

新型电力系统大规模抽水蓄能调度运行与控制综述及展望

刘德旭¹, 杨迎¹, 黄宏旭², 钟海旺^{2*}

- (1. 清华四川能源互联网研究院, 四川省成都市 610213;
2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市海淀区 100084)

An Overview and Outlook of the Operation and Control of Large-scale Pumped Hydro Storages in Modern Power Systems

LIU Dexu¹, YANG Ying¹, HUANG Hongxu², ZHONG Haiwang^{2*}

- (1. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610213, Sichuan Province, China;
2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: As power systems are under the transit from the traditional to the new forms, pumped storage is rapidly developed and constructed to meet the increasing regulation capacity demand. Large-scale pumped storage will become a significant structural feature of new power systems, alongside with high-proportion new energy sources. This paper examines the current status and future trends of domestic and foreign pumped storage projects. It analyzes the characteristics, scenarios, and pumped storage requirements of the new type of power system. The paper also reviews the research progress in large-scale pumped storage optimization and its participation in power system stability control. Finally, this paper proposes the coordinated participation of large-scale pumped storage in optimal scheduling and stability control. This research aims to provide guidance for the development of pumped storage and its integration into new types of power systems.

KEY WORDS: pumped storage; optimal dispatch; stability control; new-type power system; large-scale

摘要: 在传统电力系统向新型电力系统转变进程中,为适应新型电力系统日益攀升的调节能力需要,抽水蓄能正以前所未有的速度加快开发建设,“含大规模抽水蓄能”将逐渐成为既“含高比例新能源”之后,新型电力系统又一显著结构特征。该文以大规模抽水蓄能为视角,梳理总结当前国内外抽水蓄能建设现状及未来发展趋势,分析新型电力系统特征、面临场景及对抽水蓄能的需求,从调度运行与稳定控制两方面,综述大规模抽水蓄能优化调度、参与电力系统稳定

控制研究进展。最后,结合整体对待、整体优化、集中力量理念,展望大规模抽水蓄能协同参与优化调度、多功能协调支撑稳定控制前景,以期理顺抽蓄发展思路,助力抽水蓄能合理利用,为新型电力系统建设提供支撑。

关键词: 抽水蓄能; 优化调度; 稳定控制; 新型电力系统; 大规模

0 引言

抽水蓄能是新型电力系统中灵活、高效、清洁的调节电源,对保障电力系统安全稳定运行具有重要作用。因此,国内外均大量建设抽蓄电站以适应和满足能源结构转型和新型电力系统构建需要。据国际水电协会(International Hydropower Association, IHA)发布的2023全球水电报告^[1],截至2022年底,全球水电装机容量13.97亿kW,其中抽水蓄能1.75亿kW,占水电比例12.5%,全球处于不同发展阶段的在建水电规模5.90亿kW,其中抽水蓄能2.14亿kW。从建设现状和发展态势来看,全球抽水蓄能目前已初具规模且有进一步扩大趋势,未来全球抽水蓄能规模有望达到3.89亿kW,占总水电比例提升至近20%,成为支撑新型电力系统发展的中坚力量。

在我国加快规划建设新型能源体系的背景下,为满足风电、光伏发电大规模、高比例接入电力系统的迫切需求,抽水蓄能正以前所未有的速度加快开发建设。截至2022年底,我国已投产抽水蓄能装机容量45.8GW,在建抽水蓄能装机容量1.21亿kW,

基金项目: 国家自然科学基金项目(52122706)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52122706).

已建和在建规模均居世界第一^[2]。同时，随着抽水蓄能概念广义化，混合式抽水蓄能^[3]、地下抽水蓄能^[4]、海水抽水蓄能^[5]等新型抽水蓄能也逐渐由理论走向实践，并初步探明开发利用潜力巨大，未来成为新的增长极促使抽水蓄能规模进一步扩大。

由此可见，随着新型电力系统构建的不断深化，“含大规模抽水蓄能”将成为既“含高比例新能源”之后，新型电力系统又一显著结构特征，在新型电力系统建设进程中，如何利用大规模抽水蓄能支撑新型系统调度运行与稳定控制，帮助系统克服新能源波动及其他不确定性扰动，维持电力系统清洁低碳、安全高效、提供平稳有序的电力供应，成为研究学者们的关注焦点之一。

基于上述认识，本文以大规模抽水蓄能为视角，综述其在新型电力系统中调度运行与控制研究现状，并展望未来方向。首先对国内外抽水蓄能资源禀赋及已建设情况进行梳理，分析未来规模及新建方向；然后总结含高比例新能源、大规模抽水蓄能的新型电力系统特征及对抽水蓄能的需求；再根据发展背景，综述大规模抽水蓄能参与电力系统优化调度及稳定控制研究进展；最后对新型电力系统如何优化利用大规模抽水蓄能进行展望，以期理解抽水蓄能发展路径，为合理利用抽水蓄能助力新型电力系统构建提供支撑。

1 抽水蓄能规模化发展现状及趋势

1.1 国内外已建抽水蓄能规模及发展趋势

对于全球抽水蓄能潜力，澳大利亚国立大学 100% 可再生能源小组基于高分辨率全球数字高程模型、水库蓄能模型、建设成本模型初步测算了全球抽水蓄能潜力，并绘制了不同类型、不同储能能力的抽水蓄能潜在站点资源地图集^[6]，该地图集为全球第一份关于抽水蓄能资源总量评估的图集。100% 可再生能源小组研究得出，全球抽水蓄能潜在站点资源丰富，储能潜力达 23 000 TW·h，比支撑净零排放下可再生能源发电所需储能高出两个数量级，储能能力不是制约风电、光伏大规模发展的关键因素，根据实际需要，抽水蓄能可灵活选址^[7]。

鉴于抽水蓄能潜在资源丰富且调节能力优越，世界各国高度重视抽水蓄能的规模化发展。其中，印度电力部门 2023 年发布了《抽水蓄能项目指南》，强调抽水蓄能对其 2030 年新能源规模达 4.5 亿 kW、

2070 年实现碳中和目标的重要性，并评估出印度抽水蓄能潜力为 103 GW(不含离河抽水蓄能)，当前抽水蓄能在运规模 4.7 GW，发展滞后，因此将共计 26.6 GW 的抽蓄电站项目纳入国家规划^[8]。英国、波兰等欧洲国家意识到在当前电力、能源市场框架下，长时储能的投资和建设不能满足可再生能源发电量的激增，于是出台法案和政策支持抽水蓄能发展，以扩大抽水蓄能规模，在能源转型和实现 2050 年温室气体净零排放中发挥关键作用^[9-10]。加拿大也着力推动灵活、清洁、辅助服务强的电力系统建设，推动其国内装机最大的 Ontario 抽蓄项目(1 GW)于 2030 年前投产^[11]。

截至 2022 年底，全球已建抽蓄容量排名前十国家抽蓄及水电规模如图 1 所示。其中，中国水电装机容量约 4.1 亿 kW，规模居世界第一，但其中抽水蓄能装机 45.8 GW，占比仅 11%；美国抽水蓄能装机容量 22 GW，占其总水电装机容量的 21.6%；欧洲抽水蓄能总装机容量 56 GW，占总水电装机容量的 21.9%，其中意大利、德国、西班牙、奥地利、法国抽水蓄能装机容量均超 5 GW，德国抽水蓄能在水电中的比例高达 56%；日本、韩国抽水蓄能装机容量分别为 27、5 GW，在各自水电中的占比均超 50%。由此可见，发达国家抽水蓄能在水电结构中呈高占比，已成为水电的主要形式，中国、印度抽水蓄能及水电结构发展潜力较大。

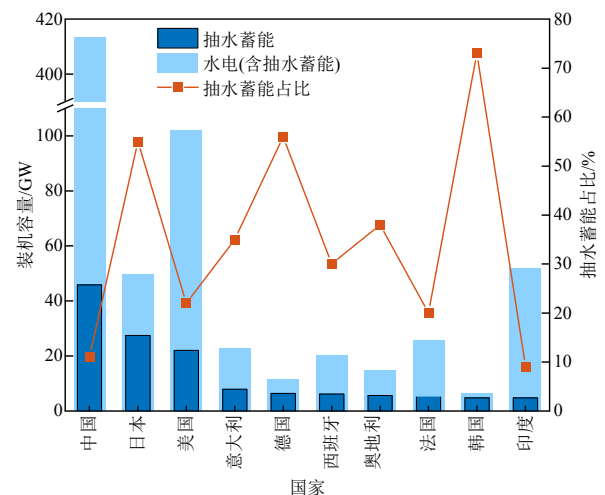


图 1 全球已建抽蓄容量排名前十国家抽蓄及水电规模

Fig. 1 Top ten countries with pumped storage capacity and hydropower scale

鉴于抽水蓄能的重要性，IHA 就抽水蓄能的综合规划、灵活选择、财务框架、可持续性评估发布指南，以促进抽蓄项目健康发展，长远来看，抽水蓄能发展趋势向好，在电力系统中的规模及作用逐

渐扩大。

1.2 我国抽水蓄能演进路径

在政策引领支持和市场需求刺激双重驱动下,我国抽水蓄能近年来高速发展,装机规模稳步上升,且随着“双碳”目标贯彻落实、新型电力系统构建、以及大型新能源基地和流域水风光一体化基地建设的深入推进,抽水蓄能将持续、快速、高质量、规模化发展。

从资源禀赋角度而言,我国地形地貌复杂多样、气候气象复杂多变,建设抽水蓄能的社会和环境制约因素众多。尽管抽水蓄能的资源总量难以确切评估,随着技术进步、视野拓宽,我国数次资源普查得到的抽水蓄能资源总量也越来越高,据国家能源局2020年组织的最新一轮资源普查,我国可建抽水蓄能站点1529个,总规模约16.04亿kW^[12],后续资源普查在已有工作基础上滚动调整。2021年9月,国家能源局发布《抽水蓄能中长期发展规划(2021—2035年)》,指出我国地域辽阔,建设抽蓄电站的站点资源比较丰富,应结合实际优先布局对保障系统安全作用强、促进新能源规模化发展作用大、经济指标相对优越的抽蓄电站,为此,中长期发展规划布局重点实施项目340个,总装机规模约4.21亿kW,提出储备项目247个,总装机规模约3.05亿kW^[13],后续统筹考虑系统需求和项目建设条件等因素动态调整。综合历次资源普查结果和纳入规划情况,我国规划中抽水蓄能站点资源总量约8.23亿kW^[2]。

