

日本抽水蓄能电站技术的新进展

肖贡元

(上海勘测设计研究院,上海 200434)

摘要:日本抽水蓄能电站是日本电力的重要组成部分。日本的抽水蓄能电站装机容量在亚洲国家中居首位,装机容量在 1000 MW 以上的抽水蓄能电站和 1000 MW 以下的抽水蓄能电站在规划和大坝、下水库等、地下厂房的建设和施工过程中采用了一些新技术和新工艺,提高了大水库的库容,提高了电站的发电能力;提高了大水库的水力发电,用于变频机组;提高了工程建设的经济效益。

关键词:抽水蓄能电站;工程规划;水力发电;下水库;地下厂房;日本

中图分类号:TM743 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7771(2003)01-0061-005

日本是世界上的经济大国,也是电力消费大国。日本的电源构成以核电为首位,其次依次为燃煤火电、LNG 火电和常规火电。日本的常规水电开发充分,但水电资源总量不多,在电源构成中的比重不大。常规水电站除了常规水电站外,优先用于峰荷发电;许多 LNG 火电站和燃煤火电站也作为日开轮机组运行。为了解决调峰问题,已经建设了大量抽水蓄能电站。^[1] 日本共有 43 座抽水蓄能电站,总装机容量 24 705 MW,居世界首位。抽水蓄能电站在电网中的作用首先是调峰填谷,降低负荷系数;同时用于变频、稳定电网电压和调频。在日本,抽水蓄能电站是公差的主要调峰手段。日本抽水蓄能电站平均年发电运行小时数只有 620 h,可见其主要用于峰荷发电和解决电压的问题。尽管抽水蓄能电站的建设成本不低,但与其调峰电价相比,还是有竞争力的。^[2] 日本近年来还在继续建设抽水蓄能电站^[3]。

为了适应新建抽水蓄能电站在电力市场的竞争力,日本抽水蓄能电站的建设采取了一些应对措施,新建抽水蓄能电站应充分发挥抽水蓄能电站的优势。从规划和设计来说,除了担负调峰填谷的状态功能外,更应着力于发挥抽水蓄能电站的静态功能。机组要有更宽的对负荷变化的适应能力,适应频繁的工况变化,水库库容要更大,更长时间运行能力的要求。为了降低工程投资,从站址选择上要选水头更高的站址,安装大容量机组采用最新水平的超高水头、大容量的抽水蓄能机组,减小地下厂房的规模。同时还要尽可能减少对环境的干扰,降低工程造价。

总的投资。这些措施中很重要的一条是发展高水头和大容量的抽水蓄能机组,加大电站的规模^[4]。目前正在建设或建设的抽水蓄能电站中,有一些超大规模的电站。本稿主要介绍的神流川(Kannagawa)抽水蓄能电站和金居原(Kaneihara)抽水蓄能电站可以作为其中的典型^[5]。这两座电站在水库规划、水工建筑设计和工程施工中采用了一些新的思想和新的技术。

1 神流川抽水蓄能电站

1.1 神流川抽水蓄能电站

神流川抽水蓄能电站由日本东京电力公司开发,位于群馬县与长野县交界处。上水库位于长野县利根川水系相模川上,下水库位于群馬县利根川水系神流川上,地下厂房在群馬县境内。该电站装机容量为 2 700 MW,是目前世界上装机容量最大的抽水蓄能电站。地下厂房分两处,1 号厂房安装 4 台机组,容量共 1 800 MW;2 号厂房安装 2 台机组,容量共 900 MW。两处厂房有共同的水系,但共用上、下水库,与我国大型抽水蓄能电站相似。电站有发电水头 653 m,最大发电水头 695 m,最大抽水扬程 728 m,属 700 m 水头段机组。单机额定容量 450 MW,其额定容量与发电水头的乘积超过了日本目前已部分投入运行的新野川抽水蓄能电站机组,属世界上最大的抽水蓄能机组。该电站目前正在建设中,到 2001 年 11 月工程已完成 61%。

1.2 金居原抽水蓄能电站

金居原抽水蓄能电站由日本东京电力公司开发,位于长野县与岐阜县交界处。上水库位于岐阜县

肖贡元,男,高级工程师,从事水利水电工程规划、设计、施工、管理、科研等工作。

木曾川水系八草川上,下水库位于滋贺县淀川水系须亦川上,地下厂房在滋贺县境内.该电站装机容量2280 MW,在世界上也名列前茅.电站的6台机组安装在一个地下厂房内,是世界上同一地下厂房内装机容量最多的抽水蓄能电站.电站有效发电水头514.8 m,最大发电水头535.2 m,最大抽水扬程约560 m.由于该电站水头变幅高达150 m,计划有部分机组要采用可变速机组.该电站的前期准备工程如对外交通道路的施工已在进行中,但主体工程尚未开工.

