

国内大型抽水蓄能电站水轮机选型研究

邓小华

(中电建水电开发集团有限公司,四川成都 610041)

摘要:抽水蓄能电站既是一座电站,更是一个电网管理工具,具有调峰、填谷、调频、调相、储能、备用等多种功能。水轮机的选型是抽水蓄能电站建设至关重要的一项工作,其成功与否直接关系到电站能否有效发挥在电网中的巨大作用。本文重点论述了大型抽水蓄能电站水轮机选型的要点,系统地对大型抽水蓄能电站水轮机选型的原则、单机容量的选择和主要特征参数的选择等进行了深入研究,具有较强的实用性和参考价值。

关键词:抽水蓄能电站;电网管理工具;水轮机;选型

中图分类号:TV743;TK7;A715

文献标志码: B

文章编号:1001-2184(2023)05-0078-05

Study on the Selection of Hydraulic Turbine for Domestic Large-scale Pumped Storage Power Stations

DENG Xiaohua

(PowerChina Hydropower Development Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610041)

Abstract: A pumped storage power station is not only a power station, but also a power grid management tool, with peak regulation, valley filling, frequency regulation, phase regulation, energy storage, backup and other functions. The selection of hydraulic turbine is a very important work in the construction of a pumped storage power station, and its success is directly related to whether the power station can effectively play a huge role in the power grid. This paper focuses on the key points of turbine selection in large-scale pumped storage power stations, and systematically studies the principle of turbine selection, single capacity selection and the selection of main characteristic parameters, etc. which has strong practicability and reference value.

Key words: Pumped storage power station; Grid management tool; Hydraulic turbine; Type selection

1 国内大型抽水蓄能电站发展状况

由于光伏和风电等新能源波动性和随机性大,不利于电网系统的稳定,需要规模足够大的储能电源来保持和调节系统稳定,大型抽水蓄能电站是最佳选择。

抽水蓄能电站建设在我国起步较晚,首台抽蓄机组 1968 年投入运行,至今已有五十余年。20 世纪 90 年代,我国抽水蓄能电站建设才逐步进入高速发展期,进入 21 世纪以后,发展更快^[1],截至 2023 年 3 月底,全国已建成抽水蓄能电站总装机容量达到 4 729 万 kW,核准在建抽水蓄能电站总装机容量达到 1.32 亿 kW。“十四五”以来,核准的抽水蓄能电站达到 68 座,总装机容量达到 9 399 万 kW^[2]。

收稿日期:2023-08-21

2 大型抽水蓄能电站机组的特点

抽水蓄能电站机组根据水轮机和发电机的布置型式不同分为组合式和可逆式,组合式又分为四机式和三机式,可逆式机组(也称为两机式机组)又分为混流式(单级或多级)、轴流式、斜流式和贯流式。四机式机组是最早使用的抽水蓄能机组,由单独的抽水机和发电机组合而成,三机式机组是将一台水泵和一台水轮机分别连接在可以兼作电动机和发电机的电动发电机的一端或两端。两机式机组是由可逆向旋转的水轮机和可以兼作电动机和发电机的电动发电机构成,机组正向旋转发电,逆向旋转抽水,也称为可逆式水泵水轮发电机组。

四机式机组两套设备完全分开设置,机组和附属设备数量多、运行维护成本高、工作量大。三机式机组造价高,水泵运行时需要压缩空气压低

水轮机尾水管水位,增加运行维护难度和土建成本。可逆式水泵水轮机组结构简单、尺寸小,土建工程量小、电站造价低,是当今国内外抽水蓄能电站普遍采用的机组型式。

近年来,随着科学技术的进步,先进的工业设计手段日趋成熟,新工艺新材料的广泛应用,使可逆式水泵水轮机的设计制造技术取得较大发展。

2.1 高水头化

20世纪70年代以前,可逆式水泵水轮机(单级混流式)最高扬程未超过400.0 m;1973年日本沼原抽水蓄能电站最高扬程突破520.0 m;80年代初巴吉纳·巴斯塔抽蓄电站最高水头突破600.0 m,水泵最高扬程突破620.0 m;1994年,保加利亚茶拉抽蓄电站最高水头突破670.0 m,水泵最高扬程突破700.0 m;前几年投产的日本葛野川抽蓄电站最高水头突破750.0 m,水泵最高扬程突破770.0 m。我国已投产的抽蓄电站大多以500.0 m水头段居多,近年来,建成的抽蓄电站最大水头已经突破了700.0 m,如山西西龙池抽蓄电站最高扬程为703.0 m,广东阳江抽蓄电站最高水头700.0 m,在建的浙江乌龙山抽蓄电站最高扬程也达到700.0 m以上。