建设趋势方面,未来我国水电与抽水蓄能演进路径如图2所示,其中,抽水蓄能电站随着理念广义化,增长源众多,根据《抽水蓄能中长期发展规划(2021—2035年)》,2025、2030年我国抽水蓄能投产总规模目标分别达62、120GW,至2035年,抽水蓄能中长期发展规划提出的重点实施项目大部分开发建设完成,抽蓄规模达305GW;常规水电站建设由于站址逐渐转向江河上游高原高寒地区,资源条件差,开发建设难度高,总体进度放缓,考虑在建、扩建工程逐步投产及新建工程保持合理增速,预计2025、2030、2035年我国常规水电规模分别约380、420、450GW^[14]。由此可知,未来我国抽蓄增长将成为水电增长的主要贡献力量,抽水蓄能在水电中的占比将由2022年的11%逐渐提高,2025、2030、2035年分别可达14%、22%、40%,成为水电开发建设的主要形式。在更远期,即抽水

蓄能、常规水电均按2022年底纳规资源量823、687GW全部开发建设^[15],抽蓄规模将超过常规水电规模,在总水电中的占比达到54%。

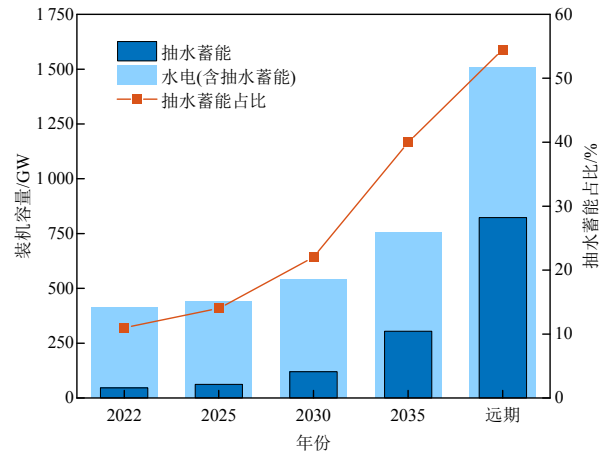


图2 我国水电与抽水蓄能演进路径

Fig. 2 Evolution path of hydropower and pumped storage in China

关键技术研发方面,自20世纪60年代以来,我国抽水蓄能经历了近60年的技术引进和经验积累,目前已基本形成具有独立自主规划设计、施工建造和运营管理能力的专业化发展体系。从国内大型抽蓄电站参数选择来看,抽蓄机组不断向高水头、高转速、大容量、高性能、高可靠以及可变速发展^[16],当前国内已建抽蓄电站最大单机容量达400MW(广东阳江抽蓄电站),最大水头及扬程达750m(浙江长龙山抽蓄电站),在建抽蓄电站单站最大装机容量3600MW(河北丰宁抽蓄电站),居国际领先水平。但在机组形式上,国内除丰宁抽蓄电站装设两台300MW可变速机组外,其余均为定速机组,对更具灵活性的全功率变频、三元式、分离式机组仍缺乏关键技术突破和工程实践^[17]。

我国未来抽水蓄能发展路径与新能源大规模发展也高度契合,即满足高比例新能源电力系统运行与控制需要,助推电力系统向绿色低碳转型。同时,随着规划与建设的逐步开展,符合设计要求的优质站址将逐步用尽,未来抽蓄电站开发将向因地制宜的中小型抽水蓄能、流域梯级水电融合改造的混合式抽水蓄能及利用新空间的新型抽水蓄能发展。

1.3 新型抽水蓄能

随着符合建设条件的站址资源逐渐纳规,未来抽水蓄能电站规划与建设将向新形式的抽水蓄能发展,地下抽水蓄能、海水抽水蓄能、水下抽水蓄能、抽发分离抽水蓄能等新型抽水蓄能将是重要的新兴发展方向。

1.3.1 地下抽水蓄能

地下抽水蓄能是新开挖地下空间或利用废弃矿井的地下廊道、硐室、采空区等已有地下空间建造地下水库，将地表储水空间转移至地下的抽水蓄能形式，具有选址地形依赖小、水量蒸发损失少、发电水头更高等优势。目前，地下抽水蓄能开发与利用仍处在探索阶段，国外部分学者开展了地下水库建设的初步设计和原型试验^[18-19]，国内学者从利用废弃矿井，因地制宜改建地下水库建设抽水蓄能电站的角度，围绕采空区空间测算、水力特性、水环境与水质、结构及安全^[20]等关键问题开展了理论研究与分析，在云南^[21]、黄河流域九省区^[22]等地区开展了兴建地下抽水蓄能潜力评估和选址定容工作，据统计和估算，我国废弃矿井储水空间达 $8.7 \times 10^5 \text{ m}^3$ ，可储存电能量 $7.25 \times 10^6 \text{ MW} \cdot \text{h}$ ^[23]，开发利用潜力巨大，但受制于技术、经济条件尚未成熟，规划化改建废弃矿井为地下抽水蓄能仍有待突破。

1.3.2 海水抽水蓄能

海水抽水蓄能是以海水作为储能介质，并以大海为下水库，在海岸或海岛山地建造上水库的抽水蓄能形式。海水抽水蓄能可作为海上风电的配套储能，对促进海上新能源开发与消纳具有重大潜力，据资源普查，我国海水抽水蓄能站址资源主要分布在广东、福建、浙江等 8 省区，可开发利用资源站址 238 个，总装机容量约 4 200 万 kW^[24]。海水抽水蓄能水工建筑物和机电设备受海水腐蚀、水生生物侵蚀及台风盐雾等环境因素影响大^[25]，目前国内外真机建设几乎处于停滞阶段，日本冲绳海水抽水蓄能电站是世界上唯一一座建设并运行的试验性海水抽水蓄能电站，于 1999 年建设，2016 年试验完成并拆除，为验证海水抽水蓄能技术提供了借鉴和参考意义^[26]。

1.3.3 水下抽水蓄能

同样以海水作为储能介质，以水压力或浮力为驱动力的水下抽水蓄能目前尚处于研发阶段^[27]。水下抽水蓄能基本原理是将钢结构混凝土球壳安装于水深 600~800 m 处^[28]，球内相当于常规抽水蓄能电站的下水库，球外海洋相当于上水库，发电工况时水压力驱动海水涌入球内并带动水轮机发电，抽水工况时水泵做功将球内海水抽到周围海洋^[29]。水下抽水蓄能选址对水深、离岸距离、海底地形以及洋流等要求较高，核心装置建造及安装难度大，同样还面临承压、海水腐蚀、真空气蚀等难题，距离

规模化应用尚远。

1.3.4 抽发分离抽水蓄能

我国能源资源与负荷中心呈逆向分布，新能源、水资源、电力等需长距离、大规模输送，为此，有学者提出结合跨流域调水工程的抽发分离抽水蓄能理念^[30]。该理念在调水送出端建设一系列山地调蓄水库和提水工程，并利用可再生能源电力提水蓄能；山地高坡上的水资源通过引水工程输送至受水端，受水端建设发电工程将水资源从高坡引下，释放水能发电。不同于常规抽水蓄能的上下水库水资源循环，抽发分离抽水蓄能的水资源流向是从上水库到下水库的单向流动，且上下水库相对距离较远，抽水与发电实现了分离，可服务两个地区电网。抽发分离抽水蓄能有机结合了水资源优化配置和电能优化配置，实现了水-电耦合输送，是促进水-电融合发展的新思路。

1.3.5 新型抽蓄机组形式

传统抽蓄机组形式为定速水泵水轮机，通过控制转轮转向实现发电或抽水运行，且抽水工况转速不可调节，目前我国几乎所有抽蓄机组为定速形式。变速机组通过调整转子励磁电流，使转速可在一定范围或全功率范围波动，相较于定速机组抽水功率可调节，我国丰宁抽水蓄能电站 12 号机组是我国首台自行安装、整组启动的变速机组。机组组成方面，目前文献报道有将水泵与水轮机分离，并与电动发电机同轴相连的三元式机组以及水泵与水轮机完全解耦的分离式机组^[17]，相较于一体化的水泵水轮机，三元式和分离式机组工况转化时间更短，发电和抽水效率更高。机组布置方面，立式是最为常见的布置方式，适用于大多高水头、小库容、上下水库独立的抽蓄电站，随着河道内建设大容量、低水头抽蓄电站的需要，因地制宜的卧式布置方式也逐渐兴起，目前我国对卧式抽水蓄能的水力特性、机电特性研究已取得积极进展^[31-32]。

2 含高比例新能源、大规模抽水蓄能的新型电力系统

2.1 新型电力系统结构及特征

新型电力系统以高比例消纳新能源为主要特征，电源侧革新是新型电力系统的驱动要素和关键影响因素。然而随着新能源占比日益提高，其输出的不确定性为电力系统的安全可靠运行带来严峻挑战。为克服新能源的间歇性、随机性和波动性，

避免一次能源不确定性沿供应链传导，电力系统亟须配置储能以提高调节应对能力。

鉴于抽水蓄能相对其他储能具有单位容量建设成本低、能量密度和功率密度大等突出优势，大量建设抽水蓄能来“重塑”风光出力过程、稳定风光并网影响是切实可行的有效手段。当前国内外抽水蓄能的大规模建设进程，也反映出高比例新能源电网有突出的抽水蓄能需求，含高比例新能源、大规模抽水蓄能，将是新型电力系统的突出结构特征。新型电力系统结构如图3所示，以不确定性新能源为主导，辅以大规模抽水蓄能来平抑风光出力波动、阻滞不确定性传导，提高新能源主动支撑能力。

