



抽水蓄能技术 发展与应用研究

汪顺生 编著



科学出版社

抽水蓄能技术发展与应用研究

汪顺生 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书论述抽水蓄能技术的发展过程及应用,全书内容包括:抽水蓄能电站的工作原理与工作特点、电力系统与抽水蓄能技术、站址规划、主要参数选择、水泵水轮机、电动发电机、抽水蓄能电站的水工建筑物、抽水蓄能电站的运行和经济评价。全书理论与实践相结合,内容翔实,层次分明,具有较强的实用性。

本书可供从事抽水蓄能电站规划、设计、建设、管理的工程技术人员和高等院校教师、研究生学习和参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

抽水蓄能技术发展与应用研究/汪顺生编著. —北京:科学出版社,2016. 8
ISBN 978-7-03-046811-6

I. ①抽… II. ①汪… III. ①抽水蓄能水电站-技术发展-研究
IV. ①TV743

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 309640 号

责任编辑:耿建业 陈构洪 邢宝钦 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 8 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 8 月第一次印刷 印张:17

字数:327 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

抽水蓄能技术是一种具有启动快、负荷跟踪迅速和反应快速等特点的特殊电源,它既是一个电站,又是一个电网管理的工具,它具有发电、调峰、填谷、调频、调相、旋转备用、事故备用和黑启动等多种功能,同时还有节约能源和保护环境的特点,已经成为我国电力系统的一个重要组成部分。

抽水蓄能技术利用调峰填谷性能可以降低电力系统峰谷差,提高电网运行的平稳性,有效地减少电网拉闸限电次数,减少对企业和居民等广大电力用户生产和生活的影响;抽水蓄能电站启停灵活、反应快速,具有在电力系统中担任紧急事故备用和黑启动等任务的良好动态性能,可有效提高电力系统安全稳定运行水平;抽水蓄能电站跟踪负荷迅速,能适应负荷的急剧变化,是电力系统中灵活可靠的调节频率和稳定电压的电源,可有效地保证电网运行频率、提高电压稳定性;建设适当规模的抽水蓄能电站与核电站配合运行,可解决核电站在基荷运行时的调峰问题,提高核电站的运行效益和安全性;抽水蓄能电站作为储能装置,具有转换能量快、储存规模大、转换效率高和机动灵活的调节性能,充分吸纳不稳定和不连续的风力与太阳能发电电源等清洁能源上网,提高输电线路经济性;抽水蓄能电站启停迅速、运行方式灵活,是实现高效智能电网调度的可靠保证,是加强智能电网建设的重要组成部分,迫切需要在不同电压等级、不同电网结构、发输电的各个环节配置不同调节性能、不同规模大小的抽水蓄能电站,满足经济社会发展对电力系统提出的更高要求。我国的抽水蓄能事业方兴未艾,必将在未来有更快、更好的发展。

本书由汪顺生撰写并统稿。在编写的过程中,从专业要求出发,力求加强基本理论、基本概念和基本技能等方面的阐述,同时注意反映抽水蓄能技术的新发展、新成就及其应用。本书参考和引用了陆佑楣、潘家铮主编的《抽水蓄能电站》,梅祖彦编著的《抽水蓄能发电技术》,董述春、张德旺编写的《抽水蓄能电站》,万永华主编的《抽水蓄能电站规划及运行》和张克诚编著的《抽水蓄能电站水能设计》等书以及国内外有关抽水蓄能技术的文献,书后列出了主要参考文献,对这些参考书和有关文献的作者,在此表示衷心的感谢。

华北水利水电大学高传昌教授和西安理工大学费良军教授对全书进行了系统审阅,提出了许多宝贵的修改意见,在此表达最诚挚的谢意。科学出版社为本书的

出版付出了辛勤的劳动,研究生刘东鑫、王康三、李欢欢、薛红利等参与了本书的文字图表处理等工作,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

