

抽水蓄能电站可逆式水泵水轮机发展现状与展望

赵万勇, 马 达, 曾 玲

(兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘 要: 从甘肃省的风电发展和世界抽水蓄能发展情况讨论了我国抽水蓄能电站建设的必要性; 介绍了抽水蓄能电站中水泵水轮机的各种型式, 分析了国内外在这方面的研究现状; 对可逆式水泵水轮机的发展趋势和存在的问题进行了探讨; 认为仍需加强我国抽水蓄能电站机组的研发能力, 并展望了我国抽水蓄能电站的发展宏图。

关键词: 抽水蓄能电站; 水泵水轮机; 发展

中图分类号: TH3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0366(2012)02-0101-03

Development of Reversible Pump-Turbines in Pumped Storage Power Stations and Their Prospects

ZHAO Wan-yong, MA Da, ZENG Ling

(School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Science and Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: On the basis of wind power development in Gansu province and the pumped storage development of the world, the necessity of developing our pumped storage power stations in China is elaborated. Various types of hydraulic pump-turbines in pumped storage power stations are introduced; the tendency of development of reversible hydraulic pump-turbines are discussed; the domestic and international studies in this field are also related. It is pointed out that in China, the R&D ability of pumped storage power stations is still low, but we have a bright future.

Key words: pumped-storage power station; pump-turbine; development

抽水蓄能电站可逆式机组在电力系统中发挥着重要作用, 不仅有调峰填谷、季节性调蓄等静态功能, 更具有调频、负荷调整、同步调相运行、同步旋转备用、满足负荷突变的要求等动态效益, 这些优势是其他调峰方式所不能比拟的。

1 电站建设的必要性

随着新能源产业的不断发展, 近年来甘肃风电发展迅速, 到 2010 年底, 甘肃已完成风电装机 5 500 MW, 占全国在建容量的 31.23%, 位居第二。按照规划, 甘肃 2015 年风电装机将达到 17 000 MW, 成为全国最大的风电基地之一; 到 2020 年, 装机容量增加到 20 000 MW 以上, 建成陆上“三峡”工程; 2030 年以后, 装机容量可

以继续扩大到 30 000 MW 以上, 届时, 河西走廊将成为中国乃至世界上有影响的风电基地之一。

由于风力发电是间歇性发电, 其不稳定性对电网运行和电力供应的经济性都带来巨大挑战。与其他储能方式相比, 抽水蓄能是当今世界上技术最成熟、最经济的大规模储存电能的方式, 转换效率高达 75%。抽水蓄能的比例也是一个国家能源使用效率和提高清洁能源使用率的重要指标。发达国家的抽水蓄能与总装机的比重在 3%~10% 之间, 其中英国和日本分别达到了 4% 和 10%, 我国仅为 1.6%^[1,2]。

所以, 在风电集中和即将进行大规模开发风电的甘肃建设抽水蓄能电站, 从而把随机的、质量不高的风电电量转化为稳定的、高质量的峰荷电量。这不

收稿日期: 2011-11-22

基金项目: 甘肃省教育厅研究生导师科研项目 (0503-04)

作者简介: 赵万勇 (1962-), 男, 教授, 主要从事流体机械方面的研究。E-mail: zhaowy@lut.cn

但能够解决大比例风电并网对电能质量的影响并减少低谷期风电弃风的问题,同时还能实现促进清洁能源发展和保证电网安全运行的目标,将对促进甘肃新能源利用,推动低碳经济发展发挥重要作用。

2 可逆式水泵水轮机

2.1 水泵水轮机的型式

抽水蓄能电站首先于1882年在瑞士的苏黎世诞生,至今已有100多年的历史^[3]。抽水蓄能电站的主要设备是抽水蓄能机组,最早使用的蓄能机组是四机式机组。随着科学技术的发展和进步,出现了可以双向运行的水力机组,它向一个方向旋转抽水,向另一个方向旋转发电,这样的机组称为可逆式水泵水轮机(又称为两机式机组)。

分析国内外抽水蓄能电站的现状表明,由于可逆式蓄能机组具有结构简单、造价低、土建工程量小等特点,从1970年后建成的和当前正在施工建设的所有抽水蓄能电站,在水头范围4~600 m内,全部采用可逆式水泵水轮机^[4,5]。

可逆式水泵水轮机的工作水头范围与反击式水轮机的工作水头范围一致,随着相应水头的不同,可以做成混流可逆式、斜流可逆式及贯流可逆式机组。其中混流可逆式水泵水轮机在可逆式水泵水轮机中应用最为广泛。例如,在我国已经投入使用的天荒坪抽水蓄能电站和广州抽水蓄能电站均采用300 MW单机混流可逆式水泵水轮机^[6]。