2.2 高转速化

水泵水轮机的工作水头大小取决于转轮的线速度。为了达到与水泵水轮机工作水头相应的转轮线速度,需要采用较大的转轮直径或较高的转速。随着科学技术的发展和加工工艺的提升,现代化的设计理论和发展方向将转轮直径保持在一定范围内而尽量提高水轮机转速。对水力特性而言,就需要采用较高的比转速,但是,和常规水轮机一样,水泵水轮机的工作水头越高比转速会越小,通常采用水泵工况下最低扬程时的比转速。在水泵水轮机工作水头提高的同时,比转速的降低会导致水泵水轮机转轮的摩擦损失增加,运行效率下降,因此,要尽可能不降低水泵水轮机转轮的比转速。随着科学技术和工艺水平的进一步提升,可逆式水泵水轮机必将同时向高水头和高比转速方向发展。

2.3 大容量化

20世纪70年代以后,世界范围内混流单级可逆式水泵水轮机单机容量不断增大。50年代最大单机容量仅为90 MW,60年代单机容量最

大220 MW,70年代单机容量最大400 MW,80年代单机容量已经能达到457 MW。目前,我国可逆式水泵水轮机单机容量以300 MW为主,技术成熟,运行稳定,完全实现国产化。近年来,国内主要发电设备制造商已经突破单机容量400 MW的水轮机研发和制造(广东阳江抽蓄),运行可靠,水轮机效率高,正在研发制造425 MW水轮机(浙江天台抽蓄)。

2.4 高性能化

可逆式水泵水轮机的高水头、高转速和大容量发展,对水轮机的材料强度、水轮机振动噪音水平和设备疲劳损害等提出了更加严格的要求。目前在国内外普遍采用CFD技术(流体分析技术)实施从蜗壳进口到尾水管出口全流体断面设计,CFD技术的运用能够实现水轮机整体工况最优。CFD在给出计算条件和流道形状后,能够快速获得压力和流速分布。可以全流道解析尾水管、转轮、活动导叶、座环(含固定导叶)、蜗壳等数据。在实际工程中,通过对流体的反复解析能够准确地确定流道和叶片的形状、预测汽蚀程度和水轮机的效率,实现高性能化。

2.5 高可靠性

为提高可逆式水泵水轮机的可靠性,国内外主要发电设备制造商都可以在模型试验的基础上,对水泵水轮机进行真实大小相同和缩小模型的试验,验证其设计性能、疲劳强度以及运转的耐久性。主要包括真实扬程试验、主轴密封装置试验和机组调相漏气量试验等。通过这些试验,确保了出厂的水轮机均具有真实的较高的运行可靠性。

2.6 变速水轮机

为了满足新型大电网对电能质量和水轮机更短反应时间等指标越来越高的要求,大容量的变速发电电动机正在逐步投入实际应用。变速发电电动机相较于恒速发电电动机,可以在一定范围内使水泵水轮机转速连续变化,从而达到水泵工况和水轮机工况下在较大流量和水头的变化范围内都具有很高的运行效率,满足更大的功率变化和更宽的扬程/水头变幅。如在建中的河北丰宁抽水蓄能电站(二期)已经采用大容量变速可逆式水泵水轮机(单机300 MW)^[3]。

3 大型抽水蓄能电站水轮机选型要点

3.1 大型水泵水轮机的选型原则

(1) 水泵水轮机机型选择应根据发电水头/抽水扬程、运行特点及设计制造水平等因素,经技术经济比较后来确定。发电水头特征值包括最大水头、最小水头、平均水头和额定水头等,抽水扬程特征值包括最大扬程和最小扬程。

(2) 水轮机台数和单机容量的选择应在分析研究、充分考虑所有影响因素的基础上,拟定多个组合方案(至少不少于 3 个),经技术经济比较后确定,水轮机台数大于两台,一般选偶数。

(3) 额定水头选择应考虑水头/扬程变幅、水轮机运行稳定性和效率等因素。水头变幅较大的抽水蓄能电站,额定水头应大于或等于算术平均水头;水头变幅较小的抽水蓄能电站,额定水头应小于算术平均水头或加权平均水头^[4]。