作 者

2015 年 12 月

目 录

前言

第一章 抽水蓄能电站的基本原理与发展	1
第一节 抽水蓄能电站的基本原理及组成	1
一、什么叫抽水蓄能电站	1
二、基本原理	1
三、抽水蓄能电站组成	2
第二节 抽水蓄能电站的开发方式和分类	3
一、按上水库调节水量分类	3
二、按调节性能分类	5
三、按机组类型分类	7
四、按水头分类	11
五、按布置特点分类	11
第三节 抽水蓄能电站的工作特性	12
一、运行灵活性和可靠性	12
二、运行工况	12
三、能量转换特性	13
四、抽水蓄能电站的工作特点	15
第四节 抽水蓄能电站发展概况与趋势	15
一、我国抽水蓄能电站发展简况	15
二、世界抽水蓄能电站发展简况	19
三、抽水蓄能电站的发展趋势	21
第二章 电力系统与抽水蓄能电站	23
第一节 电力系统概述	23
一、电力系统的形成	23
二、电力系统基本参数	24
三、电力系统的优越性	25
四、电力系统容量组成	27
五、我国电力工业发展简况	28
第二节 电力负荷	30
一、什么是电力负荷	30

二、电力负荷分类	30
三、综合用电负荷	33
第三节 能源概述及各类发电厂的特点	37
一、能源概述	37
二、各类发电厂及其特点	42
第四节 电力系统运行	46
一、电力系统运行特点	46
二、电力系统运行要求	47
三、电力系统功率平衡	48
四、电力系统稳定性概述	51
第五节 抽水蓄能电站在电力系统中的作用及经济性	52
一、抽水蓄能电站在电力系统中的作用	52
二、抽水蓄能电站的经济性	55
第三章 抽水蓄能电站站址规划	58
第一节 抽水蓄能电站的建设条件	58
一、地形条件	58
二、地质条件	63
三、地理位置	64
四、水源条件	64
五、施工条件	65
六、水库淹没条件	65
七、环境影响条件	65
第二节 站址普查	66
一、站址普查的重要性	66
二、站址初选	66
三、现场查勘	67
四、普查成果	68
第三节 站址选择	68
一、站址选择的基本原则	68
二、站址选择的基本程序	70
第四节 抽水蓄能电站的建设与环境问题	72
一、抽水蓄能电站的建设对环境的影响	72
二、美化环境的措施	73
三、抽水蓄能电站的建设与地区经济发展的关系	74

第四章 抽水蓄能电站主要参数选择	75
第一节 抽水蓄能电站的主要参数	75
一、主要参数	75
二、主要参数关系分析	75
三、主要参数选择程序	78
第二节 上、下水库参数的计算与选择	81
一、水位和库容选择	81
二、选择特征水位应考虑的主要因素	82
三、上、下水库特征水位选择方法和步骤	85
四、发电工况的水头和抽水工况的扬程计算	85
第三节 输水道直径选择	86
一、概述	86
二、比较方案拟定	86
三、水头损失计算	87
四、出力和电量损失计算	89
五、方案比较	89
六、输水道直径选择方法和步骤	89
第四节 水泵水轮机额定水头选择	91
一、概述	91
二、额定水头比较方案拟定	92
三、各方案受阻出力和受阻电量计算	92
四、方案比选	93
第五节 装机容量选择	93
一、装机容量的意义及组成	93
二、装机容量选择的基本依据与主要因素分析	95
三、装机容量选择的方法和步骤	98
四、纯抽水蓄能电站的最大可能装机容量	99
五、混合式抽水蓄能电站的装机容量	103
第五章 抽水蓄能电站机组选型	105
第一节 水泵水轮机概述	105
一、抽水蓄能机组的类型及特点	105
二、组合式水泵水轮机	106
三、可逆式水泵水轮机的类型	107
四、水泵水轮机的发展趋势	114
五、水泵水轮机的制造难度	116

第二节 水泵水轮机特性	117
一、工作原理	117
二、基本参数	121
三、能量特性	131
四、效率换算	133
五、空化特性	136
六、吸出高度	139
七、压力脉动	140
八、力特性	142
第三节 水泵水轮机选型	145
一、选型原则	145
二、选型依据	146
三、选型程序	146
四、选型设计	147
五、运转特性曲线	155
六、混合式电站选型	157
第四节 电动发电机的主要参数	158
一、电动发电机的类型	158
二、电动发电机的特点	159
三、电动发电机的主要参数选择	160
第五节 电动发电机的启动与容量选择	164
一、电动发电机的结构	164
二、电动发动机的启动	170
三、可变转速电动发动机的容量选择	180
第六章 抽水蓄能电站的水工建筑物	184
第一节 抽水蓄能电站的水工建筑物及其特点	184
一、水工建筑物的组成	184
二、抽水蓄能电站的特点	184
第二节 抽水蓄能电站的布置形式	185
一、纯抽水蓄能电站的布置形式	185
二、混合式抽水蓄能电站的布置形式	186
第三节 水库及挡水、泄水建筑物	188
一、上、下水库的基本类型	188
二、挡、泄水建筑物	189
第四节 抽水蓄能电站进出水口和拦污栅	190

