

上池下库循环,绿水青山常在 ——抽水蓄能技术应用与发展

韩民晓¹, 畅欣¹, 李继清², 杨刚³, 尚天坤⁴

1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206

2. 华北电力大学可再生能源学院, 北京 102206

3. 国网黑龙江省电力有限公司哈尔滨供电公司, 哈尔滨 150010

4. 上海电力股份有限公司, 上海 200010

摘要 电力系统需要配置大容量的储能装置, 补偿功率变化, 适应新能源的大规模发展。更重要的是, 近年来电力负荷率较低、负荷波动较大, 需要对负荷进行调整。在电力系统中配置适当规模的抽水蓄能, 是解决当前风电等新能源大规模发展对电网安全稳定影响问题的最佳选择。分析了抽水蓄能技术的基本原理和特性, 阐述了抽水蓄能技术发展的新趋势。介绍了可变速抽水蓄能技术, 探讨了双馈方式和全功率方式的整体结构, 并提出了在不同模式下的控制策略, 分析了新型特殊抽水蓄能电站的构成、技术挑战和解决方案。

关键词 可变速抽水蓄能; 全功率变流器; 海水抽水蓄能; 高寒地区抽水蓄能; 可再生能源; 电力系统稳定

随着风电、光伏等可再生能源发电的大规模发展, 中国电力系统的安全稳定运行面临着巨大挑战。电力系统需要在一定范围内维持系统频率和电压, 保持有功功率、无功功率的平衡。储能技术在电网侧、用户侧和新能源发电中有着不同的应用特点和发展规划。通过储能系统的功率吞吐, 实现电力系统功率平衡, 是保持系统稳定运行的重要途径^[1-4]。

根据能量储存形式来划分, 储能可以分为: 1) 机械能储能: 包括抽水蓄能、飞轮储能和压缩空气储能等; 2) 电磁储能: 包括超导电磁储能和超级电容储能等; 3) 化学储能: 包括铅酸蓄电池、全钒液流电池、液流电池、钠硫电池、镍镉电池等; 4) 相变储能: 冰蓄冷等。中国仅有化学储能和抽水蓄能可以应用在电网中, 化学储能的电能转化效率是抽水蓄能的 1.1~1.2 倍, 但单位千瓦投资却是抽水蓄能的 4.8~7.6 倍, 运行寿命不足其 2/5, 最大储能能力不足其几十分之一。从储能规模、单位千瓦投资、运行寿命、最大储能能力、应用范围等角度看, 抽水蓄能都优于化学储能方式。抽水蓄能电站以其运行灵活可靠、工况转换迅速、环境压力小的特点, 是目前公认的最成熟、最经济、容量最大的储能方式, 可用于削峰填谷、调相、事故备用、黑启动、平滑规模化可再生能源输出功

率等。在电力系统中配置一定装机的抽水蓄能, 是解决当前风电等新能源大规模发展对电网安全稳定影响问题的重要选择。抽水蓄能电站控制目标灵活多样, 可以充当调峰和调频厂, 有效调节电力系统生产、供应、使用之间的平衡, 优化电力系统的运行, 增加电力系统的稳定性, 在系统中发挥重要功能^[5-9]。电网故障时, 抽水蓄能机组对有功和无功的支持有助于电网的快速恢复, 并减轻频率和电压波动带来的不良影响。

百年来抽水蓄能技术取得了长足的进步, 尤其是基于双馈机组和全功率变流器机组的可变速抽水蓄能技术的出现, 给抽水蓄能带来了新的发展方向。采用可变速技术的抽水蓄能电站, 不仅可以独立快速调节有功功率和无功功率来提高系统的稳定性和快速响应能力, 提高发电效率, 还可以有效地控制电网负荷频率, 并平衡可再生能源引起的频率波动, 改善电能质量^[10]。日本、德国、瑞士等国已有大量可变速抽水蓄能机组在电网运行中发挥重要作用^[11]。中国抽水蓄能电站建设起步较晚, 第一批抽水蓄能电站主要分布在经济较为发达的东部地区和以火电为主的中部地区。中国正步入抽水蓄能电站的快速发展期, 应将其纳入电力中长期发展规

收稿日期: 2016-01-04; 修回日期: 2016-10-28

基金项目: 高等学校学科创新引智计划(“111”计划)项目(B08013)

作者简介: 韩民晓, 教授, 研究方向为电力电子、电力系统、电能质量, 电子信箱: hanminxiao@ncepu.edu.cn

引用格式: 韩民晓, 畅欣, 李继清, 等. 上池下库循环, 绿水青山常在——抽水蓄能技术应用与发展[J]. 科技导报, 2016, 34(23): 57-67; doi: 10.3981/j.

issn.1000-7857.2013.23.006

划,按照区域电网进行统一配置,并将抽水蓄能电站提供的各项功能纳入系统辅助服务补偿范畴,预计在2025年抽水蓄能装机将达到1亿kW,占电力系统总装机的4%。本文综述抽水蓄能技术的应用及发展。

1 抽水蓄能技术原理及特性

1.1 构成

抽水蓄能的工作原理是利用可逆的水泵水轮机组,在电力负荷低谷时利用多余电能将下水库中的水抽到上水库储存起来,在电力负荷高峰时放水发电。抽水蓄能电站由上下水库、引水系统(高压部分和低压部分)、电站厂房和机组等构成。理论来说,水量和落差越大,储能就越多。

上水库选址一般要求高程较高、库盆封闭性比较好、库周边平顺、库岸山体雄厚、库周边垭口少、库区开阔、坝址河谷较窄。下水库一般由挡水建筑物和泄水建筑物组成,有时可利用已有的水库。水道系统一般由(上水库)进出口、引水隧洞、引水调压室、高压管道、尾水调压室、尾水隧洞、(下水库)进出口等组成,用来连接上下水库(图1)。电站的厂房系统一般包括主厂房、副厂房、主变压器室、开关站及出线场,以及母线洞、出线洞、进厂交通洞、通风洞、排水廊道等附属洞室等,是抽水蓄能电站的核心。

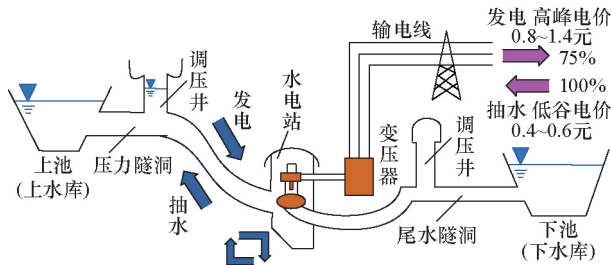


图1 抽水蓄能电站构成

Fig. 1 Composition of pumped storage power station

按照地理位置、结构、功能等的不同,抽水蓄能电站可以分为各种不同的类型。按开发方式划分,可分为纯抽水蓄能电站和混合式抽水蓄能电站。按调节周期划分,可分为日调节、周调节、季调节抽水蓄能电站。电力系统通过抽水蓄能电站的能量转换,将电能在时间上重新分配,从而可以协调电力系统的发电和用电在时间上和数量上的不一致。抽水蓄能电站的上、下水库水位随发电、抽水工况的转换而有所变动,能量转换的过程就是上下水库水位变化的过程,基本不耗水,但会损失部分能量^[12]。图2为典型的抽水蓄能电站示意^[13]。

1.2 在电力系统运行中的作用和效益

随着抽水蓄能电站工程技术的发展及其在电网中实际运行的表现,百年来,它逐渐显示出更多的优势,也被赋予了更多的职责。抽水蓄能电站作为综合性电站和能量缓冲器,得到了世界范围内的广泛认可。一般认为,抽水蓄能电站的