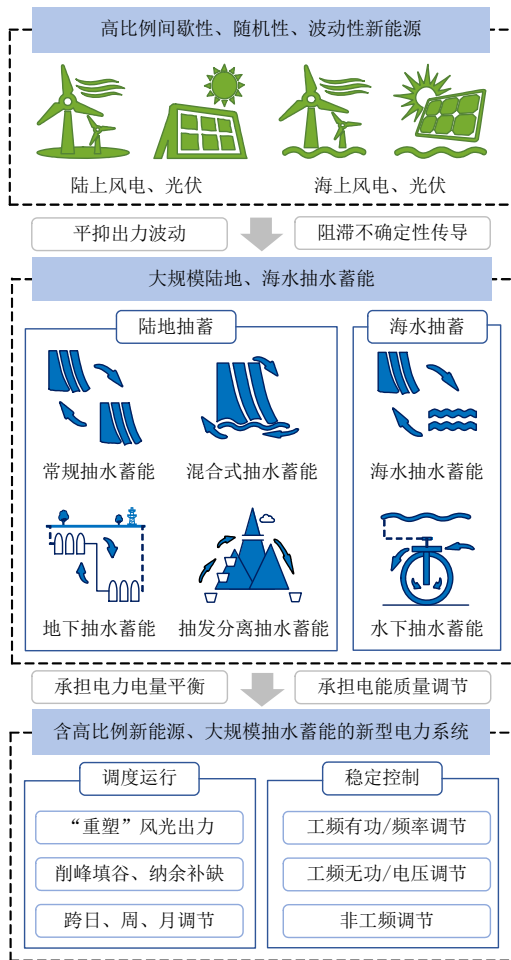


图3 含高比例新能源、大规模抽水蓄能的新型电力系统
Fig.3 New-type power system with high proportion of new energy and large-scale pumped storage

其中，依据地理位置与资源禀赋，陆上风电和光伏与常规抽水蓄能、水库水电站融合改造的混合式抽水蓄能、利用废弃矿井建造的地下抽水蓄能、或结合跨流域调水工程的抽发分离抽水蓄能等陆地抽蓄有机结合，海上风电和光伏与以海水为储能介质的海水抽水蓄能或水下抽水蓄能有机结合，共

同参与电力系统电力电量平衡和电能质量调节。在电源侧风蓄、光蓄、风光蓄多能互补结构下，系统调度运行与稳定控制得到有效改善。调度运行方面，电源出力可调可控性增强，可以适应峰谷差更大的负荷过程，同时电量能够再分配，在跨日、周、月长时间尺度上纳余补缺；稳定控制方面，抽水蓄能与新能源协同主动支撑，保持有功和无功稳定，提高系统惯量和抗扰能力。

新型电力系统是电力系统在“双碳”背景下的新业态，以多源互补、源网协同、供需互动和灵活智能为主要特征^[33]，构建新型电力系统的路径是“源-网-荷-储”全环节的共同进步，其中电源侧一次能源逐渐由化石能源主导过渡到清洁能源主导，是路径中的“主干线”，与其他储能技术相比，抽水蓄能单机容量大、能够长时大量储能、应用功能覆盖各时间尺度^[34]，且清洁低碳，潜在站点资源丰富，具有突出优势，随着新型电力系统构建的推进，“高比例”抽水蓄能将成为又一项能源结构特征。

2.2 系统调度运行与控制面临的场景及挑战

新型电力系统在传统电力系统基础上不断演进深化，但系统调度运行与控制的目标和判据并未明显改变，即调度运行的目标依然是维持发用电平衡，确保电力供应平稳有序，系统稳定的判据依然是频率、功角、电压保持在合理范围内，确保电力系统安全可靠。随着电源结构、网架结构的显著改变，新型电力系统调度运行与控制出现了一些新的难题，即面临的不确定性场景增多，表1总结了新型电力系统调度运行与稳定控制面临的场景，依据场景出现频次及场景下运行与控制难易，将场景划分为常规、非常规和极端3类情形。

表1 新型电力系统调度运行与控制面临的场景

Table 1 Scenarios faced by the dispatch and control of the new power system

情形	调度运行	稳定控制
常规	典型季节场景、典型日场景	典型稳态场景、典型暂态场景
非常规	迎峰度夏/度冬场景、	重要线路/机组检修场景、
	节假日场景、	短暂风光出力骤降场景、
极端	短暂风光出力骤降场景	受扰动长时振荡场景
	连续风大无光/光大无风/	大规模风光脱网场景、
	无风无光场景	大容量直流满功率闭锁场景、
		大区域电网解列场景

常规情形下，系统中长期、短期调度运行分别按典型季节场景、典型日场景下的发用电特征开展

电力电量平衡，系统备用充足，电力电量裕度大。系统状态为典型稳态或易恢复典型暂态，控制难度较小，抗扰能力较强。

非常规情形下，系统调度运行面临迎峰度夏、迎峰度冬、短暂风光出力骤降、节假日等场景，这些场景下系统调峰能力不足，既可能面临供应紧张、备用不足问题，又可能面临发电能力过剩、弃风弃光问题。系统稳定控制面临重要线路/机组检修、短暂风光出力骤降、受扰动长时振荡等场景，系统抗扰能力下降，部分暂态长时维持甚至难以恢复。

极端情形为系统遭遇极端自然灾害，调度运行与稳定控制均面临严峻挑战。调度运行方面，连续长时间的光大无风(如高温连晴天气)、风大无光(如低温寒潮、雷暴等天气)、无风无光(如台风、暴风雪等天气)，系统产生供应缺口且无备用电源，只能依靠长时储能设施提供应急支撑。稳定控制方面，大规模风光脱网、大容量直流满功率闭锁、大区域电网解列等场景严重威胁系统安全，触发电力系统第 3 道防线。

为克服高比例新能源不确定性对运行与控制造成的负面影响，应充分发挥大规模抽水蓄能的调节能力和长时储能能力，满足系统调度运行与稳定控制的调节需求。

2.3 新型电力系统对抽水蓄能的需求

从新型电力系统调度运行和稳定控制两方面来看，新型电力系统对抽水蓄能需求分别主要为承担电力电量平衡和承担电能质量调节。

2.3.1 承担电力电量平衡

短时间尺度功率平衡、中长期时间尺度电量平衡是电力系统运行的核心任务，然而在新型电力系统中，新能源出力具有显著的不确定性，导致电力供应失衡风险极大增高，使得系统运行对长/短时调节能力需求极大提升^[35]。

短时间尺度上，新能源出力具有如下特征：1) 出力波动具有叠加效应，即装机规模越大、时间范围越长，波动越大；2) 出力具有区域平滑效应，随空间范围扩大波动性被平滑^[36]；3) 出力具有“反调峰”效应，负荷高峰时段出力不足，负荷低谷时段出力富余。因此，新型电力系统对抽水蓄能有平抑新能源出力波动，维持调峰时段电力平衡的需求，具体表现为：1) 向新能源出力波动方向的反方向调节，“重塑”新能源出力过程；2) 提供充足的上调、下调备用，以应对大范围的风光出力骤降、

陡升；3) 适应用电负荷早晚高峰的快速升降，提供快速的爬坡能力。相较于新型电力系统中的其他调节电源，如电化学储能和气电，抽水蓄能在备用能力、爬坡能力上具有突出优势。

中长时间尺度上，新能源具有季节性特征，冬季电量通常高于夏季，但也存在季节特征规律失灵的场景，如美国得州 2021 年遭遇极寒天气风机冰冻停摆，与冬季新能源常态相悖^[37]。新型电力系统长时调节需求落脚到抽水蓄能表现为：1) 跨日、跨周、跨月甚至跨季度的长时调节；2) 具有较大的储能能力，储能随时间推移不发生损耗；3) 具有应急调度运行方式，调节电量纳余补缺。

2.3.2 承担电能质量调节

抽水蓄能属于可调度的同步发电机，通过控制导叶开度及工况转换，能提供多种电能质量调节功能，满足系统工频有功、工频无功以及非工频的调节需求。

抽水蓄能电站可以从调频以及调压两方面，为电网的电能质量调节提供支撑能力^[34]。从调频能力而言，发电工况运行的抽蓄机组可根据水头和电网频率变化改变机组转速和功率，在调速控制系统作用下对电网频率进行调节。抽水工况运行的定速机组转速不可变，仅能提供紧急频率支援，如低频切泵；变速机组可在调速器控制下优化导叶开度及转轮转速，实现抽水功率的可控，进而参与频率稳定控制。调相工况运行时机组导叶关闭、转轮空转，调速器不参与调节，机组无法提供调频功能；针对电网调压需求，目前大多抽水蓄能具有调相运行方式，具体可分为调相运行和进相运行，调相运行时电动发电机向系统输出感性无功功率，进相运行时电动发电机吸收系统感性无功功率。

规模化抽水蓄能承担新型电力系统电能质量调节，稳定控制策略需满足：1) 快速响应系统稳定控制指令，在线执行系统分配的有功、无功和非工频调节量；2) 快速调频、自动发电控制(automatic generation control, AGC)、惯性支撑等功能统筹协调，共同支撑提升功率平稳性和频率稳定性；3) 短期电压稳定、自动电压控制(automatic voltage control, AVC)以及过电压抑制等功能灵活配合，共同支撑提升电压稳定性和电压质量；4) 恰当的电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)参数优化及控制策略，防范系统出现次/超同步振荡、谐波/谐振等各种非工频振荡并提升电能质量^[38]。

3 新型电力系统中大规模抽水蓄能调度运行与控制研究进展

3.1 大规模抽水蓄能优化调度研究进展

无论是传统常规抽水蓄能还是各种新型抽水蓄能,抽蓄机组发电工况与抽水工况功率函数均满足水电转换关系式,发电工况发电函数为

$$P_t^{\text{hydro}} = gQ_h H_h \eta_h \quad (1)$$

式中: P_t^{hydro} 为机组发电出力; t 为时段; g 为水电转换系数; Q_h 为机组发电流量; H_h 为发电水头; η_h 为机组综合发电效率。

抽水工况抽水函数为

$$P_t^{\text{pump}} = \frac{gQ_p H_p}{\eta_p} \quad (2)$$

式中: P_t^{pump} 为机组抽水功率; Q_p 为机组抽水流量; H_p 为抽水扬程; η_p 为机组综合抽水效率。

发电工况/抽水工况运行还需满足机组功率上下限约束、机组功率爬坡约束、机组工况状态单一性约束、机组工况转换时间约束等机组类约束,以及上下水库水位上下限约束、水位连续变化约束、水量平衡约束等水库类约束^[39],此外,由于抽水蓄能一洞多机布置存在水力干扰现象^[40],还需考虑全厂/引水洞出力范围约束、全厂/引水洞运行状态过渡约束等电站类约束。

由于各类约束联系紧密,在含大规模抽水蓄能电力系统中,对抽蓄的数学描述应以电站为建模单元,电站优化调度结果再厂内分配至机组,避免因约束考虑不全导致优化调度结果失真。各抽蓄电站设计参数与运行条件不尽相同,应对各类约束条件删繁就简,以减少模型数据要求及降低计算难度。

