

抽水蓄能在四川电网的应用前景展望

陈刚¹, 丁理杰¹, 韩晓言², 王亮¹, 李甘², 史华勃¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘要:随着适应高比例新能源接入新型电力系统加快构建, 系统对储能等灵活调节电源的需要愈发迫切。作为目前技术最成熟、应用最为广泛、寿命周期最长、容量最大的一种储能技术, 抽水蓄能进入了发展的快车道。文中介绍了抽水蓄能的基本原理和发展现状, 总结了抽水蓄能最新发展趋势; 分析了四川电源特性和存在的问题, 以及抽水蓄能在四川电网的应用前景, 并提出了适合四川电网实际的抽水蓄能的应用场景和模式。

关键词:抽水蓄能; 新能源; 四川电网

中图分类号: TM 73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2022)02-0001-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20220201

Investigation into Application Prospects of Pumped Storage in Sichuan Power Grid

CHEN Gang¹, DING Lijie¹, HAN Xiaoyan², WANG Liang¹, LI Gan², SHI Huabo¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: With the accelerated construction of new power system for high proportion of new energy access, the needs for power supply with flexible adjustment such as energy storage are more and more urgent. Pumped storage, as one of the most mature and the most widely-used energy storage technology with the longest life cycle and the largest capacity, has entered into a fast track of development. The basic principle and development status of pumped storage are introduced, and the latest development trend of pumped storage is summarized. The characteristics and existing problems of power supply are analyzed as well as the application prospect of pumped storage in Sichuan power grid. At last, the application scenes and modes suitable for the practical needs of pumped storage in Sichuan power grid are proposed.

Key words: pumped storage; renewable energy; Sichuan power grid

0 引言

近年来能源短缺、环境恶化、气候变暖, 以化石能源为主的传统能源结构不可持续, 构建清洁低碳、安全高效的新型能源体系势在必行。

过去5年, 风电、光伏等新能源装机容量快速增长, 2020年年底, 全国风电和光伏总装机容量已达534 GW, 预计2030年将超过1200 GW^[1]。但新能

源发电天然具有的随机波动性, 给系统的电力电量平衡、调控运行、安全控制等诸多方面带来了巨大的挑战和不利影响, 限制了新能源的有效利用。为此, 引入储能增加系统灵活性、提升系统安全运行水平和新能源消纳能力成为行业共识^[2-4]。

抽水蓄能是目前技术最成熟、应用最广泛、寿命周期最长、容量最大的大规模物理储能方式^[5]。根据中关村储能产业技术联盟统计^[6], 截止2020年, 全球抽水蓄能装机容量为178 GW, 占全球储能总装机容量的90.3%; 中国抽水蓄能的装机容量规模达到31.79 GW, 占中国储能总量的89.3%。大规模开

基金项目:国家重点研发计划项目“分布式光伏与梯级小水电互补联合发电技术研究及应用示范”(2018YFB0905200)

发抽水蓄能电站已成为支撑新型电力系统建设的重要措施,国家陆续出台多项政策支持抽水蓄能发展。

四川省是全国最大的水电清洁能源基地,截止 2020 年,水电装机容量突破 7892 kW,预计 2023 年年末水电装机容量将超过 100 GW;但其中径流式水电站约占 50%,水电整体调节性能较差。在四川发展抽水蓄能,提升系统调节能力成为需求迫切。此外,四川新能源将迎来快速发展,预计“十四五”末风电和光伏装机容量将超过 20 GW,进一步为抽水蓄能的发展提供了应用场景和需求。

下面调研了抽水蓄能的发展现状,总结了发展趋势,结合四川电网的实际情况,分析了抽水蓄能在四川电网的应用前景,并提出了适合四川电网实际的抽水蓄能的应用模式。

1 抽水蓄能发展现状

抽水蓄能是利用负荷低谷电能或无法正常消纳的新能源弃电电能抽水至上水库,在负荷高峰或需要时再放水至下水库发电的水电站,是电力系统中最为优质的灵活调节电源,具有削峰、填谷、调频、调相、事故备用、黑启动等多种功能^[4,7-8],是电网安全稳定的重要保障和大规模新能源并网消纳的关键支撑。

