20 座，装机容量 27200 MW。

一般工业化国家抽水蓄能装机占比约在 5%-10%水平，其中日本 2006 年抽水蓄能装机占比已经超过 10%。目前，我国抽水蓄能装机占全国总装机约为 2.4%，根据统计及分析预测，全国在 2015 年、2020 年水平年抽水蓄能装机全国总装机约为 3.7% 和 4.4%^[90]，与工业化国家抽水蓄能装机占比有一些差距。我国可利用的抽水蓄能资源很多，尤其是东南沿海地区以及内地一些纯火电电网更有必要，也有条件加速发

展这一事业，优化这些地区的电源结构。我国抽水蓄能电站目前占比明显偏低，随着国内核电、大型火电机组的投建，新能源以及特高压、智能电网的迅速发展，国内抽水蓄能电站建设明显加速。目前在建规模达到约 14000MW，拟建和可行性研究阶段的抽水蓄能电站规划规模分别达到 15000MW 和 20000MW，如果以上项目顺利投产，2020 年我国抽水蓄能电站总装机容量将达到约 60000MW。

由于历史发展的原因，我国大中型抽水蓄能电站自动控制系统基本上都是随主设备一起引进国外公司的产品，制约了我国自主研发的大中型抽水蓄能电站自动化控制系统技术的进步与发展，在一定程度上形成了国外的技术垄断，不仅使电站的投资增加，其系统运行方式和功能也与我国电力系统安全运行要求存在一定差距，同时也不利于抽水蓄能电站运行维护水平的提高。近年来，国家加大了大中型抽水蓄能电站国产化的步伐，我国自主研发的大中型抽水蓄能电站计算机监控系统也从研制逐步发展到实际应用阶段。

综合上述分析，可以得出这样的结论：中国社会发展需要建设更多抽水蓄能电站。由于抽水蓄能电站的复杂性，不可避免将会出现许多水利水电问题，值得加大跟踪、研究力度。

本专题资料来源于国家科技图书文献中心、调研得到的资料以及网上查询等。以“蓄能电站”加上“自动控制”为检索词在国家科技图书文献中心检索，查到 998 篇文章。为完成本专题，与北京勘测设计研究院、广州蓄能发电厂、广州惠州蓄能发电厂、广东清远蓄能电厂等单位有关技术人员进行了技术交流活动，获得部分技术资料。

2 本专题进行调研的原因、必要性及意义

大中型抽水蓄能电站运行工况复杂，对设备各项性能指标要求高，为确保我国抽水蓄能电站控制系统关键技术与国际先进水平保持一致，促进我国自主研发的大中型抽水蓄能电站自动控制系统技术水平进步，有必要开展大型抽水蓄能电站自动控制技术发展动态跟踪调研，推动我国抽水蓄能电站监控系统国产化进程的健康发展。

抽水蓄能电站的机电设备具有如下特点：主机设备技术含量高、制造难度大，附属及配套设备较多，为满足电网需要，电站启停较频繁、运行工况转换多，对设

备可靠性要求高，对自动化控制系统、设备技术要求高，程序复杂。一般抽水蓄能电站水头比较高，一般在 400-600 米，在甩负荷情况下，转速升高和压力升高都对水工建筑物和机电设备要求很高。由于将势能转化为动能的水轮机与将机械能转化为势能的水泵为一体，同步发电机与同步电动机为一体，主要机电设备的设计、制造难度较高，作为抽水蓄能的控制设备-自动控制设备设计、制造难度也很大。但目前国内制造商对大型抽水蓄能机组及其配套设备的独立设计、配套及制造刚处于起步阶段，其设备制造、成套和整体综合调试经验相对不足。

根据参考资料^{[1][80]} 及参考资料^[89]，表 2-1、表 2-2、表 2-3 分别列出了中国国内大陆地区已建、在建和拟建的抽水蓄能电站的电站名称、电站的技术参数（装机台数及单机容量、水头与扬程范围、机组转速、水泵水轮机形式、发电电动机形式及启动方式），同时也列出了设备制造/采购情况和机组投运时间。从这表中，可以看出，100MW 及以上的大中型机组中有 19 个电站。这 19 个大中型抽水蓄能电站有 12 个机电设备都是完全由国外厂商供货。为了积极推进抽水蓄能机组的国产化进程，对其中 7 个电站在引进过程中，采用了技术贸易结合方式，我国的机电设备制造部门通过监造、验收、分包等途径吸收了不少技术经验。目前国外一些著名厂商也在我国组建了一批合资企业，他们在使用国际金融组织贷款国际竞争性投标中，不但有投标资格还有价格优势。为了节约电站投资和发展我国机电制造工业，逐步实现抽水蓄能机组国产化是十分必要的，我国机电制造部门应在提高技术水平、装备和材料方面积极努力，提高信誉，逐步推进国产化进程。

相对于抽水蓄能水电主机设备，电气二次设备的国产化水平更是落后。从表一看，抽水蓄能自动化设备的国产率非常低，属于刚刚起步阶段，

本课题研究的意义在于，通过大型抽水蓄能电站自动控制技术发展动态跟踪调研，可以更好地了解有关技术发展动态，了解掌握有关技术，为我国大型抽水蓄能电站的机电设备和自动控制系统与设备国产化水平不断提高，为中国大型抽水蓄能电站发展打下一定基础。

表 2-1 中国大陆地区已建抽水蓄能电站一览表

序号	电站名称	建设地点	装机台数 X 单机容量	水头/扬程范围	机组转速 (rpm)	水泵水轮机形式	发电电动机形式及启动方式	设备制造/采购情况	机组投运时间	备注
1	岗南	河北平山	215MW (常规); 1X 11MW (抽蓄)	64~28/ 59~31	214250/ 273	混流式 (常规) 斜流转桨可逆式	变极双速电机, 电磁推力轴承, 半压异步启动	FUJI 进口	1968.6 (抽蓄)	混合式抽水蓄能电站
2	密云	北京密云	4X18.7MW (常规) 2X13MW (抽蓄)	64~28/ 59~31	214250/ 273	混流式 (常规) 斜流转桨可逆式	变极双速电机, 半压异步启动	天发厂自制	1973.11, 1974.12	混合式抽水蓄能电站
3	潘家口	河北迁西	1X150MW (常规) 3X90MW (抽蓄)	86~36/ 86.2~37.1	100125/ 142.8	混流式 (常规) 混流可逆式	全压启动	G/M: 东方电机 P/T: 东方电机 计算机监控: ABB	1991.7~ 1992.12	混合式抽水蓄能电站 意大利政府信贷
4	寸塘口	四川蓬溪	1X1 (抽蓄)	33.6~21.0	500 (飘逸转速 825)	混流可逆式	变极双速电机, SFC 启动, 背靠背为辅, 扬程小于 45m 时, 由 60MW 变频装置驱动无级变速	G/M: ABB P/T: ABB 计算机监控:	1991.7~ 1992.12	

序号	电站名称	建设地点	装机台数 X 单机容量	水头/扬程范围	机组转速 (rpm)	水泵水轮机形式	发电电动机形式及启动方式	设备制造/采购情况	机组投运时间	备注
5	广州 I	广州从化	4X300MW	535.6~493.7/ 552.8~514.14	500	混流可逆式, 下拆	SFC 启动, 背靠背为辅	ALSTOM 制造 (全套), 转轮由 Neyrpic 和 E.W 联合研制	1993~1994	纯抽蓄, 法国政府信贷, 座环、顶盖、底环、导水机构、推力支架、控制环分包东方电机, 尾水管分包富春江
6	十三陵	北京昌平	4X200MW	473~430/ 490~440	500	混流可逆式, 上拆	SFC 启动 (18MW), 背靠背为辅	G/M: ELIN, P/T: Voith, CSCS: ELIN-BaileyGIS: ABB 220kV 电缆: 瑞士 Brugg, SFC: 法国	1995 (1#)	OECF 贷款, 纯抽蓄; 4 台机尾水管里衬、机坑里衬、试验盖东电, 除此以外, 1#、2#机进口, 3#、4#机: P/T 除转轮调速器、球阀毛坯外分包东方电机, 发电电动机除定子线棒外分包哈电机, 其中上机架分包东方电机
7	羊卓雍湖	西藏贡嘎	1X22.5MW (常规) 4X22.5MW (抽蓄)	816/850	750	三机一体式(六级离心泵、冲击式水轮机、G/M)	水轮机启动	P/T: Voith, G/M: ELIN	1996 (1#)	混合式抽水蓄能电站, 奥地利政府信贷
8	溪口	浙江奉化	2X40MW	271~240/ 276~246	600	混流可逆式	半压异步启动	G/M, CSCS: ABB, P/T: E.W	1998.3~1998.5	纯抽蓄电站, 与香港合资