运行目标的考虑上,经济、低碳、低损耗等可作为抽蓄电站运行目标。文献[39]建立了抽水蓄能上水库水位变幅最小和抽发运行收益最大目标函数,通过水位变幅目标来提高发电利用率、降低损耗,通过抽发收益目标来保障利用经济性与合理性,两个目标函数能确定抽蓄电站在负荷图上的最佳工作位置,也能以平均值的方式拓展到多个抽蓄电站,分别确定多个抽蓄电站工作位置。抽蓄电站抽水工况耗能应使用绿色电力,不间接排放碳,消纳新能源电量可作为电站运行的低碳目标。

对于含大规模抽水蓄能的新型电力系统,抽水蓄能参与系统优化调度方法主要有电源侧多能互补优化、电网侧以需定用优化、灵活性资源协同优

化及参与电力市场优化等。

3.1.1 电源侧协同互补优化

电源侧异质能源打捆联合消除差异化波动,提高供电平稳性,是解决大规模新能源并网运行难题的有力手段。以抽水蓄能为调节电源的电源侧协同互补组合有风-蓄、光-蓄、风-光-蓄、风-光-水-蓄等,不同电源组合互补优化调度特性如表2所示。

表2 含抽水蓄能互补系统及其特征

Table 2 Systems containing pumped storage and their characteristics

互补系统	特点
风-蓄	缓解大规模风电并网的调峰问题,提高夜间风电消纳能力,减少弃风
光-蓄	集中式光伏与大容量抽水蓄能联合,分布式光伏与小型抽水蓄能联合,减少午间调峰需求和弃光
风-光-蓄	联合互补提升供电平稳性,是解决大型新能源基地送出问题的有效方案,显著提高出力与负荷需求的匹配程度,显著提高新能源利用率
风-光-水-蓄	流域水风光一体化开发、清洁能源基地的新范式,具有超强的蓄能能力,可有效促进能源互补

其中,风-蓄系统的特征为风电随机性和反调峰性强,风电功率预测的准确率和合格率较低,抽蓄的加入能缓解大规模风电并网的夜间调峰问题,提高夜间风电消纳量以减少弃风。文献[41]从供热期和非供热期论证了蒙西电网大规模风电与抽蓄电站联合运行的可行性以及显著效益,供热期抽蓄电站充分调峰填谷减少弃风,非供热期弃风压力减小抽蓄电站为风电提供备用。文献[42]将旋转备用容量作为优化变量,建立了计及备用成本和效益的风蓄联合优化调度模型,使联合系统运行更经济。

光-蓄互补系统存在两种规模,一种是集中式光伏与大容量抽水蓄能联合,优化目标为联合系统总运行成本最小和光伏消纳量最大,文献[43]研究了光伏与废弃矿井抽蓄电站联合运行方式,模拟得到抽蓄电站在08:00—16:00抽水工况运行,显著促进了午间时段光伏消纳;文献[44]引入深度强化学习算法缓解并网点功率波动并减小抽蓄工况转换频率,使联合系统功率波动降低12.7%,收益增加4.95%。另一种是分布式光伏与小型抽水蓄能联合,优化目标为提高分布式光伏出力匹配度,小型抽水蓄能水库容量要求低,建设周期短、初期投资小,且分布灵活,与分布式光伏构成分布式能源体具备可观的发展潜力^[45]。

风-光-蓄联合互补系统具有稳定的电力供应能力,是解决大型新能源基地送出问题的有效方

案，图 4 为张北风光蓄互补系统及柔性直流输电示范工程的示意图，总计约 3 250 MW 风电与 2 210 MW 光伏与丰宁抽蓄电站构成互补系统，当新能源功率小于负荷端需求时，功率缺额首先由丰宁抽蓄电站补充，其次由外部交流电网进一步填补；反之，当新能源存在弃电时，富余电量先经丰宁抽蓄电站储存，其次由外部交流电网进一步消纳^[46]。风光蓄联合发电能显著改善新能源出力与负荷需求的不匹配，促进新能源消纳，提升互补系统经济效益。对于具体场景具体时段的出力配合，文献[47]采用改进的自适应遗传算法与罚函数法求解风光蓄联合互补优化调度，得到提升互补系统效益的抽蓄电站运行过程；文献[48]则引入主从博弈，以区域电网为主体，以风光蓄互补系统为从体，研究互补系统与区域电网的均衡运行策略，具有很好的可实践性。

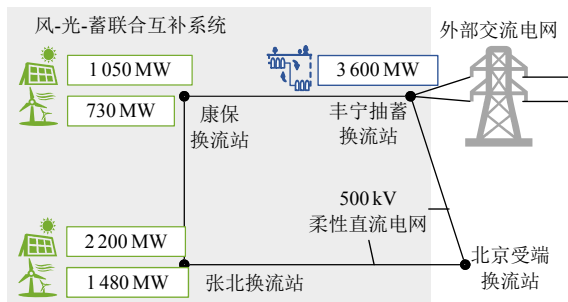


图 4 张北风光蓄互补系统及柔性直流输电工程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the Zhangbei wind-solar-energy storage and flexible DC transmission project

风-光-水-蓄联合互补系统在风-光-蓄系统的基础上耦合了水电，相较于风-光-蓄系统，风-光-水-蓄系统常见于流域清洁能源基地，是流域水风光一体化开发利用的新范式。文献[49]对流域梯级水电融合改造、增建抽水蓄能来提高系统运行进行了论证；文献[50]对水风光多能互补发电系统多时间尺度协调运行的建模及求解思路进行综述。风-光-水-蓄联合能够有效促进水风光资源互补，且有多种接入电网的模式，一种为风电、光伏连接水泵，将电能转换为水势能，再经由水轮机二次转换为电能接入电网，另一种为风电、光伏、水泵水轮机经由同一条母线接入电网，两种模式均能实现水风光互补以及混蓄电站的灵活调节^[51]。

3.1.2 电网侧以需定用优化

除源侧多能互补优化外，网侧以需定用是抽水蓄能另一主要调度优化模式。在电网租赁制商业模

式下，电网依据保供应、保安全、促消纳需求，在出现新能源消纳困难、调峰及备用资源不足、重要线路停电检修、支撑电网安全及应急处置电网故障和异常时，调用抽水蓄能满足调节需求，确保电力供应平稳有序。网侧抽水蓄能优化以发用电计划为基础，调用抽蓄电站存蓄富余电量，弥补电力缺额，优化计算需输出调用时段、抽蓄工况以及调用量，当前研究已在模型建立及求解算法上实现了系统对抽水蓄能的按需调用^[52]，以提高系统运行效益。

随着抽水蓄能的规模化发展，兼顾抽水蓄能与系统运行经济性，确保抽水蓄能既不发生利用，也不发生欠利用，逐渐成为含大规模抽水蓄能电力系统优化调度研究热点。文献[53]提出日前计划分层递阶优化算法，计算了含多座抽蓄电站的省级电网各机组 96 点出力曲线，将其大规模混合整数线性规划问题转换成大规模线性规划和小规模整数线性规划问题，分别不考虑和考虑抽蓄电站出力松弛，以使抽蓄机组具有合理的启停组合。文献[39]为系统和抽水蓄能分别设置了运行成本最小、平均上水库水位变幅最小及平均期望收益最大目标函数，用约束法将抽水蓄能目标转化为系统运行约束条件，通过交替迭代计算得到系统和抽水蓄能两主体均衡的调度运行方式，并用省级电网算例进行了合理性验证。文献[54]以时序为线索，建立了由 1d 前、1h 前、15 min 前组成的多时间尺度含抽水蓄能电力系统协调调度模型，提前对抽蓄机组输出功率进行优化调度，实现系统与抽水蓄能的协同经济运行。

3.1.3 储能侧多能协同优化

新型电力系统源储互补、源荷互动对系统灵活性资源的规模和性能提出高要求，除传统水库水电站、深调改造后煤电、气电外，新型电力系统重点发展的灵活性资源主要在储能侧，主要为抽水蓄能、新型储能以及柔性负荷，不同灵活性资源的差异主要为可调节容量范围、爬坡速率和输出持续时间^[55]。

抽水蓄能具有调节幅度大、蓄放能持续时间长的优点，但也存在建设周期长、建设成本高，以及输出功率无法细化到千瓦级、响应时间无法细化到毫秒级的缺点，需与其他储能技术以及柔性负荷优势互补^[56]，协同规划、发展、运行。规划发展方面，文献[57]对储能协同优化配置以提升新型电力系统弹性进行综述，并提出面向弹性提升的储能规划模型框架。调度运行方面，文献[58]建立了灵活性资

源两阶段优化调度模型,两阶段分别以净负荷波动最小和系统运行成本最小为目标,研究了各调节资源如何协调配合。文献[59]基于安全约束最优潮流计算,指出大规模抽水蓄能混合小规模电池储能,能更有效降低系统能量不平衡。

抽水蓄能能量密度和功率密度大,响应持续时间长但响应速度慢。其他储能技术中,飞轮储能响应速度快,功率密度高,但能量密度低,响应持续时间短;压缩空气储能运行特征与抽水蓄能相近,可大规模长时储能,但建设地理条件要求高;各种电池储能能量循环效率高,响应速度极快,但容量小、放电持续时间短,与抽水蓄能运行特征恰好互补。因此,不同储能技术服务系统运行的功能及效果不同,储能侧各储能资源优势互补、协调联动,才能全面覆盖新型电力系统各时间尺度的功率、能量平衡需要,全面发挥抽水蓄能及其他储能的服务应用价值。

3.2 大规模抽水蓄能参与电力系统稳定控制研究进展

3.2.1 参与功率及频率稳定控制

抽水蓄能电站具有快速响应和灵活调节的优点,能够有效地平抑新能源发电和电网故障引起的功率波动,提高电力系统的频率稳定性。从抽水蓄能电站自身优势出发,挖掘调频资源参与频率控制,对于保障新型电力系统频率安全、推动抽蓄技术的发展具有重大意义。

传统的定速抽蓄机组在发电工况下通过调节导叶开度进行频率调节,在抽水工况下不具备频率调节能力,但可以通过紧急切泵来减小电网有功缺额,减少切负荷量,降低频率控制代价。相较于定速抽蓄机组,变速抽蓄机组的优势在于抽水工况可进行自动频率控制,发电工况机组可迅速调节其有功功率输出,从而满足系统的调节需要,通过变速抽蓄机组的调节,可以有效避免高比例新能源并网后出现频率大幅变化问题。