1.1 抽水蓄能的分类

1.1.1 按转速是否变化分类

按照转速是否变化,可分为定速抽蓄机组和可变速抽蓄机组。

1) 定速抽蓄机组:转速不可调,发电功率可通过导叶调节(与常规水电机组一致),抽水功率不可调,目前在建的大型抽水蓄能基本都是定速机组。

2) 可变速抽蓄机组:转速可调,发电工况下功率可同时通过变导叶或变转速进行调节,调节范围更广^[9];抽水工况下一般具有一定的功率调节能力,可根据水头等运行工况变化调整最优转速,提高抽水和发电效率,响应速度更快。又分为变转速和变极调速两种方式,根据变转速原理不同,又可分为双馈式和全功率式。

1.1.2 按有无天然径流分类

按照有无天然径流,可分为纯抽水蓄能电站和混合式抽水蓄能电站^[10]。

1) 纯抽水蓄能电站:专为电网调节修建的,无法独立承担径流发电任务。其上水库没有径流或来

水量很小,水在上水库、下水库循环使用。一般用于调峰、调频,不能作为独立电源存在。

2) 混合式抽水蓄能电站^[11]:其上水库有一定的天然来水,电站同时安装常规水电机组和抽水蓄能机组。

1.1.3 按水库调节性能分类^[10]

按照水库调节性能,可分为日调节、周调节和季调节抽水蓄能电站。

1) 日调节抽水蓄能电站:水库调节能力仅满足在日内循环。每日低谷负荷抽水,高峰负荷期发电,水库的库容量按每日调峰的发电量决定。

2) 周调节抽水蓄能电站:水库调节能力满足在周内循环。工作日负荷较高,每天的发电用水量大于抽水量;周末负荷较低,利用多余电能进行大量蓄水。

3) 季调节抽水蓄能电站^[12]:一般在年或多年调节水电站中加装抽水泵,丰水期利用弃水电量抽水,充分利用水库库容的跨季节调节能力,在枯水期放水发电。

1.1.4 按机组类型分类

按照机组类型,可分为四机式(分置式)、三机式(串联式)和两机式(可逆式)抽水蓄能机组。

1) 四机式(分置式)机组:采用单独工作的抽水机组和发电机组,抽水和发电各自独立运行。

2) 三机式(串联式)机组:将发电机和电动机合并为一体,与水泵、水轮机在一起而形成一种组合式机组。

3) 两机式机组:将水泵和水轮机合并为一体的可逆式水泵水轮机,为现代抽水蓄能电站的主要机型。

1.1.5 其他分类

按水头高低,可分为低水头(100 m 以下)、中水头(100~700 m)、高水头(700 m 以上)。

按厂房布置特点,可分为地面式、地下式、半地下式。

按照利用水的性质,可分为淡水抽水蓄能、海水抽水蓄能^[13]。

1.2 抽水蓄能的发展现状

1882 年,世界首座抽水蓄能电站在瑞士诞生^[14]。受限于社会经济发展滞后,中国抽水蓄能电站的发展相对较慢。1968 年,中国首台 11 MW 抽水蓄能机组在河北岗南电站投产^[15]。1992 年,河北潘家口水电站先后投运 3 台 90 MW 抽水蓄能机组,中国抽水蓄能建设由此步入快车道^[16],数座抽

水蓄能电站在负荷中心城市建设以满足日益增长的调峰要求。中国历年抽水蓄能装机容量增长情况如图 1 所示。2017 年 5 月 19 日,中国装机容量突破 27.73 GW,正式超越日本成为世界上抽水蓄能装机容量最大的国家。截止 2021 年 8 月,中国在运抽水蓄能装机容量为 32.49 GW,在建规模为 54.93 GW。