序号	电站名称	建设地点	装机台数 X 单机容量	水头/扬程范围	机组转速 (rpm)	水泵水轮机形式	发电电动机形式及启动方式	设备制造/采购情况	机组投运时间	备注
9	天荒坪	浙江安吉	6X300MW	607.5~512/ 614~523.5	500	混流可逆式, 中拆	SFC 启动, 背靠背为辅	P/T; Kvaerner, G/M: GE Canada, CSCS: ELIN- Bailey, 500kV 电缆: Hitachi, 主变: Peebles, GIS: ABB	1998.9~2000.12	世行贷款, 纯抽蓄; G/M 部分: 3~6 定子机座, 6 台机上、下机架分包东方电机; 投运后, 两台主变换定常州东芝
10	广州 II	广州从化	4X300MW	541.6~509.6/ 552.8~514.52	500	混流可逆式, 中拆	SFC 启动, 背靠背为辅	G/M: SIEMENS, SFC: 隔离变 24MVA 干式, Siemens, 可控硅电压 18kV, 带输入/输出电抗器, 无空调; P/T: Voith, 球阀水压操作无旁通,	1999~2001	纯抽蓄, 亚行贷款水轮机埋件分包富春江
11	响洪甸	安徽金寨	4X10MW (常规) 2X40MW (抽蓄)	62~27/ 64~33	150/166.7	混流可逆式	变极双速电机, SFC 启动, 背靠背为辅	机组: 东电, 其中水力设计和成品转轮由 MCE 引进 SFC: 天传所 CSCS: 南瑞	2000. 6.24	混合式抽水蓄能电站
12	天堂	湖北罗田	2X35MW	52~43~38/ 53~47~42	157.9	混流可逆式	SFC 启动, 背靠背为辅	机组: Kvaerner 杭发总包, 水力设计、转轮分包 MCE, 电机分包 ELIN (概念设计、线棒), CSCS、SFC: ELIN	2001.2	混合式抽水蓄能电站

序号	电站名称	建设地点	装机台数 X 单机容量	水头/扬程范围	机组转速 (rpm)	水泵水轮机形式	发电电动机形式及启动方式	设备制造/采购情况	机组投运时间	备注
13	沙河	江苏溧阳	2X50MW	97.7/	300	混流可逆式	SFC 启动, 背靠背为辅	机组: ALSTOM, 天津 ALSTOM 分包水轮机机坑里衬、座环、蜗壳、尾水管等少量部件	2002.6.29	纯抽水蓄能电站, 香港合资
14	桐柏	浙江天台	4X300MW	285.7~29.62/ 288.71~237	300	混流可逆式	SFC 启动, 背靠背为辅	机组及监控: VA TECH 国内部分为: 座环、蜗壳、顶盖、底环、尾水管、控制环、机坑里衬、机坑起吊设备、定子机座埋件、上、下机架, 励磁变、CSCS 的 LCU 装置。 SFC: ALSTOM, GCB: ABB, 换向开关: ABB。 GIS、主变、500kV 电缆: ABB、SIEMENS、VISCAS	2006.10	纯抽蓄, 世行贷款
15	白山	吉林	2X150MW		200	混流可逆式	SFC 启动, 背靠背为辅	引进水力设计和一台转轮等, HEC 主承包, 2002.7 定标	2006.6.6	带发电功能的泵站, 全内资

序号	电站名称	建设地点	装机台数 X 单机容量	水头/扬程范围	机组转速 (rpm)	水泵水轮机形式	发电电动机形式及启动方式	设备制造/采购情况	机组投运时间	备注
16	回龙	河南南阳	2X60MW	410~379~ 362/420~378	750	混流可逆式	SFC 启动, 背靠背为辅	机组: 哈电, 转轮、推力 Hitachi, 励磁: ABB, SFC、CSCS: VA TECH	2005.12.8	2001.8.21 签定机组合同
17	泰安	山东泰安	4X250MW	220/261~224	300	混流可逆式	SFC 启动, 背靠背为辅	国际招标, 主机和计算机监控标, Voith Siemens Hydro, Voith Siemens Fuji, Voith Siemens Shanghai	2007.1.8	纯抽蓄, JBIC 贷款
18	琅琊山	安徽滁州	4X150MW	149.8~121/ 154.5~125.6	230.8	混流可逆式	SFC 启动, 背靠背为辅	VA TECH 总包: 国内分包: 座环、蜗壳、机坑里衬、尾水管、G/M 上下机架和上下盖板	2007.9.5	纯抽蓄, 奥地利政府信贷
19	宜兴	江苏宜兴	4X250MW	413~410.7~ 344~336.7/ 420.5~414.3~ 358.9~352.1		混流可逆式	SFC 启动, 背靠背为辅	主机设备: 国际招标, GE Hydro/ABB 联营体。GIS、主变、500kV 电缆: ABB、SIEMENS、JPS	2008.12	纯抽蓄, 世行贷款
20	西龙池	山西五台	4X300MW	687.8~609.5/ 704~635	500	混流可逆式	SFC 启动, 背靠背为辅	国际招标, 东芝、日立、三菱	2008. 12	纯抽蓄, JBIC 贷款
21	张河湾	河北井陉	4X250MW	342.56~ 283.56/349.92 ~294.85	333.33	混流可逆式	SFC 启动, 背靠背为辅	国际招标, ALSTOM Power, ALSTOM 天津	2008.12	纯抽蓄, 亚行贷款

序号	电站名称	建设地点	装机台数 X 单机容量	水头/扬程范围	机组转速 (rpm)	水泵水轮机形式	发电电动机形式及启动方式	设备制造/采购情况	机组投运时间	备注
22	惠州	广东惠州	8X300MW	553.7~506/ 561.4~510.7	500	混流可逆式	SFC 启动, 背靠背为辅	国际招标, ALSTOM 为责任方, 哈电、东电为技术受让方, 东电负责 8#机制造	2009.5	纯抽蓄, 全内资
23	黑麋峰	湖南长沙望城县	4x300MW	334.4~266.6/ 339.2~275.4	300	混流可逆式	SFC 启动, 背靠背	国内招(议)标, 东电为责任方, ALSTOM 为分包方和技术支持并负责 1# 机组制造	2010 年全部建成	纯抽蓄, 全内资

表 2-2 中国大陆地区在建抽水蓄能电站一览表

序号	电站名称	建设地点	装机台数 X 单机容量	水头/扬程 范围	机组 转速 (rpm)	水泵水轮机 形式	发电电动机 形式及启动 方式	设备制造/采购情况	机组投运 时间	备 注
1	宝泉	河南辉县	4X300 MW	562.48~485.79/ 572.46~501.87	500	混流可逆式	SFC 启动, 背靠背	国际招标, ALSTOM 为 责任方, 哈电、东电为技 术受让方, 哈电负责 4# 机制造	计划 2008	纯抽蓄, 全内资
2	佛磨	安徽六安	2X80 MW	54.2		混流可逆式	SFC 启动, 背靠背			纯抽蓄
3	白莲河	湖北黄冈	4X300 MW	213.7~178.3/ 220.7~191	300	混流可逆式	SFC 启动, 背靠背	国际招标, ALSTOM 为 责任方, 哈电、东电为技 术受让方, 哈电负责 4# 水泵水轮机制造, 东电负 责 4#发电电动机制造	计划 2008	纯抽蓄, 全内资
4	蒲石河	辽宁 丹东	4x300 MW	330~294/ 330~294	333.3	混流可逆式	SFC 启动, 背靠背	国内招(议)标, 哈电为 责任方, ALSTOM 为分 包方和技术支持,	首台机组 2011 年	纯抽蓄, 全内资
5	响水涧	安徽	4x250 MW	172.07~219.25/ 178.94~2222.09	250	混流可逆式	SFC 启动, 背靠背	国内招(议)标, 东电为 责任方	计划 2012 年	纯抽蓄, 全内资
6	呼和 浩特	内蒙呼 和浩特	4x300 MW	585~503/ 585~503	500	混流可逆式	SFC 启动, 背靠背	国内招(议)标, 东电为 责任方, ALSTOM 为分 包方和技术支持并负责 1# 机组制造	计划 2010 年	纯抽蓄, 全内资

序号	电站名称	建设地点	装机台数 X 单机容量	水头/扬程范围	机组转速 (rpm)	水泵水轮机形式	发电电动机形式及启动方式	设备制造/采购情况	机组投运时间	备注
7	仙游	福建仙游	4x300 MW	472.6~413.4/ 479.9~424.1m, 额定水头 430 米,	428.6r/ min	混流可逆式	SFC 启动, 背靠背	设计、制造、调试: 中国	首台机组 2009 年 5 月发电	纯抽蓄, 全内资
8	栗阳	江苏溧阳	6x250 MW	259		混流可逆式	SFC 启动, 背靠背	设计、制造、调试: 中国	首台机组 2009 年 5 月发电	纯抽蓄, 全内资
9	清远	广东清远	4 x320 MW	504.5~449.3	428.6	混流可逆式	SFC 启动, 背靠背	设计、制造、调试: 中国监控系统: 水科院中水科技 调速器: alstom,保护: Siemens,励磁: ABB		
10	响水涧	安徽	4x250 MW	172.1~219.3/ 178.9~2222.1	250	混流可逆式	SFC 启动, 背靠背	国内招(议)标, 东电 为责任方	计划 2012 年	纯抽蓄, 全内资