定速抽蓄机组发电工况参与电网频率控制的核心在于控制器的设计上。目前定速抽蓄机组的频率调节控制多使用传统比例-积分-微分(proportion integration differentiation, PID)控制器,参数根据其自身动态特性整定,并不适用于非线性系统,且鲁棒性较差,针对此问题,有学者设计了基于改进Oustaloup算法的分数阶PID控制器^[60],并将其应用在抽蓄机组负荷频率控制中,保证其在非线性系

统中具有良好的频率控制效果及鲁棒性。

当前我国华东区域、南方区域抽水蓄能装机已有较大规模,基于蓄能切泵的抽水蓄能抽水工况参与负荷频率控制逐步开始应用。华东电网已建成并投运的频率紧急协调控制系统集成了抽蓄切泵、直流功率调制及可切除中断负荷3种措施,故障发生后,协控总站确定功率缺额并分配,协控子站按次序动作执行^[61]。南方电网已设计并投运了以蓄能切泵为主体的稳控切泵切负荷、广域低频集中切泵、就地低频分散切泵和低频减载组成的多层级低频综合稳定控制系统^[62]。系统由3个层级构成,即稳控总站、蓄能子站、控制子站。当系统发生故障、频率快速下降时,稳控总站接收下辖抽水蓄能电站上送的可切泵信息及频率信息,开始广域集中切泵;在广域集中切泵的基础上,追加切除剩余可切泵,作为广域集中切泵的后备措施;蓄能子站可切泵全部切除后,切负荷量若仍未达到,主站按比例分摊给各控制子站加以执行。

变速抽蓄机组由于变频器的存在,导致机组转速与电网频率解耦,不能主动为电网提供惯量和有功支撑^[63]。因此目前的研究集中在当电网频率发生波动时,变速抽蓄机组如何通过附加控制环节快速为电网提供功率支撑。由于变速抽蓄机组多采用双馈感应电机^[64],故在研究变速抽蓄机组参与电网频率调节时可以借鉴风电机组参与调频的控制思路,即将系统频率偏差整定为有功功率附加指令来参与系统的频率调节^[65]。但在海水抽水蓄能等水头变化较大的抽蓄系统中,为了让水泵水轮机始终保持最高效率运行,需要将转速作为双馈感应电机的控制目标^[66]。

综上,定速抽蓄机组和变速抽蓄机组都具备电网频率调节的功能。新型电力系统的“两高”特性增加了抽蓄电站参与系统频率调节的难度,如何实现定速抽蓄机组在发电工况下参数自适应频率控制、抽水工况下蓄能切泵与低频减载协同频率控制,使定速抽蓄机组能充分发挥其优势参与调频仍有待深入研究。此外,变速抽蓄机组的调频机理以及在不同工况下参与系统的调频策略目前尚无定论,有待进一步研究。

3.2.2 参与无功及电压稳定控制

目前,AVC系统已广泛配置于各电网及电网中的厂站,以优化全网无功及改善电能质量,在厂站端,AVC合理分配机组的无功/电压资源以进行无

功/电压的实时闭环控制，抑制电压波动，减少损耗并维持系统稳定运行。抽蓄机组启动快、爬坡快，能在数分钟内完成工况转换，除参与调频外，也能参与系统调压^[67]。为抽蓄电站建立合适的 AVC 系统与控制策略，实现多台抽蓄机组在多种工况下的无功/电压控制，对提高电网电压调控能力与稳定性具有重要意义。

针对抽蓄电站多机组、多工况的运行特点，目前文献报道的抽蓄电站 AVC 无功分配方法主要有等功率因数法、等比例法、可调节裕量法^[68]、动态优化法^[69]等，各方法优缺点及适用性对比如表 3 所示。

表 3 抽蓄电站 AVC 无功分配方法对比

Table 3 Comparison of reactive power allocation methods for pumped storage power stations

分配方法	原理	特点	适用性
等功率因数法	按机组有功实发值占比分配	考虑了机组无功与有功的联系，需实时监测并计算有功	适用于出力变动频繁、无功容量较大的抽蓄电站
等比例法	按机组最大无功容量占比分配	未计及有功功率及损耗，但不会出现越限情况	适用于机组数量较多、无功容量较大的抽蓄电站
可调节裕量法	按机组可上/下调无功量占比分配	考虑了无功运行约束，不会造成无功大幅调整	适用于机组数量较少、无功容量较小的抽蓄电站
动态优化法	按优化系数占比分配	效果依赖优化系数选择，计算难度较高	适用于出力波动较小、无功容量较小的抽蓄电站

上述方法均依赖精准的实发无功监测，要求系统具备实时监测和及时通信能力。其中，等功率因数法侧重于机组实际有功值和 $P-Q$ 曲线，等比例法侧重于机组最大无功值，可调节裕量法侧重于机组实际无功裕度，这 3 种分配策略相对简单、响应速度快；动态优化法充分考虑各机组实际状况，整体性能最优，但计算复杂、响应速度较慢。

在含高比例新能源、大规模抽水蓄能新型电力系统中，抽水蓄能无功调节配合有功调节，结合新能源波动灵活切换运行工况，能显著提高系统调度运行与控制在不同场景中的稳定性。例如在新能源出力过多时抽蓄机组应切换至抽水工况，并采取吸收无功的进相方式运行，尽量减少弃电之余吸收多余的无功，避免用户侧出现过电压；而在用电负荷过高、新能源出力不足时，切换至发电工况并采取发出无功的调相方式运行，满足用电负荷的同时也为电网补充无功功率，维持电压稳定。在各种场景中，更为直接的方式为调节抽蓄机组的数量完成无

功功率的调节，这种投切的方式不仅调节速度快，而且反应迅速，相较于其他方式不容易电压失衡。

3.3 保障抽水蓄能调度运行与控制的运营机制研究进展

运营机制是影响抽水蓄能调度运行与控制的重要背景条件，也是保障抽水蓄能持续健康发展的先决条件。目前国内外抽水蓄能运营模式主要有电网统一运营模式、租赁运营模式以及独立运营模式^[70]。

电网统一运营模式下抽蓄电站投资以及调度运营均由电网公司负责，抽蓄电价机制采用内部核算制，即抽蓄电站运行成本和合理回报一并计入电网公司销售电价；该模式由于抽蓄电站被完全融入电网公司的效益之中，无法单独体现抽蓄电站带来的收益，不利于吸纳社会投资并且减少了抽蓄电站提高运行管理的积极性。租赁运营模式下抽蓄电站投资方为独立发电公司，电网租赁获得使用权并给付租赁费，租赁费事前按成本与合理收益核定；由于合同已经确定，该模式下抽蓄电站失去了参与市场竞争获取超额利润的机会。独立运行模式下抽蓄电站投资及运营均由独立发电公司负责，目前国内电价机制以两部制电价为主，未来在市场化成熟阶段抽蓄电站可以在电能量市场、辅助服务市场中自主竞价并获得收益。

3 种运营机制分别适用于市场化程度较低、适中以及较高的电力系统，随着电力市场建设的不断深入，独立运营模式以能够灵活自主选择调度方式、有效分摊成本并发出价格信号反映价值，将逐渐成为最主要的运营模式。

独立运营模式及电力市场竞价机制下，抽水蓄能可参与交易的标的与机组特性及运行状态有关，在发电工况下，抽蓄机组可参与电能量、调频、旋转备用、补充备用的交易；在抽水工况下，变速机组可参与的交易品种与发电工况相同，但定速机组只能运行在最大功率，不能提供调频；在停机状态下，抽蓄机组可快速启动提供补充备用服务^[71]。依据所能交易的标的或服务，文献[72]总结了美国电力市场环境下水蓄能自调度、全调度、半调度 3 种优化调度模式，3 种调度模式对比如表 4 所示。

由表 4 可知，抽水蓄能向市场提交的信息数据不同，参与电力市场的深度也不同，3 种调度模式由浅入深依次为自调度、半调度及全调度，参与程度越深，抽水蓄能自身收益不确定性越大，统一优化出清下社会效益也越大，但市场出清模型复杂

表4 电力市场环境下抽蓄调度模式对比

Table 4 Comparison of pumped storage scheduling modes in power market environment

调度模式	特征	优点	缺点
自调度	抽蓄参与电力市场只报量不报价	出力曲线由运营商结合电价预测自行确定,抽蓄运营收益有保障	抽蓄自调度结果是市场出清边界条件,实未参与市场统一优化
全调度	抽蓄提供运行参数数据,市场统一优化出清	统一优化下实现了发电总成本最小,社会福利最大	抽蓄的加入极大增加了市场出清模型复杂性及求解难度
半调度	抽蓄在发电窗口时段报发电报价,在抽水窗口时段报抽水报价,均不报量	相比于自调度实现了更大的社会效益,相比于全调度简化了出清难度	相比于自调度可能降低抽蓄自身运行收益,相比于全调度报价不能反映真实成本

度、求解难度及时效性也随之更差,目前美国的大部分独立系统运营商采用了各方面较居中的半调度模式^[73]。

当前我国抽水蓄能主要由电网投资建设,由电网调度运行,参与电力现货市场尚处于起步阶段,抽蓄电价机制采用两部制电价,以容量电价和电量电价将抽蓄运行涉及费用纳入获益电网区域统一核算^[74-75]。两部制电价下抽蓄电站容量电价依赖核准,电量电价逐渐引入竞争,随着我国电力市场发展日臻成熟及大规模抽水蓄能价值挖掘需要,抽水蓄能将逐渐转变为独立主体深度参与电力市场,由两部制向市场化的转变中,文献^[76]提出抽蓄可保留容量电费、不报量不报价内嵌于日前市场优化出清,该机制可降低抽蓄在市场改革过渡阶段的经营风险。在成熟的市场化运营下,抽蓄电站可采用半调度或全调度参与市场出清优化确定出力曲线,实现抽蓄最大化利用,系统最大化收益。

4 大规模抽水蓄能调度运行与控制展望

4.1 抽水蓄能规模化发展展望

4.1.1 抽水蓄能电站集约化管理

伴随抽蓄机组集中批量投入运行,传统的属地化分散式管理已难以支撑新型电力系统下的运维要求,因此可参考流域梯级水电集控模式成立以运营管理单位或地理区位划分的抽水蓄能电站集控中心,实现抽水蓄能电站的统一优化调度。抽水蓄能电站以成立集控中心的方式实现集成管理的路径如图5所示,将同一运营管理单位下辖的不同地理区位抽水蓄能电站、或同一地理区位下有水力或