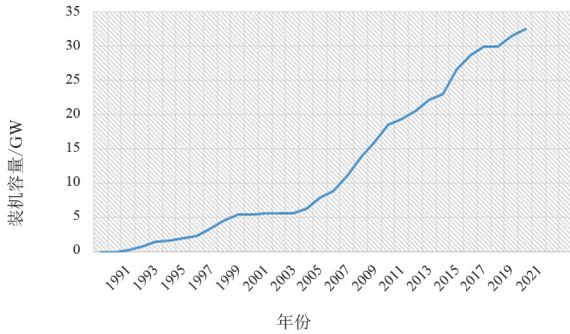


图 1 中国历年抽水蓄能装机容量情况

2 抽水蓄能最新发展趋势

为适应新型电力系统建设和大规模高比例新能源发展需要,助力实现碳达峰、碳中和目标,国家陆续出台政策支持抽水蓄能发展。2021 年 5 月 7 日,国家发改委发布《关于进一步完善抽水蓄能价格形成机制的意见》(发改价格[2021]633 号),明确将容量电价纳入输配电价回收,为抽水蓄能电站提供了市场和政策环境。

2.1 大型抽水蓄能电站加快建设

2021 年 8 月 6 日,国家能源局发布《抽水蓄能中长期发展规划(2021—2035 年)》(征求意见稿)(下称《征求意见稿》)中,提出到 2025 年投产总规模 62 GW、到 2030 年投产 200 GW、到 2035 年投产总规模 300 GW 的发展目标,并明确提出了“十四五”“十五五”“十六五”重点实施项目。虽然在 9 月 9 日发布的《抽水蓄能中长期发展规划(2021—2035 年)》(下称《规划》)中,将到 2030 年抽水蓄能投产总规模较《征求意见稿》的 200 GW 降低到 120 GW 左右。但是《征求意见稿》中提到的重点实施项目依然可以视为经过初步选点的抽水蓄能规划发展重点,可以基于此分析抽水蓄能的发展趋势。

对《征求意见稿》进行统计,得到各容量装机情况,如图 2 和图 3 所示。可以看到,已建成的抽水蓄能电站中,小型电站(装机容量小于 600 MW)数量超过 20%;随着大中型抽水蓄能电站建设技术水平

提高和电网调节需求增加,在建的抽水蓄能电站全部为大中型抽水蓄能电站,从“十四五”至“十六五”,装机容量在 1800 MW 以上的大型抽水蓄能电站数量和装机容量均快速增加。

目前,中国在建单机容量最大的抽水蓄能电站为广东阳江抽水蓄能电站,单机容量 400 MW^[17];总装机最大为河北丰宁抽水蓄能电站,装机容量为 3600 MW^[18]。