表 2-3：中国大陆地区部分拟建抽水蓄能电站一览表

序号	电站名称	建设地点	装机台数 X 单机容量	水头/扬程范围	机组转速 (rpm)	水泵水轮机形式	发电电动机形式及启动方式	设备制造/采购情况	机组投运时间
1	仙居	浙江	4X375MW			混流可逆式	SFC 启动, 背靠背		
2	洪屏	江西	4X300MW			混流可逆式	SFC 启动, 背靠背		
3	文登	山东	6X300MW			混流可逆式	SFC 启动, 背靠背		
4	天池	河南	4X300MW			混流可逆式	SFC 启动, 背靠背		
5	东江	湖南	500 MW			混流可逆式	SFC 启动, 背靠背		
6	丰宁	河北	6X300MW			混流可逆式	SFC 启动, 背靠背		
7	桓仁	辽宁	4X200MW			混流可逆式	SFC 启动, 背靠背		
8	蟠龙	重庆	4X300MW			混流可逆式	SFC 启动, 背靠背		
9	天荒坪二期	浙江安吉	6X350MW			混流可逆式	SFC 启动, 背靠背		
10	清原	辽宁	4X375MW			混流可逆式	SFC 启动, 背靠背		
11	马山	江苏	2X350MW			混流可逆式	SFC 启动, 背靠背		
12	深圳	广东	4X300MW			混流可逆式	SFC 启动, 背靠背		
13	徂徕山	山东	6X300MW			混流可逆式	SFC 启动, 背靠背		
14	乌龙山	浙江	8X300MW			混流可逆式	SFC 启动, 背靠背		
15	伍员山	江苏	1500 MW			混流可逆式	SFC 启动, 背靠背		
16	宝泉二期	河南	4X300MW			混流可逆式	SFC 启动, 背靠背		
17	竹海	江苏	6X300MW			混流可逆式	SFC 启动, 背靠背		
18	海南	海南	2X300MW			混流可逆式	SFC 启动, 背靠背		
19	梅州	广东	4X300MW			混流可逆式	SFC 启动, 背靠背		
20	牡丹江	黑龙江	4X300MW			混流可逆式	SFC 启动, 背靠背		

3 近年发展新动向和值得关注点

国内已投产或在建的大型抽水蓄能电站如广蓄、十三陵、天荒坪、桐柏、琅琊山、泰安、宜兴、张河湾、宝泉、西龙池、惠州、白莲河等，其主机及其自动化控制设备等配套设备基本采用国际招标采购方式，除去第一批抽水蓄能打捆招标各电站（宝泉、惠州、白莲河）的最后一台机组的主机设备（惠州蓄能电站哈电、东电各供一台机组）以外，基本由国外厂商供货。但也出现这样的趋势，国内分包制造或配套部分逐渐增加。机组国产化后续抽水蓄能招标各电站（蒲石河、呼和浩特、黑麋峰抽蓄）由国内为主包责任方，国外厂商分包和技术支持。

为了使我国自己的制造企业掌握抽水蓄能机组的设计、制造技术，从而逐步具备自主研发的能力，国家发改委于 2003 年在审批宝泉、惠州抽蓄项目时，决定将两个电站的主机设备进行打捆统一招标，在正常的设备采购范围及技术服务范围之外，增加技术转让的招标内容，要求中标的承包商向我国哈电、东电两个大型机组设备制造企业转让抽水蓄能机组的设计、制造技术。后来，为了增加外商的投标积极性，增加白莲河抽蓄电站的 4 台机组，三个项目共 16 台 300MW 机组捆绑在一起进行统一招标。

为了支持国内两大主机厂家哈电、东电全面掌握、吸收和应用已经引进抽水蓄能的技术，巩固技术引进成果，实现抽水蓄能电站机组主要设备国产化目标，在《国家发展和改革委员会办公厅关于印发抽水蓄能电站机组设备国产化后续工作会议纪要的通知》（发改办能源[2005]886 号）文中明确了后续六个抽蓄电站项目（蒲石河、桓仁、深圳、呼和浩特、仙游、黑麋峰抽蓄）作为抽水蓄能电站机组设备国产化后续工作的扶持和依托项目。其中，蒲石河、黑麋峰、呼和浩特三个项目的主机标于 2005～2006 年分别进行了招标，限于哈电、东电两厂为责任方的邀请招（议）标方式，两厂分别和不同的技术合作方组合进行多个投标。三个项目的分包和技术合作方确定为 ALSTOM Power。主机设备的总体设计、技术设计和性能由技术合作方负责；结构设计根据设备部件的不同分别由技术合作方或国内厂家负责，但技术合作方要总体负责审核。

在《抽水蓄能电站机组国产化后续项目招议标工作专家组第一次全体会议纪要》中提到：对调速器、励磁系统、SFC 和计算机监控系统、进水阀等附属、配套设备

的采购，建设单位可通过招议标择优选定，将所选的附属、配套设备投标人作为抽水蓄能机组主机投标人的指定分包商；国内有相当资质和业绩的附属、配套设备生产厂家与国外厂商联合设计、合作生产，也可参加该设备的投标。

目前大中型抽水蓄能电站主机设备国内两大厂商已经初步掌握设计、制造技术，所生产的设备已经在惠州、白莲河、黑麋峰等抽水蓄能电站运行。

抽水蓄能电站自动控制系统主要包括：计算机监控系统、调速器及油压系统、励磁系统、保护系统、辅机控制系统等。

较之主机系统，抽水蓄能电站自动控制系统的国产化步伐相对落后，从上世纪九十年代开始，国内自动化厂商为一些中小抽水蓄能电站提供自动化控制系统^{[81][4]}，进行了国产化尝试。最近十年，国内有实力的研制单位开始在大中型抽水蓄能电站提供自动化系统和设备，比如为吉林白山 2*150MW 抽水蓄能电站提供计算机监控系统^{[30][82][83]}、为广东清远蓄能 4*320 抽水蓄能电站提供计算机监控系统^[18]、为安徽芜湖响水涧 4*250 MW 蓄能站提供计算机监控系统^[84]，国内厂商也在开始为抽水蓄能电站提供励磁系统、保护系统等自动化系统。

3.1 国内外技术发展动态

在抽水蓄能电站自动控制系统中，与机组控制最直接相关是调速器及油压系统和励磁系统，继电保护系统，计算机监控系统。

3.2 抽水蓄能（可逆式）调速器

抽水蓄能调速器与常规水电机组调速器主要差别是增加了水泵工况和水泵调相工况。在机组开机前，机组 LCU 将水轮机（发电开机方向）开机或水泵方向开机信息通知调速器。对于发电开机或发电调相工况，都是常规水电机组具备的工况，对于水泵工况，调速器将反方向将导叶开度开到最大。机组 LCU 一般会发出以下命令通知调速器进行方式切换：

- ✓ 调速器发电开机
- ✓ 调速器水泵开机
- ✓ 调速器关机
- ✓ 功率反馈方式选择

- ✓ 负荷给定选择模拟量
- ✓ 负荷给定选择现场总线（通信）方式
- ✓ 选择导叶（脉冲）方式
- ✓ 一次调频
- ✓ 背靠背启动
- ✓ 调相运行
- ✓ 进入/退出孤网模式
- ✓ 小开度控制投入/退出

从目前国内投产的抽水蓄能电站来说，调速器系统供货均为国外厂商。据了解，正在建设中的呼和浩特蓄能电站的调速器将由国内厂家供货。

3.2.1 抽水蓄能励磁装置

对于抽水蓄能电站，其励磁系统需要满足十几个工况的需求。相对于水轮机工况，水泵工况下，励磁的工况比较复杂。复杂来源于启动过程，启动方式分背靠背（BTB）和变频装置启励（SFC）两种。在背靠背（BTB）工况下，两台机组励磁装置需要相互协调一致控制机组和同期装置。在变频装置启励（SFC）方式下，励磁装置需要控制协调变频装置启励（SFC）、机组、同期装置。抽水蓄能的水轮机工况与常规水电厂相似，但不同之处在于机组在发电方向时，经常要进行调相，也就是常说的发电调相工况，为系统提供无功功率。为了给系统提供无功功率，在水泵工况时也需要进行调相，也就常说的水泵调相。在使用电制动进行机组停机过程中，转速下降到额定转速 50%左右时，投入电制动，机组可以快速平稳地停下来，为下一次启动做好准备。对于抽水蓄能机组，普遍使用电制动方式对机组进行制动，常规机组也有使用这种方式，但比较少。因为抽水蓄能机组的启停次数较常规机组要大得多。另外，抽水蓄能机组普遍需要设置黑启动工况和线路充电工况，以在电站或系统失电时快速提供电源，这就需要励磁装置具有自动零起升压功能。对于常规水力机组励磁装置而言，一般都不具有这一功能。