图2 抽水蓄能电站示意

Fig. 2 Schematic diagram of pumped storage power station

效益可分为社会效益和经济效益,其中经济效益包括静态效益和动态效益^[14](图3)。

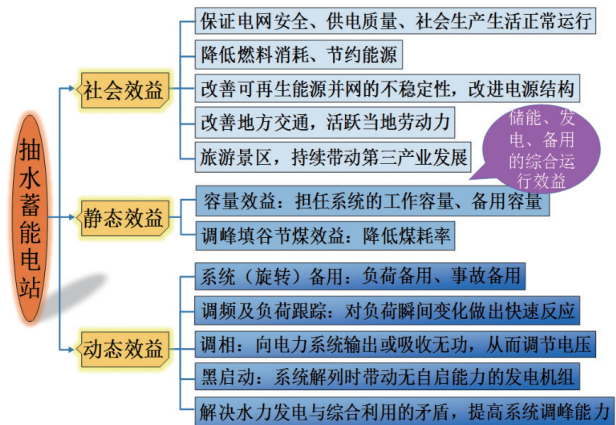


图3 抽水蓄能电站效益

Fig. 3 Benefit of pumped storage power station

1.3 经济性分析

抽水蓄能电站的单位千瓦静态投资通常大大低于常规水电站,与燃煤火电基本持平,建设相对容易。抽水蓄能电站水头越高,电站单位千瓦的投资将越低,电站的综合经济性越好。常规水电的建设费用为9000~12000元/kW,抽水蓄能电站的建设费用基本仅需4000~6000元/kW,抽水蓄能电站的单位千瓦静态投资低于常规水电站,而且建设周期比同容量的常规水电站要短。另外,由于抽水蓄能电站的自动化程度高,水工建筑物和机电设备维修费用低,因此,抽水蓄能电站固定运行费率一般为其投资的1.5%~2.5%,比燃煤火电厂少50%左右^[15]。

每次抽水发电的能量转换过程中,抽水蓄能电站均有25%的能量损失,即通常所说的用4 kW·h电抽水,只发3 kW·h电。若实施峰谷电价,高峰电价0.8~1.4元人民币,低谷电价0.4~0.6元人民币,将使抽水蓄能电站的经济效益十分显著^[16-17]。75%的转换效率貌似不高,但可以协调电网供需矛盾,从对整个电力系统的节能效果来看,采用抽水蓄能电站调峰,燃煤电厂保证在高效率区稳定运行,火电深度调峰次

数减少,火电机组平稳运行时段延长,从而有效降低系统内火电煤耗,降低电力系统运行成本,达到节能减排的效果。尤其是当抽水蓄能电站与风电和核电机组配套运行时,抽水蓄能作为能量缓存器,可以替代火电机组承担发电容量调节功能,使火电机组平稳运行在经济负荷区内,降低系统煤耗,减少火电机组不必要的出力调节过程,提高设备利用率。

1.4 应用及发展

1882年,世界上第一座抽水蓄能电站在瑞士苏黎世建成,短短一百多年间,抽水蓄能技术得到了快速发展与应用^[18]。抽水蓄能电站设计制造和工程技术不断发展,在电网运行中的优势也日趋明显。作为综合性电站和能量缓冲器,抽水蓄能电站得到了世界的广泛认可。

抽水蓄能电站的发展规模主要与各国经济发达程度、区域负荷特性、电源结构、互联系统的调峰支援能力有关,也与建设条件、成本和电网内其他调峰方法的经济性有关。各个国家发展速度和技术水平相差较大,发达国家在核电、可再生能源与抽水蓄能配套领域已有成功经验,核电、可再生能源装机比重较大的国家,均建有一定规模的抽水蓄能电站以配套运行。目前全世界抽水蓄能电站的总装机容量已经超过1亿kW,日本、美国和欧洲国家的抽水蓄能电站装机容量占全世界抽水蓄能总装机容量的80%以上,日本是当今世界范围内抽水蓄能电站装机最大的国家,截至2010年,已有装机2537万kW,超过其电力系统总装机容量的11.13%。

中国抽水蓄能电站发展起步较晚,地区发展不均衡。时间上呈现为年代波浪式发展,空间上呈现为跨区辐射式发展,分布在经济较为发达的东部地区和以火电为主的中部地区。从时间上看,中国抽水蓄能电站建设起步较晚,20世纪80年代末才开始第一座混流式大型抽水蓄能电站技术的研究工作,20世纪90年代中期建成了第一批大型抽水蓄能电站(广州抽水蓄能电站一期和北京十三陵抽水蓄能电站)。在21世纪初期,中国抽水蓄能电站迎来了第二个建设高潮,随着经济的持续发展,对电网安全稳定运行的要求越来越突出,为满足特高压输电带来的调峰需求和可再生能源大规模发展所需的储能需求也进一步提高,以风能为代表、位于内蒙古东、西部、河北北部及吉林、甘肃等地的新能源基地,亟需配套调峰调频能力强、储能优势突出、经济性好、环境友好,且能利用新技术实现功率调节、提高电力系统稳定性的抽水蓄能电站^[19]。

从1968年河北岗南抽水蓄能电站开始,中国抽水蓄能技术逐渐积累经验,克服重重障碍,步入了快速发展期,1968—2025年抽水蓄能电站发展历程和规划如图4所示,截至2016年1月,中国已投产运行的28座抽水蓄能电站装机容量共2418.5万kW(仅占中国总装机容量的1.7%),在建的18座电站装机容量超过2440万kW;已开展可研和预可研的抽水蓄能项目储备容量超过5000万kW;按照工程进度,2016—2018年抽水蓄能电站将迎来规划和签约高峰;根据《国家发展改革委关于促进抽水蓄能电站健康有序发展有关问题的意

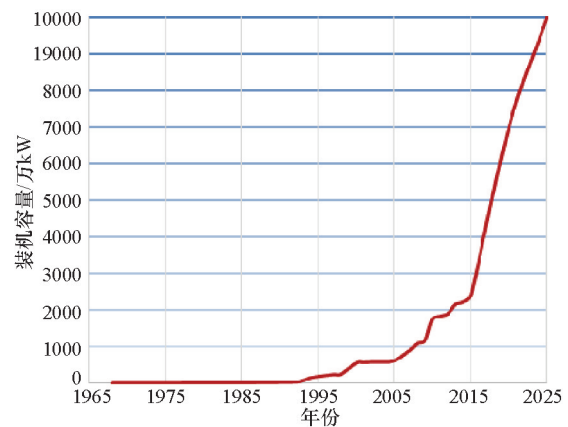


图4 中国抽水蓄能电站发展历程和规划(1968—2025年)

Fig. 4 Development process and planning of pumped storage power stations in China

见》,到2025年,全国抽水蓄能电站总装机容量预计达到1亿kW,占全国电力总装机的比重达到4%左右,目前还有较大差距。并且,中国抽水蓄能电站装机几乎全为定速机组,还不足以应对电网近年来出现的大规模快速功率波动的迫切需求。中国的抽水蓄能电站总体朝着大机组、高水头、大容量和可变速化方向发展,应在充分发挥电站在电力系统中安全稳定作用和保障生态可持续发展的前提下,准确定位,科学规划、同一部署,积极改善电价制度,将抽水蓄能电站的各种效益和功能纳入电力系统补偿范畴。

抽水蓄能技术的发展趋势和新技术主要包括以下几方面。

1) 施工技术。

信息化管理系统:通过信息化系统对整个建设过程进行质量、安全、进度的跟踪,管理电站的勘测、设计、施工、检测等的全过程。

隧洞机械掘进施工技术:可以用于地下坑道、隧洞的开挖,特点是可以一次性快速开挖成型,没有爆破震动,进而降低对围岩的影响,减少衬砌量,缩短施工时间,提高经济性。

喷锚支护等柔性支护技术:经济效益和边坡稳定效果显著,随挖随支与基坑开挖同时进行。特点是适用性广、及时、快速、不占独立工期、可以减小占用的施工场地。

另外,还有发展应用已经较为成熟的全库盆的沥青混凝土面板防渗、适用于水库岸边的钢筋混凝土面板防渗技术、混凝土岔管高 HD 值技术(设计水头 H 与直径 D 的乘积 HD 值超过6000 $m \cdot m$)等。

2) 机电制造技术。

长短叶片转轮技术:与普通的叶片转轮技术相比,可以提高全部运行范围内水轮机的效率,减少部分负荷运行时的压力脉动,改善水泵进口处空化特性,减小出力范围内的振动,该技术已成功应用于日本神流川等抽水蓄能电站。