2 水库动能规划和大坝

2.1 增大水库调节库容与电站的事故备用能力

日本纯抽水蓄能电站上下水库的有效发电库容(以满出力发电小时数计)比我国的抽水蓄能电站用得大.这一方面是为了适应周调节的要求.通常情况下,发电只在星期一至星期五进行,而抽水则每天都要进行,因此水库的库容要大于日循环所需库容.另一方面,为了加强抽水蓄能电站在市场上的竞争能力,抽水蓄能电站应有更多的事事故备用能力.水库有效库容提供的满出力发电小时数,神流川抽水蓄能电站为7 h,而金居原抽水蓄能电站为9 h.日本在20世纪70年代规划设计的一批抽水蓄能电站,水库蓄能量的满出力发电小时数多在6 h左右,最多到7 h(新高瀨川抽水蓄能电站),少的只有4 h(大平抽水蓄能电站).与这些抽水蓄能电站的平均水平相比,这两座电站的满出力发电小时数要高一些.

2.2 加大水库的水位变幅,选用可变速机组

为了降低工程投资,提高经济优势,减轻对环境的影响,在规划抽水蓄能电站的水库时,要求在满足电网需求的前提下,减小水库的总库容和占地面积.高水头的站址自然是优先考虑的.其次是加大水库的水位变幅,增加水库的工作水深,以增加水库的调节库容.这样一来,水泵水轮机的工作水头比(H_{pmax}/H_{tmin})自然要变大,可能超出常规的范围,必须选用可变速机组.

神流川抽水蓄能电站最大发电水头695 m,接近单级可逆式水泵水轮机制造能力的上限,符合高水头站址的标准.该电站水库水位变幅并不大.上水库坝高136 m,水位变幅27 m;下水库坝高120 m,水位变幅30 m;水头总变幅57 m. $H_{pmax}/H_{tmin} < 1.15$,在一般单转速水泵水轮机的水头(扬程)变幅范围之内.该电站采用的是单转速机组.金居原抽水蓄能电站最大发电水头为535.2 m,也属于高水头电站.而该电站在加大水库的水位变幅、增加水库的工作水深方面最为典型.上水库水位变幅95 m,下水库水位

变幅55 m,合计150 m. H_{pmax}/H_{tmin} 接近1.45,远超过一般单转速水泵水轮机的水头(扬程)变幅范围.因此该电站计划有部分机组要采用可变速机组,可以任意调整机组转速,以保证能在不同的水头(扬程)段高效率和安全地运行.事实上,日本可变速抽水蓄能机组发展很快,自大河内(Okawachi)抽水蓄能电站采用这种机组以来,已有数座新建及扩建的抽水蓄能电站选用了可变速机组.

2.3 坝型选择与库容的综合考虑

由于环境保护的要求,不允许过大的水库淹没,两座电站的上下水库都建在高山环抱的山谷地带,优点是最高库水位远低于库周山岭的地下水位,除坝基外,库盆没有采取专门的防渗措施.但这样的地形条件带来的缺点是为了获得必要的库容必须修建高坝.为避免土石坝上游坝体侵占库容,如地质条件允许,则尽可能建混凝土坝.

神流川抽水蓄能电站下水库坝和金居原抽水蓄能电站上水库坝都采用了混凝土重力坝.正在建造的神流川下水库大坝采用日本的碾压混凝土筑坝工法(RCD),碾压混凝土水泥用量 $110 \sim 100 \text{ kg/m}^3$,至2001年11月,大坝混凝土浇筑已经完成.神流川抽水蓄能电站上水库坝和金居原抽水蓄能电站下水库坝的地质条件不适合建混凝土坝,都采用粘土心墙堆石坝.日本迄今为止尚未真正建造过混凝土面板堆石坝.日本是多地震国家,土石坝的坝坡放得较缓.为适应抽水蓄能电站的工作条件,上游坝坡则更缓.神流川抽水蓄能电站上水库坝的上下游坝坡分别为1:2.7和1:2.0,金居原抽水蓄能电站下水库坝的上下游坝坡分别为1:2.9和1:2.1.