2.2 可逆式水泵水轮机的发展

随着新技术和新设计理念在抽水蓄能电站机组设计与制造中的广泛应用,可逆式水泵水轮机的发展趋势主要有:

(1) 高水头化 随着技术的发展,单级可逆式水泵水轮机的使用水头越来越高,目前单级可逆式机组的应用水头已超过常规水轮机。目前世界上单级可逆水泵水轮机水泵扬程最高的是日本的葛野川抽水蓄能电站,最大毛水头751 m,水泵工况最大扬程778 m^[7];

(2) 大容量化 采用更大的单机容量。水电机组所需要的金属材料 and 机械加工量并不随容量增高而成比例上升。相反,随单机容量增大,机组台数减少,机电设备的成本就随之降低了。另外,机组台数少可以简化电站控制系统,降低费用,在一定范围内,单机容量的增大能带来直接的经济效益;

(3) 高转速化 水泵水轮机的工作水头大小决定于转轮的线速度,为了达到此线速度可以使用较

大的转轮直径或较高的转速,现代的设计趋势是保持一定范围的转轮直径而采用尽量高的比转速。

可逆式水泵水轮机的比转速一般用水泵工况最低扬程的比转速 $n_{sp} = n \cdot Q_{\max}^{0.5} \cdot H^{-0.75}$ 来表示,用比速系数 $K = n_{sp} \cdot H^{0.75}$ 来衡量比转速水平和水泵水轮机的设计制造水平。我国广州一期电站蓄能机组比速系数 K 值为3 874^[8],接近预测的单机可逆式水泵水轮机的比速系数 K 的上限 $K = 4 000$,处于较高水平。

除了以上3种发展趋势外,可逆式水泵水轮机还向着高性能化、高可靠性、变速机组等方向发展。

2.3 存在问题

(1) 在高水头化过程中,高水头单级水泵水轮机的水力效率比中、低水头机组降低;水泵水轮机过流部件所承受的水压增大;引水系统承受的压力增大,过渡工况不稳定性增加;使水泵水轮机的汽蚀性能下降。虽然单级水泵水轮机水头的发展成上升趋势,但由于受到结构强度的限制,水泵的最大扬程800 m已经达到应用的上限。

(2) 提高比转速也会引起水泵水轮机的汽蚀特性恶化,从而要求在电站中有更大的掩埋深度,增加电站设计的复杂性和投资。例如,1980年建成的奥地利库泰伊蓄能电站可逆式机组是一个典型的用增加掩埋深度来换取高转速的实例。此机组的转速达到600 r/min,淹没深度48 m(最大为78 m)。按发电水头398 m计算,比转速为128, K 值为2 550,对于这一水头,此机组的比转速是相当高的。

(3) 随着单机容量的增大,在施工建设中会遇到一系列的技术困难。例如,机组中的部分大尺寸部件、转轮、顶盖、底环、座环等可能因尺寸过大而受到运输条件的限制,不得不采用更多的分瓣结构或现场加工,这就造成电站在建设中的不便,增加了建设困难。

3 水泵水轮机的研究现状

3.1 国外水泵水轮机的发展及研究现状

国外水泵水轮机的研究起步早,目前国外在水泵水轮机技术处于领先的公司有日立公司、东芝公司、三菱集团、富士公司、阿尔斯通电力公司、伏依特—西门子水电公司、VA-Tech水电公司、GE水电公司^[9]等。

从文献^[10-12]看,目前国外低水头混流式水泵水轮机技术成熟,相关文献较少;高水头混流式水泵水轮机技术是研究的热点,主要集中在500~700 m高水头水泵水轮机的研究,涉及的范围在水力性能、

结构性能以及试验等方面。由于西欧国家蓄能电站开发已接近饱和,而日本的水泵水轮机技术始于 20 世纪 80 年代末,目前技术正处于技术高峰期,并不断往高水头、大容量方向发展,所以可供参考的相关文献也较多。在振动与应力问题方面:吉田正博^[10]指出 600~700 m 水头 400 MW 级大容量水泵水轮机转轮设计技术的关键是振动问题,也就是说机组的结构问题非常重要。在水力性能研究方面:①Nakanmm T^[11]针对高水头高转速水泵水轮机转轮部分负荷下转轮压力脉动、空化性能恶化的问题,借助 CFD 技术,通过改变转轮出口形状和下环形线来改善压力脉动和空化性能,取得满意结果,并用流态模拟和试验验证了部分负荷下的空化、压力脉动和振动性能;②木本欲^[12]针对设定的真机规格参数的流道形状进行了叶片数的优化设计,得出 9 个叶片比 7 个叶片的转轮性能好的结果。