从应用角度来说，国内励磁厂家已经在安徽响水涧（4×250MW）抽水蓄能电站投入励磁装置，福建仙游（4×300MW）抽水蓄能电站励磁装置正在调试中。

3.2.2 抽水蓄能机组保护装置

根据参考文献^[85]，由于抽水蓄能机组的转换工况多，一般有十几种工况，加上工况转换过程，保护装置需要考虑的保护投入与退出的情况就比较多。对于广东清远蓄能电站（4×320MW），保护系统需要考虑 14 种工况：发电工况下电气制动、水泵工况下电气制动、发电启动、水泵启动、发电运行转发电调相、发电运行、发电调相、水泵运行、水泵调相、发电工况下电气制动、水泵工况下电气制动、发电启动、水泵启动、发电运行转发电调相。与常规水电站机组具有较大差异。

对于抽水蓄能机组，要求在各种工况下，发变组保护都要起到保护作用，不允许出现死角。因此保护装置要时刻了解机组所处的工况。目前常见处理方式是，监控系统通过开关量输出的形式通知保护装置，广东清远蓄能是通过国际通用现场总线 PROFIBUS-DP 方式发给机组保护。也有采用机组保护装置自行采集 I/O 信号，执行决定投退保护，在辽宁蒲石河即使采用这种方式实施机组保护的。

根据参考文献^[85]，发变组保护在主变差动、逆功率保护、低频过电流保护、定子接地保护、转子接地保护、励磁变低电压侧接地保护、发电机开关失灵保护都与常规水电机组有较大差异，需要认真研究有关工况，做好配置工作。

在最近投入运行的抽水蓄能电站中，国内主流保护厂家已经在国内安徽响水涧（4×250MW）抽水蓄能电站等几个电站得到应用。

3.2.3 抽水蓄能电站计算机监控系统

在抽水蓄能电站自动化系统中，调速器、励磁系统直接控制驱动蓄能机组，继电保护系统起保护作用。由于抽水蓄能机组通常有如下五种可能的工况：发电、发电转向的调相、抽水、抽水转向的调相、静止，且各种工况之间可能发生的转换有十余种，各种转换过程所经历的操作步骤均不相同，调速器、励磁系统、继电保护系统的正常工作都需要电站计算机监控系统提供必要的信息。抽水蓄能电站工况的和生产过程比常规水电站要复杂很多，同时抽水蓄能电站在电网中主要担负调峰填谷和事故备用的功能，与上级调度的关系比常规电站更为密切，因此，电力系统对抽水蓄能电站控制系统的自动化和高级应用功能要求更高，而抽水蓄能电站控制系统的高度自动化和高级应用要求都需要依靠计算机监控系统来实现，抽水蓄能电站计算机监控系统显得尤其重要。因此，抽水蓄能电站计算机监控系统技术发展动态

是本次调研跟踪的重点内容。

(1) 系统结构

整个监控系统采用分层分布式系统结构，系统层次一般分为调度层、电站厂站层和现地层 LCU，其中电站厂站层和现地层 LCU 通过监控控制网络联接在一起，调度层通过调度数据专用网与电站厂站层连接。从设备的控制层次上可分为调度层控制、电站厂站层控制、现地层 LCU 控制、监控对象设备的就地控制，其中对象设备的就地控制优先权最高，LCU 层控制权其次，其后为厂站层，调度层的控制优先权最低。

厂站层采用分布式计算机系统结构实现监控功能，一般配置两台及以上操作员站，配置一到几套数据服务器，配置一到几套调度通信服务器，配置厂内通信服务器，工程师站，语音报警服务器等。

现地层设备按机电主设备单元及其分布进行设置，每一套机组设置 1 套机组 LCU，设置 1 套机组公用 LCU，1 套厂内公用 LCU，1 套开关站 LCU，1 套上库 LCU，1 套下库 LCU 和 1 套中控室 LCU，LCU 以 PLC 为核心。

电站由电网总调及其备调、省中调及其备调进行调度。监控系统负责实现与调度层接口，传送电站实时信息和接收调度指令。

抽水蓄能电站需满足电网频繁操作并快速做出反应，抽水蓄能电站对计算机监控系统有更高的实时性与安全可靠性的要求，为此系统必须采用先进可靠的系统结构和网络结构，并通过可靠的软硬件设备配置和冗余措施来全面提高计算机监控系统的安全可靠性，实现抽水蓄能电站安全稳定运行。

(2) 网络结构

为适应抽水蓄能电站设备地理位置分布较广的特点，如厂房与开关站 LCU、1 套上库 LCU、1 套下库 LCU 等，抽水蓄能电站计算机监控系统网络结构目前较多采用单环网和双环网，也有一些抽蓄电站采用双星形结构。

广东蓄能二期工程（B 厂）计算机监控系统结构如下图 3-1 所示。

这种结构是比较典型的星型网络结构，是一种扩大的星型结构。这种结构将两个星型网络（中控楼星型网络和地下厂房现地控制单元星型网络）联接成一个网络，成为一个扩大的星型网络。

这种网络的优点是简单，网络交换机数据交换效率高，LCU 间、设备间彼此独

立。LCU 的投运、维护不影响其它设备的运行。不足的地方是网络的冗余度不高，如果两个星型的联接中断，整个系统将不能正常运行。

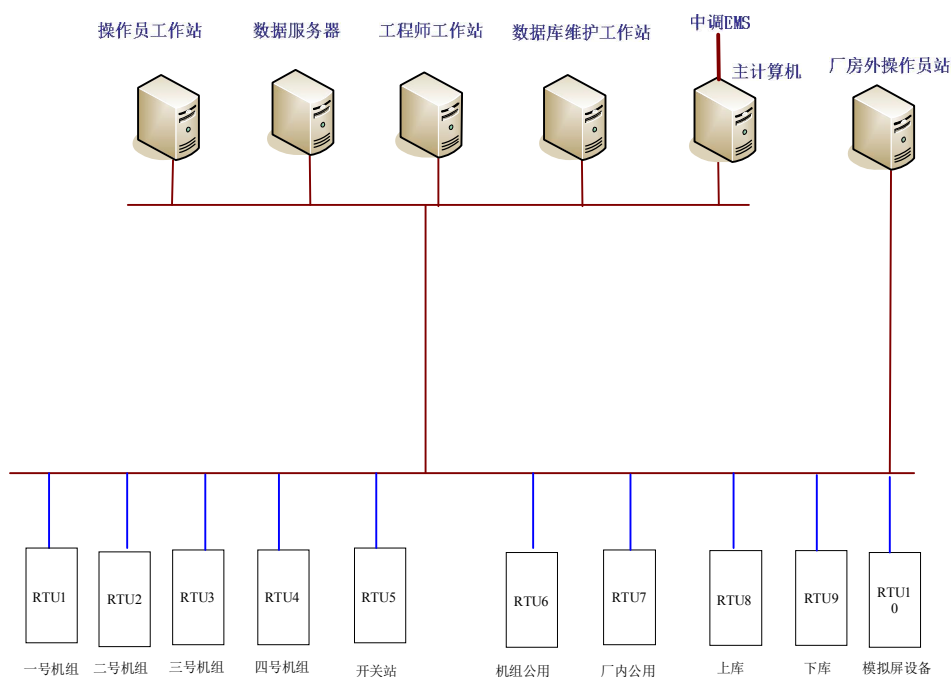


图 3-1 广州蓄能电厂（B 厂）计算机监控网络示意图

白山抽水蓄能电站网络结构，白山发电厂厂站层网络采用双行星网络，抽水蓄能现地 LCU 采用单环网的结构，两个网络采用冗余通道联接，是一种比较合理的结构如图 3-2 所示。