3 输水系统

3.1 输水道的布置与最大流速

神流川抽水蓄能电站的输水道总长约6350 m,在世界上的抽水蓄能电站中算是相当长的.它的水头也很高,有效发电水头653 m, $L/H = 9.7$,尚在通常认为较好的 $L/H < 10$ 的范围内.输水道分成2组,分别对应2个地下厂房.其中1号输水道连接4台机组,上游引水隧洞长2445 m,内径8.2 m,钢筋混凝土衬砌.经上调压井后分为2条压力钢管.压力钢管主管长约1300 m,内径4.6 m,其中斜井段长约960 m,倾角 48° .在下平段作第2次分岔,分成2条内径为2.3 m的支管,各长约100 m.尾水道依次由4条合为2条,再经尾水调压井后合为1条,内径为4.1~8.2 m,尾水隧洞总长约2300 m,全部用钢筋混凝土衬砌.2号输水道连接2台机组,引、尾水隧洞主洞内径均为6.1 m,在上调压井和尾水调压井处不

分岔,其余与1号输水道完全相同。

金居原抽水蓄能电站的枢纽布置比神流川电站要紧凑,输水道总长约2600 m, $L/H=5.1$ 。采用1洞3机,引水和尾水主隧洞各2条。地下厂房基本上是首部开发的布置,从上进出水口至厂房的2条上游输水道仅长910 m和920 m。不需要设上游调压井,上游闸门井后的2条压力钢管长740 m和710 m,内径5.7 m,倾角分别为53°和57°。在厂房前60 m处各分岔2次后分别与6台机组相连,分岔后的支管进球阀前内径2.4 m,6条内径4.2 m的尾水支管经2个尾水调压井后合为2条内径7.2 m的钢筋混凝土衬砌的尾水主隧洞。尾水道总长分别为1600 m和1610 m。

这两座抽水蓄能电站压力钢管主管内的最大流速,在通过最大发电流量时均超过10 m/s,基本上是日本抽水蓄能电站的一般做法。该流速比我国大型抽水蓄能电站压力钢管的设计最大流速高。流速高则水头损失大,对抽水蓄能电站来说,最终要用增加抽水电量也即抽水电费来补偿。欧美和日本的抽水电价相对便宜一些,在经济直径计算时往往选择较小的直径,宁可水头损失大一些。我国目前情况与他们不同,压力钢管内的最大流速一般只有6~8 m/s,通过相同流量时管径要大一些。其实对某些输水道不长、水头损失总量不大的工程,适当提高输水道内的最大流速以减少基本建设的一次投资、减小压力钢管的制作难度,可能是更好的方案。

3.2 压力钢管的新水平

两座抽水蓄能电站压力钢管的 HD 参数均甚高。神流川电站压力钢管下平段最大静水压力8002 kPa,动水压力超过9807 kPa, HD 超过46000 kN/m。金居原电站虽然承受水压要低一些(压力钢管下平段最大静水压力6365 kPa),但是管径为5.7 m,以动水压力计算的 HD 值与神流川电站也相差无几。神流川电站的压力钢管已采用了HT100级的高强钢板。将该等级的钢板用于压力钢管,在日本是首次。金居原电站的压力钢管计划也要采用HT100级的高强钢板,将是日本压力钢管使用该等级钢板的第2个工程。

神流川抽水蓄能电站压力钢管的斜井段长约1000 m,倾角48°,围岩地质条件相对软弱,为了安全和节约投资,开挖施工使用了直径为6.6 m的全断面隧洞掘进机(TBM)。在如此陡倾角、大直径的斜井开挖时使用TBM,据称在日本是首次,在世界上也没有先例。金居原抽水蓄能电站的压力斜井虽然比神流川电站斜井短一些,可是直径更大,倾角也更陡。按现在的计划,斜井施工不使用TBM。但该电站的压力斜井的施工支洞,以及尾水隧洞、进厂交通洞