一、进出水口的工作特点	190
二、抽水蓄能电站进出水口的基本要求	191
三、进出水口的形式	191
四、拦污栅	194
第五节 抽水蓄能电站输水建筑物	194
一、引水道	195
二、高压管道(高压隧洞)	195
三、分岔管	197
四、调压室	202
五、尾水道	206
第六节 抽水蓄能电站厂房	207
一、厂房的类型	207
二、抽水蓄能电站地下厂房	212
三、厂房布置	218
四、厂内交通布置	221
第七章 抽水蓄能电站的运行及经济评价	222
第一节 抽水蓄能机组的工况转换与运行方式	222
一、抽水蓄能机组的运行工况及工况转换	222
二、抽水蓄能电站在电网中的运行方式	225
第二节 抽水蓄能电站的过渡过程	230
一、概述	230
二、水泵水轮机的全特性曲线	231
三、几种典型的过渡过程	234
第三节 抽水蓄能电站经济评价	238
一、经济评价的意义和内容	238
二、抽水蓄能电站的经济合理性及经济效益分析	239
三、资金的时间价值及折算公式	246
四、经济评价的动态方法	250
参考文献	259

第一章 抽水蓄能电站的基本原理与发展

第一节 抽水蓄能电站的基本原理及组成

一、什么叫抽水蓄能电站

抽水蓄能电站是水电站的另一种形式,是一种特殊形式的水电站,它由上水库、下水库、输水道、厂房及开关站等部分组成,是一种储存电的仓库^[1]。抽水蓄能电站利用可以兼具水泵和水轮机两种工作方式的抽水蓄能机组。当夜间因部分用户用电停止时,而各种大型火电、核电不能大幅度停机或少发电,电力系统出现剩余电量;此时抽水蓄能电站可以利用这些剩余电量,开动设备把低处的水抽到高处蓄存起来,等到电力系统用电高峰时,把高处的水再放下来,带动水轮发电机组发电,把电力送回电网,供给用户用电。发电后的水,仍回到低处。如此循环往复的操作运用,促使整个电网运行灵活、可靠、安全、经济。

二、基本原理

抽水蓄能电站是根据电能转换原理而工作的,如图 1-1 所示,它利用午夜系统电力负荷低谷时的多余容量和电量,通过电动机水泵将低处下水库的水抽到高处上水库中,以水为载体,将这部分低谷电能转换成水的位能储蓄起来,待到次日电力系统用电负荷回升时,再将上水库的水通过水轮发电机组放回下水库,将水的位能转换成电能送回电网,以补充不足的尖峰容量和电量,满足系统调峰需求,如此不断循环工作。这样,既避免了火电机组反复变出力运行所带来的弊端,又增加了

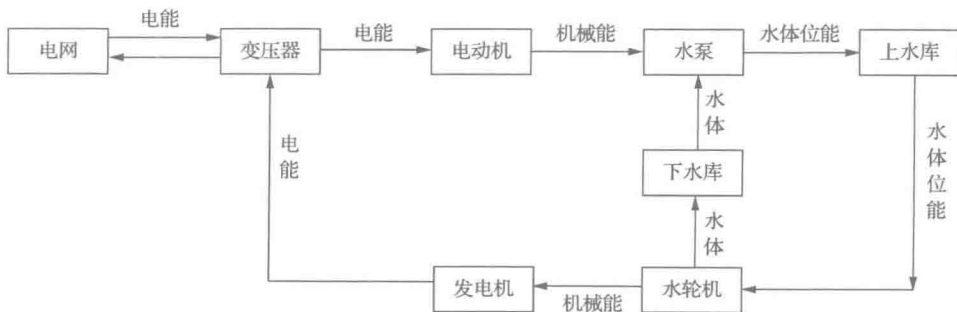


图 1-1 抽水蓄能电站能量转换过程示意图

电力系统峰荷供电能力;既解决了电力系统的调峰问题,又提高了电力系统的运行安全性和经济性。从这个意义上来说,抽水蓄能电站实际上是一个能量转换装置,它是利用水为载体,将电力系统的电能的时间上重新分配,以协调电力系统的发电出力与用电负荷在时间分配上的不一致性,从而使电力系统达到安全、经济运行。这种转换是现代电力系统不可或缺的,虽然在转换过程中不可避免地要产生能量损失,但给整个电力系统带来了许多好处。

