

# 抽水蓄能电站技术经济评价及 蓄能机组技术

河北省电力试验研究所

# 抽水蓄能电站技术经济评价及 蓄能机组技术

(课题编号:94—01—14)

批 准:胡博闻  
审 查:苑立国  
课题负责人:李 华  
课题组成员:李 华 孟 亭 高景绵

## 技术顾问

刘公孝教授级高级工程师(北京勘测设计院)  
廖资汉教授级高级工程师(中南勘测设计院)  
褚镇敏高级工程师(中南勘测设计院)  
杨凤臣高级工程师(河北省水利水电勘测设计院)  
杨亚伦高级工程师(河北省水利水电勘测设计院)  
谢子书高级工程师(河北省水利水电勘测设计院)  
夏保安高级工程师(河北省电力勘测设计院)  
杨优栋高级工程师(河北省电力公司)  
颜渊明教授级高级工程师(河北省电力公司)  
卞景余高级工程师(河北省电力公司“张蓄”项目办)  
何启华高级工程师(河北省电力公司“张蓄”项目办)

河北省电力试验研究所信息中心

1994年12月

## 内 容 提 要

《抽水蓄能电站技术经济评价及蓄能机组技术》一书是由上、中、下三篇构成。

上篇主要论述了抽水蓄能电站在电力系统中的作用及技术指标、技术特点,并对其经济效益及影响因素进行了分析评价,同时重点介绍了国内外抽水蓄能电站工程建设及发展的概况和特点。

中篇主要介绍抽水蓄能电站工程建设的科学管理、工程监理、业主责任制、建设筹资、引用外资的工作程序和方法以及国内外有关工程建设技术经验。

下篇对抽水蓄能机组技术特点、运行方式以及启动、运行、调试、维修等技术进行了分析探讨,并重点介绍抽水蓄能电站的经济效益评价和节煤效益计算方法等。

本书力求在理论与实践的结合上展示国内外抽水蓄能电站建设和项目的发展成就,并着力于介绍其巨大的技术经济效益及其在电力系统中的特殊功能,以期引起人们对抽水蓄能电站建设的广泛关注和高度重视。

本书可供从事抽水蓄能电站建设、科研和生产运行、调试及管理 etc 工程技术人员以及水利水电工作者阅读使用,同时也可供高等院校水利水电专业师生学习参考。

## 序 言

《抽水蓄能电站技术经济评价及蓄能机组技术》在电网发展最需要的时候和大家见面了。它为广大读者全面系统地了解抽水蓄能电站建设的必要性、技术经济合理性及蓄能机组的技术特点提供了一个很好的资料和便利条件。

本书从综述蓄能电站开始,到评价、建设、招标、监理、技术等分项论述,从国外日、美、俄、意、法等国蓄能电站的介绍到国内已建及在建各主要蓄能电站的描述,从机组的启动,调试到投产后的运行、维护、管理均作了全面系统的介绍。本书内容较为广泛而且具有一定的深度,是一部很有实用价值的参考资料。

在我们阅读这本书之前,我作为参与研讨者之一,想提出几个基本观点作为对这本书基本精神的概括。这就是:第一,国民经济及人民生活越现代化,电网日负荷曲线所表现出的峰、谷变化就越为突出,电网的调峰任务也就越大;第二,选择不同性能的机组分别担任基荷、腰荷、尖荷供电从电网整体讲是最经济合理的;第三,抽水蓄能机组具有双向调峰能力(即既具有顶起尖峰负荷的作用,又具有填充低谷负荷的作用),是最好的调峰机组;第四,对建设调峰机组的技术经济评价,必须从全网综合效益最佳原则去进行,不能单讲一个电站的效益。

就日本东京电力公司来讲,东京电网也是一个具有代表性的现代化电网。该电网在1994年夏季最高负荷已达57600MW,而同天最低负荷为25690MW,峰谷差达55.4%,在冬季最高负荷为46150MW,同天最低负荷为22840MW,峰谷差达50.5%,不同季节如1994年8月与同年2月最大负荷相差22390MW,差值高达38.9%。东京电网为了满足用户需要,在电源构成中建成核电25%,燃气电36%,石油电16%,煤电3%,水电20%。水电中大多数是抽水蓄能电站(5000MW),这样依照核电、径流式水电、煤电、LNG电、油电、抽水蓄能电的顺序,依次承担电网的基荷、腰荷和尖荷的供电任务。电网运行具有很高的灵活性。

当前,我国电力正处在高速度发展的时期。在这个时期,各个电网的运行与发展都遇到了两个突出的问题:一是调峰十分困难,而且越来越困难;二是在电网的进一步发展中建设调峰机组仍有各种阻力,包括投资体制问题造成的投资者只愿建煤电而不愿建抽水蓄能电站。这两个问题若不解决好,电网运行将越来越困难,要想适应社会生产和生活的现代化需要也是相当困难的。为此希望这本书能对化解上述矛盾起到一个良好的作用。

现在,随着国民经济现代化速度的加快,我国电网的负荷曲线也日益向国际上发达国家电网负荷曲线的型线接近。发达国家电网负荷曲线的共同特点是:日峰谷差大;不同季节负荷曲线的幅值及型线变化也大。我国在前几年由于现代化程度还不够高,社会生产与社会生活还未全部反映在电网负荷曲线上,加之严重