高水头、大容量水泵水轮机:抽水蓄能电站扬程越高,落差越大,储能越多,可利用的水能越大,且单位千瓦越低,综

合经济性越好。中国已建和在建抽水蓄能电站中额定水头 300 m 以上的共 29 座, 占总数量的 63%, 总装机容量的 81.36%; 单机容量 250 MW 及以上的机组共 148 台, 占总台数的 80%, 总装机容量的 93%。其中已建的西龙池抽水蓄能电站(有效水头 640 m 居世界第三)和在建的阳江抽水蓄能电站(有效水头超过 650 m/单机容量 400 MW)均采用了 700 m/400 MW 级的高水头、大容量水泵水轮机^[20-21]。

可变速机组是当今世界的重要发展趋势, 将会在后续章节详细讨论。

3) 特殊抽水蓄能电站: 海水、高寒、水泵水轮机短路运行技术将会在后续详细讨论。

2 可变速抽水蓄能技术

2.1 原理、分类及特性

风电、光伏等可再生能源的大规模利用及在电网中所占比例的增加, 对电网的稳定运行带来了挑战, 尤其是夜间频率控制。核电在夜间也必须满负荷运行, 导致可以调整输出功率的其他机组在夜间被停运, 加剧了夜间负荷调整及频率波动的困难。定速抽水蓄能机组工作在电动模式时, 无法调节输入功率, 因此无法满足电网快速精确地调节电网频率的要求。

另外, 当工作在发电模式时, 抽水蓄能电站上下水库水位同时发生变化, 水头变化较大。而水头不同时, 发电最佳效率对应的转速也不同。故产生了抽水蓄能机组的可变速运行的需求。

除了定速抽水蓄能机组的作用之外, 可变速抽水蓄能机组还具有以下优势: 提供系统自动控制容量, 适应更宽水头范围提高运行效率, 实现有功功率的高速调节, 提高机组运行的稳定性, 可以使用变频装置进行水泵工况启动, 优化土建工程的设计。可变速机组在日本、欧洲的实例证实, 其对电力系统的经济性和稳定起了非常重要作用; 并且同一电站或区域已投运的可变速机组的调用率远高于定速机组^[22-23]。

抽水蓄能电站可变速机组的变速方式分为 2 种, 一种是分档变速(一般为两档), 包括变极变速和双转子双定子变速等。中国通过技术引进和自主研发, 也曾开展过可变速机组的设计、生产和应用, 但基本都属于变极调速方式。1) 并非真正意义上的可变速电机, 主要用于水头变化较大时改变抽水功率, 在电动模式工作时也无法进行自动频率控制; 2) 有些机组基本按定速机组运行, 在电网中起到的作用和获得的经济效益非常有限; 3) 容量偏小, 设计经验不足、设备老化, 技术上还存在材料利用率低, 磁场畸变、谐波损耗大、电压波形差等缺点, 设计制造缺陷造成投运后安全隐患较为严重; 4) 在电机设计、制造上增加了不小难度。综上所述, 分档变速方式的应用受到较大限制, 难以推广。

目前应用较多、发展较快的是另一种连续调速方式, 包括双馈变频调速和全功率变频调速。下面将分别进行详细

的介绍。

2.2 双馈方式实现及控制

随着电力电子技术和自动控制理论的飞速发展, 三相交流励磁的转子组成的可变速抽水蓄能机组得到了技术支持, 并很快开始了应用。普通机组的励磁是 AC-DC 的整流装置, 而双馈可变速的机组则由原先的 AC-AC 变频装置发展到如今的 AC-DC-AC 结构。双馈可变速机组的变流器的结构和容量不断发展, 从 CYC(可控硅)到 GTO(门极可关断晶闸管)或 GCT(门极换流晶闸管)再到 IEGT(电子注入增强型晶闸管)。IEGT 可以简化驱动电路和缓冲电路, 提高变流器的效率, 且尺寸不大, 适用于抽水蓄能电站的地下厂房, 已得到了广泛应用; 另外大容量、三相分布绕组的隐极转子的线圈端部固定方式得到改进, 如东芝公司的 U 型螺栓支撑系统已在实际运行中得到了高可靠性的验证, 并已成功应用于额定容量 460 MW、额定转速 500 r/m、世界最高扬程 728 m 的葛野川电站 3#/4#可变速机组上。

采用双馈可变速技术的抽水蓄能电站, 不仅可以快速单独调节有功功率和无功功率来提高系统的稳定性和快速响应能力, 实现机电系统的柔性连接, 提高发电效率, 还可以有效控制电网负荷频率, 并平衡可再生能源引起的频率波动, 改善电能质量。有效控制电力系统中电压失稳、低频振荡等不稳定现象, 提高系统的稳定控制能力。同时, 利用可变速机组的无功调节能力, 还可以维持电网电压的稳定。采用超同期的转子励磁调节方式可以获取较大调节范围, 由于基于双馈方式的可变速抽水蓄能机组的变流器仅承担转差功率, 所以装机容量仅占总装机容量的 20%~30%, 回转速度调节范围约 10%, 机组的输入功率调节可达 30%, 且造价和占地相对较小。日本、德国、瑞士等国已有大量双馈方式的可变速抽水蓄能机组在电网运行中发挥重要作用^[24-25]。图 5 为日本的大河内抽水蓄能电站, 4 台机组中有 2 台 40 万 kW 机组采用可变速抽水蓄能技术, 调用率远高于定速机组, 很适合深夜抽水工况的调频方式。

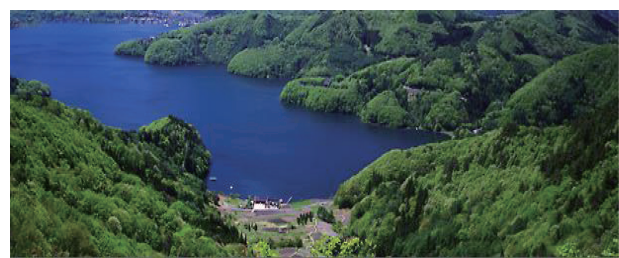


图 5 日本的大河内可变速抽水蓄能电站
Fig. 5 Ōkawachi variable speed pumped storage power station in Japan

双馈可变速抽水蓄能系统的原理性结构如图 6 所示。

由旋转磁场的原理可知, 当装有三相绕组的转子线圈通过三相交流电时, 转子周边会产生旋转磁场。设这一旋转磁场的旋转速度为 n_2 , 转子的机械速度为 n_r , 则从定子侧看, 转

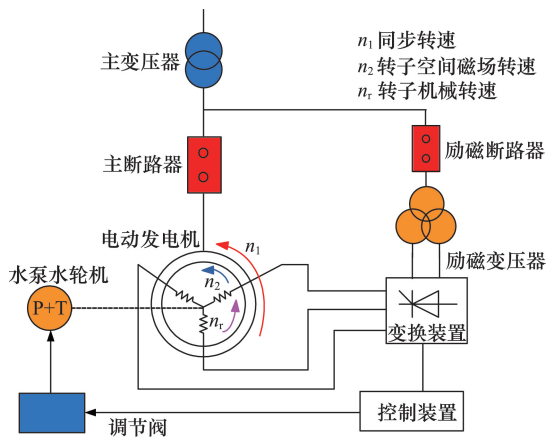


图6 可变速抽水蓄能系统的原理性结构

Fig. 6 Schematic structure of a variable-speed pumped storage system

子旋转磁场的速度 n_1 为

$$n_1 = n_2 + n_r \quad (1)$$

因此,当 n_1 为同步速度且保持定值,调整 n_2 就可以实现 n_r 的调节。

由水泵水轮机的特性可知,电网吸收的功率与转速的三次方成正比。当转子机械转速 n_r 发生改变,就可以大幅度的调节电网和水轮机之间的功率,可变速抽水蓄能机组的励磁调速系统是电力电子器件构成的变流器,优点在于可以用在高电压大功率的系统中,可靠性高,且可以快速控制电流、抑制励磁系统过电压,有助于机组的平稳启动、减少高次谐波。