电力联系的抽水蓄能电站集成到集控中心,使电站级运维管理上升为中心级运维管理,在集控中心统一管理下对外交互,实现全中心安全可靠供电或抽水、经济高效运营、集成开放、协同共进。

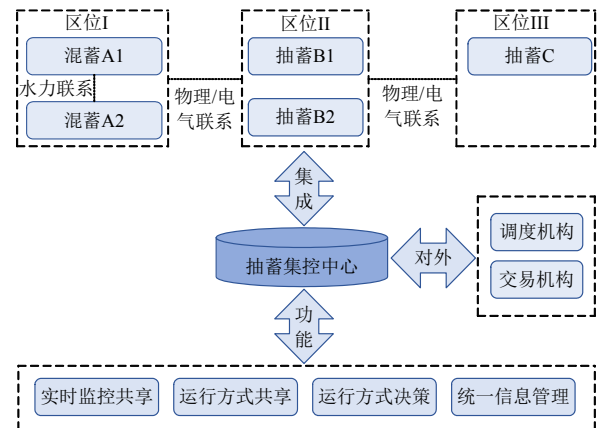


图5 抽蓄集控中心集成与功能

Fig. 5 Integration and functions of pumped storage control center

开展抽水蓄能电站集中控制运营,可加强抽水蓄能发展上的一些薄弱环节,助力推动抽水蓄能行业大规模发展。1) 避免信息孤岛方式运行,实现生产运行数据的实时监控和共享; 2) 根据共享的运行状态监测信息智能分析、辅助决策,实现全局最优而非局部最优; 3) 统一信息管理,便于抽水蓄能电站建设和管理的经验借鉴与技术创新。

目前国内南方电网储能股份有限公司已率先开展抽水蓄能电站集中控制运营模式探索,目标是将公司运营管理的9座既有抽水蓄能电站及常规水电站集成为集控中心,将属地化分散式监控模式转变为远程少人多厂站的集中监控模式^[77]。对于布局分散独立的小型抽蓄电站,积极探索集约化管理也有利于运营模式创新,同步先进运营经验及待解决问题,各方合作博弈,使集约集体价值最大化。小型抽水蓄能集约化管理可借鉴规模化聚合管理的思路,成立或引入聚合商聚合管理各分布式电站,以整体利益最大为目标参与系统调度运行与控制^[78]。随着抽水蓄能进一步参与电力市场,抽蓄集控中心或聚合商将成为抽蓄电站商业化运营、经济运行和优化调度的基础单元之一。

4.1.2 新型抽水蓄能资源开发利用

现阶段常规抽水蓄能已初具大规模特征,混合式抽水蓄能和地下抽水蓄能得到初步发展,已投运部分示范工程,海水抽水蓄能、水下抽水蓄能及抽发分离抽水蓄能则仍在理论研究阶段,尚需关键技

术突破。为避免抽水蓄能远离负荷中心、远离新能源基地、远离电网网架导致源-网-荷不匹配，应因地制宜、因需而异规划建设抽蓄电站，选址灵活、资源潜力巨大的各式新型抽水蓄能则是可行解决途径。

重视新型抽水蓄能资源开发利用，一方面要做好系统调节需求预测，把握抽蓄电站建设速度，避免出现系统调节需求不满足与抽水蓄能建设不充分矛盾。另一方面要加强技术研发，加快关键技术装备设计及制造，并通过可行性验证。最后，有序推进站址资源勘探和纳规，结合技术条件、经济条件及系统需求等由易到难有序开发利用。

4.2 抽水蓄能调度运行与控制研究展望

4.2.1 优化调度方面

1) 大规模抽水蓄能协同运行优化调度研究。未来新型电力系统以高比例新能源、大规模抽水蓄能为突出电源结构特征，抽水蓄能成为重要电源簇，在系统电力电量平衡与电能质量调节中扮演重要角色。在系统优化调度中，抽水蓄能调度运行要有整体对待、整体优化、集中力量的大规模协同理念，即将当前分散、位于电网各节点的抽蓄电站视为一个电源类别，与风光新能源、传统水火核能源、新型储能等电源类别一起联合优化，充分发挥抽水蓄能储能时间长、蓄能容量大、装机容量大、出力范围大等独特优势，助力实现各时间尺度的系统优化调度目标。

在电力市场环境下，抽水蓄能作为产销者能发能用，也应在顶层设计上整体考虑，为抽水蓄能电源簇设计合理的准入条件、竞价规则、出清规则，以使抽蓄运行收益能覆盖运行成本，抽蓄深度参与电力市场助力社会福利实现最大化。

2) 含大规模抽水蓄能运行的电源电网规划研究。电源电网规划应与大规模抽水蓄能的调度运行有机结合，充分考虑调度运行可能面临的各种场景，在规划阶段充分评估建设投资时兼顾经济性与场景适应能力，最大化加强系统电源电网结构，避免新能源产生“窝电”，避免抽水蓄能出现“窝能力”。有机结合的优势除便利调度运行外，同时还能把握抽水蓄能与新能源的规模化发展速度，保障新能源不断并网过程中有合理规模的抽水蓄能投运，满足系统攀升的调节能力需求，避免发展失衡带来不利影响。

3) 能量市场与辅助服务市场机制下的抽水蓄

能调度策略研究。含高比例新能源、大规模抽水蓄能的新型电力系统优化调度以合理利用抽水蓄能平抑新能源波动、维持电力电量平衡为核心，优化调度一方面要提升抽水蓄能发电能力在能量市场上的收益，另一方面要解决系统调节需求量化及预测问题，最后，以合适的优化调度策略平衡抽蓄能力与系统调度需求，给出能量市场与辅助服务市场机制下的抽水蓄能调度策略。抽水蓄能发电能力计算应结合抽蓄电站形式，充分考虑各种水库运行约束、电力运行约束，并计及对既有梯级水电或同节点其他电源的潜在影响^[79]，精确计算发电工况下可供电力电量和抽水工况下可吸纳电力电量。系统调节需求量化及预测则依据面临场景，概率化表达一次能源和负荷需求的不确定性，分析发用电一致性及存在的偏差，该发用电偏差即为待填补的调节需求。最后，优化调度需提出均衡的优化调度策略，以协调系统中的调节能力或措施满足系统需要，对抽水蓄能而言，即是要确保经济利用，不出现明显的过利用或欠利用，以及恰当的厂间、厂内发电空间分配策略确保抽蓄运行工况一致性，避免系统出现同一时段既有抽蓄电站或机组在发电，又有抽蓄电站或机组在抽水的不合理利用现象。

4.2.2 稳定控制方面

1) 全面参与新型电力系统安全稳定控制方法研究。抽水蓄能在源、荷、储三方面均具有相应功能和行为能力，可深度参与电力系统安全稳定控制。在电源侧，由于通过变压器并网的新能源与电网弱耦合，导致系统惯量不足，可让抽水蓄能参与一次调频，提供惯量支撑抑制系统频率跌落；在负荷侧，当通过紧急功率支援、储能放电及减少柔性负荷仍不能解决系统低频问题时，为避免低频、低压减载启动，可设计稳控策略优先将系统中抽水工况运行的抽蓄机组予以切除；在储能侧，大规模长时储能特性使抽水蓄能可提供中长期电压调节。

因此，抽水蓄能应发挥优势，全面参与新型电力系统安全稳定控制。有功控制方面，统筹惯性支撑、快速调频、AGC等功能，支撑系统多时间尺度的功率及能量需求，提升频率稳定性和功率平稳性；无功控制方面，兼顾过电压抑制、短期电压稳定、AVC等功能，用于不同时间尺度的电压调节，提升系统的电压稳定性和电压质量；非工频控制方面，通过振荡抑制、电能质量控制等功能，平抑工频以外的宽频带电磁动态，防范系统出现各种非工

频振荡并提升电能质量^[56]。

2) 短时间尺度应用功能及控制方法研究。抽水蓄能能量密度高、能量转化效率高、运行费用较低,在系统中长时间尺度的调节中已有较好发挥,如调峰调频、承担备用等,其中抽水蓄能响应速度在分钟级以上,为适应新型电力系统多时间尺度调节需要,应拓展抽水蓄能应用功能至短时间尺度,如快速调频、抑制低频振荡等,这就需要抽水蓄能将响应速度提高至秒级甚至毫秒级,健全抽水蓄能多时间尺度功用价值。然而拓展抽水蓄能应用功能至短时间尺度仍有待发电技术突破,定速机组受制于设备条件几无可能实现拓展,可变速机组相较于定速机组发电设备及技术已有较大提升,针对可变速机组短时间尺度应用功能及其控制策略的研究是抽蓄功用价值拓展的主要方向。

3) 适应不同场景的多功能协调支撑方法研究。当前抽水蓄能应用功能仍较单一,核心目标局限于削峰填谷、消纳新能源等功能,少有综合多种应用功能的多功能协调支撑方法设计,随着新型电力系统各种常规、非常规、以及极端场景下运行与控制困难日益加剧,有必要协调抽水蓄能的多种应用功能,满足系统多样化调节需求,提升系统稳定性和经济性。适应不同场景的抽水蓄能多功能协调支撑策略可借鉴调度运行定需求总量后分配的思路,根据不同场景下系统稳态、暂态、动态监测指标变化态势感知,在系统层面计算出有功、无功及其他调节需求量,在厂站层面结合抽蓄机组状态确定AGC、AVC等各项能力并上送至控制中心,通过分配计算后向抽水蓄能下达调控指令,多功能协调联动,以缓解指标恶化,使系统恢复稳定运行。

4.3 规模化抽水蓄能运营机制展望

从全球抽水蓄能开发建设的良好势头来看,既往抽蓄运营模式与电价机制极大促进了抽水蓄能规模扩大,但随着投资开发主体的多元化及抽水蓄能功能定位的扩大化,现有运营机制下抽水蓄能“过利用”与“欠利用”问题并存,收支不平衡的运营困境阻碍抽蓄可持续发展的问题日益突出。对此,应发挥独立运营模式下抽水蓄能电站分摊成本与反映价格信号的优势,通过采取独立运营模式,让规模化抽水蓄能电站合理获取收益,实现电站利用与利润的平衡。