缺电,造成了以电来支配生产和生活而不能以电来服从于服务于生产生活的需要的状况。

随着国民经济现代化的发展,社会生产和社会生活几乎全部与电相关联了。因此,当今电网负荷曲线,反映的是电网供电区域内全部生产和生活活动随时间而变化的轨迹,成为该地区全部生产与生活活动的缩影。因此,我们讲人民电业为人民,在电网组织电力生产供应上就是要尽最大努力,最大限度地来满足这个轨迹的要求。为此,根据世界各国电网建设的经验就要合理安排建设分别担负基荷、腰荷和尖荷供电任务的机组,并要有一个比较合理的比例。国际上发达国家的电网水电调峰机组的比例一般在14%—20%,加上担负腰荷的机组也具有一定的调峰能力,就可以较好的满足社会生产和生活用电的客观需要了,并可使电网运行在经济合理的状态。

电网调峰困难,而且非常困难,是当前我国各个电网的突出而紧迫的问题。解决这一问题的关键,就是要充分利用我国现有的水力资源,加快抽水蓄能电站建设,迅速改变电源构成比例上的不合理状况,充分发挥抽水蓄能电站在调峰、填谷、事故备用和提高电网安全经济运行水平方面的作用,使各个电网适应社会生产和生活用电客观规律的要求,适应国民经济现代化和人民生活现代化的需要,把电网与用户的适应能力提高到一个新的水平。



# 抽水蓄能电站技术经济评价及 蓄能机组技术

## 目 次

### 序 言

### 上篇 抽水蓄能电站概论

#### 第一章 抽水蓄能电站综述

- 1-1 抽水蓄能电站在电力系统中的地位和作用..... (1)
- 1-2 抽水蓄能电站在国内外的的发展..... (3)
- 1-3 抽水蓄能电站的技术原理、主要类型及运行特点 ..... (5)
- 1-4 抽水蓄能电站主要工程技术参数..... (9)
- 1-5 抽水蓄能电站的经济合理性及经济效益分析 ..... (14)
- 1-6 抽水蓄能电站的经济评价及效益主要影响因素分析 ..... (19)

#### 第二章 国外抽水蓄能电站的概况及发展

- 2-1 日本抽水蓄能电站的概况及发展 ..... (22)
- 2-2 美国抽水蓄能电站建设与发展 ..... (33)
- 2-3 原苏联抽水蓄能电站的建设技术 ..... (43)
- 2-4 意大利的抽水蓄能电站建设经验 ..... (48)
- 2-5 法国最大的抽水蓄能电站——蒙泰济克 ..... (55)

#### 第三章 国内抽水蓄能电站的概况及特点

- 3-1 岗南电站——我国第一座混合式抽水蓄能电站 ..... (57)
- 3-2 广州抽水蓄能电站工程建设及机组特点 ..... (60)
- 3-3 潘家口抽水蓄能电站特点 ..... (67)
- 3-4 天荒坪抽水蓄能电站工程概况 ..... (73)
- 3-5 十三陵抽水蓄能电站工程概况 ..... (75)
- 3-6 羊卓雍湖抽水蓄能电站 ..... (80)
- 3-7 雾灵山抽水蓄能电站初探 ..... (87)
- 3-8 张河湾抽水蓄能电站工程及特点 ..... (91)
- 3-9 明湖——台湾第一个抽水蓄能工程..... (102)
- 3-10 台湾明潭抽水蓄能工程 ..... (109)

## 中篇 抽水蓄能电站工程建设管理

### 第四章 抽水蓄能电站的工程监理及业主责任制

- 4-1 工程监理制..... (117)
- 4-2 工程监理的任务..... (121)
- 4-3 工程监理工程师的素质..... (124)
- 4-4 抽水蓄能电站工程监理实施过程的三大控制..... (125)
- 4-5 工程监理过程中的两大管理..... (158)
- 4-6 工程招标与工程监理..... (167)
- 4-7 水电建设项目业主责任制..... (184)

### 第五章 国际融资机构及引用程序

- 5-1 水电工程的筹资渠道..... (190)
- 5-2 电价及融资改革..... (193)
- 5-3 亚洲开发银行简介..... (195)
- 5-4 亚洲开发银行引资基本程序..... (198)
- 5-5 世界银行集团的组成与任务..... (206)
- 5-6 世界银行引资程序实例..... (209)
- 5-7 引用外资提高工程总体投资效益..... (214)
- 5-8 国际贷款水资源工程对社会和环境影响的要求..... (216)
- 5-9 项目业主财务评价方法..... (218)
- 5-10 水轮发电机组国际招标采购实例..... (224)

### 第六章 施工管理及施工技术

- 6-1 广州抽水蓄能电站改革建设管理体制..... (226)
- 6-2 美、日抽水蓄能电站施工管理概况..... (228)
- 6-3 扎戈尔斯克抽水蓄能电站施工经验..... (232)
- 6-4 抽水蓄能电站水库设计特点及在天荒坪工程中的体现..... (238)
- 6-5 张河湾抽水蓄能电站(下库)水工模型试验报告..... (243)
- 6-6 LM-200型反井钻机在十三陵抽水蓄能电站出线竖井导井工程中的应用..... (249)
- 6-7 十三陵蓄能电站上池混凝土面板温控试验块成果介绍..... (252)
- 6-8 广州抽水蓄能电站防涡梁设置必要性及结构优化的探讨..... (255)
- 6-9 抽水蓄能电站的新技术..... (259)
- 6-10 气垫式调压室在抽水蓄能电站尾水道上的应用前景..... (262)