3.2 国内可逆式水泵水轮机的研究现状

我国对可逆式水泵水轮机的研究始于 20 世纪 70 年代初。进入 21 世纪以后,国家科研把可逆式水泵水轮机的研制工作提到重点日程上。从这段时期的文献来看,研究范围广泛,涉及过渡过程的研究、水泵水轮机的参数选择和优化探讨、模型试验台的建立及模型试验研究、国外机组引进消化研究、水力性能的模拟研究以及除转轮外的其他水力部件的研究。于治观等^[13]计算了混流式水泵水轮机泵工况启动过渡过程,用内特性法推导了考虑导叶漏水转矩泵工况启动时的计算公式,对工程有重大的应用价值;另外对混流式水泵水轮机装置泵工况断电过渡过程提出了解析计算的方法;林育汉等^[14]针对抽水蓄能电站仿真中 Suter 法描述水泵水轮机转轮特性时的小开度问题和多值问题提出了水泵水轮机转轮特性描述新方法及其工程应用;纪兴英等^[15]对混流式水泵水轮机三维湍流数值分析对水泵工况计算结果进行了详细分析,并与模型试验结果进行了对比;周嘉元等^[16]针对水轮机全特性图上的“S”形特性,从理论上分析了其产生的原因及对抽水蓄能电站运行的影响,并结合实际剖析了“S”形特性对抽水蓄能电站日常运行的影响和常用的解决方法等。

4 展望

综上所述,我国抽水蓄能电站建设虽然起步较晚,但由于后发效应,起点却较高,近年建设的几座大型抽水蓄能电站技术已达到世界水平。例如,天荒坪

与广州抽水蓄能电站机组单机容量 300 MW,额定转速 500 r/min,额定水头分别为 526 m 和 500 m,已达到单级可逆水泵水轮机的世界先进水平。虽然国内水泵水轮机的研究取得了一些成绩,但是目前我国在研制抽水蓄能电站机组方面与世界先进水平还有较大差距,大型抽水蓄能机组制造水平还较低,目前国内只有 3 家已经具备了试验台和相关的技术:哈电机、东方电机和中国水利水电科学研究院。大型抽水蓄能机组仍依赖国外厂家供应,抽水蓄能机组国产化的成功仍有漫长的路要走。

可喜的是,随着国内一些大型抽水蓄能电站的开工建设,抽水蓄能机组国产化的步伐将大大加快,机组制造技术水平可望迅速提高,届时必将促进我国抽水蓄能电站的建设。

参考文献:

- [1] 中国电力百科全书[M]. 第 2 版. 北京:中国电力出版社, 2001.
- [2] 邱彬如. 世界抽水蓄能电站新发展[M]. 北京:中国电力出版社, 2006.
- [3] 朱书麟. 水力发电工程[M]. 北京:中国水利学会, 1980.
- [4] 梅祖彦. 抽水蓄能技术[M]. 北京:清华大学出版社, 1988.
- [5] 梅祖彦. 抽水蓄能发电技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [6] 张克诚. 抽水蓄能电站水能设计[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007.
- [7] 冈崎胜广(日本), 栾锡广译. 日本葛野川抽水蓄能电站 2 号机投运[J]. 国外大电机, 2001, 69(2): 75-77.
- [8] 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.
- [9] 姜茜, 武杰. 国外公司抽水蓄能机组技术述评[J]. 东方电机, 2004, 32(2): 44-54.
- [10] 吉田正博(日本), 栾锡广译. 600~700 m 水头 400 MW 大容量水泵水轮机[J]. 国外大电机, 1994, 33(12): 71-73.
- [11] Nakamra T(日本), 张亚梅译. 高转速高水头可逆式水泵水轮机研究[J]. 国外大电机, 1996, 42(4): 37-61.
- [12] 木本欲(日本), 吕彤丹译. 高速水泵水轮机转轮叶片数的优化研究[J]. 国外大电机, 2003, 78(3): 59-63.
- [13] 于治观, 常近时. 混流式水泵水轮机水泵工况启动过渡过程导叶漏水的计算[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2000, 17(1): 46-49.
- [14] 林育汉, 陈乃祥, 李辉, 等. 水泵水轮机转轮特性描述新方法及其工程应用[J]. 清华大学学报:自然科学版, 1999, 39(4): 73-75.
- [15] 纪兴英, 赵凌志, 刘胜柱, 等. 混流式水泵水轮机三维湍流数值分析[J]. 大电机技术, 2008, 196(1): 54-58.
- [16] 周嘉元, 郑慧娟. 水泵水轮机的“S”形特性及对机组性能的影响[J]. 水电能源科学, 2006, 24(2): 83-85.