三、抽水蓄能电站组成

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。一般来讲,抽水蓄能电站的主要组成建筑物从上游开始依次是:①上水库;②进(出)水口;③引水道和调压室;④压力管道;⑤厂房;⑥尾水道和调压室;⑦出(进)水口;⑧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,则要设尾水调压室。

(一) 上、下水库

混合式抽水蓄能电站的上水库一般为已建成的水库,下水库可能是下一级电站的水库,或为用堤坝修建起来的新水库。纯抽水蓄能电站多数是利用现有水库为下库,而在高地上或山间筑坝建成上库。

人工修筑的水库,其容量除应满足全天发电所需的水量外,另有一定的备用库容,以抵消蒸发和渗漏。据估计,大型抽水蓄能电站每年损耗水量可达 100 万~200 万 m^3 。上库的修筑工作量是巨大的,所形成的库容十分宝贵,库底及边壁都应有防渗保护。国内外现在广泛使用沥青混凝土全面铺盖,也有用混凝土板防护的,对上库原来有水源的也应视情况决定是否采取防护措施。

(二) 引水系统(高压部分)

与常规水电站一样,抽水蓄能电站引水系统的高压部分包括上库的进水口、引水隧洞、压力管道和调压室。上库的进水口在发电时是进水口,但在抽水时是出水口,故称为进出水口。为满足双向水流的要求,进出水口应按两种工况的最不利条件设计。常规水电站在进水口都装有拦污栅。在抽水蓄能电站中,因水泵工况的出水十分湍急,对拦污栅施加很大的推力和振动力,故拦污栅是进出水口设计的一个重要项目。

抽水蓄能电站引水隧洞上的分岔管在发电工况时流向是分流的,在抽水工况则是合流的,为使两个方向水流的损失都能最小,需要进行专门的试验研究。

(三) 引水系统(低压部分)

地下电站的尾水部分(低压部分)是有压的,通常也做成圆断面的隧洞。设计中要特别注意过渡过程中可能出现的负压,如隧洞较长,一般需在机组下游修建尾水调压井。因引水系统高压部分的造价比低压部分高,故现在趋向于将厂房向上游移动,也就是尾水隧洞将会更长,产生负压的可能性也就更大。

(四) 电站厂房

中低水头抽水蓄能电站或为坝后式或为引水式,都可使用地面厂房。水轮机工况的排水和水泵工况的吸水都直接连通到尾水渠。由于水泵的空化性能比水轮机要差,机组中心必须安放在比常规水轮机更低的高程。高水头抽水蓄能电站几乎没有例外都采用地下厂房,不少中低水头的抽水蓄能电站也使用地下厂房。现在高水头抽水蓄能电站机组中心已达尾水面以下 70~80m,厂房内所有管道都要承受很大的压力,厂房本身的防渗漏问题也需特别设计。多数的地下电站都将变压器安装在地下,故需专门开挖一个洞室放置变压器。如电站需要修建尾水调压井,则常将几台机组的尾水闸门连通,形成第三个洞室。

由于既接近负荷中心又具有很高水头的站址不好寻找,选址的一个出路就是向地下发展。美国即将建造的两座大型抽水蓄能电站都利用地面上的小湖为上库,将厂房放到废弃的矿井下面,将已有坑道扩大而形成下水库,压力隧洞和各种通道都是垂直的^[2]。

第二节 抽水蓄能电站的开发方式和分类

一、按上水库调节水量分类

(一) 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,抽水蓄能电站基本不消耗水量,厂房内机组全部是抽水蓄能机组,蓄能发电所需全部调节水量在上、下水库中循环使用。电站本身不直接生产电能,只改变电力系统电能在时间上的分配,如图 1-2 所示。