## 下篇 抽水蓄能电站技术

### 第七章 抽水蓄能电站的基本技术特点

7-1 抽水蓄能电站水工建筑物的特点	(267)
7-2 水泵水轮机的特点	(273)
7-3 电动发电机的概况及特点	(280)
7-4 抽水蓄能电站机型参数选择	(295)
7-5 潘家口抽水蓄能电站水泵水轮机机型的选择	(301)
7-6 抽水蓄能电站的发电电动机	(304)
7-7 La Muela 抽水蓄能电站的电动机—发电机组	(309)
7-8 羊卓雍湖工程抽水蓄能机组选择及运行方式	(313)
7-9 日本今市抽水蓄能电站机械设计的特点	(317)

### 第八章 抽水蓄能机组技术经验

8-1 抽水蓄能机组的启动方式	(321)
8-2 抽水蓄能机组用作尖峰发电还是运行备用 —应用 DEMETER 模拟优化运行方式	(327)
8-3 水头变幅很大的抽水蓄能电站运行方式的探讨	(333)
8-4 抽水蓄能机组的现场试验结果	(341)
8-5 抽水蓄能机组的维护和检修	(344)
8-6 水力蓄能电站可逆式机组进入飞逸工况的过程	(346)
8-7 水电站与蓄能电站机组的电气制动	(351)
8-8 扎戈尔斯克抽水蓄能电站水力机组的调整和试运转	(354)
8-9 新高濑川水力蓄能电站#4 机组可逆式水轮机和发电电动机检修	(357)
8-10 蓄能电站厂房结构振动	(360)
8-11 抽水蓄能电站电气结线综述	(366)
8-12 大型抽水蓄能电站电气主结线	(372)
8-13 潘家口抽水蓄能电站电气(一次)设计特点	(382)
8-14 天荒坪抽水蓄能电站电气主结线和主机设备介绍	(389)
8-15 巴德河抽水蓄能工程电气主系统设计、运行和试验	(391)
8-16 大型抽水蓄能机组的变频启动	(396)
8-17 潘家口抽水蓄能电机变极方式	(400)
8-18 潘家口抽水蓄能机组变频系统调试经验	(403)
8-19 调速抽水蓄能发电系统	(409)
8-20 大型抽水蓄能机组的变速运行	(414)
8-21 潘家口抽水蓄能机组变速运行的模拟试验	(420)
8-22 可变速抽水蓄能发电系统的实用化	(428)
8-23 400MW 可调速抽水蓄能系统	(431)



8-24	世界首台用于抽水蓄能电站的变频器供电变速发电—电动机的研制和商业运行 .....	(434)
8-25	可变速抽水蓄能发电系统动力电子技术的应用 .....	(444)
8-26	调峰水电站和抽水蓄能电站水机运行中负荷变化速度的设计准则 .....	(449)
8-27	抽水蓄能电站监控系统的设想 .....	(455)
8-28	调速水泵蓄能机组控制系统的研制 .....	(458)
8-29	抽水蓄能水电站全数字处理系统 .....	(463)
8-30	利用微机进行小时抽水蓄能模拟 .....	(471)
8-31	抽水蓄能电站的现地控制和远方控制分布系统 .....	(478)
8-32	潘家口水电站蓄能机组控制系统的特点 .....	(484)
8-33	天荒坪抽水蓄能电站运行控制系统 .....	(489)
8-34	广州抽水蓄能电站控制系统 .....	(497)
8-35	周期最佳控制及在抽水蓄能电站的应用 .....	(498)
8-36	用远端电压调节对抽水蓄能电站进行动态电压控制 .....	(505)
8-37	抽水蓄能机组水压力控制的数值研究 .....	(510)

## 第九章 抽水蓄能电站的经济运行及效益计算

9-1	抽水蓄能电站在电力系统中的经济运行方式 .....	(516)
9-2	概率模拟中蓄能电站经济运行的判据 .....	(521)
9-3	关于抽水蓄能电站厂内经济运行问题的研究 .....	(526)
9-4	电力系统中抽水蓄能电站的经济性 .....	(535)
9-5	蓄能电站静、动态效益评估方法 .....	(542)
9-6	抽水蓄能电站动态效益研究 .....	(549)
9-7	抽水蓄能电站动态效益估评 .....	(556)
9-8	抽水蓄能电站经济效益分析计算方法 .....	(560)
9-9	张河湾抽水蓄能电站的经济效益分析 .....	(568)
9-10	关于抽水蓄能电站节煤问题及其研究方法的探讨 .....	(576)
9-11	抽水蓄能电站节煤效益分析 .....	(582)
9-12	抽水蓄能电站节煤效益的定量分析 .....	(588)
9-13	抽水蓄能电站节煤效益及计算方法 .....	(593)
9-14	抽水蓄能电站节煤效益计算 .....	(597)
9-15	抽水蓄能技术在电网调度管理中的应用 .....	(603)
9-16	抽水蓄能发电成本与上网电价的探讨 .....	(606)

附表 I : 各国抽水蓄能电站装机容量 .....

附表 II : 大型水轮机制造与规格简介 .....

附表 III : 国外水轮机、发电机制造厂一览表 .....

主要参考文献 .....

编后语 .....