另外,影响独立运营电站收益的最大因素是电站的电价机制。针对独立运营模式下的规模化抽蓄

电站,应持续完善抽水蓄能价格疏导与分摊,保障抽蓄合理效益。理论研究层面,亟待解决的问题包括:1) 容量电费核算及分摊,核算要精确评估抽水蓄能项目成本,确保项目论证、设计、建设、融资等相关费用均已纳入考虑;分摊要涵盖所有受益主体,对于跨地区、跨电网服务的抽蓄电站的分摊方式应特殊考虑。2) 电量电价机制,抽蓄参与电力市场的峰谷价差应满足抽蓄的合理收益,且当市场价格失灵、无法覆盖抽蓄运行成本时,抽蓄应获得额外补偿。3) 辅助服务品种定价,对抽水蓄能调度运行中提供的备用、调峰、调频等辅助服务的定价,应能够真实全面反映抽水蓄能服务价值,鼓励抽水蓄能深度参与电力市场。

5 结论

当前新型电力系统构建过程中,抽水蓄能发展路径不清晰、运行调用不合理、功能利用不全面等问题突出。针对以上问题,本文以大规模抽水蓄能为研究对象,首先梳理国际、国内抽水蓄能建设现状及发展趋势,总结抽水蓄能的建设规模与发展方向;然后以含高比例新能源、大规模抽水蓄能的新型电力系统为背景,从源储协同互补、电网侧以需求定用、灵活性资源协同、参与电力市场等方面综述了抽水蓄能优化调度研究进展;同时,从参与功率及频率控制、参与无功及电压控制、大规模集中控制等方面综述了抽水蓄能稳定控制研究进展。最后结合优化调度与稳定控制研究现状,展望了大规模抽水蓄能协同参与优化调度、多功能协调支撑稳定控制等研究方向,助力抽水蓄能合理利用,为新型电力系统建设提供支撑。

参考文献

- [1] International Hydropower Association . 2023 world hydropower outlook[R] . London : International Hydropower Association, 2023.
- [2] 水电水利规划设计总院,中国水力发电工程学会抽水蓄能行业分会. 抽水蓄能产业发展报告 2022[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2023.
China Renewable Energy Engineering Institute, CPSA. Development report of pumped storage industry 2022[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2023(in Chinese).
- [3] TOUFANI P, NADAR E, KOCAMAN A S. Operational benefit of transforming cascade hydropower stations into pumped hydro energy storage systems[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 51: 104444.

- [4] 刘泽洪. 新型电力系统建设与水电创新发展[J]. 新型电力系统, 2023, 1(2): 105-115.
LIU Zehong. New-type power system and innovative development of hydropower[J]. New Type Power Systems, 2023, 1(2): 105-115(in Chinese).
- [5] 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.
TAN Yaqian, ZHOU Xuezhi, XU Yujie, et al. Seawater pumped hydro energy storage: review and perspectives[J]. Energy Storage Science and Technology, 2017, 6(1): 35-42(in Chinese).
- [6] BLAKERS A, STOCKS M, LU Bin, et al. A review of pumped hydro energy storage[J]. Progress in Energy, 2021, 3(2): 022003.
- [7] Australian National University. 100% Renewable Energy Group. Pumped hydro energy storage atlases[EB/OL]. (2023-12-01)[2024-01-12]. <https://re100.eng.anu.edu.au/global.htm>.
- [8] Minister of Power and New & Renewable Energy of India. Guidelines on pumped storage projects[EB/OL]. (2023-12-01)[2024-01-12]. <http://admin.indiaenvironmentportal.org.in/reports-documents/guidelines-pumped-storage-projects>.
- [9] AMEEN M T, MA Zhiwei, SMALLBONE A, et al. Demonstration system of pumped heat energy storage (PHES) and its round-trip efficiency [J]. Applied Energy, 2023, 333: 120580.
- [10] GUSTAVSSON P. Development of an investment model for pumped storage hydropower[D]. Uppsala: Uppsala University, 2023.
- [11] TAHSEEN S. The water-energy nexus-a modern case study to reassess hydropower in the Niagara river [D]. Toronto: University of Toronto, 2017.
- [12] 水电水利规划设计总院, 中国水力发电工程学会抽水蓄能行业分会. 抽水蓄能产业发展报告 2021[M]. 北京: 水利水电出版社, 2022.
China Renewable Energy Engineering Institute, CPSA. Development report of pumped storage industry 2021[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2022(in Chinese).
- [13] 国家能源局. 抽水蓄能中长期发展规划(2021-2035年)[EB/OL]. (2023-12-01)[2024-01-12]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-09/17/c_1310193456.htm.
National Energy Administration. Medium and long term development plan for pumped storage(2021-2035)[EB/OL]. (2023-12-01)[2024-01-12]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-09/17/c_1310193456.htm(in Chinese).
- [14] 韩冬, 赵增海, 严秉忠, 等. 2021 年中国常规水电发展现状与展望[J]. 水力发电, 2022, 48(6): 1-5, 72.
HAN Dong, ZHAO Zenghai, YAN Bingzhong, et al. Status and prospect of China's conventional hydropower development in 2021[J]. Water Power, 2022, 48(6): 1-5, 72(in Chinese).
- [15] 韩冬, 赵增海, 严秉忠, 等. 2021 年中国抽水蓄能发展现状与展望[J]. 水力发电, 2022, 48(5): 1-4, 104.
HAN Dong, ZHAO Zenghai, YAN Bingzhong, et al. Status and prospect of China's pumped storage development in 2021[J]. Water Power, 2022, 48(5): 1-4, 104(in Chinese).
- [16] 邓小华. 国内大型抽水蓄能电站水轮机选型研究[J]. 四川水力发电, 2023, 42(5): 78-82.
DENG Xiaohua. Study on the selection of hydraulic turbine for domestic large-scale pumped storage power stations[J]. Sichuan Hydropower, 2023, 42(5): 78-82(in Chinese).
- [17] 赵子文, 陈帝伊, 李建玲, 等. 五种抽蓄运行特点的区域能源系统灵活性评估[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(18): 7103-7114.
ZHAO Ziwen, CHEN Diyi, LI Jianling, et al. Flexibility assessment of regional energy systems considering five types of pumped storage with different operational characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(18): 7103-7114(in Chinese).
- [18] PUJADES E, ORBAN P, BODEUX S, et al. Underground pumped storage hydropower plants using open pit mines: how do groundwater exchanges influence the efficiency? [J]. Applied Energy, 2017, 190: 135-146.
- [19] PUJADES E, JURADO A, ORBAN P, et al. Hydrochemical changes induced by underground pumped storage hydropower and their associated impacts[J]. Journal of Hydrology, 2018, 563: 927-941.
- [20] 高学平, 袁泽雨. 抽水蓄能电站地下水库建设进展及关键水力学问题[J]. 水利学报, 2023, 54(9): 1058-1069.
GAO Xueping, YUAN Zeyu. Development of the underground reservoirs of pumped-storage hydropower and key hydraulics issues[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(9): 1058-1069(in Chinese).
- [21] 卢开放, 侯正猛, 孙伟, 等. 云南省矿井抽水蓄能电站潜力评估与建设关键技术[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 136-144.
LU Kaifang, HOU Zhengmeng, SUN Wei, et al. Potential evaluation and construction key technologies of pumped-storage power stations in mines of Yunnan province[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(1): 136-144(in Chinese).
- [22] 卞正富, 朱超斌, 周跃进, 等. 黄河流域九省区废弃矿井抽水蓄能利用潜力评估[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(12): 51-64.
BIAN Zhengfu, ZHU Chaobin, ZHOU Yuejin, et al. Evaluation on potential of using abandoned mines for pumped storage in nine provinces of Yellow River

- Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(12): 51-64(in Chinese).
- [23] 谢和平, 侯正猛, 高峰, 等. 煤矿井下抽水蓄能发电新技术: 原理、现状及展望[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(5): 965-972.
- XIE Heping, HOU Zhengmeng, GAO Feng, et al. A new technology of pumped-storage power in underground coal mine: principles, present situation and future[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(5): 965-972(in Chinese).
- [24] 钱钢粮. 我国海水抽水蓄能电站站点资源综述[J]. *水电与抽水蓄能*, 2017, 3(5): 1-6.
- QIAN Gangliang. Brief introduction of Chinese seawater pumped storage power station's resources [J]. *Hydropower and Pumped Storage*, 2017, 3(5): 1-6(in Chinese).
- [25] 滕军, 吴新平, 吴林波, 等. 海水抽水蓄能电站设计关键技术问题研讨[J]. *中国农村水利水电*, 2022(1): 159-162.
- TENG Jun, WU Xinping, WU Linbo, et al. Research on the key technical problems in designing seawater pumped storage power stations [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(1): 159-162(in Chinese).
- [26] 熊伟平, 郑觉平, 吴金水. 冲绳海水抽水蓄能电站概况、技术特点及借鉴[J]. *水电与抽水蓄能*, 2018, 4(6): 56-66, 12.
- XIONG Weiping, ZHENG Jueping, WU Jinshui. General situation and technical analysis of Okinawa seawater pumped-storage power station[J]. *Hydropower and Pumped Storage*, 2018, 4(6): 56-66, 12(in Chinese).
- [27] SLOCUM A H, FENNELL G E, DUNDAR G, et al. Ocean renewable energy storage(ORES) system: analysis of an undersea energy storage concept[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2013, 101(4): 906-924.
- [28] HAHN H, HAU D, DICK C, et al. Techno-economic assessment of a subsea energy storage technology for power balancing services[J]. *Energy*, 2017, 133: 121-127.
- [29] 王晰, SHAIR J, 谢小荣. 水下储能技术综述与展望[J]. *电网技术*, 2023, 47(10): 4121-4130.
- WANG Xi, SHAIR J, XIE Xiaorong. Underwater grid-scale energy storage: review and prospect [J]. *Power System Technology*, 2023, 47(10): 4121-4130(in Chinese).
- [30] 刘泽洪, 梁旭明, 周原冰, 等. 基于新型抽蓄的绿色蓄能调水工程研究[J]. *全球能源互联网*, 2022, 5(6): 525-534.
- LIU Zehong, LIANG Xuming, ZHOU Yuanbing, et al. Research on green water transfer project with energy storage based on new-type pumped storage [J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2022, 5(6): 525-534(in Chinese).
- [31] WANG Hao, WANG Fujun, WANG Benhong, et al. Partial flow separation in guide-vane region of large-capacity/low-head pumped hydro energy storage system with horizontal shaft[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 71: 108173.
- [32] WANG Hao, WANG Fujun, WANG Benhong, et al. Gravity-induced virtual clocking effect in large-capacity/low-head pumped hydro energy storage system with horizontal shaft[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2023, 60: 103441.
- [33] 刘吉臻, 王庆华, 胡阳, 等. 新型电力系统的内涵、特征及关键技术[J]. *新型电力系统*, 2023, 1(1): 49-65.
- LIU Jizhen, WANG Qinghua, HU Yang, et al. Connotation, characteristics and key technologies of new power systems[J]. *New Type Power Systems*, 2023, 1(1): 49-65(in Chinese).
- [34] 谢小荣, 马宁嘉, 刘威, 等. 新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(1): 158-168.
- XIE Xiaorong, MA Ningjia, LIU Wei, et al. Functions of energy storage in renewable energy dominated power systems: review and prospect [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(1): 158-168(in Chinese).
- [35] 刘映尚, 马骞, 王子强, 等. 新型电力系统电力电量平衡调度问题的思考[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(5): 1694-1705.
- LIU Yingshang, MA Qian, WANG Ziqiang, et al. Cogitation on power and electricity balance dispatching in new power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(5): 1694-1705(in Chinese).
- [36] 李明节, 陈国平, 董存, 等. 新能源电力系统电力电量平衡问题研究[J]. *电网技术*, 2019, 43(11): 3979-3986.
- LI Mingjie, CHEN Guoping, DONG Cun, et al. Research on power balance of high proportion renewable energy system[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(11): 3979-3986(in Chinese).
- [37] ZHANG Guanglun, ZHONG Haiwang, TAN Zhenfei, et al. Texas electric power crisis of 2021 warns of a new blackout mechanism[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2022, 8(1): 1-9.
- [38] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. "双高"电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(2): 461-474.
- XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(2): 461-474(in Chinese).
- [39] 彭煜民, 刘德旭, 王雪林, 等. 计及水库运行约束的极端气象场景下抽蓄电站优化调度研究[J]. *水利学报*,