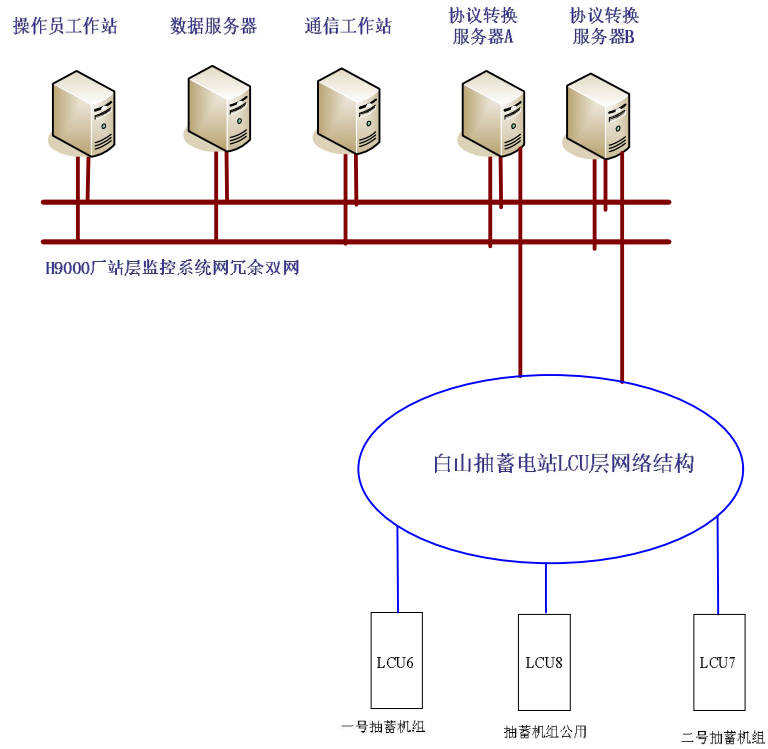


图 3-2 白山发电厂与白山蓄能电站网络示意图

广东清远抽水蓄能电站结构，是一种完整双环网，下库 LCU8 和上库 LCU9 分别通过厂内公用 LCU6 和开关站 LCU7 的交换机接入主环，是目前抽水蓄能电站主要的网络结构方式：

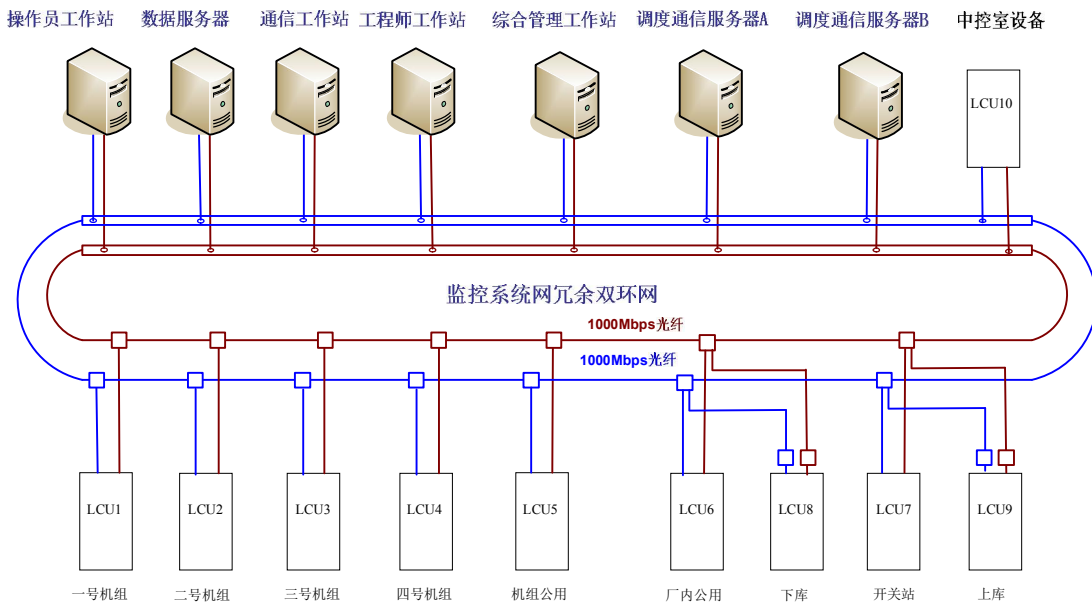


图 3-3 广东清远蓄能电站网络示意图

广东惠州抽水蓄能电站结构，是一种双相切的网络结构：

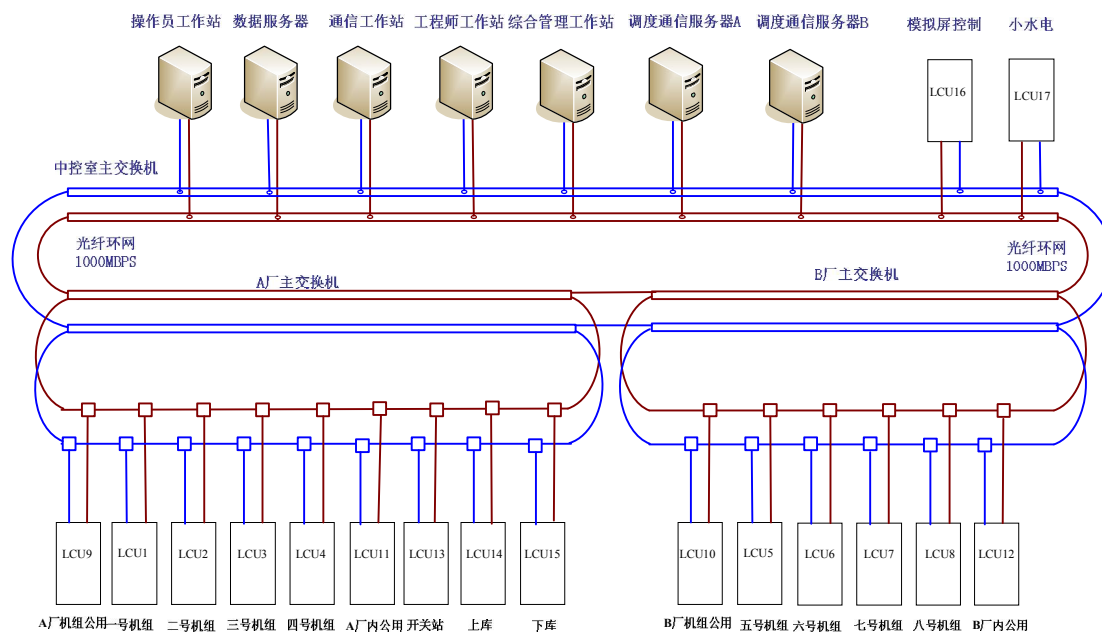


图 3-4 广东惠州蓄能电站网络示意图

(3) 功能

蓄能电站计算机监控系统各项功能分布在相关节点上，每个节点严格执行指定的任务，通过系统网络与其它节点进行通讯。监控系统采集、管理各类实时数据，接收电站计算机监控系统以外的其它厂内外系统的数据信息，对采集的每种数据进行相应的处理，以支持系统完成控制和记录功能。现地控制层按对象分散设置现地控制单元，各单元采集控制功能分布在本 LCU 中，有利于加强各层和设备的处理能力，提高各层和整个系统的可靠性，响应速度快，合理分解与协调整个系统的功能。

1) 调度层功能

电站的调度层为网总调及其备调、省中调及其备调，系统实时远动信息上送调度层 EMS 系统。远动信息按“二遥”信息采集，监控系统接受调度层发出的机组开停、500kV 断路器分合、AGC/PJC、AVC 等命令，自动执行相应流程。同时调度层的控制权受限于电站厂站层设置。

2) 厂站层功能

监控系统厂站层完成对本电站所有被控对象的安全监控，具有数据采集与处理、实时控制和调节、参数设定、监视、记录、报表、运行参数计算、通信控制、系统诊断、软件开发和画面生成、系统扩充、运行管理和操作指导等功能。

电站厂站层实时采集来自 LCU 层的所有主要运行设备的模拟量、开关量、脉冲量等信息以及来自调度层的控制命令和交换数据。

3) 现地层功能

现地层各 LCU 采集相关模拟量、开关量和脉冲量，按照数据就地处理的原则完成数据处理任务，根据需要上送电站厂站层。完成显示与安全监视，外部通讯功能，自诊断功能，并接受厂站层的控制、调节命令，对监控对象进行控制、调节。在脱离电站厂站层的情况下，各 LCU 独立完成对所控设备的闭环或开环控制，保证安全运行和操作。

a) 机组 LCU

完成机组和主变各种模拟量、开关量的采集工作；通过现地监视与厂站层控制系统完成其功能；与机组公用 LCU 协调配合，可以自动或在机旁以分步操作方式，完成机组的工况转换，并完成有功功率、无功功率的调整功能；机组 LCU 具有与中控室层计算机的通信功能、与机组公用 LCU 的通信、与调速器及励磁等其他装置的通信功能；对 CPU 模件故障、I/O 控制模件故障、接口控制模件故障、通信控制模件故障和电源故障自诊断。