# 第一章 抽水蓄能电站综述

## 1-1 抽水蓄能电站在电力系统中的地位和作用

抽水蓄能电站的建设与电力系统的发展密切相关。随着系统中高参数,大容量火电机组和大型核电机组的投入以及电网供电负荷率的进一步降低,抽水蓄能电站的地位和作用越来越重要,已逐步成为系统电源构成中一个不可缺少的组成部分。抽水蓄能电站之所以得到如此迅速的发展不是偶然的,它能实现电能在时间上的重新调和转换电力系统的发展和安、经济运行需要,并在技术经济上具有独特的优越性。抽水蓄能电站在电力系统中的功能、作用。

### 1 调峰填谷

随着国民经济的发展和人民生活水平的不断提高,电网的不断扩大和市政生活用电的急剧增加迫使电网峰谷差的绝对值也越来越大,出现高峰时电不够用,低谷时又用不了的现象。对于以火电为主的电力系统来说,由于目前的火电机组调峰能力都比较低,出力的变化速度也远远满足不了系统负荷急剧变化的要求,且火电调峰发电使发电成本增加,单靠火电机组难以解决电网的调峰问题。抽水蓄能电站根据电网的用电特性与电源构成特点,建设抽水蓄能电站是解决调峰问题的有效途径,可以替代火电机组担负系统的调峰任务。抽水蓄能电站启动快,可以在数秒内达到满负荷运行,是一种灵活可靠的调峰电源。它吸收夜间系统负荷低荷时的多余电能抽水,使火电站不必降低出力或部分停机,改善了火电机组的运行条件,使之在热效率最高、煤耗率最小的情况下运行,降低系统发电成本。延长火电机组使用寿命,提高电网整体经济和社会效益。抽水蓄能电站可利用夜间火电多余的出力,在电力系统低谷负荷时提高火电站荷载,起到填谷作用,是其独有特点,是任何其它类型的电站所没有的。

### 2 调频、调相和事故备用

抽水蓄能电站运行灵活可靠,组启停快,适应性强,能适应电网中负荷急骤增长或下降状况,从而保证电力系统电压和频率的稳定性。目前最先进的可逆式抽水蓄能机组,从开始担任负荷到满负荷运行只需数秒,同时具有低的强迫停运率,比较可靠。因此,抽水蓄能电站不仅适用调峰,还适于调频和事故备用,是一种可作为低费用旋转备用容量的极好电源。它还与常规水电站一样,在距负荷中心较近的条件下,或靠近抽水电源点,因此它是比较理想的调相机,平时在既不抽水又不发电的时候,可带无功负荷以调整系统的电压,增加系统的无功出力,改善系统电压质量。与此同时,机组的利用率又得到提高。抽水蓄能电站的这些特性,可以有效地改善和保持电网周波的稳定,提高电网的经济效益、电能质量和供电的可靠性。

### 3 抽水蓄能电站与核电站配合运行,可使核电站在最佳状态下运行

核电站主要设备及辅助设备极为繁杂,要求在非常稳定情况下运行,机组出力变化的限制

很严,难以适应电力负荷的变化,除周期性检查期外,总是持续不断地以额定出力工作,承担电力系统基荷部分。在有核电站的供电系统中,需设置较大的备用容量。随着核电比重进一步增长,电网供电负荷率将越来越低,电网中午夜以后即使将火电站的出力尽可能压低,发电容量仍会超出电力负荷的需要,出现剩余电能。因此,更需要发展抽水蓄能电站,与日益增长的核电站配合运行。

#### 4 是未来开发利用不稳定性一次能源的基本保证

可以预言,在不可再生燃料日益缺乏的将来,从可再生能源,如太阳能、风能、潮汐能等天然再生能源中取得一次能源。当这些新能源作为重要的商业上的能源成为现实时,就必须依靠抽水蓄能电站等这种类型的电站来保证系统稳定运行。

#### 5 淹没损失小

与常规水电站比较,一般抽水蓄能电站都是利用现有的水库,淹没少,移民也少。对环境的影响也小得多。这是蓄能电站的突出特点之一。

#### 6 改善电网运行条件,具有节煤效益

抽水蓄能电站是与电网中其他各种类型的电站密切配合运行的,因此在考察分析抽水蓄能电站的效益时,应从整个电网系统出发,即将抽水蓄能电站与电网的所有电厂放在一进行经济分析,而决不能只从抽水蓄能电站本身的运行特点来考察。

抽水蓄能电站的主要功能是实现在时间上的转换,这样就有个能量损失。从抽水蓄能电站本身的运行来看,这不可能用 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 的电抽水就能发出 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 的电,性能较好的抽水蓄能电站效率一般为 $0.7\sim 0.75$ ,也就是我们常说的“用 $3\text{kW}\cdot\text{h}$ 的电换 $2\text{kW}\cdot\text{h}$ 的电”,或“用 $4\text{kW}\cdot\text{h}$ 电换 $3\text{kW}\cdot\text{h}$ 电”这单从蓄能电站本身运行特点得出的结论。如果从电力系统角度看,抽水蓄能电站的节能效益表现在两个方面:一是改善作为抽水电源的火电运行条件,具有填谷节煤效益;二是替代燃料的消耗高的尖峰,火电机组,具有调峰节煤效益。根据华北电网的测算资料:“当抽水蓄能电站的转换效率为 $0.75$ 时,其煤耗为 $310\text{g}/\text{kW}\cdot\text{h}$ ,仅与基荷火电煤耗为 $320\text{g}/\text{kW}\cdot\text{h}$ 大致相当,该电网目前调峰火电机组平均煤耗为 $450\text{g}/\text{kW}\cdot\text{h}$ ,即尖峰火电机组平均煤耗为 $450\text{g}/\text{kW}\cdot\text{h}$ ,即尖峰电站发 $2\text{kW}\cdot\text{h}$ 电所消耗的煤与抽水蓄能电站发 $3\text{kW}\cdot\text{h}$ 电所消耗的煤大体相当。由此可看出,抽水蓄能电站具有较大的节煤效益。以十三陵抽水蓄能电站为例,它投入系统后,每年系统可节标煤 $42.9$ 万 $\text{t}$ ,节油 $2.9$ 万 $\text{t}$ ,电力系统可少装调相机组 $340\text{MW}$ ,减少年电量损失 $7740\text{MW}\cdot\text{h}$ ,折合年效益达 $5566.8$ 万元,单位装机年效益 $69.6$ 元/ $\text{kW}$ 。经济效益十分明显。