(4) 水泵工况最大入力的选择,应在发电机与电动机容量平衡的基础上考虑电网正常的频率变化范围及模型换算至原型时可能存在的偏差。

(5) 水轮机台数的选择,应充分考虑电网系统对电站在汛期和非汛期运行输出功率、水轮机运行方式和大修时间的要求,以及在电网中所占的比重。

(6) 水轮机的选择必须综合考虑水轮机设备招标条件、行业技术发展水平和潜在制造商的生产能力。

3.2 水轮机型式和单机容量选择

(1) 水轮机型式的选择。水头/扬程高于 800.0 m 时,宜选择组合式水轮机或多级式水泵水轮机;水头/扬程为 50.0~800.0 m 时,宜选择单级混流式水泵水轮机;水头/扬程低于 50.0 m 时,宜根据实际情况,通过技术经济比较选择混流式、轴流式或者贯流式水泵水轮机。

(2) 单机容量范围的确定。目前我国已建和在建抽水蓄能机组单机容量以 300 MW 为主,国外单机容量最大已经达到 475 MW。近年来国产单机容量有进一步增大的趋势,已有投产的国产机组单机容量达到 400 MW,在建国产机组单机容量最大达到 425 MW。根据统计数据和工程实例表明,单机容量一般以 25 MW 作为一个数量级进行递增。随着自主开发和蓄能机组国产化需求的进一步提升,国内制造商的生产制造周期和制造难度等因素在单机容量选择时应引起高度重视。

(3) 额定水头的选择。抽水蓄能电站额定水头是衡量水轮机特性的一个重要参数,对抽水蓄能电站在电网中的作用及水轮机的运行影响很大,必须严格控制最小水头和最大水头的变幅。根据经验公式分析可得,额定水头应尽可能靠近平均水头,上限不高于平均水头 4%,下限不低于平均水头 1%。提高额定水头可以改善水泵水轮机的运行效率,使水轮机稳定运行的范围扩大,有利于水轮机长时间稳定运行。

3.3 主要特性参数选择

与常规水轮机不同,水泵水轮机国内外制造商都没有成形的型谱系列,常规水轮机的设计方法在项目设计前期不能完全适应水泵水轮机设计。

3.3.1 设计基本假定及初始条件

(1) 确定各特征参数。水头(扬程)、流量、出力(入力)、效率。

(2) 流道损失。计算流道水头损失时,引入损失系数 K_Q ,计算损失水头公式:

$$h_f = K_Q Q^2$$

式中 h_f 为流道损失, m; K_Q 为流道损失系数。

(3) 水轮机出力与入力基本计算。

$$\text{水轮机出力: } N_t = 9.81 Q_t H_t \eta_t$$

$$\text{水泵入力: } N_p = 9.81 Q_p H_p / \eta_p$$

3.3.2 特性参数估算

(1) 水轮机工况参数估算。发电机及水轮机效率初步拟定;参照已经运行的水轮机,初步拟定水轮机效率。据统计,水泵工况效率平均为 0.92,水轮机工况效率平均为 0.90,发电电动机的效率平均为 0.98,在具体计算时,可以根据情况分别拟定在最小水头、额定水头和最大水头时的效率。水轮机额定工况:如果系统没有超出力的要求,额定水头下的水轮机出力即为额定出力。

(2) 水泵工况参数估算。水泵工况最大入力计算:按充分利用电机的原则,发电机视在功率约等于电动机视在功率,并留有一定的余量,目前一般按水泵工况电动机预留 3%~5% 的裕量来考虑。水泵最小扬程工况:一般情况下,水泵工况最小入力发生在水泵工况最低扬程时。

(3) 比转速估算与水轮机转速确定。水泵比转速:基于不同的数学模型,目前国内外有多个比转速常用计算公式,有北京勘测设计院、清华大学、东方电气集团公司、哈尔滨电气集团公司、东

芝公司等不同的计算公式。计算值相差较大,在实际选择时,可以初步选取几个公式计算结果的平均值,再与相似电站参数水平进行比较后初定。水轮机比转速:与水泵比转速选择相同。水轮机转速:分别用水轮机工况和水泵工况计算出的比转速,利用同步转速公式计算出同步转速范围,选取不同的同步转速与类似电站进行方案比较,确定最终水轮机转速,该转速必须满足发电电动机的同步转速。

(4)转轮直径。当水泵比转速、水轮机转速和额定水头确定后,就可以确定转轮直径以及进出水边直径比值。

(5)吸出高度选择。水泵水轮机吸出高度计算国内外也有多个常用计算公式,主要基于不同的空蚀系数数学模型,同样有北京勘测设计院、清华大学、东方电气集团公司、哈尔滨电气集团公司、东芝公司等不同的计算公式,计算值相差较大。同理,可以初步选取几个公式计算结果的平均值,再与相似电站参数水平进行比较后初定。吸出高度值必须在土建工程招标前确定,进而确定厂房位置和水道系统的布置。