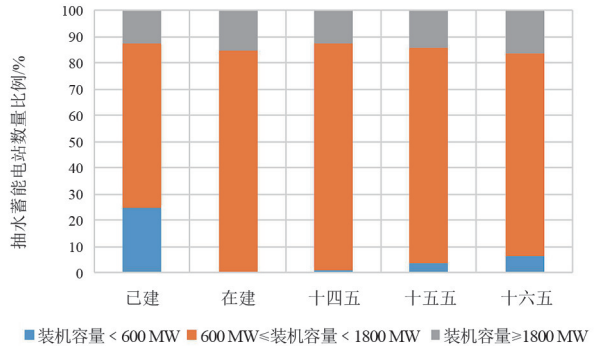


图 2 各容量装机抽水蓄能电站数量发展趋势

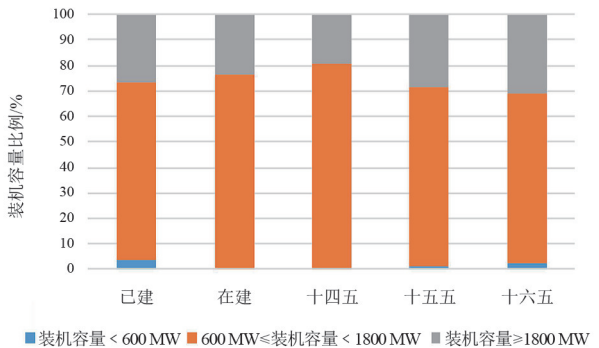


图 3 各容量装机抽水蓄能电站总装机发展趋势

2.2 抽水蓄能电站建设从负荷侧向电源侧转移

对已建、在建以及《征求意见稿》中明确的重点实施项目进行统计,如图 4 所示。可以看到,已建抽水蓄能主要集中在中东部负荷中心,西部地区仅有内蒙古和西藏各有一座。在建的抽水蓄能电站中,东部负荷中心依然占据 50% 以上,而在“十四五”“十五五”规划重点项目中,东部地区比例急剧减少,西部地区明显增强。主要有三方面原因:1) 抽水蓄能电站最初的功能是对负荷进行削峰填谷,因此负荷中心对抽水蓄能电站的需求最为迫切,优先规划建设;2) 随着社会经济快速发展,西部部分区域中心负荷增长迅速,且电源空心化问题突出,迫切需要抽水蓄能电站进行调节;3) 在建设新型电力系统中,西部地区大量新能源并网后,对抽水蓄能电站等大容量储能有了更迫切的需求。

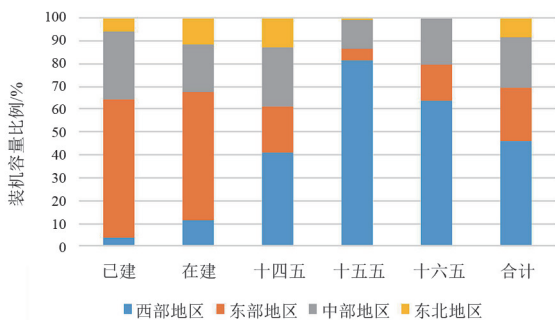


图4 各地区抽水蓄能电站总装机容量发展趋势

2.3 变速抽水蓄能电站将快速发展

变速抽水蓄能技术是抽水蓄能发展的重要方向,是最具代表性的国际前沿技术之一^[5],尚属卡脖子技术。目前,中国正在建设的河北丰宁抽水蓄能电站^[19]主要引进国外机组,采用双馈式变速模式,得益于变速机组具有的快速响应、宽调节范围、无功支撑等优点,非常适合与新能源进行互补联合发电,特别是补偿新能源快速功率波动^[20-22]。

为突破变速抽水蓄能关键技术,国家重点研发计划“十三五”智能电网技术与装备重点专项安排了两个项目进行技术攻关:1)由中国南方电网有限责任公司承担的“海水抽水蓄能电站前瞻技术研究”项目,该项目研发了10 MW双馈式变速抽水蓄能机组样机,并开发试验平台^[23-26];2)由国网四川省电力公司牵头的“分布式光伏与梯级小水电互补联合发电技术研究及应用示范”项目,该项目将研发国内首台全功率变速恒频抽水蓄能机组,并在220 kV春厂坝电站扩建5 MW全功率变速抽水蓄能示范电站^[27-30]。

研究表明,为保证系统灵活性和经济性,抽水蓄能应占系统总装机容量的10%~15%,其中,变速抽水蓄能机组容量应占抽水蓄能机组装机容量的25%以上^[5]。在未来新能源快速增长的形势下,随着中国装备技术的突破,变速抽水蓄能必将迎来快速发展。

2.4 基于常规梯级水电改/扩建抽水蓄能电站成为快速发展模式之一

由于常规大型抽水蓄能电站建设周期长,一般需要6~8年,短期内很难满足新能源爆发式增长的需要。为了尽量满足新能源并网需求,可通过对常规梯级水电进行改/扩建,利用原有的引水系统和上下水库,可大幅节约投资成本,且建设期一般在2年以内,有以下两种模式:

1)通过对梯级水电进行改造,在年调节及多年调节水电站中增加抽水泵或者扩建抽水蓄能机组,形成具有季调节能力的大型抽水蓄能电站,实现跨季节的削峰填谷,减少弃水,提高枯水期发电能力,同时增强系统的灵活调节能力。这是短期内增强系统调节能力的重要手段之一。

2)随着电力电子设备成本下降,以全功率变速恒频抽水蓄能机组技术为基础,对常规梯级小水电进行改/扩建,形成中小型变速抽水蓄能电站。作为一种优质的储能资源,其具有建设周期短、响应速度快、调节范围广、运行效率高、无功支撑能力强等优点^[31],非常适合与新能源进行互补联合发电,是未来抽水蓄能发展的重要方向之一^[32]。