纯抽水蓄能电站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。



图 1-2 纯抽水蓄能电站示意图

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。

(二) 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。

混合式抽水蓄能电站整体布置与一般蓄水式电站类似，如图 1-3 所示，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。抽水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。密云电站和潘家口电站都是混合式抽水蓄能电站。它们共同的特点是上水库都是大型综合利用水库，原来水

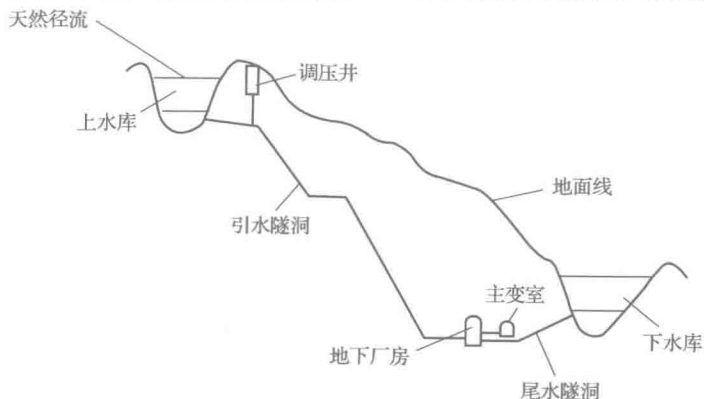


图 1-3 混合式抽水蓄能电站示意图

电站的运行方式常是“以水定电”，不能满足电力系统的调峰需要，改装可逆式机组后，便可改变电站的运行方式，既满足了综合利用部门的用水要求，又提高了电站的调峰能力。

混合式抽水蓄能电站一般是因为该常规水电站的调节水库承担综合利用任务，例如，除了发电以外，尚有灌溉、航运等任务，发电运行方式受到一定的限制。为了充分发挥电站的调峰作用，加装抽水蓄能机组，将其改建成混合式抽水蓄能电站，如岗南混合式抽水蓄能电站。另外，当天然径流年内分配不均匀性很大，水库调节容量有限时，为了充分利用丰水期径流发电，加装抽水蓄能机组，丰水期常规和蓄能机组同时发电，增加季节性电能，枯水期利用蓄能机组抽水发电，提高枯水期供电能力，如潘家口混合式抽水蓄能电站。

（三）非循环式抽水蓄能电站

当上水库位于两条河流的分水岭时，分水岭两边河谷具有不同的高差，且高差小的一边有足够的天然径流来源。可在高差小的一边建下水库或取水口，设置抽水站，在分水岭建上水库，同时在另一边建常规水电站，将下水库的水抽到上水库，再通过常规水电站放到其下游发电，其具体布置如图 1-4 所示。这样从下水库抽上来的水量不再返回下水库，而是流到另一条相邻河流。这是跨流域引水发电的一种特殊方式。由于抽水扬程小于发电水头，所以也是一种有利的开发方式。例如，奥地利赖斯采克抽水蓄能电站的最大抽水扬程为 1070m，最大发电水头为 1773m，最大抽水功率为 18MW，最大发电出力为 67MW。

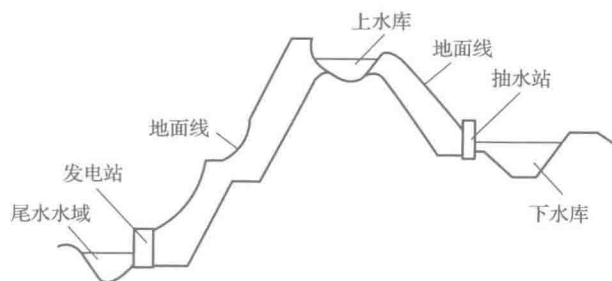


图 1-4 非循环式抽水蓄能电站示意图

二、按调节性能分类

（一）日调节抽水蓄能电站

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，所需的蓄水库容取决于每日调峰时的发电量。

日调节抽水蓄能电站承担调节一昼夜电力负荷不均匀任务,其上、下水库水位变化的循环周期为一日。电力系统日负荷曲线是变化的,如图 1-5(a)所示,夜间负荷减少,要求电力系统减少电力供应,迫使火电厂降低出力运行,这对火电厂运行是不利的。日调节抽水蓄能电站此时抽水,增加电力需求,也就是提高火电厂的低谷负载率,避免压负荷运行,改善火电厂的运行条件。次日负荷需求增大时,日调节抽水蓄能电站改为发电运行,又可增加电力系统负荷高峰时的供电能力。