#### 7 建设投资低

抽水蓄能电站的上、下池往往是利用已建水库或天然湖泊,水头较高,所以它的投资比常规水电站火电站均便宜。

#### 8 综合利用

a. 对于一些综合利用任务为主的水电站,电站发电运行常常是“以水定电”,不能满足电力系统发电要求,若电站增装蓄能机组,改建为混合式蓄能电站,则既可满足综合利用各部门的

用水要求,又提高了电力系统的调峰能力。

b. 对于某些径流式的常规水电站来说,电站往往装设一定数量的重复容量,以尽可能多发季节性电能,减少系统的燃料消耗。如将这种电站改建成混合式抽水蓄能电站,蓄能机组在丰水期集中利用天然径流发电,在枯水期进行抽水蓄能发电,可将电站的重复容量变为可靠容量,将季节性电能转变为可靠电能。

c. 对于水电比重较大的电力系统,丰水期装机容量不能充分利用,水电站要强迫弃水,而枯水期出力又不足。如有条件修建季调节的抽水蓄能电站,可利用汛期丰富的季节性电能进行抽水蓄能,到枯水期集中放水发电,便可提高电力系统枯水期间的水电站出力,起到蓄洪补枯作用,也为季节性电能的利用开辟了一条新的途径。

d. 美化环境,发展旅游事业。抽水蓄能电站同常规水电站一样,每一个水电站都会建成一个山青水秀,林木密布、鸟语花香、环境优美的旅游点,发展旅游事业,促进地区经济发展。

抽水蓄能电站在我国已得到相当的重视,只要在已经取得的经验基础上,广泛吸收和采用世界先进技术,充分利用我国丰富的水利资源,随着我国对外开放的进一步扩大,更有助于抽水蓄能电站的建设。

## 1—2 抽水蓄能电站在国内外的的发展

### 1 国外抽水蓄能电站现状及发展远景

抽水蓄能电站的开发利用已有近百年的历史,七十至八十年代是抽水蓄能电站发展最快的十年,兴建抽水蓄能电站的国家已由欧美少数工业发达国家进而发展到世界各国。目前世界上据不完全统计已投入运行和在建的抽水蓄能电站约 400 座,总装机容量达 1.0 亿 kW。

抽水蓄能电站发展最快的是美国、日本和意大利,其中:美国目前运行和在建抽水蓄能电站共计 40 座,总装机容量 27336MW,占水电装机容量的 24.9%,据世界第一位,已投入运行最大的抽水蓄能电站是装机容量 2100MW 的巴斯康蒂电站。日本是一个动力资源十分贫乏的国家,水力资源已开发殆尽,非常重视抽水蓄能电站的开发利用,已投入运行和在建的抽水蓄能电站约 40 座,总装机容量为 25472MW,约占水电装机容量的 50%,据世界第二位。美、日、意、独联体等抽水蓄能电站的发展规模和增长速度见表 1 所示。

欧洲工业发达的意大利、法国、奥地利、西德、英国、瑞士等国的抽水蓄能电站也都得到了迅速发展。意大利是建设抽水蓄能电站比较早的国家之一。在五十年代末,水电开发已接近顶峰,六十年代以来电力负荷迅速增长,随着火机组的发展,水电比重逐渐下降,为了解决调峰问题,建设了一大批抽水蓄能电站。目前,已建和在建抽水蓄能电站 23 座,蓄能机组总装机容量达 8325MW,在西欧国家中占第一位。根据以上统计资料,日本抽水蓄能容量所占比重最高;美国、日本、意大利三个国家从 1970 年到 1990 年的抽水蓄能电站增长了 6~8 倍,取得了相当大的发展。

独联体、波兰、捷克斯洛伐克、德国、南斯拉夫、保加利亚等也很注意开发利用抽水蓄能资源。俄罗斯在水电开发利用方面取得了很大进展,但在抽水蓄能建设方面起步较晚,第一座抽水蓄能电站库班抽水蓄能电站建于 1956 年,6 台机组,装机容量 19MW,水头 14.5~30m; 1970 年建成第二座抽水蓄能电站(基辅抽水蓄能电站)水头 65m,装机容量 235MW,目前,已投入运行和在建中的抽水蓄能电站共有 7 座,总容量约 13000MW。俄罗斯尽管从八十年代起

加强了抽水蓄能电站的建设,但由于多种原因,抽水蓄能电站的建设速度仍然较慢。

目前全世界抽水蓄能电站总装机容量近十几年每年递增约 7000M~10000MW,说明抽水蓄能电站比火电站和核电站有着本质上的优越性,已被世界各国广泛采用,也充分说明其经济上的优越性已被更广泛地认识和接受。现在国外抽水蓄能电站,规模越来越大,利用水头越来越高,单机容量越来越大。目前在国外的抽水蓄能电站中主要采用大型可逆式机组,单机容量 200M~500MW,大多数电站水头一般为 100~650m,少数达 700~900m,近来有些电站水头已高达 1200~1500m,未来的发展趋势是提高水头和加大单机容量。