发电模式时,可变速抽水蓄能机组与双馈异步风力发电机原理相同,工作方式包括以下3种。

- 1) 亚同步运行状态: $n < n_1$, 滑差频率为 f_2 的电流产生的旋转磁场转速 n_2 与转子的转速方向相同;
- 2) 超同步运行状态: $n > n_1$, 滑差频率为 f_2 的电流产生的旋转磁场转速 n_2 与转子的转速方向相反;
- 3) 同步运行状态: $n = n_1$, 滑差频率 $f_2 = 0$, 转子为直流励磁,与普通同步发电机相同^[26-27]。而电动模式时可以采用转子串接电动势调速法。

机组处于发电状态时,对于不同水头,机组发电出力对应的最佳转速不同。控制励磁的频率来调节转速,可以实现不同水头时的最佳功率输出。通常,可调速机组通过发电时水轮机按最佳速度运行,可使效率提高3%~5%。

在发电模式下,通过机组调速,可较大范围改变输出功率,从而实现电网功率平衡,如图7所示,传统抽水蓄能机组在60%~100%范围内抽水时便不可调节,并且在60%以下范围内调节时电力损耗较多;双馈可变速机组发电时,调节范围可由50%~100%扩大至30%~100%,且电力损耗比传统机组要小。在电动模式下,可变速电机的输出功率变化范围则如图8所示,图8中的粗实线为定速机组的输入功率与扬程的对应关系曲线,在扬程一定时输入功率几乎不可调整。而对于可变速机组,随着转速的变化,输入功率在图8中所得

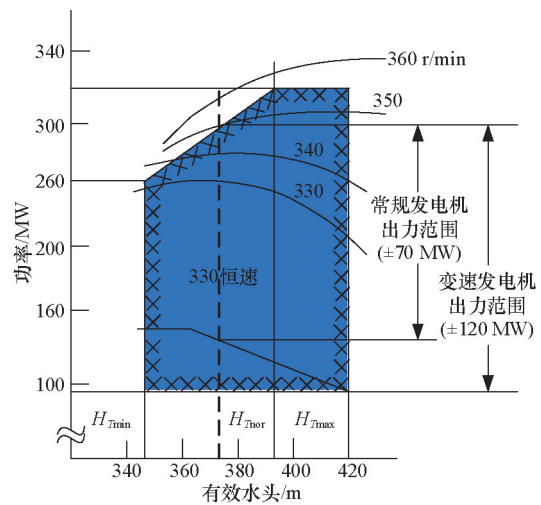


图7 双馈可变速机组的出力变化(发电模式)

Fig. 7 Output variation in generator mode

梯形框中大范围变化,从而起到利用负荷变化调节系统频率的目的。图8中 H_T 为有效落差, H_r 为扬程。

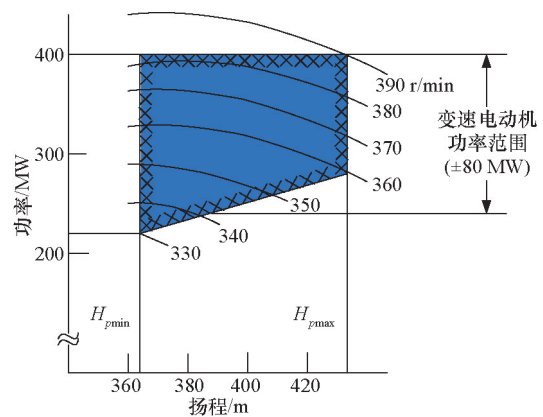


图8 双馈可变速机组的出力变化(电动模式)

Fig. 8 Output variation in pump mode

可变速机组通过调节转子励磁绕组的电流,就可以实现有功出力与无功出力的单独调节,因而对电网发生的诸如电压失稳、低频振荡等不稳定现象有一定的抑制作用,提高系统的稳定控制能力。还可以利用可变速机组的无功调节能力,实现电网电压的稳定控制^[28]。

2.3 全功率方式实现及控制

全功率变流器(full-size converter, FSC)在电动发电机定子与电网间连接了一个与电动发电机功率相同的变流器。发电模式时,将发电机发出的电压、频率不同的电能,经过AC/DC/AC变流后,变成与电网电压、频率相同的电能,输入电网。反之,电动模式时则作为电动机,功率流向相反,电机从电网吸收电能。

同为连续调速可变速技术,相对于双馈可变速抽水蓄能电站,基于FSC和同步电机的可变速抽水蓄能电站得到研究和关注的原因主要有:

1) 三相交流励磁转子组成的大容量双馈可变速抽水蓄能机组的转子和启动程序较为复杂,多级机械传动系统存在附加损耗、噪声和可靠性问题。

2) FSC将发电机和电网完全隔离,电机调速范围更宽,可以实现转速的完全调节。同时在电网异常和故障状态下,变流器的兼容运行能力更强。而双馈可变速机组转速的调节范围与转差率相关,调速范围受限。

3) 不管是设计安装新的电站,还是改装现有的抽水蓄能电站,FSC机组都具有一定的优势。现有的中小型抽水蓄能电站可以较为方便地改装为FSC可变速抽水蓄能电站,这在中国目前没有真正意义可变速机组的现状下具有实际意义。例如瑞士的Grimsel 2号抽水蓄能电站(总装机1125 MW)使用IGCT等电力电子器件将原先的一台定速机组改装为100 MW的FSC可变速机组,其实际出力可以快速跟随计划出力,取得了良好的效果^[29-30],如图9所示为Grimsel电站的大坝^[31]。



图9 瑞士Grimsel电站的大坝

Fig. 9 Dam of Grimsel hydropower station in Switzerland

4) 双馈可变速技术的变流器仅承担转差功率,装机容量仅占总装机容量的20%~30%,曾因为相对低廉的制造成本而得到广泛应用,然而,由于电力电子器件的价格按摩尔定律快速下降,变流器占整体工程投资的比例逐渐减小,双馈可变速机组投资较小的优势也越来越不明显。将普通的抽水蓄能机组改装为全功率机组时,抽水蓄能电站的主要投资仅增加了2%~4%。同时还可以降低水轮机的摩擦损耗,减少水流对水轮机的损坏,从而增长机组的维修周期,降低维修时消耗的人力、物力和财力。

如图10所示,FSC是水轮机发出的电能连接到电网的唯一通路,应具备较高的可靠性和较快的响应速度,并且具有与抽水蓄能机组相同的容量。由于容量和电压的增大,FSC可变速技术采用三电平中点箝位型(neutral point clamped,

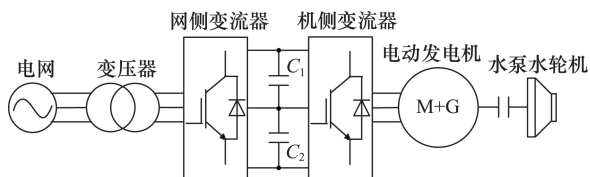


图10 三电平中点箝位型(NPC)双PWM结构

Fig. 10 Main circuit of three-level NPC converter

NPC)电压源变流器。2个串联器件的中点通过箝位二极管和直流侧电容的中点相连接。箝位二极管可以在开关器件导通时,提供电流通道,防止电容短路。FSC系统可以使用多种控制策略,如正弦PWM控制、方波控制等。其中空间矢量脉冲宽度调制算法(space vector pulse width modulation, SVPWM)由于其数字化程度高,直流电压利用率高的特点,已经广泛应用于三电平中点箝位型电压源变流器中^[32-35]。

为保证电网正常运行,网侧变流器要依据功率指令提供交换的有功功率和无功功率的平衡。基于d-q解耦的控制算法,网侧变流器控制可以实现有功与无功的解耦控制,保证电网的正常运行。其工作原理是:当电网电压保持恒定,通过控制与变流器连接的滤波电感上的电流大小,使其跟踪指令电流的变化,从而使变流器经滤波后的输出功率能够随指令电流而成比例变化。全功率变流器的网侧采用解耦控制,能够在发电和电动模式下灵活切换,独立地调节电网有功与无功功率的波动,从而调节系统频率和电压。此外,在电网故障状态下,抽水蓄能机组对有功和无功的支持有助于电网的快速恢复,并减轻频率和电压波动带来的不良影响。