b) 500KV 开关站 LCU

定时采集 500KV 开关站的断路器，隔离开关及地刀闸的位置状态，500KV 开关站及环网的电气量及非电气量，继电保护装置的报警信号以及开关站直流系统，通讯系统的信号。并向中控室层传送，同时累积各线路有功无功电量并向中控室传送。对 500KV 断路器进行分、合闸控制，对开关站断路器实现同期操作。实现开关站范围内隔离开关的分、合闸控制，另有通信及自诊断功能。

c) 机组公用 LCU

定时采集并处理 SFC 系统和机组公用起动回路的电气量、温度量、状态量及报警信号。控制 SFC 系统的投、切，与机组 LCU 配合、执行水泵的变频起动或背靠背启动，其中包括选择和控制起动回路的隔离开关和断路器并完成相关的顺序操作，同时还具有与机组 LCU，SFC 的通信功能及自诊断功能。

d) 全厂公用 LCU

定时采集 6KV、10KV、400V 厂用电系统以及全厂油、水、气等公用辅助设备的电气量，状态量、报警量、累加有无功电度值。完成厂用（6KV、10KV 等）开关

分合及厂变的投退，厂用电系统的自动倒换。另外，部分工况闭锁由全厂公用 LCU 实现。

e) 上、下库 LCU

定时采集上、下库水位，定时采集上、下调压井水位及水库水温以及交、直流系统有关参数，发现异常及时上报，定时采集上、下库进出水口闸门位置并控制闸门关闭（远方或现地）。上、下库 LCU 一般有 Lock-out/Local control/Remote 三种控制方式。

f) 模拟屏（中控室设备）LCU

定时采集厂房通信系统，消防系统，500KV 洞内部分，厂房直流系统的电气量及非电气量和各设备的状态量、报警量，驱动模拟屏开关状态及各模拟量显示，在模拟屏 LCU 屏柜上布置机组的 ESD 按钮，可从中控室直接紧急停机。

(4) 机组工况转换

抽水蓄能电站机组工况稳态、转换工况多，稳态一般有：停机（S）、发电（G）、发电调相（GC）、抽水（P）、抽水调相（PC）、旋转热备用（SR）；暂态一般有：拖动（L）、线路充电（LC）、黑启动（BS）。控制流程多达 20 多个，而常规水电站的主要控制流程只有 2-3 种，运行方式多样，工况转换复杂，下图给出一典型转换流程如图 3-5 所示。

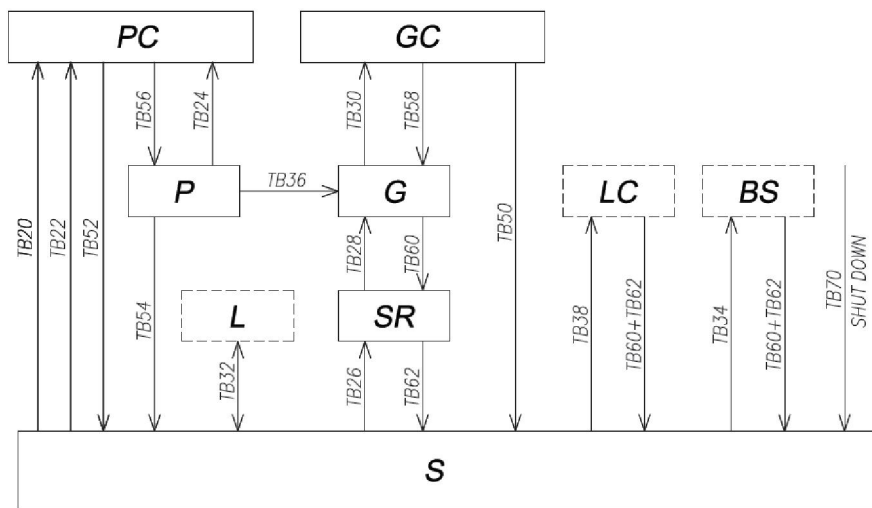


图 3-5 抽水蓄能电站计算机监控系统机组工况转换流程图

(5) 高级应用

对于常规水电厂，最主要的高级应用软件是自动发电控制（AGC）和自动电压

控制。但是抽水蓄能电站由于具有抽水工况，需要具有水泵联合调度控制高级应用软件（PJC）。

3.3 本专题发展的新方向和值得关注点

随着电网规模越来越大以及多种新能源越来越多的接入，对抽水蓄能装机容量的需求越来越大，中国需要建设更多的大型抽水蓄能电站。为了更好地促进大型抽水蓄能电站建设与运行，需要加速抽水蓄能电站自动控制系统与设备国产化进程。抽水蓄能电站计算机监控系统、励磁系统、继电保护系统、调试器及油压系统国内已开始研制制造并在一些大型抽水蓄能电站运行。本专题发展的新方向和值得关注点有：

对于调速器及油压装置，一般情况大型抽水蓄能机组水头都很高，在满足调保计算要求上既要保证机组甩负荷时压力升高在电站水工系统安全裕度内，又要保证机组转速升高在机电设备允许的范围内，难度比较大。同时，还要考虑一次调频与计算机监控系统配合协调问题。一般情况下，负荷调整多采用功率调节方式，较多采用 AO 方式进行功率值给定。

对于励磁系统，需要充分考虑机组发电机工况和水泵工况对励磁的要求，考虑电制动方式对励磁功能要求。由于大型抽水蓄能电站在电力系统中的作用的特殊性，一般都需要具有黑启动功能和线路充电功能。这两个功能都需要，励磁系统具有零起升压功能，而且是非手动方式。常规机组励磁较少具有此功能。

对于保护系统，因为大型抽水蓄能电站机组工况多，转换多，因此保护投退比较多，要全范围保护机组，需要考虑各种情况下保护投退与定值的设定。对于机组工况的判断，将由监控系统输出开关量的方式倾向于保护系统自己判断转变，这样可以减少对机组 LCU 的依赖。

对于计算机监控系统，主要有两点。一是熟悉了解抽水蓄能机组生产流程的规律，才能编制出安全可靠的程序，应注意采用软件工程的理论，做好范围规划、功能规划、构架规划，并经过充分测试，尤其要充分考虑各种异常情况。而是要充分研究 PJC 与 AGC 功能与方式，尤其是注意安全闭锁条件的设置。

在大型抽水蓄能电站自动控制系统中，系统内部各 LCU 设备间数据交换的数量远大于常规水电站，而且可靠性要求更高，因此需要采用通信带宽高而且可靠的通

信方式进行通信。目前各主流厂商传统的系统内部数据通信技术采用的是现场总线方式，数据带宽在 38.4kbps-5Mbps 之间。在这样的数据通信带宽情况下，为了保持 CPU 机箱与远程或扩展机箱实时通信，通常对远程或扩展机箱的配置是有限制的，比如一个机箱配置的输入/输出不能超过 64 字/64 字。目前各主流厂商纷纷推出 PLC 内部连接为工业以太网的产品，带宽可以达到 100Mbps，数据通信的速率和可靠性都得到了提高。因此在构建各系统结构时，要充分进行安全性、可靠性、合理性需求分析，保证各个系统安全可靠地运行。

3.4 评价与分析

目前中国抽水蓄能电站将处于大发展阶段。中国已建成的抽水蓄能电站，从水利机械到机电设备及自动化设备主要是国外技术领先的厂商提供。因此中国抽水蓄能电站水利机械、机电、自动化控制系统设备反映了当代世界的先进水平。

通过消化吸收借鉴这些先进技术，中国已基本掌握了大型抽水蓄能机组主机制造技术，但是自动化技术还需要加紧研究与跟踪。

目前大型抽水蓄能电站自动控制技术主要采用计算机技术，有以下几个特点：

1) 采用合理的自动化系统网络结构，有利于自动化系统得长期稳定性、可靠性与灵活性。

由于我国抽水蓄能电站自动化系统与设备随主机进口，我国国内大多数正在运行的抽水蓄能电站自动化系统网络结构反映了国外主流技术水平，网络结构采用较多的是环形网络结构，具体分为单环网或双环网。

对于单环网，允许有一处一次网络断开，在自愈时间内（几十毫秒到几百毫秒之间）网络可以继续双向数据通信；对于单环网的结构，一个网络节点上，除了流通本节点的数据，也流通其它节点的数据，是有一定数据拥塞的概率的。对于环网，在施工期间，每接入一次网络设备，就要影响一次网络正常运行。由于环网的特点，任何 LCU 或其它设备检修维修，其所属的网络交换机都不建议停电。因为一旦停电，相当于环网中出现一个断开点，如再出现其它任何一点的网络故障，维修的 LCU 到故障点的设备将失去与系统的通信。

对于双环网，当一个网络出现任何故障时，系统将正常运行。当其中一个网络出现一处一次故障，另一个网络再一次出现一次一处网络故障时，在自愈时间内（几

十毫秒到几百毫秒之间)网络可以继续双向数据通信;如果再发生网络故障,网络将不完整,部分数据通信将不正常。数据的有效性将于单环网相同。施工期的接入问题,LCU网络交换机都不建议停电。