表 1 几个国家抽水蓄能电站装机容量发展情况表 单位:MW

年份 国家 项目	1960			1970			1980			1990			2000(预计)		
	水电	抽水蓄能	蓄能占水电比(%)	水电	抽水蓄能	蓄能占水电比(%)	水电	抽水蓄能	蓄能占水电比(%)	水电	抽水蓄能	蓄能占水电比(%)	水电	抽水蓄能	蓄能占水电比(%)
美国	33190	90	0.3	55840	3690	8.6	78270	13300	17	110000	27830	24.9	153000	49800	32.6
日本	12680	110	0.9	20030	2960	14.8	29200	10800	37	51000	25470	49.9			
意大利	12900	240	1.9	15360	1260	4.6	17160	3330	19.4		8330				
法国	10230	230	2.2	15220	450	3.0	19400	1110	6.0		6570				
奥地利	2950	820	27.8	5470	890	16.3	7820	1800	23		5480				
独联体	14780	190	0.13	31370	2540	0.81	52600	2540	0.48	108000	12880	11.9	165000 ~240000		
中国	1940	0	0	6240	110	0.18	20320	330 (1000)	0.16	32700	41030 (1000)		60000~ 80000		

注:1. ( ) 为台湾省抽水蓄能电站容量,中国 1990 抽水蓄能装机容量包括已建、在建和计划项目

2. 资料来源摘自《中国水力发电工程学会手册》、《Water power & Dam Construction April 1990》

## 2 国内抽水蓄能电站现状及其发展

40 多年来,我国水电建设取得了高速发展,1949 年我国水电装机不超过 360MW,年发电量也只有 120MW·h,分别列居世界第 20 和 21 位,到 1988 年底,水电装机已达 32700MW,年发电量达 10920GW·h,增长了 91 倍,跃居世界第 6 位和第 5 位。而我国的抽水蓄能电站的开发利用却起步较晚,速度缓慢,远远落后于欧美等工业发达国家,大容量抽水蓄能机组设计和制造基本上还是空白。

随着我国国民经济的迅速发展及人民生活水平的提高,在电力系统负荷结构方面相应发生很大变化,电网峰谷差越来越大,在调峰容量愈感不足的情况下,于 1968 年在河北省岗南水电站从日本引进一台单机容量 110MW 的小型斜流可逆式水泵/水轮机—电动/发电机机组,抽水功率 150MW(发电最大水头 64m,最小水头 28m),成为我国第一座混合式抽水蓄能电站。经过 20 年来的运行,经济技术效果很好,使一个无保证出力的季节性电站,变成一个运用灵活全年调峰和事故备用的正常混合式抽水蓄能电站。其后,于 1973 年开始又在北京市密云水电站改装了两台斜流可逆式抽水蓄能机组,该机组由天津发电设备厂制造,单机容量 11MW,抽水功率 13.5MW,成为我国第二座混合式抽水蓄能电站。

从七十年代至八十年代我国的电力工业发展很快,各大电网调峰问题已突出起来,为缓解京津唐电网调峰问题,于 1976 年开始在河北省潘家口水利枢纽筹建第三座混合式抽水蓄能电站,本电站安装一台 150MW 常规水轮发电机组和三台单机容量 90MW 混流可逆式水泵/水轮机—电动/发电机机组,目前工程业已完工,本电站由于增设抽水蓄能机组,尖峰电量增加了

3.7倍,替代容量增加2.5倍,在电网中调峰填谷调节容量约344MW,使电网调峰出力增加了4.5倍,该电站在采用变极机组的基础上,在低水头段又采用了60MW变频器(SFC)新技术,即能在最佳效率区变速运行,又能作水泵工况电动机启动所用,潘家口水电站是我国当前最大的混合式抽水蓄能电站,在京津唐电力系统中调峰、填谷及事故备用等作用十分显著。

台湾省从七十年代世界发生第一次石油危机以来,积极开发核电、燃煤火电、水电、以减少进口石油发电,近几年水电仅占年发电量的18%,而核电占61%,几乎所有适宜开发的水电站均已被开发。因此,认为在台湾电力工业中在建设核电站的同时兴建抽水蓄能电站是满足电力要求的一种手段。鉴于以上情况于1981年开始兴建明湖抽水蓄能电站,该电站是台湾兴建的第一座抽水蓄能电站,装有4台单机容量250MW可逆式机组,总装机容量为1000MW,有效水头321m,整个工程于1985年建成并网发电。1987年开始了第二座抽水蓄能电站建设,装有6台275MW可逆式机组总装机容量为1602MW。

目前,我国七大电网电力发展很快,随着国民经济的发展,尤其华北、华东、东北、华南电网日电日趋严重,已预感到建设抽水蓄能电站的必要性的迫切性,为缓解电力不足和系统调峰问题,最近一个时期华北、华南及华东等地区已开展了抽水蓄能电站的规划选点和勘测设计工作,如华北地区的十三陵抽水蓄能电站;华南地区的广州抽水蓄能电站;华东地区的天荒坪抽水蓄能电站及西藏的羊卓雍湖抽水蓄能电站等,均已动工兴建并有的已并网运行。

国家按照水电建设规划,拟在经济发达但又缺乏能源地区建设一批高水头,大容量的抽水蓄能电站,以满足电网调峰需要。近几年来全国各地都开展了抽水蓄能电站资源的普查、规划选点、可行性研究等工作,如华北地区正在进行可行性研究的雾灵山及张河湾等抽水蓄能电站,是具有高水头大容量十分理想的抽水蓄能电源点。根据国外抽水蓄能电站占电力总装机容量的比重约为4%~10%,若以5%计,预测2000年,抽水蓄能电站装机容量需要10000MW左右,而且目前已投入运用和在建的岗南、密云、潘家口、十三陵、广州、天荒坪等6座抽水蓄能电站的总容量只有4103MW,其差距还很大。