当网侧变流器的有功功率波动时,直流母线电压随之变化。当直流母线电压变化时,机侧变流器可以调整输出频率,从而调整发电电动机的转速,通过转子动能的调整和调速器对水流量的调整来实现功率的控制。机侧变流器控制的目的是:连接网侧变流器和电动发电机,实现两者之间的电能输送,准确控制转矩跟踪。使用全控器件和空间矢量SVPWM调制算法,可以有效减小电流谐波、抑制电机转矩波动、降低系统损耗、在不同工作模式下实现能量的双向流动,还可以提高变流器直流电压利用率,保证良好的动态性能^[36]。

使用Matlab/Simulink软件对整个FSC抽水蓄能系统进行建模和仿真,如图11所示,FSC可变速系统对功率波动指令的跟踪特性良好,这表明FSC可变速抽水蓄能技术可以快速灵活地调节可再生能源发电功率。

对含大规模风力-FSC可变速抽水蓄能系统功率的控制,实质是对FSC可变速抽水蓄能系统的控制。采用威布尔

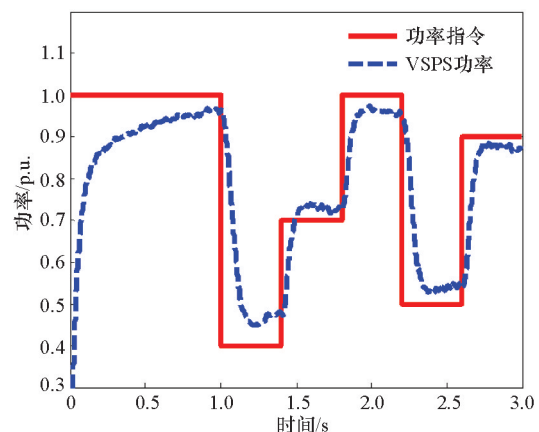


图11 FSC可变速系统对功率指令的跟踪

Fig. 11 Tracking of power order by VSPPS

(Weibull)分布能够较好地描述风速,但当研究的时段比较短时,可以用正态分布近似描述风电场风速。如图12所示,以电动模式为例,对于风电短时间内功率的标么值用一个均值为0.5,方差为0.02的高斯分布进行模拟。

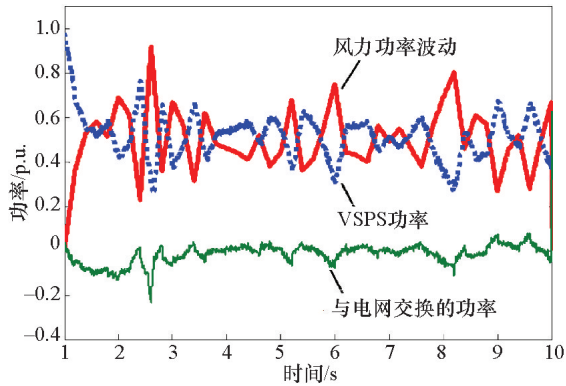


图12 风力波动和功率补偿后与电网交换的功率

Fig.12 Wind power fluctuation and the power exchanged with the grid after compensation

数值分析可以看出,功率补偿后与电网交换的功率均值仅为-0.0135。表明FSC抽水蓄能可以快速灵活地调节功率,有效降低了风电的波动,使得在功率补偿后与电网交换的功率波动较为平滑,且能降低风电对电力系统备用容量的要求,提高系统的经济性。结果表明,FSC可变速抽水蓄能机组可以补偿可再生能源引起的功率波动,可在含大规模可再生能源的电力系统控制中发挥作用^[37-39]。随着控制技术的快速发展和电力电子器件价格的降低,传统抽水蓄能行业的新时代特性将会得到进一步挖掘,全功率变流器将会得到更深入的研究。

3 特殊抽水蓄能技术

3.1 海水抽水蓄能技术

3.1.1 必要性

一般而言,抽水蓄能电站都是伴着包括上下游水库建设在内的大规模土木工程,因而对周围环境的影响常引发社会关注,其建设地点的选定也容易受到来自环境评价的限制。中国海洋资源丰富,海岸线蜿蜒曲折,相对常规抽水蓄能电站,海水抽水蓄能电站把海洋当成上游水库,水位变幅较小,有利于水泵水轮机的稳定运行,也可以大幅度地降低建设造价和运行调度方面的费用。

海水抽水蓄能电站的基本结构是:在距海边1000 m左右处建造一个高出地面200 m左右的多边形平面,在该平台上挖一个池塘作为上水池,把海作为下水池,并用压力管道把上水池的海水以一定流速引导到下水池的发电站。

随着沿海核电、海上风电、太阳能、海上潮流能、潮汐能等新能源的大规模发展,以及温室效应的加剧和淡水资源的短缺,海水抽水蓄能电站可以帮助维持电力系统有功功率和无功功率的平衡,构建安全稳定经济清洁的沿海能源供应体

系^[40-42]。2013年,中国东南沿海地区海水抽水蓄能项目研究已正式启动,对中国开发海水抽水蓄能的资源条件做出了前瞻性的评价。

3.1.2 技术挑战及解决方案

与传统的淡水环境相比,海水环境的运行条件苛刻,在防蚀方面有很多问题,仅仅凭传统的技术难以解决,引起了对海水抽水蓄能电站的争议。海水抽水蓄能电站面临的主要问题:1)上库防渗效果和海水对地表及地下水污染的评价;2)海水中的有机物质对管道及水轮机的粘附作用以及由此造成发电和抽水效率降低的评价;3)在高压和高速水流作用下海水对金属材料的腐蚀作用;4)在高海浪情况下,管道进出口海水的输入和排泄的不稳定性对发电出力的影响;5)上库海水因台风等风力作用而飘到水库周围,对植物、动物及其他生物的影响;6)对生息在下库出口周围的珊瑚及其他有机生物的影响^[17]。

电站建设过程中关键技术问题的解决方案:1)上池采用防水性能好的EPDM(ethylene propylene diene monomers)橡胶板衬砌防渗。当橡胶防渗板一旦出现问题时,设置在过渡层检查廊道内排水管处的盐分监测仪和压力计就会检查出海水泄漏情况并向控制所发出警报,以便及时向上池补给海水。2)水压管中有300 m的直线部分,采用的是具有耐磨性和不易附着水生物的强化玻璃钢管。排水管采用防腐性能好的环氧树脂喷涂钢筋混凝土管,排水口则采用具有良好耐磨和耐腐蚀性的特殊陶瓷喷涂材料。3)水轮机转轮和导流叶片采用耐气蚀和耐腐蚀的特殊不锈钢材料,大规模采用双向缠绕结构的纤维增强复合材料(FBP)可达到预期效果。4)电气防腐蚀装置。采用防腐蚀电流可调的外加电源,分为阴极法和阳极法两种,并设置氯气排放装置来防止海水电解产生的氯气破坏不锈钢钝化膜。5)采用可变速的抽水发电系统,以适应发电和抽水情况高效转换。6)及时检测和分析周围海水浓度和动植物群生长状况。

3.1.3 海水抽水蓄能应用示例

日本、埃及、印尼等国家已有建设海水抽水蓄能电站的案例,中国尚无此方面的实践。就日本而言,由于可以确保冷却水,所以在海岸边建设了多座火电站和核电站,再于其周边地区建设海水抽水蓄能电站,则有利于整个电网系统的运作及送电成本的降低。世界上第一座海水抽水蓄能电站是日本的冲绳山原抽水蓄能电站,如图13所示。该电站位于日本冲绳岛,是利用太平洋作为下库,上库是由一块凹地经人工开挖筑坝而成,装机容量30 MW,是一座试验性的抽水蓄能电站。上池与海平面的有效落差为136 m,使用流量为26 m³/s,最大输出功率为3万kW。该工程之所以引起国际上的广泛关注,不仅因为它是世界上第一座利用海水的抽水蓄能电站,也是因为在工程建设过程中考虑到了保护濒危物种。运行多年后,在人与环境和谐相处的前提下,渗透与渗漏、水工建筑物、水泵水轮机组、海水供电系统以及在台风环境中的状况良好^[43-45]。