3.3.3 主要结构尺寸选取

主要结构尺寸包括蜗壳尺寸和尾水管尺寸,蜗壳尺寸有:进口直径 D_s 、进口中心与水轮机中心距 R 以及蜗壳其他尺寸(如蜗壳四个平面轴向外壳至蜗壳中心的距离 L_{+x} 、 L_{-x} 、 L_{+y} 、 L_{-y});尾水管尺寸有:导叶中心圆直径、安装高程至尾水管地板高、水轮机中心到尾出口长度、尾水管出口宽、尾水管出口高等。蜗壳进口直径 D_s 和蜗壳进口中心与水轮机中心距 R 可通过相应公式计算获得,其余尺寸可通过蜗壳尺寸计算表和尾水管尺寸计算表中相应经验公式计算获得。

3.3.4 初步选型计算说明

水泵水轮机选型参数水平不能取得太高,水轮机运行的稳定性应放在首位,特别是水头高、水头变幅较大或泥沙含量较多的电站,应谨慎考虑。一般的做法是在项目前期就和潜在的制造商进行技术交流,共同讨论参数确定。吸出高度选择应留有一定的裕量,特别是长尾水管的水力损失应充分考虑。确定制造商后,应根据最终的设计参数重新进行复核计算^[5]。

4 某大型抽水蓄能电站水轮机比选实例

某规划抽水蓄能电站位于广西壮族自治区北部山区,枢纽建筑物由上水库、输水系统、地下厂房、下水库组成。上水库为新建人工库,初拟正常蓄水位784.0 m,死水位749.5 m,设计调节库容706万 m^3 。下水库为一天然河谷内筑坝成库,多年平均流量4 m^3/s ,初拟正常蓄水位336.5 m,死水位311.0 m,调节库容868万 m^3 。初拟采用一洞四机布置方式,电站厂房采用中部式布置方案,设置下游调压室。电站平均水头438.0 m,发电最大/最小水头473.0 m/403.5 m,水泵抽水最大/最小扬程480.0 m/405.0 m。上下水库进/出水口间输水系统水平距离约为2 643.0 m,距高比(L/H)约为6.03。

本文采用国内某主要电力设备制造商的比转速和比速系数计算公式。(公式略)

当电站采用单机300 MW方案时,参考水泵水轮机统计经验,水轮机工况额定水头430.0 m,比转速 n_{st} 约在108.0~128.0 $m \cdot kW$ 范围内,比速系数 K_t 约在2240~2654范围内。根据比转速范围计算出转速范围在382~452 r/min 之间,可选取的同步转速为428.6 r/min 。此时水轮机的额定比转速为121.1 $m \cdot kW$,比速系数为2 511.3,比转速水平处于合理的统计位置内的中上水平。

当电站采用单机350 MW方案时,根据比转速范围计算出转速范围在352~419 r/min 之间,可选取的同步转速为375 r/min 。此时,水轮机的额定比转速为114.5 $m \cdot kW$,比速系数为2 373.3,比转速水平处于合理的统计位置的中等水平。

水泵工况时,在最小扬程 $H_{pmin} = 405.0$ m时,最大流量比转速 n_s 范围约34~40 $m \cdot m^3/s$,比速系数 K_p 在3 070~3 661范围内。当水轮机选用300 MW—428.6 r/min 的方案时的最大流量比转速水平高于统计水平;当水轮机选用350 MW—375 r/min 的方案时的最大流量比转速水平,与国内同水头段电站更接近,处在更加合理的范围内。同时,在水泵运行时,350 MW—375 r/min 方案的流量变化更小,更有利于水轮机长时间稳定运行。

根据以上分析结果,该抽水蓄能电站水泵水轮机最终选择了350 MW—375 r/min 方案,电站

总装机规模 1 400 MW。

5 结 语

(1)当前国内大型抽水蓄能电站发展迅速,水泵水轮机呈现高水头、大容量发展趋势,水轮机的选型越来越重要。

(2)大型抽水蓄能电站水轮机主要有 6 大特点,水轮机的选型必须结合这 6 大特点,遵循选型的基本原则,多方面比选水轮机单机容量,科学合理地选择水轮机台数和主要特征参数。