和出线电缆洞计划使用TBM开挖。

3.3 尾水隧洞

两座抽水蓄能电站的尾水隧洞都很长,而且由于机组单机容量大、转速高, H_s 绝对值也很大(神流川 $H_s=-104$ m,金居原 $H_s=-95$ m),所以两座电站的尾水调压井的规模都很大。神流川电站1号输水道的尾水调压井高148 m(从尾水隧洞中心线起算,下同),为带上室的阻抗式,井身内径10 m。金居原电站由于下水库的水位变幅大,原设计尾水调压井高186 m,带有上室,井身为内长轴15 m、短轴10 m的椭圆形,便于3条尾水支洞同时进入井内。

近年来,为了减少土建工程量、降低工程投资,日本抽水蓄能工程界正在探索高水头抽水蓄能电站长尾水隧洞取消调压井的可能性,进行了相应的试验研究。有一座设计中的抽水蓄能电站尾水洞长近900 m,经研究可以取消尾水调压井。在研究中他们提出了一个尾水隧洞时间参数 T_{ws} (单位s),表示尾水隧洞内水力过渡过程压力变化相对于 H_s 值的比例,即:

$$T_{ws} = LV/[g(-H_s)]$$

式中: L 为尾水隧洞长度,m; V 为尾水隧洞内平均流速,m/s; g 为重力加速度,m/s²; $-H_s$ 为最小淹没深度,m。

根据多座抽水蓄能电站的设计经验,可以取消尾水调压井的 T_{ws} 不能大于6 s,但如果 T_{ws} 大于4 s就须进行详细研究^[4]。本文介绍的这两座电站的尾水隧洞太长,按工程数据计算,神流川电站1号输水道 $T_{ws}=14.3$ s,2号输水道 $T_{ws}=12.9$ s,金居原电站 $T_{ws}=11.2$ s,均远大于6 s的限值。故两座抽水蓄能电站设置尾水调压井是必须的。

4 地下厂房

4.1 地下厂房的布置特点

由于两座抽水蓄能电站的水泵水轮机要求的最小淹没深度都非常大,而地质条件又允许,采用地下式厂房是必然的选择。

在输水系统部分已经介绍,神流川抽水蓄能电站的地下厂房分为2处。1号地下厂房安装4台机组,厂房尺寸为长214.7 m,宽34.0 m,高55.3 m;2号地下厂房安装2台机组,厂房长139.0 m,宽度和高度与1号地下厂房相同。之所以将地下厂房分2处布置,据说主要是由于地质条件的原因。2处地下厂房加在一起,共长约350 m,分2处布置也为加快施工进度创造了条件。金居原电站的地下厂房安装全部6台机组,厂房尺寸长269.9 m(其中主厂房段长197.5 m),宽25 m,高48.3 m。

与我国已经建设的大型抽水蓄能电站相比,这两座电站的地下厂房除了规模大之外,还有一些特点.这两座电站的地下厂房在布置上都是把主变压器放在主厂房洞的两端,主副厂房和主变洞合为一个洞室.副厂房也不是集中布置在主厂房的一端,而是在主厂房内分散布置.这样的布置方式与我国抽水蓄能电站通常的布置是不同的.但在日本,以前就有一些抽水蓄能电站的地下厂房采用这种布置方式.另外,神流川电站的1号厂房和金居原电站的厂房都把安装场布置在厂房的中部而不是在厂房的一端(神流川电站2号厂房因为只有2台机组,安装场是布置在一端的).安装场放在地下厂房的中部,在日本是常用的做法,而我国已建大型抽水蓄能电站仅十三陵的地下厂房是这样布置的.日本和中国抽水蓄能电站地下厂房布置方式的不同,除了各自的习惯做法外,从水工结构的观点来说,可能主要还是考虑到地质条件对洞室围岩稳定的影响.日本抽水蓄能电站地下厂房的地质条件多数都不好,采用一个长的大洞室,比起用2个相互平行、间距又不可能很远的大洞室来,围岩的整体稳定性自然要更好一些.同样,安装场放在地下厂房中部比起放在端部来,可以减少洞室上下游高边墙连续长度,对增加高边墙的稳定性的也是有利的.