对于单星网,不允许网络断开,本节点只流通本节点数据,不存在数据拥塞问题。星型网施工方便,接入新设备时,不影响其它已运行设备,任何LCU或其它设备检修维修,其所属的网络交换机都可以停电。

对于双星网,每一个节点只流通本节点数据,不存在数据拥塞问题。星型网施工方便,接入新设备时,不影响其它已运行设备,任何LCU或其它设备检修维修,其所属的网络交换机都可以停电。如果一个网断开,网络可以正常运行,如果该设备第二个网络再断开,本节点将失去与系统的通信。

从目前应用情况看,可以采用星型和环网相结合的方式,采用如图3-6的结构,也可以采用图3-4相切的结构。

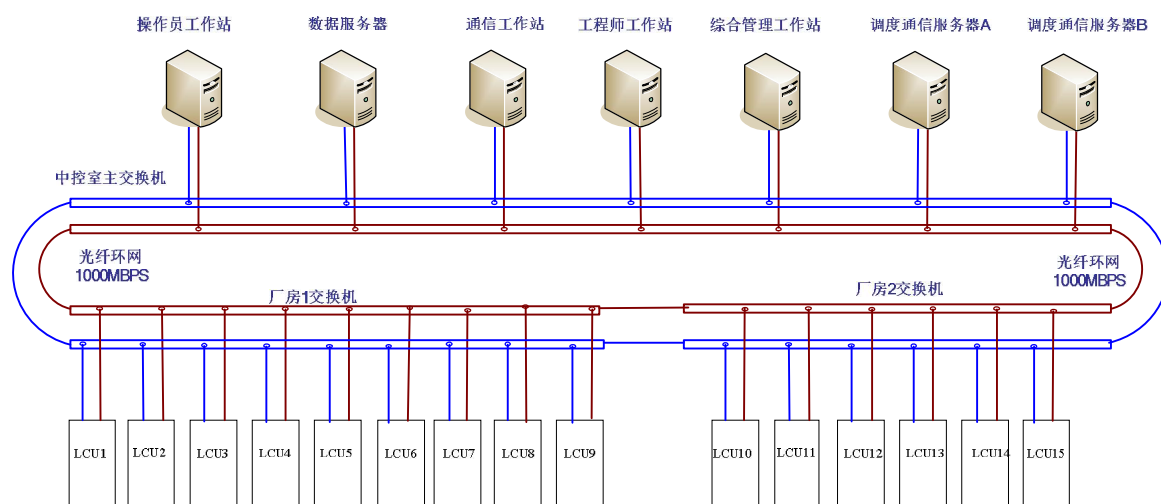


图 3-6 推荐蓄能电站网络结构图一

2) 可靠性要求高,要求采用冗余技术;

由于大型抽水蓄能机组在系统中具有消峰填谷的作用,因此在电源、处理器、机箱联接、网络、重要信号等需要采取冗余措施,以提高可靠性。

3) 各系统间及系统内部数据交换量大,现场总线技术和工业以太网技术应用的越来越多;

监控系统与励磁系统、调速器系统、继电保护系统间都要大量数据交换,需要采取实时性、可靠性都较好的方案。目前主流技术是现场总线技术和工业以太网技

术。现场总线技术在水电在抽水蓄能主要有 Profibus-DP、ControlNet、GeniusNet、CanOpen、ModbusPlus 等，工业以太网技术主要有 ProfiNetRT、EtherNet/IP、PowerLink、ModbusTCP、EtherCAT、Mechatrolink 等。

4) 系统内设备彼此依赖数据，需要研究新型 LCU 结构。

对于抽水蓄能监控系统，机组 LCU 正常运行需要机组公用 LCU、厂内公用 LCU、开关站 LCU 都处于健康状态，才能正常运行。因为机组 LCU 正常运行需要这些 LCU 的信息，需要这些 LCU 运行必要的设备才能够正常运行。这些 LCU 处于健康状态，是机组启动必要条件之一。

3.5 对我院（我国水利水电行业）本专题发展的建议，未来发展思路和新兴思路和新兴增长点

(1) 在水电厂计算机监控系统总体规约中，充分考虑抽水蓄能电站的需求，并预留发展空间。

正如前述，抽水电站的生产过程比常规水电厂的生产规程复杂得多。因此，需要在水电厂计算机监控系统总体规约中充分考虑考虑抽水蓄能电站的流程复杂性，充分考虑机组操作类型、设备操作类型、设备间操作类型、设备间数据交流的需求，为工程化承担抽水蓄能自动化项目做好准备。

(2) 分处理好计算机监控系统水泵联合抽水控制程序（PJC）与自动发电控制程序（AGC）之间的关系，尽可能将 PJC 于 AGC 融合成一个整体，并要充分考虑各种工况的闭锁问题。

(3) 水蓄能各个现地控制单元自动控制流程的复杂性，在程序开发过程中需高度重视异常情况下的处理，因此要高度重视可靠性问题。

(4) 水电厂建设正在国内水电厂试点，将越来越多地遵循 IEC61850 和 IEC61970 标准，IEC61850 和 IEC61970 分别由一系列标准组成，智能化水电厂代表了未来的发展方向，因此技术跟踪、系统研制时，要根据智能化水电厂的需求，实现对 IEC61850-8-1、IEC61850-9-2 通信接口规范的支持，实现对 IEC61970 标准公共信息模型（CIM）和组件接口规范（CIS）的支持，实现不同厂家开发的系统和应用软件的有效集成与共享，为后续发展提供空间。

(5) 家有关部门, 按照支持抽水蓄能主机设备那样的模式, 继续支持抽水蓄能自动控制系统国产化, 更好地促进我国抽水蓄能电站的健康发展。

参考文献

- 1 罗绍基, 中国抽水蓄能电站建设, 第一届水利水电国际学术交流会论文集
- 2 张子香, 世界抽水蓄能电站发展概况, 四川水力发电, 1992 年 03 期
- 3 汪军, 响洪甸抽水蓄能电站计算机监控系统, 水利水电技术, 2000 年第 2 期
- 4 刘徽, 沙河抽水蓄能电站的计算机监控系统, 华东电力, 2001 年第 2 期
- 5 姜海军, 大中型抽水蓄能电站监控系统的国产化研究, 水电厂自动化, 2005 年第 1 期
- 6 杨文道, 桐柏抽水蓄能电站 SFC 启动机组的自动控制, 水电厂自动化, 2006 年第 4 期
- 7 周嘉元, 抽水蓄能机组起动中的若干问题, 水力发电, 2007 年第 10 期
- 8 K.Aguro, 日本可调速抽水蓄能系统丰富的运行经验和新技术, 国外大电机, 2009 年第 2 期
- 9 曾德华, 黑麋峰抽水蓄能电站变频启动装置的自动控制, 水力发电, 2010 年第 7 期
- 10 叶生, 计算机监控与保护装置在广州蓄能水电厂的应用, 继电器, 1998 年第 4 期
- 11 杨志申, 可逆式抽水蓄能机组控制保护系统的特点, 水利水电工程, 1994 年第 1 期
- 12 池建军, 蓄能机水泵工况压水起动中抬机原因分析, 水电站机电技术, 1996 年第 3 期
- 13 钟宁, 广西电网调峰电源的探讨与选择, 企业科技与发展, 2011 年第 24 期
- 14 张文浩, 导叶不同步装置在抽水蓄能电站的应用, 科技与企业, 2011 年第 16 期
- 15 谭力强, 抽水蓄能电厂在广东电网中的优化运用分析, 广东科技, 2011 年第 24 期
- 16 刘明, 国外几座抽水蓄能工程的建设, 水利水电快报, 2011 年第 10 期
- 17 俞文科, 大规模电力储能技术的特性与比较, 浙江电力, 2011 年第 12 期
- 18 赵勇飞, 清远抽水蓄能电站计算机监控系统设计与实现, 水电站机电技术, 2012 年 2 期
- 19 张学峰, 抽水蓄能电站温度采集系统的设计与应用, 水力发电, 2011 年第 10 期
- 20 彭煜民, 抽水蓄能机组单导叶控制不同步故障分析与处理, 水力发电, 2011 年第 9 期
- 21 蒋杏芬, 中小型抽水蓄能电站现状及其在浙江省的发展, 小水电, 2011 年第 6 期
- 22 耿克红, 抽水蓄能电站发展的政策瓶颈与建议, 能源与环境, 2011 年第 1 期
- 23 陈国华, 论我国应对气候变化与国家能源安全问题的策略, 能源与环境, 2011 年第 5 期
- 24 郭海峰, 交流励磁可变速蓄能机组技术及应用, 南方电网技术, 2011 年第 4 期
- 25 周坤, 建立抽水蓄能电站应急响应模式的设想, 山东电力技术, 2011 年第 5 期
- 26 郑柏青, 关于桐柏 4 号机组溅水功率保护启动浅析, 北京电力高等专科学校学报: 自然科学版, 2011 年第 12 期
- 27 张声涛, 蓄能工程实现新疆能源水利综合开发, 北京电力高等专科学校学报: 自然科学版, 2011 年第 11 期