3 四川电网应用抽水蓄能前景分析

3.1 四川电网电源情况

四川水电资源丰富,技术可开发量为148 GW,经济可开发量为145 GW。截止2020年年底,四川电网统调装机101.05 GW,其中水电占主导地位,装机容量78.92 GW,占78.1%;新能源装机比例较小,仅为6.17 GW,占6.11%,如图5所示。随着双碳目标的提出,四川新能源也迎来爆发式增长,根据规划,到“十四五”末,四川风电、光伏均将达到10 GW,新能源装机容量比例达到13.25%;到2030年,新能源装机容量将超过40 GW,比例超过20%。虽然总体而言,四川新能源装机容量比例不高,但是由于四川新能源资源主要集中在川西地区(如图6所示),特别是在河流、峡谷地带,风、光资源丰富,使得四川在川西局部地区新能源比例高,给局部电网安全运行带来极大挑战。

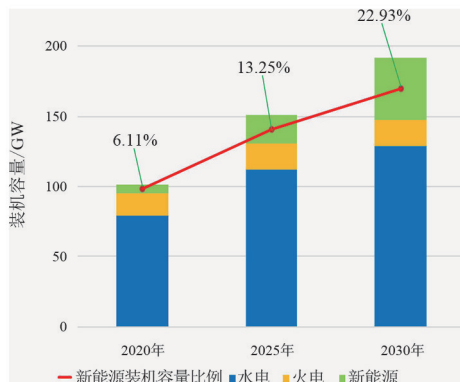


图5 四川电网能源结构及增长趋势



图 6 四川电网河流及光照资源分布

3.2 四川电网面临的主要问题

1) 水电丰枯期特性差异明显、调节能力不足

四川水电站以无调节和日调节的径流式水电站为主,如图 7 所示,图中外环表示各类型电站数量占比,内环表示各类型电站装机容量比例。可以看到,从装机容量看,径流式水电比例约 50%,季调节水电比例为 25%,具有年及多年调节能力的不超过 30%,整体调节性能较差。由于河流天然来水的丰枯差异大,四川电网水电枯水期发电能力仅为丰水期的 1/4~1/3 左右,水电发电量明显不足。

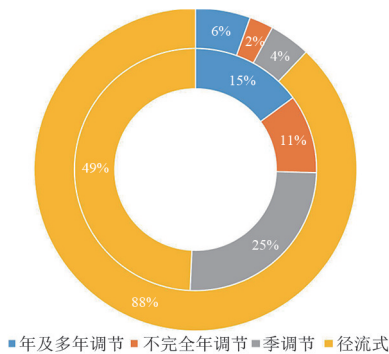


图 7 四川电网水电站主要调节性能比例

2) 丰水期少弃水和保外送的联合作用下,调峰能力不足

四川电网丰水期(6月—10月)水电发电能力富裕,需要大规模外送消纳,截止 2020 年年底四川水电外送能力 34 GW,跨省外送能力全国第一。一方面,径流式水电站丰水期都具备满发的能力,参与调峰必然弃水,一般承担基荷;另一方面,为了减轻受端电网的调峰压力,水电跨省外送曲线应避免出现“反调峰”特性。因此,在少弃水和保外送的联合作用下四川电网丰水期存在调峰能力不足的问题。

3) 负荷中心电源空心化,高峰时段供电能力不足

随着川西大量新增水电投产,并经过梯格型网架接力式送出,成都、川南负荷中心穿越潮流加重。在“双碳”政策背景下,负荷中心新建常规能源难度极大,呈现“电源空心化”特点,导致重负荷、大外送方式下电压调节困难,电压稳定水平不足。

随着社会经济发展,成渝中心城市带负荷增长迅速,城市配电网建设速度无法满足高峰负荷供电需求。以成都为例,2020 年,最高负荷达到 15.026 GW,较 2019 年增长 12.6%,但最大负荷超过 14 GW 仅 2 天,最大负荷超过 12 GW 只有 21 天,单纯依靠新增电网投资满足高峰负荷用的需求会造成大量的投资浪费。