4.2 地下厂房支护方式与施工技术的发展

与日本早期的抽水蓄能电站地下厂房相比,神流川电站和金居原电站地下厂房结构的明显进步在于厂房洞室的支护方式.由于围岩条件不好,以往日本抽水蓄能电站地下厂房基本上都是全钢筋混凝土衬砌,或者至少顶拱是钢筋混凝土衬砌的.而这两座电站的地下厂房洞室支护已完全改变了以前的常规做法.神流川电站地下厂房尽管跨度已达到34m,其顶拱和边墙均采用锚杆喷混凝土加系统的预应力锚索支护.预应力锚索为1000kN等级,长度一般为15m,围岩好的地方也有的长10m,间距 $3\text{m}\times 3\text{m}$;系统锚杆长5m.金居原电站地下厂房跨度25m,设计也是对顶拱和边墙采用喷锚支护.顶拱喷混凝土厚32cm,边墙喷混凝土厚24cm,也要加系统的预应力锚索或锚杆.

神流川电站的地下厂房洞室已于2001年10月完成开挖.34m的跨度对抽水蓄能电站的厂房是比较少见的.为了确保施工安全,开挖的程序上有些新意.顶拱先开挖中导洞,导洞顶拱支护好以后再向两侧扩挖.扩挖时每侧的岩体等分为若干区段,每段在洞轴线方向的长度为15m左右.同侧的各区段采用“跳仓”式的开挖,即隔一段挖一段,挖完一段随即支护好;而两侧的先开挖区段相互错开,以减少顶拱支

护前的自由跨度.待整个顶拱的先开挖区段支护好后,顺序开挖留下的区段.顶拱开挖支护完毕后再用类似的方法逐层下扩.该厂房洞室开挖时采用了观测施工管理系统,即综合了勘察、设计、施工和监测功能的一体化信息系统,对开挖区域进行了连续监测.围绕厂房洞室建立了约1600个测点,不断地监测围岩的状况.通过计算机系统对观测数据高速处理,分析围岩由于开挖而产生的应力变形的变化,并将分析结果反馈给后续开挖过程的设计,以促进洞室的开挖,做到安全和经济.

5 减轻对环境的不利影响

重视保护环境,减轻工程对环境的不利影响,已成为工程设计和施工必须做到的重要方面.作为发达国家的日本,更是如此.两座电站在环境保护方面也有一些新的理念.

a. 不改变河水的流向.如前所述,神流川电站上水库位于信浓川水系,该水系流入日本海;而下水库所在的利根川水系则流入太平洋.上水库集水面积 6.2km^2 .尽管面积不大,为了使这块集水面积上的径流不致改变其归属,从而不改变下游的生态环境,上水库集水面积的产水未被截留,而是通过导流洞和放水设施如数排向下游.这是考虑环境效益重于经济效益的实例.以前,通过跨流域调水来增大抽水蓄能电站的经济效益,曾是抽水蓄能电站选点规划时要考虑的因素之一.在环境保护日益重要的今天,规划的观念也要更新.

b. 不破坏地面自然景观.除了大坝和水库以外,所有的设施都尽可能设置在地下.除了采用地下输水系统和地下厂房外,这两座超大型抽水蓄能电站的站内交通道路都大量地采用了隧洞的形式.神流川电站的对外交通道路从位于下水库左岸的进厂交通洞洞口跨过水库库尾,再沿下水库右岸经大坝右坝头直至下游与已有公路连接,长度超过5km,大部分采用隧洞.金居原电站下库区从大坝下游通向库尾地面开关站和进厂交通洞口的道路以及对外交通道路改线段采用隧洞共长3.42km,约占这些道路总长度的50%.此外,为了少破坏地面植被,筑坝材料尽可能在库内淹没区开挖.库外料场和弃渣区均精心修建水土保持设施,重新种植当地的植物,以恢复原有的自然景观.

6 结 语

为了增强抽水蓄能电站在电力市场的竞争力,日本抽水蓄能电站的建设有针对性地采取了一些应对措施,并已在新建的抽水蓄能电站中实施,以充分

发挥抽水蓄能电站的优势.日本抽水蓄能电站建设技术也在这个过程中得到新的发展.限于笔者所能获得的资料,本文仅介绍了两座正在建设的超大型抽水蓄能电站规划和土建方面的一些新的技术进展.值得指出的是,由于近年来日本经济发展持续低迷,电力需求增长缓慢,对新电源点包括新抽水蓄能电站的建设速度也有明显的影响.例如神流川抽水蓄能电站虽然地下厂房已经开挖完毕,但计划要到2005年才发电;金居原抽水蓄能电站的建设机构早已成立并运作,但至今主体工程尚未开工.尽管如此,日本从20世纪90年代以来抽水蓄能电站建设的新理念和新技术,还是值得我们研究和借鉴的.