### 1-3 抽水蓄能电站的技术原理、主要类型及运行特点

抽水蓄能电站的工作原理是能量的转换。根据电力用户的要求,在时间上重新分配其他电厂生产的电能。其工作方式是为人为地将低位水库(下库)的水打到高水库(上库),将一定数量的水以位能形式储存起来,即利用上、下池的蓄水量和高差,启动水泵和水轮机作两种工作运行,电网峰荷时放水发电,低谷负荷时抽水蓄能,也就是在电力有剩余时把能量贮存起来,在电网电力不足时把能量释放出来。换言之,抽水蓄能电站,就是高焓值的水能、电能交替转换方式,进行发电、用电、用水、蓄水。

抽水蓄能电站的最基本设备和建设物是抽水蓄能机组、厂房、输水道和与之相连接的两座水位高程不同的水池。

抽水蓄能电站(或机组),最适用于尖峰低谷负荷差值大的电力系统,尤其在火电和核电比重大,常规火电满足不了调峰要求的电力系统。纯抽水蓄能电站不能脱离电力系统单独运行。

抽水蓄能电站可按下列情况分为不同的类型。

#### 1 按与常规电站的结合情况分

##### 1.1 纯抽水蓄能电站

纯抽水蓄能电站的特征是只有很少甚至没有天然来水进入上水库,蓄能电站用水只是一天内水质的往复运动,基本上不消耗水量,厂房内机组全部是抽水蓄能机组。

纯抽水蓄能开发方式要求有足够的蓄能库容。通常上库建在比河面高程高几百米的地面上,围堤修建人工水库来蓄存发电水量。下库则利用河流上已建的水库,或者在电站下游适当地点用低坝新建一个小水库,也可利用天然湖泊作为下水库。

纯抽水蓄能电站一般选择在靠近负荷中心及电源点处,以减少电站在送电和受电时输电线路的电能损失。

## 1.2 混合式抽水蓄能电站

结合常规水电站的新建、改建或扩建,加装抽水蓄能机组即为混合式抽水蓄能电站。厂房内有的机组是常规水轮发电机组,有的则是可逆式机组。混合式抽水蓄能电站的上水库具有天然径流汇入,它的电能构成也分为两部分:一部分为天然径流发电,另一部分为抽水蓄能发电。

混合式蓄能电站整体布置与一般蓄水式电站类似,只是需要在电站下游建筑一个具有相应蓄水库容的下水库,降低和挖深蓄能机组的发电厂房基础。蓄能机组的水头受原有水电站设计水头的限制,单位电量投资稍大,如原有水电站远离负荷中心,输电损失就会增加。

## 2 按调节性能分

### 2.1 日调节蓄能电站

它以一日为运行周期,夜间负荷处于低谷时进行一次抽水,日间担任峰荷时发电一次或多次,但每次时间较短,所需的蓄水库容决定于每日调峰时的发电量。

### 2.2 周调节蓄能电站

它以一周为运行周期,每日仍抽水 and 发电各一次,但在周末节假日系统负荷特低时,可多利用富裕电能延长抽水时间,储蓄更多水量,以增加日调峰出力,或延长担任调峰的时间。所需库容较日抽蓄电站的大。国外周末工厂多数停工,这种蓄能电站较多。

### 2.3 季调节蓄能电站

将汛期多余水量抽蓄到上水库中供枯水期增加发电量用,所需库容较上述两种电站大得多,一般利用径流式水电站丰水期季节性电能作抽水能源。

## 3 按水头分

对于纯抽水蓄能电站,从减少投资的角度出发,一般认为水头在 150~200m 是能接受的最低限度。考虑到水头对机组选择的影响,可分为

### 3.1 水头低于 600m

在此范围内,选择单级可逆混流式水泵—水轮机可以满足需要。

### 3.2 水头超过 600m

水头超过 600m 以上可选用多级式机组或三机式机组。

## 4 按机组类型分

### 4.1 四机分置式

这是比较早期的纯抽水蓄能电站所用的机组组合方式,装有水泵、电动机、水轮机与发电机,即抽水机组与发电机组分列。由于工程投资昂贵,未获得广泛的应用。

### 4.2 三机串联式

其电动机和发电机结合在一个电机之内,即发电机兼用作电动机。它与水轮机、水泵连接在一个直轴上,发电时由水轮机带动发电机,抽水时则由电机驱动水泵。对于容量较小的机组和电站,可布置成横轴装置,水轮机和水泵分置电机两端。对于大容量蓄能电站,通常采用竖轴装置,水泵通过联轴器装在水轮机下面。

#### 4.3 二机可逆式

此布置方式包括一个可逆式水力机械(水泵水轮机)和一个电机(电动发电机),与常规水电站的机组布置相似。反击式水轮机如反方向旋转,可以作为扬水泵使用。应用于抽水蓄能机组的反击式水轮机有斜流式和混流式两种。斜流式可逆机组工作性能较佳,一般在水头为 35~140m 时采用;水头较高时,普遍采用混流式可逆机组。当水头大于 600m 时,要采用多级混流式可逆机组。

### 5 按布置特点分

任一抽水蓄能电站的组成都包括上、下水库和厂房,至于输水系统的具体组成建筑物则因条件不同有较大的差异。一般讲抽水蓄能电站的主要组成建筑物从上游开始依次是:上水库;进(出)水口;引水道和调压室;压力管道;厂房;尾水道和调压室;出(进)水口;下水库。