3.3 四川电网抽水蓄能的应用分析

3.3.1 四川抽水蓄能电站现状

1993 年 1 月 13 日,中国第一座自行设计、制造的混流可逆式抽水蓄能电站——寸塘口抽水蓄能电站,在四川省蓬溪县建成投产,发电装机容量为 2000 kW,抽水容量为 2500 kW^[33]。该电站已停止运行,当前四川电网没有在运的抽水蓄能电站。

作为国家重点研发计划项目的示范工程,四川正在建设春厂坝变速抽水蓄能电站,电站位于阿坝州小金县,春厂坝原常规机组装机容量 54 MW,利用原春厂坝电站引水管道扩建 1 台 5 MW 全功率变速抽蓄机组,如图 8 所示。

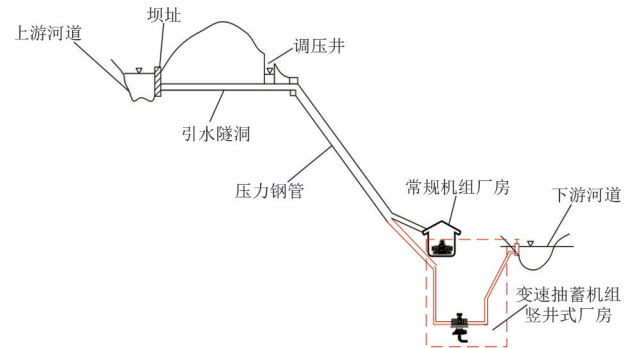


图 8 春厂坝常规水电扩建抽水蓄能机组

电站建成后,将与木坡、赞拉、猛固桥三座梯级小水电以及美兴光伏电站互补运行,构成梯级水光蓄互补联合发电系统,为支撑大规模新能源并网,助力实现“双碳”目标建立工程样板,示范工程如图 9 所示。

3.3.2 四川抽水蓄能电站应用场景

根据《征求意见稿》中提到的重点实施项目,四川规划抽水蓄能电站装机容量总计约 10.10 GW,主

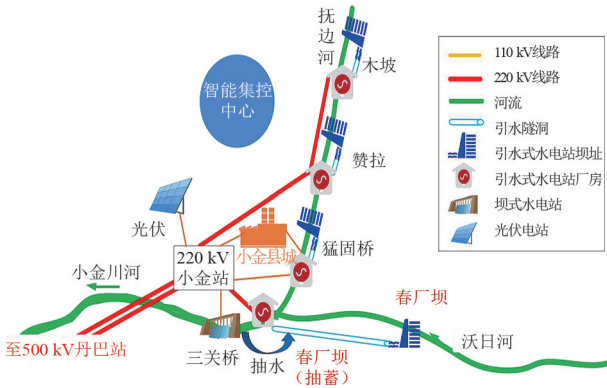


图 9 梯级水光蓄互补联合发电示范工程

要分布在甘孜、成都、阿坝和绵阳等地区。结合四川电网特点,未来抽水蓄能电站将在电源侧和电网侧发挥重要作用。

1) 电源侧:通过建设抽水蓄能电站与规模化新能源进行互补,四川新能源比例虽然不高,但大多分布在“三州一市”的川西地区,与水力资源在地理上存在天然的互补性,在风电、光伏等新能源出力高峰时段进行抽水,并通过抽水蓄能的快速响应特性补偿新能源的快速功率波动,解决新能源大规模接入带来的间歇性和波动性问题,提升新能源并网友好性。并且,由于抽水蓄能作为一种大容量、长周期储能,可通过共享储能等辅助服务模式解决新能源并网对储能的需求。此外,还可以建设季调节抽水蓄能电站,实现天然来水的季节性转移,提高梯级水电站群枯水期的发电量。

2) 电网侧:通过在成都、绵阳等负荷中心新建抽水蓄能电站,可以在负荷低谷时段抽水、高峰时段发电,达到削峰填谷的作用,可有效延缓输配电网投资。能够提高电网调峰能力,减少调峰弃水电量,保证水电外送曲线符合受端电网需求。更重要的是,作为负荷中心具有快速响应能力的优质电源,抽水蓄能电站具有调频、调相功能,可对负荷中心起到无功电压支撑、紧急事故备用、黑启动等作用,确保负荷中心安全稳定供电。