参考文献:

[1] Yasuda Masashi. Japan's experience in pumped Storage[A]. In: The World Bank and Jiangsu Provincial Electric Power Company. Proceeding of Pumped Storage International Workshop[C]. Nanjing, China, 2000,11(5):1~3.

[2] Yasuda Masashi. Commercial arrangements of pumped storage development in Japan[A]. In: The World Bank and Jiangsu Provincial Electric Power Company. Proceeding of Pumped Storage International Workshop[C]. Nanjing, China, 2000,11(5):2~10.

[3] Yasuda Masashi. Optimization of pumped storage development [A]. In: The World Bank and Jiangsu Provincial Electric Power Company. Proceeding of Pumped Storage International Workshop[C]. Nanjing, China, 2000,11(9):2~4.

[4] Kaneo Sugishita et al. Experimental study to eliminate a surge chamber from long tailrace tunnels of high head pumped storage

power plants[A]. In: The World Bank and Jiangsu Provincial Electric Power Company. Proceeding of Pumped Storage International Workshop[C]. Nanjing, China, 2000,11(9):555~557.

(收稿日期:2002-07-08 编辑:傅伟群)

(上接第57页)

70 kPa,满足了设计要求.

b. 真空预压过程中的真空度保持在85 kPa以上,有效应力达到77 kPa,强度增长约17.5 kPa,平均固结度达到83.5%.

c. 现场静力触探及十字板试验结果表明,加固后锥尖阻力大幅度提高,十字板强度达到33.4 kPa.地基土的含水量、孔隙比及压缩系数都有很大降低,压缩模量增加了58%.

d. 本次采用真空预压加固大面积浅层软弱地基,有着良好的技术经济性,可为其他类似工程提供借鉴.

参考文献:

[1] 黄廷学.广东省珠海发电厂软基真空预压联合堆载加固施工[J].中国港湾建设,1999(1):13~17.

[2] 王希鸿,苗中海.真空联合堆载预压法在珠海发电厂超软基加固工程中的应用[J].港口工程,1998(5):29~33.

[3] 唐明.真空联合堆载预压加固软土地基的理论与实践[J].江西水利科技,1998,24(1):46~48.

[4] 张威琪.关于地基沉降计算方法的探讨[J].低温建筑技术,2000(2):49~50.

(收稿日期:2002-04-01 编辑:马敏峰)

·简讯·

“地下水渗流数字化动态可视系统”通过专家鉴定

江苏省农业科学院原子能研究所主持完成的“地下水渗流数字化动态可视系统”在2002年12月21日通过了江苏省科学技术厅组织的鉴定.鉴定认为:①“地下水渗流数字化动态可视系统”首次引入高精密的航空定向器,使地下水流速定向的测量精度提高了一个数量级,并且实现了地理磁偏角的随时校正;还可以以建筑物的方位为零点,进行相对位置的测量,使测量更加准确可靠.②“地下水渗流数字化动态可视系统”是集航空定向技术、压力传感技术、核探测技术、数字采集与处理技术、水文地质测量和多媒体技术的多学科与多专业相互融合的成果,具有技术上的先进性和应用上的广泛性.③在地下水渗流测量中,首次提出了渗流“能量测量法”.在测点上,同时动态地显示出地下水渗流的位能、压能、动能、容重等物理量的消长量值.④开创性地将这一技术引入到地铁、公路桥基和高层建筑等水文地质勘测中,并成功地应用于32项各类重大水文地质工程,创造了巨大的社会效益,为我国测井技术的理论研究与水平跨入国际先进行列,在该领域提高我国的国际竞争力和科技实力做出了贡献.⑤“地下水渗流数字化动态可视系统”是一项创新能力和市场应用价值都很高的科技成果,拥有自己的知识产权,整体技术达到国际先进水平,其中“智能化地下水动态参数测量仪”达到国际领先水平.

(杜国平供稿)