如果压力水管是直接从上水库取水,则引水隧洞、调压室都可以省掉。如果厂房布置在地下,尾水隧洞又很长时,则要设尾水调压室。按其水工建筑物与地面所处的相对位置可分为:

#### 5.1 地面式

全部建筑物布置在地面上,由于电站规模、地形地质条件的不同,其具体的工作布置各有不同。

露天式压力水管,只有在地形地质条件适宜布置明厂房、电站的引用流量不大时被采用。

#### 5.2 地下式

除上、下水库设在地面外,整个输水系统及厂房均布置在地下。蓄能电站的一个重要特点是机组防气蚀要求淹没深度大,深达 30m 甚至更大。因此只要地质条件允许,把厂房布置在地下,技术上和经济上都是比较有利的。按地下厂房在输水系统中所处位置不同可分为:首部式、中部式、尾部式三种基本类型。

将水管布置在地下,利用围岩承担一部分内水压力,可以减少钢衬的厚度,电站工作流量较大时可比明渠方案减少压力水管的根数,这样既可节省投资又可以减少输水能量损失。通常引水道(包括引水隧洞和调压室)的造价要比低压的尾水隧洞高,因此蓄能电站总体布置的趋势是倾向于缩短引水道的长度。

地下式布置要重视地质条件,一般尽可能把建筑物布置在较好的岩石中。这样做,即使输水道的长度有所增加,但能充分利用围岩的承载作用和防渗能力,对于施工和电站长期运行也是有利的。

#### 5.3 特殊布置形式

主要特点是在地下深处筑一人工地下水库。例如美国有一高水头蓄能电站采用三机式,总水头达 1005m,它的厂房在地下,输水道为压力竖井。由于水头很高、流量小,所以所需蓄能库容也很小。因而作为蓄能电站的下库,也布置在地下,由隧洞网组成。电站的出线和对外交通都采用竖井。

### 6 抽水蓄能电站的运行特点

a. 纯蓄能电站和常规水电站不同,只有水库电能而没有天然来水不蓄电能。它在白天担任



峰荷时的发电量由下式计算

$$E_T = \frac{HV_s \eta}{367.2}$$

式中  $E_T$ ——发电量, kW·h

$H$ ——抽水蓄能电站的计算水头, m

$V_s$ ——上水库的有效库容(蓄能库容),  $m^3$

$\eta$ ——电站在水轮机工况时的效率

储存在上水库的可能发电量与蓄能库容有关, 同时在很大程度上决定于水头。抽水蓄能电站的静水头由上、下水库的水位高程差决定, 在运行过程中它随上、下水库的蓄水和放水而相应地变化, 上、下水库水位一昼夜内的变化一般达到 10~30m。应该注意研究水头变化对电站运行的影响。包括机组效率和受阻容量, 对中低水头蓄能电站来说更是如此。

b. 抽水蓄能电站是电力蓄能装置, 将低谷电能转换成高峰电能。电站综合效率的重要参数, 它定义为在供给上库和从上库取出的水量相等的条件下, 水轮机工况时所生产的电能  $E_i$  与水泵工况时所消耗的电能  $E_p$  之比, 即蓄能发电量与抽水用电量之比

$$\text{综合效率} = \frac{\text{蓄能发电量}}{\text{抽水用电量}}$$

抽水蓄能电站的综合效率是变压器、水力机械与电气设备、引水道在水轮机工况和水泵工况时运行效率之乘积。这里只考虑到电站出口为止, 未考虑线路损失。在运行中, 偏离最佳效率和水头的某一变化均将降低抽水蓄能电站的最大效率。

采用大型可逆二机式机组的现代抽水蓄能电站, 其综合效率值达到 70%~75%。如英国迪诺威克抽水蓄能电站, 按抽水/发电的日循环工况运行, 平均效率已达 78%。英国的克鲁瓦强(Cruachan)蓄能电站, 机组容量 100MW, 综合效率为 75%; 德国的伦克豪森(Ronkhausen)蓄能电站, 单机容量 67MW, 综合效率 75.1%。

采用三机式时, 由于水轮机和水泵的效率较之可逆式机组高, 抽水蓄能电站的总效率达到 79%, 如卢森堡的非安登抽水蓄能电站。

c. 抽水蓄能电站的主要运行特点是机组既要作发电运行, 又要作抽水运行, 而且还可能转换频繁。这就要求它的机组、输水系统中各组成建筑物要能适应蓄能电站运行方式的要求, 作建筑物布置设计时要充分考虑水流在输水系统各建筑物中流动的双向性, 使之在两种运行方式下水流条件都比较好, 以提高电站的综合效率。

此外, 在决定下水库工作深度时, 不仅需要研究发电工况, 还应研究抽水工况。为了使蓄能电站在抽水工况能在高效情况下运行, 在转轮直径和转速一定的条件下, 水泵的计算扬程和最大扬程间有一定的关系。根据统计资料, 其关系为

$$H_p \geq 0.86H_{pmax}$$

如以水泵平均扬程作为计算扬程, 则水泵扬程的变化范围有以下限制

$$H_{pmin} \geq 0.72H_{pmax}$$

式中  $H_p$ ——水泵计算扬程

$H_{pmax}$ ——水泵最大扬程

$H_{pmin}$ ——水泵最小扬程

d. 抽水蓄能电站运行灵活、可靠。抽水蓄能机组具有许多独特的性能, 对大的负荷变化可作出快速反应, 其运行灵活性有的已超过常规水力发电机组。目前最先进的可逆式机组从开始