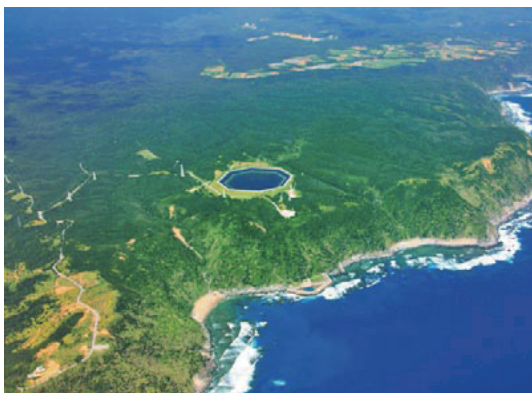


图 13 日本冲绳山原海水抽水蓄能电站

Fig.13 Okinawa Yanbaru seawater pumped storage power station in Japan

3.2 高寒地区抽水蓄能技术

3.2.1 必要性

以风能和太阳能为优势能源代表,西北等高寒地区蕴含丰富的能源,适合建设大型能源基地,进行能源的集中开发及输出,在中国电力发展规划中不可或缺。但是西北高寒地区的风能、太阳能资源大多位于电网末端,离主电网负荷中心较远,负荷率低下,因此当地电网消纳能力十分有限。一直以来,西北电网调峰需求不高,仅依靠常规水电和火电调峰就能得到满足。

近年来,风电、光伏并网规模发展迅速,新疆等地已经出现因为电网调峰能力不足而制约风电消纳的情况。由于常规水能开发潜力有限,仅靠水电和火电调峰已难以满足风电、光伏快速发展对调峰的需求,需要配置一定规模的抽水蓄能电站保持电力系统的安全稳定。在风电大规模并网之前,目前,甘肃、新疆等地已经出现因为电网调峰能力不足而制约风电消纳的情况,今后更大规模的风电、光电并网对电网调峰能力的要求将更高,因此,在这些地区建设抽水蓄能电站已变得十分必要。

3.2.2 技术挑战及解决方案

西北地区由于其独特的地理位置、地形地质条件与气候条件,西北地区的抽水蓄能电站有自己独有的特点。西北大部分地区海拔高,新疆、青海、甘肃抽水蓄能电站基本位于海拔 2000~3500 m 高程。因此,高寒地区的抽水蓄能电站需克服困难、依据具体情况来改进。保证过机含沙量不超标、保证电站发电用水及冰冻期电站安全运行是西北地区抽水蓄能电站设计中需要解决的重要问题。配合大基地外送的抽水蓄能电站的主要运行方式为在风电、光电出力大系统无法消纳时抽水蓄能,对机组性能也会有更高的要求,抽水蓄能电站的运行方式、评价方法和效益量化也有待进一步研究。

解决方案:1) 预防措施,做好选点规划工作,尽可能将电站位置定在日照长的阳坡坡面,并在选择渠线时尽量顺直。每年冬季来临之前对进水口拦污栅进行彻底清理,提出副拦污栅并锁于平台上以减少冰凌挂在拦污栅上的机会,减缓拦

污栅挂冰的速度。严格控制库区水位在规定区间内变化,防止冰面上涨造成冰面与坝面底部封死或冰面下降造成库区涌冰^[47-48]。2) 引水渠口与渠道结合处,增加设置一个滑冰隔离板,使上游的冰块在流入引水渠口前,就被滑冰板隔离到主干河道冲至拦河坝以下,使引水渠只进水不进冰。采用拦阻浮冰、用排冰道排泄浮冰、对引水渠道加钢筋砼改版保温并提高水温或建筑物保温来消融冰冻、改良闸板等措施,并结合人工、机械破冰法和水泵扰动等方法^[49]。3) 为保证发电用水,设计中考虑水损备用库容。保证过机含沙量满足要求的主要措施是建拦沙坝,即,在水源库上游再修建一座坝和泄洪排沙洞,通过泄洪排沙洞将高含沙量(超过过机含沙量要求)水流排至水库下游,并能保证给水库补充清水。4) 加强建设管理和运行管理,建立完善的建设运行管理机制。

3.2.3 高寒地区抽水蓄能应用示例

羊卓雍湖(西藏三大圣湖之一)抽水蓄能电站位于中国西藏自治区贡嘎县境内,是混合式抽水蓄能电站。电站厂区地面海拔约 3600 m,是世界上海拔最高的抽水蓄能电站。电站利用羊卓雍湖与雅鲁藏布江之间约 840 m 的天然落差和相应的 150 亿 m³ 的蓄水量,上池取羊卓雍湖的湖水,通过引水隧洞和压力钢管,引水至雅鲁藏布江边的发电厂。总装机容量 11.25 万 kW(5×2.25 万 kW),另预留 1 台 2.25 万 kW 常规机组,年发电量已超过 0.84 亿 kW·h,电力供应拉萨、山南和日喀则 3 个地区,是西藏规模最大的水电站,对拉萨电网乃至藏中电网的安全稳定运行具有重要作用。枢纽发电时,直接从羊湖取水,经隧洞、调压井、压力钢管至厂房,尾水泄入雅鲁藏布江;抽水运行时,由江边低扬程泵房抽水入沉沙池,再进入主厂房多级蓄能泵,经引水系统流入羊湖。图 14 为羊卓雍湖抽水蓄能电站的上池羊卓雍湖水。



图 14 上池——西藏的羊卓雍湖

Fig. 14 The upper reservoir——Yamdrok lake in Tibet

3.3 水泵水轮机短路运行抽水蓄能技术

基于定速机组和水泵水轮机短路运行(hydraulic short circuit operation)方式的抽水蓄能技术,省去了工况转换和机组的启停过程,同时运行在发电和电动模式下,灵活可靠,更方便地随着电网的功率波动而进行调节。当抽水蓄能电站有一台机组时,该机组同时运行在发电模式和电动模式。当抽水蓄能电站有多台机组时,可以使一部分机组运行在发电

模式,一部分机组运行在电动模式^[50]。例如,在只有一台机组的情况下,当系统输入100 MW,水泵输出150 MW时,系统拓扑和功率流动如图15所示。

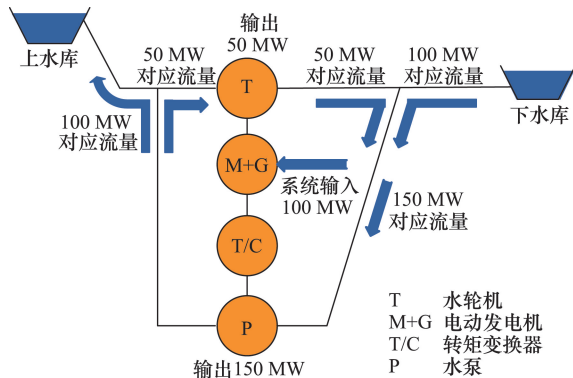


图15 水泵水轮机短路运行方式示意

Fig.15 Schematic diagram of hydraulic short circuit operation

4 结论

中国抽水蓄能电站总体上起步较慢,却起点较高,在时间、空间上呈现为年代波浪式、跨区辐射式发展,已建设的大型抽水蓄能电站技术已处于世界先进水平。随着经济的继续发展,对电网供电可靠性的要求必然进一步提高,对新能源大规模发展所需要的储能调节等要求会越来越突出。并且,随着中国能源政策的调整,抽水蓄能电站在地域上也会将重心从经济发达的中东部地区扩展到风能资源突出的内蒙古、吉林、甘肃等新能源基地,发挥抽水蓄能电站调峰能力强、储能优势突出、经济性好,且能提高输电线路经济性的特点。因此,未来中国抽水蓄能电站必然迎来新的建设高潮。

随着风电、光伏等可再生能源的大规模并网及核电规模的不断扩大,抽水蓄能电站的储能规模大、储能效益显著、寿命长、利于节能减排,且可以与新能源电源实现联合运用并适合大规模推广,因而在现阶段乃至未来几十年,它都将在大规模储能技术方面处于领先的地位。未来需要解决的核心问题:

1) 完善电价制度和管理制度。制约抽水蓄能发展的是投资意愿,中国抽水蓄能制度不完善,相关政策出台较慢,所以需要改革电价制度和管理体制,将抽水蓄能电站的各项功能纳入系统辅助服务补偿范畴,合理引导规划和投资,促进电力资源优化配置;在综合管理的同时,在建设和运行阶段都提高保护资源和生态环境的意识。

2) 发展核心技术。目前,全国抽水蓄能电站装机几乎全为定速机组,还不足以应对电网近年来出现的大规模快速功率波动的迫切需求。现有的中小型抽水蓄能电站可以较为方便地改装为FSC可变速抽水蓄能电站。鉴于可变速抽水蓄能机组在提高系统资源利用率、保障电网安全稳定运行等方面的优越性能,建议尽快选择合适项目装设可变速机组投入电网运行,并以期通过跟踪其实际运行为中国可变速抽水

蓄能技术的发展提供实践依据。

3) 配合能源互联网和储能系统的协调发展。能源互联网对储能提出了更高的要求,亟需抽水蓄能电站的配套,抽水蓄能电站及其可变速将会得到更多的关注和更深入的研究。

参考文献(References)

- [1] Zhang N, Kang C Q, Kirschen D S, et al. Planning pumped storage capacity for wind power integration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(2): 393-401.
- [2] Brown P D, Peas Lopes J A, Matos M A. Optimization of pumped storage capacity in an isolated power system with large renewable penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 523-531.
- [3] Ding Lijie, Wang Biao, Zhang Hua, et al. The optimal allocation of pumped storage station in wind farm[C]//Power and Energy Engineering Conference 2012. Shanghai, China: IEEE, 2012: 1-4, 27-29.
- [4] 李强, 袁越, 李振杰, 等. 考虑峰谷电价的风电-抽水蓄能联合系统能量转化效益研究[J]. 电网技术, 2009(6): 13-18.
Li Qiang, Yuan Yue, Li Zhenjie, et al. Research on energy shift-ing benefits of hybrid wind power and pumped hydro storage system considering peak valley electricity price[J]. Power System Technology, 2009(6): 13-18.
- [5] Jae Woong Shim, Youngho Cho, Seog-Joo Kim, et al. Synergistic control of SMES and battery energy storage for enabling dispatchability of renewable energy sources[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, 23(3): 570-575.
- [6] 李碧辉, 申洪, 汤涌, 等. 风光储联合发电系统储能容量对有功功率的影响及评价指标[J]. 电网技术, 2011(4): 123-128.
Li Bihui, Shen Hong, Tang Yong, et al. Impacts of energy storage capacity configuration of HPWS to active power characteristics and its relevant indices[J]. Power System Technology, 2011(4): 123-128.
- [7] 王皓怀, 汤涌, 侯俊贤, 等. 风光储联合发电系统的组合建模与等值[J]. 中国电机工程学报, 2011, 34: 1-9.
Wang Haohuai, Tang Yong, Hou Junxian, et al. Composition modeling and equivalence of an integrated power generation system of wind, Photovoltaic and Energy Storage Unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 34: 1-9.
- [8] 袁铁江, 陈洁, 刘沛汉, 等. 储能系统改善大规模风电场出力波动的策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014(4): 47-53.
Yuan Tiejia, Chen Jie, Liu Peihan, et al. Strategy of improving large-scale wind farm output fluctuation based on energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2014(4): 47-53.
- [9] 廖毅. 风光储联合发电系统输出功率特性和控制策略的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
Liao Yi. An optimization strategy of smoothing control of HPWS active power output[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [10] Bidgoli M A, Mohammadpour H A, Bathaee S M T. Advanced vector control design for DFIM-based hydropower storage for fault ride-through enhancement[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015: 1-11.
- [11] Furuya S, Taguchi T, Kusunoki K, et al. Successful achievement in a variable speed pumped storage power system at Yagisawa power plant [C]//Power Conversion Conference. Japan: IEEE, 1993: 19-21.
- [12] 贾金生, 郝荣国, 姜忠见, 等. 抽水蓄能—将富余的电能转化为水的势能, 按需释放[J]. 科学世界, 2015(3): 20-47.
Jia Jinsheng, Hao Rongguo, Jiang Zhongjian, et al. Pumped storage[J]. Newton, 2015(3): 20-47.
- [13] 梅州史上最大基建工程: 梅蓄电站开工, 投资70亿元[EB/OL]. (2016-

- 01-10)[2015-09-30]. <http://news.sina.com.cn/o/2015-09-30/doc-ifximezx0782214.shtml>
- The largest infrastructure project in the history of Meizhou: Mei power plant started to invest 7 billion yuan[EB/OL]. (2016-01-10)[2015-09-30]. <http://news.sina.com.cn/o/2015-09-30/doc-ifximezx0782214.shtml>
- [14] 张东. 基于综合评价法的抽水蓄能电站项目经济效益研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- Zhang Dong. Economical benefit study of pumped storage power station based on comprehensive evaluation method[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [15] 吕项羽, 李德鑫, 郭欢, 等. 含风力-抽蓄发电的电力系统经济运行方式优化[J]. 电力建设, 2014(2): 28-35.
- Lü Xiangyu, Li Dexin, Guo Huan, et al. Economic operation mode optimization of power system with wind and pumped storage power generation[J]. Electric Power Construction, 2014(2): 28-35.
- [16] 李强, 袁越, 李振杰, 等. 考虑峰谷电价的风电-抽水蓄能联合系统能量转化效益研究[J]. 电网技术, 2009(6): 13-18.
- Li Qiang, Yuan Yue, Li Zhenjie, et al. Research on energy shifting benefits of hybrid wind power and pumped hydro storage system considering peak valley electricity price[J]. Power System Technology, 2009(6): 13-18.
- [17] Figueiredo F C, Flynn P C. Using diurnal power price to configure pumped storage[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 804-809.
- [18] 罗莎莎, 刘云, 刘国中, 等. 国外抽水蓄能电站发展概况及相关启示[J]. 中外能源, 2013(11): 26-29.
- Luo Shasha, Liu Yun, Liu Guozhong, et al. Pumped storage power station development in foreign countries and inspiration for China[J]. Sino-Global Energy, 2013(11): 26-29.
- [19] Yang H, Liang C, Yang J. Analysis on the functions of pumped storage station in the construction of China's smart grid[C]//Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. China: IEEE, 2011: 1623-1628.
- [20] 陈天城. 日本抽水蓄能电站建设中的新技术应用[C]//抽水蓄能电站建设经验技术交流论文集. 福建: 中国水力发电工程学会, 2002: 3.
- Chen Tiancheng. Application of new technology in the construction of pumped storage power station in Japan [C]//Proceedings of the experience and technical exchange meeting for the construction of Pumped Storage Power Station. Fujian: Society of hydroelectric engineering, 2002: 3.
- [21] 肖贡元. 日本抽水蓄能电站技术的新进展[J]. 水利水电科技进展, 2003(1): 61-65.
- Xiao Gongyuan. New progress of the technology of pumped storage power station in Japan[J]. Advances in Science and Technology of Water resources, 2003(1): 61-65.
- [22] 韩民晓, Othman Hassan ABDALLA. 可变速抽水蓄能发电技术应用与进展[J]. 科技导报, 2013, 31(16): 69-75.
- Han Minxiao, Othman Hassan ABDALLA. Variable speed pump storage power generation technology and its development[J]. Science and Technology Review, 2013, 31(16): 69-75.
- [23] Padoan A C, Kawkabani B, Schwery A, et al. Dynamical behaviour comparison between variable speed and synchronous machines with PSS[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3): 1555-1565.
- [24] Othman Hassan Abdalla Elkhalfifa. 基于级联式H-桥多电平变频器的可变速抽水蓄能系统[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- Othman Hassan Abdalla Elkhalfifa. Variable speed pump storage based on cascaded H-bridge multilevel converter[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [25] Abdalla O H, Han M X, Liu C R. Multi-level converter based variable speed pump storage for wind power compensation[C]//Information Science, Electronics and Electrical Engineering. Japan: ISEEE, 2014.
- [26] Suul K J A U, Undeland T. Variable speed pumped storage hydropower for integration of wind energy in isolated grids—case description and control strategies[C]//Proc. NORPIE. Finland: Proc. NORPIE, 2008: 1.
- [27] Suul K J A U, Undeland T. Wind power integration in isolated grids enabled by variable speed pumped storage hydropower plant[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies. Singapore: ICSET, 2008.
- [28] Lung J K, Lu Y, Hung W L, et al. Modeling and dynamic simulations of doubly fed adjustable-speed pumped storage units[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(2): 250-258.
- [29] ABB. Pumping efficiency[J/OL]. ABB review, 2014, 2: 42-48. [2015-12-20]. [http://www09.abb.com/global/scot/scot271.nsf/veritydisplay/8db01-db1243_33c1bc1257ddc0046cdb7\\$file/ABB%20Review%202-2014_72dpi.pdf](http://www09.abb.com/global/scot/scot271.nsf/veritydisplay/8db01-db1243_33c1bc1257ddc0046cdb7$file/ABB%20Review%202-2014_72dpi.pdf).
- [30] Inoue K, Nagasue S, Okada M, et al. Renovating of existing pumped storage power plant from conventional system to adjustable speed system[C]//Electrical Machines and Systems (ICEMS), South Korea: IEEE, 2010: 1642-1644.
- [31] GRIMSELWELT. Adventure Hydrodam[EB/OL]. [2015-12-20]. <http://www.grimsewelt.ch/grimsewelt-experience/power-plant-tour/adventure-hydrodam/>
- [32] 景巍, 谭国俊, 叶宗彬. 永磁直驱风力发电系统中两电平与三电平变流器比较[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(6): 92-97.
- Jing Wei, Tan Guojun, Ye Zongbin. Comparison of two-level and three-level converters in permanent magnet direct-drive wind power generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(6): 92-97.
- [33] Clotea L, Forcos A, Marinescu C, et al. Power losses analysis of two-level and three-level neutral clamped inverters for a wind pump storage system[C]//Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), Romania: OPTIM, 2010: 1174-1179.
- [34] 陶高周. 全功率变流器机械结构关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- Tao Gaozhou. Research on key technologies of mechanical structure of full power converter[D]. Hefei: HeFei University of Technology, 2010.
- [35] Hu Weihao, Chen Zhe, Wang Yue, et al. Flicker mitigation by active power control of variable-speed wind turbines with full-scale back-to-backpower converters[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(3): 640-649.
- [36] 肖飞. 直驱式永磁同步风力发电变流器若干关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- Fei Xiao. Research on several key technologies of converter for permanent magnet directly driven wind turbine[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [37] Chang Xin, Han Minxiao, Zheng Chao. Power control analysis for variable speed pumped storage with full-size converter[C]//41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Japan: IECON, 2015.
- [38] 畅欣, 韩民晓, 郑超. FSC可变速抽水蓄能在含大规模风光发电系统中的应用[C]//抽水蓄能电站建设文集2015. 深圳: 中国水力发电工程学会, 2015: 71-76.
- Chang Xin, Han Minxiao, Zheng Chao. Application of variable speed