(二) 周调节抽水蓄能电站

它以一周为运行周期,每日仍抽水和发电各一次,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。所需库容较日调节抽水蓄能电站的大。国外周末工厂多数停工,这种抽水蓄能电站较多。

周调节抽水蓄能电站承担调节一周内电力负荷不均匀任务,其上、下水库水位变化的循环周期为一周的抽水蓄能电站。每日仍抽水和发电一次,只是周末负荷低落时抽水时间加长,储蓄更多电能,以增加下周工作日电力供电能力,如图 1-5(b)所示^[3]。

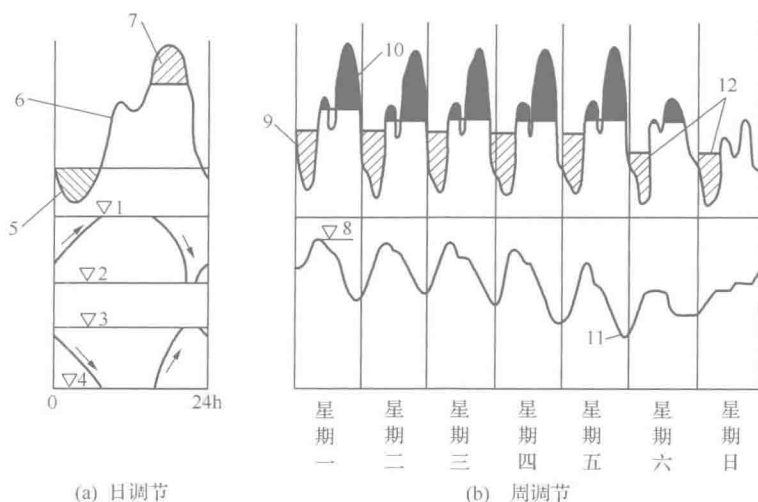


图 1-5 日、周调节抽水蓄能电站运行方式示意图

1-上水库正常蓄水位; 2-上水库死水位; 3-下水库正常蓄水位; 4-下水库死水位; 5-低谷抽水; 6-日负荷曲线; 7-高峰发电; 8-上水库正常蓄水位; 9-工作日低谷抽水; 10-工作日高峰发电; 11-上水库死水位; 12-假日集中抽水

(三) 季调节抽水蓄能电站

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。季调节抽水蓄能电站承担调节年内丰、枯季节之间电力负荷不均匀任务,其上、下水库水位变化的循环周期为一年,但主要是抽蓄汛期水量的抽水蓄能电站。此类电站要求上水库调节库容必须能够调节枯水季节发电所需水量,因而所需库容较大。通常可不建下水库,只要具备取水条件(同时承担日调节任务者除外)。此类电站在常规水电站较多且调节性能较差,季节性电能较多,或弃水电量较大的情况下建设较为有利。

三、按机组类型分类

(一) 四机分置式

抽水蓄能电站机组由电动机、水泵、水轮机、发电机组成,抽水机组与发电机组分开布置。这是早期发展的纯抽水蓄能电站所采用的机组组合形式。由于厂房布置复杂,工程投资大,逐步被淘汰。此方式因水泵和水轮机分开布置,便于使水泵、水轮机都按最佳效率运行。例如,奥地利赖斯采克抽水蓄能电站,采用的就是四机式布置,最大发电水头为 1773m,最大扬程为 1070m,为年调节电站,发电最大功率为 67MW,抽水最大功率为 18MW,首台机组于 1957 年建成投产。

(二) 三机串联式

其电动机和发电机结合在一个电机之内,即发电机兼用于电动机。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。对于大容量抽水蓄能电站,通常采用立轴装置,水泵通过联轴器装在水轮机下面,见图 1-6。在发电工况运行时,可通过联轴器脱开水泵,避免其空转损失及为此而放空水泵过水部分积水的必要性。

水轮机和水泵通常采用同向旋转,可使切换到抽水工况时水泵启动便捷,而改变为发电工况时水轮机也能很快达到正常转速。机组工况的转换通过闸门的相应开闭进行。

与两机式比较,三机式布置由于水泵和水轮机可按各自的运行工况进行设计,可以达到很高的效率。但三机式机轴长,需要厂房高度较大,进出水需要两套设备,工程投资要贵很多。