4 结 论

上面对抽水蓄能发展现状进行总结,重点分析了抽水蓄能的发展趋势,指出电源侧、大容量、可变速、梯级水电融合改造将是抽水蓄能未来发展的重点方向。分析了四川电网电源装机容量特点和存在

的问题,结合抽水蓄能的发展趋势,提出了四川应用抽水蓄能的主要场景和模式。通过在电源侧、电网侧建设抽水蓄能电站,将有助于解决四川电网面临的水电调节能力不足、少弃水和保外送矛盾、高峰时段供电能力不足以及电源空心化等问题。随着“双碳”目标的提出和新型电力系统的加快构建,抽水蓄能迎来更为广阔的发展天地。

参考文献

- [1] 习近平. 继往开来,开启全球应对气候变化新征程——在气候雄心峰会上的讲话[N].人民日报,2020-12-13(2).
- [2] 王玥娇,张兴友,郭俊山.储能技术在高比例可再生能源电力系统中的应用[J].山东电力技术,2021,48(7):19-25.
- [3] 全国工商联新能源商会储能专业委员会.储能产业研究白皮书 2011[EB/OL].(2011-01-28)[2021-09-14].<http://www.esresearch.com.cn/#/resReport/Rdetail>.
- [4] 张文亮,丘明,来小康.储能技术在电力系统中的应用[J].电网技术,2008,32(7):1-9.
- [5] 高苏杰.抽水蓄能的责任[J].水电自动化与大坝监测,2015(3):1-6.
- [6] 中国能源研究会储能专委会,中关村储能产业技术联盟.储能产业研究白皮书 2021[EB/OL].(2021-04-13)[2021-09-14].<http://www.esresearch.com.cn/#/reReport/Rdetail>.
- [7] S M Schoenung, C Burns. Utility energy storage applications studies[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1996, 11(3):658-665.
- [8] Ning Lu, J H Chow, A A Desrochers, Pumped-storage hydro-turbine bidding strategies in a competitive electricity market[J]. IEEE Transactions on Power System, 2004, 19(2):834-841.
- [9] 贺儒飞.定速与变速抽水蓄能机组功率特性分析对比[J].水电与抽水蓄能,2021,7(4):51-55.
- [10] 周学志,徐玉杰,谭雅倩,等.小型抽水蓄能技术发展现状及应用前景[J].中外能源,2017,22(8):87-93.
- [11] 梁国艳,梁中华,许晓峰.蓄能电站在电力系统的应用[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2006(4):333-335.
- [12] 姜海洋,杜尔顺,朱桂萍,等.面向高比例可再生能源电力系统的季节性储能综述与展望[J].电力系统自动化,2020,44(19):194-207. (下转第 37 页)

- [8] 程诗敏.SF₆/N₂混合气体介质条件下 GIL 内绝缘特性研究[D].武汉:武汉理工大学,2018.
- [9] 孙鹏程,王帮田,洪文芳,等.SF₆/N₂混合气体绝缘特性的实验研究[J].中国电力,2012,45(12):71-75.
- [10] 覃兆宇,郑宇,卫李静,等.低温下 SF₆/N₂混合气体的雷电冲击绝缘特性[J].高电压技术,2017,43(12):3907-3913.
- [11] 李鸿鹏,丰驰尧,李宝锋,等.SF₆混合气体的液化特性研究[J].电气技术,2020,21(11):57-60.
- [12] 张震,林莘,余伟成,等.C₄F₇N/CO₂和 C₄F₇N/N₂混合气体热力学物性参数计算[J].高电压技术,2020,46(1):250-256.
- [13] 唐念,姜旭,黎晓淀,等.均匀电场中 SF₆及其替代气体雷电冲击特性实验研究[J].高压电器,2021,57(3):6-10.
- [14] 李丽,郭泽,邹磊磊,等.SF₆替代气体的饱和蒸汽压特性研究[J].西安交通大学学报,2019,53(3):157-163.