(3)大型抽水蓄能电站水轮机选型要充分运用现代化先进科学技术,如 CFD 技术(流体分析技术)和三维 CAD 技术等,重点是分析水轮机工况和水泵工况的水流、压力、变形等参数变化,找出最佳组合方式,实现水泵水轮机效率最科学合理。

(4)在大型抽水蓄能电站水泵水轮机选型实例中,要选择 2~3 个不同理论路径的公式,分别计算水轮机工况时的比转速 n_{st} 、比速系数 K_t 和水泵工况时的比转速 n_{sp} 、比速系数 K_p 。然后初步选择这些公式计算结果的平均值,和相似抽水

蓄能电站水泵水轮机参数水平进行比较后选定设计比转速和比速系数。

(5)事实表明,对大型抽水蓄能电站机组选型进行深入研究非常必要,将会对抽水蓄能电站的工程设计、机组研发、新技术应用、理论创新和前沿科技的探索提供非常有价值的科学依据,从而进一步提高我国大型抽水蓄能电站的开发和运行水平,更好地为新型电力生产服务。

参考文献:

- [1] 抽水蓄能电站工程建设文集 2021[C]. 北京:中国水利水电出版社,2021;序.
- [2] 抽水蓄能发展论坛学术报告 2022[R],北京:中国水力发电工程学会,2022.
- [3] 邱彬如,刘连希.抽水蓄能电站工程技术[M].北京:中国电力出版社,2008.
- [4] NB/T 10072-2008 抽水蓄能电站设计规范[S].北京:国家能源局,2018.
- [5] 高传昌,汪顺生,李君,刘新阳.抽水蓄能电站技术[M].郑州:黄河水利出版社,2011.

作者简介:

邓小华(1981-),男,四川广元人,工程硕士,高级工程师,从事水电站建设及生产运营管理。

(责任编辑:卓政昌)

(上接第 77 页)

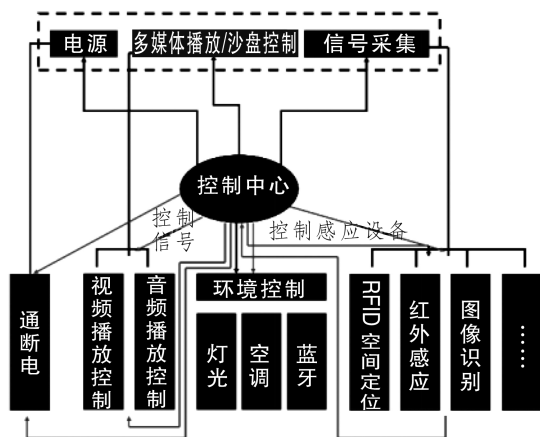


图 2 数字展厅设备控制示意图

5 结 语

数字展厅作为一种新的展示技术,是现代信息展示技术的发展方向,可以融合网络技术、视频动画技术、大数据技术和虚拟现实技术等。总而言之,数字展厅对企业的价值和优势是非常显著的,它不仅是一个信息屏幕、动画视频,更是一种信息表达和信息传递方式的平台,既可以提高企业的企业形象和品牌形象,还可以提高企业的

效率和降低企业的成本。在未来,数据展厅将成为现代企业展示产品和提供服务的重要方式之一,它能充分应用数字孪生、360°全息投影、4D 影院、模拟仿真操作等现代新技术,提升创新空间和设计灵感,为企业发展提供更多选择、带来更多机遇。同时,可结合企业实际和应用需求,采取多元、丰富的技术,实现实用和直观的功能,为企业提升形象、提高效率带来重要作用。

参考文献:

- [1] 林佳慧,徐景刚.数字投影技术在展示空间中的应用[J].百科知识,2023,05C:50-51.
- [2] 百度百科.数字展厅[OL].<https://baike.baidu.com/item/数字展厅/9070729>,20230716.
- [3] 张家豪,常雅堃,孙淑桐.基于数字媒体技术下的智慧展厅设计方法研究[J].鞋类工艺与设计,2021,1(22):122-124.
- [4] 秦琴.虚拟现实技术在展厅设计实践教学中的应用[J].信息技术,2021,(23):188-190.
- [5] 张驰,章宜,郑宏佑.数字化技术下的智慧工地管理与科技展厅应用[J].工程与建设,2022,36(4):1163-1167.

作者简介:

周开云(1975-),男,四川眉山人,学士,工程师,从事信息化建设工作;

张倩(1981-),女,四川石棉人,学士,工程师,从事电力营销工作。

(责任编辑:卓政昌)