- pumped storage with full-size converter in the large-scale wind power generation system complementary with solar power generation system, Shenzhen: Society of hydroelectric engineering, 2015: 71-76.
- [39] Chen G Z, Liu D Y, Wang F, et al. Determination of installed capacity of pumped storage station in WSP hybrid power supply system[C]//Sustainable Power Generation and Supply, SUPERGEN, China: IEEE, 2009: 1-5.
- [40] Tashiro Y, Kameda Y. Concentration of organic sun-blocking agents in seawater of beaches and coral reefs of Okinawa Island, Japan[J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, 77 (1-2): 333-340.
- [41] 大岛胜宏, 松浦润, 关存良. 海水抽水蓄能技术及其展望[J]. 水利水电技术, 2002, 33(1): 71-73.
Oshima Katsuhiko, Matsuura Jun, Guan Cunliang. Water pumped storage technology and its prospect[J]. Water Conservancy and Hydropower Engineering, 2002, 33(1): 71-73.
- [42] Fujihara T, Imano H, Oshima K. Development of pump turbine for seawater pumped-storage power plant[J]. American Society of Civil Engineers, 1998, 47: 199-202.
- [43] Pina A, Ioakimidis C S, Ferrao P. Economic modeling of a seawater pumped-storage system in the context of São Miguel[C]//Sustainable Energy Technologies. Singapore: ICSET, 2008: 707-712.
- [44] 刘布谷. 世界上首座海水抽水蓄能电站上库的设计与施工[J]. 水利水电快报, 2012(11): 15-17.
Liu Bugu. The world's first water pumped storage power station, the design and construction of water conservancy and Hydropower[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2012(11): 15-17
- [45] 晏红. 日本利用海水的抽水蓄能电站[J]. 水电科技进展, 2001(2): 35-38.
Yan Hong. Water pumping station in Japan by seawater[J]. Hydropower energy storage technology, 2001(2): 35-38.
- [46] 冯黎, 王社亮. 西北地区发展抽水蓄能电站的意义与面临的主要问题[J]. 西北水电, 2014(2): 1-4.
Feng Li, Wang Sheliang. The significance and main problems of the development of pumped storage power station in the northwest region of China[J]. Northwest water and electricity, 2014(2): 1-4.
- [47] 李建峰, 姚莉, 肖长伟, 等. 论西藏高寒地区水电站闸门防冰冻技术[J]. 西藏科技, 2014(4): 65-67.
Li Jianfeng, Yao Li, Xiao Changwei, et al. Study on the anti freezing technology of sluice gate in the high cold region of Tibet[J]. Tibet science and technology, 2014(4): 65-67.
- [48] 杨桥春. 高寒高海拔水电站枢纽防寒冬过冬问题及解决方案[J]. 电力安全技术, 2015(8): 67-68.
Yang Qiaochun. The alpine hydropower station hub cold winter problem and solution[J]. Electric safety technology, 2015(8): 67-68.
- [49] Anselmetti F S, Bühler R, Finger D, et al. Effects of alpine hydropower dams on particle transport and lacustrine sedimentation[J]. Aquatic Sciences, 2007, 69(2): 179-198.
- [50] 水力発電機器の設計技術の動向調査専門委員会. 可変速揚水発電技術[J]. 電気学会技術報告, 2015(4): 114-135.
Special committee on the investigation of the design technology of hydraulic power generator[J]. Technical report of Electrical Institute(Japan), 2015(4): 114-135.

Application and development of pumped storage technology

HAN Minxiao¹, CHANG Xin¹, LI Jiqing², YANG Gang³, SHANG Tiankun⁴

1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources; School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China
2. School of Renewable Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China
3. State Grid Harbin Electric Power Company, Harbin 150010, China
4. Shanghai Electric Power Co., Ltd., Shanghai 200010, China

Abstract The large-scale development of renewable energy generation such as wind energy and solar energy has brought enormous pressure to the safety and stability of the power system. Power system is in urgent need to configure large capacity energy storage systems, compensate power change, and adapt to the large-scale development of new energy sources. More importantly, the demand for load adjustment has recently been very urgent because of low power load rate and fast power fluctuation. The best solution to the problem of safety and stability of power grid, caused by large-scale development of new energy such as wind power, is to install pumped storage station in an appropriate scale. This paper analyzes the pumped storage technology principle and characteristics, expounds the new trend of pumped storage technology development: the construction technology of extra high water head and high capacity; manufacturing technology of large capacity pump turbine; rotor AC excitation technology of variable speed pumped storage units and full size converter technology; the construction and operation technology of pumped storage station for coastal and alpine regions. This paper focuses on the variable speed pumped storage technology, presents the overall structure of the double feed mode and full size converter mode, and puts forward the control strategy in different modes. The composition, technical challenges and solutions of the new special pumped storage power station are also presented in this paper.

Keywords VSPS; full-size converter; seawater pumped storage; alpine area pumped storage; renewable energy; stability of electric power system

(责任编辑 刘志远)