作者简介:

贾程乾(1997),男,硕士研究生,主要研究方向为高压与绝缘技术。
(收稿日期:2021-09-30)

(上接第6页)

- [13] 谭雅倩,周学志,徐玉杰,等.海水抽水蓄能技术发展现状及应用前景[J].储能科学与技术,2017,6(1):35-42.
- [14] Wikipedia. Pumped-Storage Hydroelectricity [EB/OL]. (2016-04-16) [2021-09-14]. https://en.wikipedia.org/wiki/Pumped-storage_hydroelectricity.
- [15] 林铭山.抽水蓄能发展与技术应用综述[J].水电与抽水蓄能,2018,4(1):1-4.
- [16] 王楠.中国抽水蓄能电站发展现状与前景分析[J].电力技术经济,2008,20(2):18-20.
- [17] 国内单机容量最大抽蓄电站定子吊装并下闸蓄水[J].云南电力技术,2021,49(4):39.
- [18] 世界最大在建抽水蓄能电站复工[J].中国产经,2020(3):64.
- [19] 费万堂,衣传宝,杨梅,等.河北丰宁抽水蓄能电站交流励磁变速机组工程设计与认识[J].水电与抽水蓄能,2020,6(4):12-18.
- [20] 李偲,郗文康,张德隆,等.柔性直流系统中变速抽蓄机组与风电的协调控制策略研究[J].天津理工大学学报,2020,36(4):16-21.
- [21] 陈超,刘海滨,葛景,等.双馈变速抽蓄机组参与平抑风电功率波动研究[J].发电技术,2020,41(4):452-460.
- [22] Minxiao Han, Girmaw Teshager Bitew, Sifrash Amogne Mekonnen, et al. Wind Power Fluctuation Compensation by Variable Speed Pumped Storage Plants in Grid Integrated System: Frequency spectrum analysis[J].CSEE Journal of Power and Energy Systems,2021,7(2):381-395.
- [23] 吴秋芳,林文婧,陈志伟,等.海岛抽水蓄能电站枢纽布置研究——以大万山岛为例[J].广东水利水电,2020(8):61-67.
- [24] 贺儒飞,王方,张豪.海水可变速抽水蓄能机组技术路线及关键参数选择[J].水利水电技术,2020,51(增刊2):184-189.
- [25] 张韬,高彦明.可变速抽水蓄能机组水泵水轮机能量特性及效益优势浅析[J].水电与抽水蓄能,2020,6(4):32-35.
- [26] 刘宇,王建刚,乔照威,等.海水抽水蓄能变速发电电动机设计与计算[J].大电机技术,2021(2):13-18.
- [27] 史华勃,王渝红,滕予非,等.全功率变速抽水蓄能机组快速功率模式小信号建模[J].电力系统自动化,2022,46(4):162-169.
- [28] 韩晓言,丁理杰,陈刚,等.梯级水光蓄互补联合发电关键技术与研究展望[J].电工技术学报,2020,35(13):2711-2722.
- [29] 周修宁,江军.基于改进 NSGA-II 算法的水-光-蓄发电系统多目标规划方法[J].四川电力技术,2021,44(2):8-15.
- [30] 李涛,胡维昊,陈刚,等.多场景下梯级水-光-蓄容量配置与优化运行研究[J].四川电力技术,2021,44(2):1-7.
- [31] 衣传宝,杨梅,梁廷婷,等.全功率变频抽水蓄能机组技术应用浅析[J].水电与抽水蓄能,2020,6(5):56-61.
- [32] 畅欣.FSC可变速抽水蓄能机组功率调节特性研究[D].北京:华北电力大学,2016.
- [33] 周鸿汉.四川省第一座抽水蓄能电站——寸塘口抽水蓄能电站简介[J].水电站设计,1992(4):81-82.

作者简介:

陈刚(1985),男,博士,高级工程师,研究方向为电力系统分析与控制;

丁理杰(1981),男,博士,正高级工程师,研究方向为大电网安全稳定分析与控制;

韩晓言(1965),男,博士,正高级工程师,从事电力系统稳定与控制工作。

(收稿日期:2021-09-16)