- 28 陈满, 蓄电厂监控系统上位机自动控制功能开发及应用, 水电站机电技术, 2011 年第 3 期
- 29 陈正平, 潘家口抽水蓄能电厂下池闸门监控系统改造, 水电自动化与大坝监测, 2011 年第 3 期
- 30 段振国, 常规机组与抽水蓄能机组混合监控技术, 水电站机电技术, 2009 年第 6 期
- 31 徐庆芳, 十三陵蓄能电厂计算机监控系统自动开停机简介, 水电站机电技术 1998 年第 2 期
- 32 杜晨辉, 蒲石河抽水蓄能电站监控系统 LCU 回路设计., 水电自动化与大坝监测, 2011 年第 3 期
- 33 郭毅, 监控系统在抽水蓄能电厂的应用, 大众用电, 2011 年第 5 期
- 34 郭阳, 蒲石河抽水蓄能电站计算机监控系统的设计与应用, 水力发电, 2012 年第 5 期
- 35 Noury,R, 广州抽水蓄能电站的现代化监控系统, 水力发电, 1990 年第 10 期
- 36 吴正生, 抽水蓄能电站监控系统的设想, 华东电力, 1990 年第 10 期
- 37 小林雅一, 抽水蓄能电站和水电站内的记测, 水电厂自动化, 1993 年第 4 期
- 38 游来坤, 潘家口蓄能机组的试运行, 水电站机电技术, 2011 年第期
- 39 高明杰, 十三陵抽水蓄能电站计算机监控系统的特点及应用, 水电厂自动化, 1996 年第 2 期
- 40 严晋庆, 菲律宾第一座抽水蓄能电站, 青海电力, 1996 年第 1 期
- 41 王芝鹃, 蒲石河电站计算机监控系统方案比较, 东北水利水电, 1996 年第 1 期
- 42 蔡宗宪, 广州抽水蓄能电站计算机监控系统, 水利水电, 1991 年第 1 期
- 43 张桂芝, 十三陵抽水蓄能电站简介, 华北电力科技情报, 1991 年第 1 期
- 44 梁见诚, 十三陵抽水蓄能电站计算机监控系统的招标设计., 1992 年第 1 期
- 45 陈志鑫, 天荒坪抽水蓄能电站监控系统, 华东水电技术, 1995 年第 1 期
- 46 余国铨, 天荒坪电站主机及监控系统国际招标的经验与教训, 华东水电技术, 1995 年第 2 期
- 47 雷煦, 十三陵抽水蓄能电站监控系统, 水电厂自动化, 1995 年第 2 期
- 48 邝明勇, 广州抽水蓄能电站二期工程监控系统, 水电厂自动化, 1995 年第 4 期
- 49 由丽华, 羊卓雍湖抽水蓄能电站计算机监控系统, 水力发电, 1995 年第 11 期
- 50 魏青, 响洪甸抽水蓄能电站计算机监控系统简介, 水电厂自动化, 1997 年第 3 期
- 51 徐庆芳, 十三陵蓄能电厂计算机监控系统自动开停机简介, 水电站机电技术, 1998 年第 2 期
- 52 吴正生, 响洪甸抽水蓄能电站计算机监控系统的设计, 华东电力, 1998 年第 11 期
- 53 傅新芬, 天荒坪抽水蓄能电站计算机监控系统, 华东水电技术, 2000 年第 2 期
- 54 王志刚, 抽水蓄能机组的黑起动, 水力发电, 2001 年第 11 期
- 55 郭徐文, 抽水蓄能电站计算机监控系统规划和选型配置, 水力发电, 2001 年第 11 期
- 56 汪军. 潘家口蓄能电厂计算机监控系统改造, 水电厂自动化, 2002 年第 4 期
- 57 洪允云, 天荒坪蓄能电站控制保护系统设计, 水电自动化与大坝监测, 2002 年第 1 期
- 58 汪军, 我国抽水蓄能电站计算机监控技术评析, 水电自动化与大坝监测, 2002 年第 1 期
- 59 陈怡, 沙河抽水蓄能电站计算机监控系统, 水电厂自动化, 2002 年第 3 期

- 60 回金方, 潘家口蓄能电厂监控系统改造, 水电厂自动化, 2002 年第 1 期
- 61 陈敏., 深圳抽水蓄能电站二次设备国产化探讨, 水利水电, 2002 年第 2 期
- 62 赵贵前, 十三陵抽水蓄能电厂上池 7LCU 的改造, 水电厂自动化, 2003 年第 2 期
- 63 龚世龙, 浅谈大型蓄能电站监控系统国产化的可行性, 水电自动化与大坝监测, 2003 年第 3 期
- 64 戈迪斯托尔抽水蓄能工程的创新设计, 国际水力发电, 2003 年第 5 期
- 65 汪军, 抽水蓄能电站控制与保护设备的国产化, 水电自动化与大坝监测 2004 年第 3 期
- 66 姜树德, 抽水蓄能电站电气二次设备和接线的特点, 电力设备, 2004 年第 12 期
- 67 曾庚运., 广东抽水蓄能电站计算机监控系统的发展, 广东水利水电, 2006 年第 021 期
- 68 杨文道, 桐柏抽水蓄能电站监控系统介绍, 水电厂自动化, 2006 年第 B10 期
- 69 姜海军, 大中型抽水蓄能电站监控系统的国产化研究, 水电厂自动化, 2005 年第 1 期
- 70 王善永, MB80 在大型抽水蓄能电站计算机监控系统的应用, 水电自动化与大坝监测, 2007 年第 2 期
- 71 张海鹏, 白山三期抽水蓄能电站计算机监控系统实施与应用, 水电厂自动化, 2007 年第 4 期
- 72 周庆忠, 国产化大型抽水蓄能电站计算机监控系统, 电力系统自动化, 2007 年第 17 期
- 73 王卓瑜, 张河湾电站计算机监视控制系统, 水电厂自动化, 2007 年第 3 期
- 74 周坤, 泰山抽水蓄能电站计算机监控系统设计, 山东电力技术, 2008 年第 5 期
- 75 许旭生, 惠州抽水蓄能电站计算机监控系统, 广东水利水电, 2008 年第 7 期
- 76 刘叔玉, 张河湾电站计算机监视控制系统设计, 水电厂自动化, 2010 年第 2 期
- 77 朱勇, 白莲河抽水蓄能电站计算机监控系统设计, 中南水力发电, 2009 年第 3 期
- 78 邵芳, 抽水蓄能电站计算机监控系统, 可编程控制器与工厂自动化(PLC FA), 2010 年第 12 期
- 79 李长胜, 可编程控制器与工厂自动化(PLC FA), 科技与生活, 2010 年第 17 期
- 80 水电顾问集团华东勘探设计院, 福建仙游抽水蓄能电站机电设备采购分标方案(送审稿), 2011 年第期
- 81 张卫君, 密云水电厂计算机监控系统改造设计与实现, 水电站机电技术, 2012 年第 3 期
- 82 刘晓波, 白山梯级水电厂计算机监控系统升级改造, 《第一届水力发电技术国际会议论文集(第一卷)》, ISBN 7-5083-4873-7, 2006 年 10 月第一版, 中国电力出版社
- 83 王德宽, 白山发电厂监控系统及基础自动化改造, 水力发电, 1999 年第 9 期
- 84 邵芳, 抽水蓄能电站计算机监控系统, 可编程控制器与工厂自动化(PLC FA), 2010 年第 12 期
- 85 张兵海, 抽水蓄能机组几种特殊发变组保护整定配置原则探讨, 水电自动化与大坝监测, 2010 年第 1 期
- 86 刘振亚, 智能化电网技术, 中国电力出版社, 2010 年 4 月第一版, 2010 年 7 月北京第二次印刷
- 87 刘振亚, 智能化电网知识读本, 中国电力出版社, 2010 年 4 月第一版, 2010 年 7 月北京第二次印刷

- 88 I.Erich, U.Bachmama, Dynamic Behavior of Variable Speed Pump Storage Units in the German Electric Power System, 15th Triennial World Congress, Barcelona.Spain
- 89 北极星智能电网在线, 2012-7-4, 我国抽水蓄能水电站已建、在建、拟建情况一览
- 90 端润生, 我国抽水蓄能电站建设及机组国产化进程,《第一届水力发电技术国际会议论文集(第二卷)》, ISBN 7-5083-4874-5, P809-813, 2006年10月第一版, 中国电力出版社