- 2023, 54(11): 1298-1308.
- PENG Yumin, LIU Dexu, WANG Xuelin, et al. Optimization scheduling of pumped-storage power stations under extreme weather scenarios considering reservoir operation constraints[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, 54(11): 1298-1308(in Chinese).
- [40] 陈帝伊, 刘公成, 梁潇, 等. 定-变速抽水蓄能机组调相-发电过渡过程动态特性研究[J]. *水利学报*, 2023, 54(1): 105-116.
- CHEN Diyi, LIU Gongcheng, LIANG Xiao, et al. Study on dynamic characteristics of phase modulation-generation transition process of fixed-speed and variable-speed pumped-storage units[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, 54(1): 105-116(in Chinese).
- [41] 徐飞, 陈磊, 金和平, 等. 抽水蓄能电站与风电的联合优化运行建模及应用分析[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(1): 149-154.
- XU Fei, CHEN Lei, JIN Heping, et al. Modeling and application analysis of optimal joint operation of pumped storage power station and wind power [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(1): 149-154(in Chinese).
- [42] 张刘冬, 殷明慧, 卜京, 等. 基于成本效益分析的风电-抽水蓄能联合运行优化调度模型[J]. *电网技术*, 2015, 39(12): 3386-3392.
- ZHANG Liudong, YIN Minghui, BU Jing, et al. A Joint optimal operation model of wind farms and pumped storage units based on cost-benefit analysis[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(12): 3386-3392(in Chinese).
- [43] 梁喆, 李梅, 周孟然, 等. 面向光伏消纳的光伏-废弃矿井抽蓄-蓄电池联合发电系统优化调度策略[J]. *科技导报*, 2021, 39(13): 52-58.
- LIANG Zhe, LI Mei, ZHOU Mengran, et al. Optimal scheduling strategy for PV-abandoned mine pumped storage-battery hybrid power generation system for PV energy consumption[J]. *Science & Technology Review*, 2021, 39(13): 52-58(in Chinese).
- [44] 李涛, 胡维昊, 李坚, 等. 基于深度强化学习算法的光伏-抽蓄互补系统智能调度[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(13): 2757-2768.
- LI Tao, HU Weihao, LI Jian, et al. Intelligent economic dispatch for PV-PHS integrated system: a deep reinforcement learning-based approach [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(13): 2757-2768(in Chinese).
- [45] 赵书强, 王子巍, 李志伟, 等. 分布式光伏-抽蓄系统联合优化运行策略[J]. *南方电网技术*, 2023, 17(11): 76-86.
- ZHAO Shuqiang, WANG Ziwei, LI Zhiwei, et al. Joint optimal operation strategy of distributed photovoltaic-pumped storage systems[J]. *Southern Power System Technology*, 2023, 17(11): 76-86(in Chinese).
- [46] 曹敏健, 胡泽春, 孟颖, 等. 含抽水蓄能电站与新能源发电的柔性直流系统日前优化调度方法[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(15): 36-44.
- CAO Minjian, HU Zechun, MENG Ying, et al. Day-ahead optimal dispatch method for flexible DC system with pumped storage hydropower plant and new energy power generation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(15): 36-44(in Chinese).
- [47] 姬嘉明. 考虑抽水蓄能电站的风光互补发电系统的优化调度研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2022.
- JI Jiaming. Research on optimal scheduling of wind-solar hybrid power generation system considering pumped-storage power station[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2022(in Chinese).
- [48] 周永斐, 梅亚东, 谢凡仪, 等. 基于主从博弈的风光蓄网短期优化调度[J]. *水力发电学报*, 2021, 40(12): 52-64.
- ZHOU Yongfei, MEI Yadong, XIE Fanyi, et al. Short-term optimal scheduling of wind-photovoltaic-pumped storage grid based on Stackelberg game[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, 40(12): 52-64(in Chinese).
- [49] 刘欣雨, 罗彬, 陈永灿, 等. 融合改造的梯级混合式抽蓄短期调峰优化模型[J/OL]. *电网技术*, 2024, 1-13 [2024-05-07]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2047>.
- LIU Xinyu, LUO Bin, CHEN Yongcan, et al. Short-term peak shaving model of cascade hybrid pumped storage retrofitted from conventional hydropower[J/OL]. *Power System Technology*, 2024, 1-13[2024-05-07]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2047>(in Chinese).
- [50] 申建建, 王月, 程春田, 等. 水风光多能互补发电调度问题研究现状及展望[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(11): 3871-3884.
- SHEN Jianjian, WANG Yue, CHENG Chuntian, et al. Research status and prospect of generation scheduling for hydropower-wind-solar energy complementary system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(11): 3871-3884(in Chinese).
- [51] 刘德民, 耿博, 赵永智, 等. 水风光能源互补形式的研究探讨[J]. *水电与抽水蓄能*, 2021, 7(5): 13-19.
- LIU Demin, GENG Bo, ZHAO Yongzhi, et al. Research on complementary forms of hydro wind and solar energy[J]. *Hydropower and Pumped Storage*, 2021, 7(5): 13-19(in Chinese).
- [52] 邵磊, 多增森, 柴嘉启, 等. 抽蓄-风-光-火联合系统日前优化调度研究[J]. *电网与清洁能源*, 2023, 39(6): 108-114.
- SHAO Lei, DUO Zengsen, CHAI Jiaqi, et al. A study on

- the day-ahead optimal scheduling of the pumped storage-wind-solar-thermal combined system [J]. *Power System and Clean Energy*, 2023, 39(6): 108-114(in Chinese).
- [53] 周云海, 张智颖, 徐飞, 等. 含多座抽水蓄能电站的省级电网日前计划分层递进优化算法[J]. *中国电力*, 2023, 56(5): 41-50.
- ZHOU Yunhai, ZHANG Zhiying, XU Fei, et al. Hierarchical progressive optimization algorithm for day-ahead planning of provincial power grid with multiple pumped storage power Stations[J]. *Electric Power*, 2023, 56(5): 41-50(in Chinese).
- [54] XIA Shiwei, DING Zhaohao, DU Ting, et al. Multitime scale coordinated scheduling for the combined system of wind power, photovoltaic, thermal generator, hydro pumped storage, and batteries[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, 56(3): 2227-2237.
- [55] LOPES F, COELHO H. Electricity markets with increasing levels of renewable generation: structure, operation, agent-based simulation, and emerging designs[M]. Cham: Springer, 2018.
- [56] 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.
- JIANG Haiyang, DU Ershun, ZHU Guiping, et al. Review and prospect of seasonal energy storage for power system with high proportion of renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(19): 194-207(in Chinese).
- [57] 李更丰, 孙少华, 别朝红, 等. 面向新型电力系统弹性提升的储能优化配置与灵活调度研究综述[J]. *高电压技术*, 2023, 49(10): 4084-4095.
- LI Gengfeng, SUN Shaohua, BIE Zhaohong, et al. Review on optimal configuration and flexible scheduling research of energy storage for resilience improvement of new power system[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(10): 4084-4095(in Chinese).
- [58] 樊伟, 李旭东, 王尧, 等. 新型电力系统灵活性资源聚合两阶段调度优化模型[J]. *电力建设*, 2023, 44(2): 25-37.
- FAN Wei, LI Xudong, WANG Yao, et al. Two-stage scheduling optimization model of flexible resource aggregation in new power system[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(2): 25-37(in Chinese).
- [59] PATTNAIK A, KUMAR DAUDA A, PADHEE S, et al. Security constrained optimal power flow solution of hybrid storage integrated cleaner power systems [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 232: 121058.
- [60] 单华, 和婧, 范立新, 等. 面向抽水蓄能电站区域负荷频率的分数阶PID控制研究[J]. *电网技术*, 2020, 44(4): 1410-1418.
- SHAN Hua, HE Jing, FAN Lixin, et al. Research on fractional order PID control of regional load frequency of pumped storage power station[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(4): 1410-1418(in Chinese).
- [61] 许涛, 励刚, 于钊, 等. 多直流馈入受端电网频率紧急协调控制系统设计与应用[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(8): 98-104.
- XU Tao, LI Gang, YU Zhao, et al. Design and application of emergency coordination control system for multi-infeed HVDC receiving-end system coping with frequency stability problem[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(8): 98-104(in Chinese).
- [62] 陈兴华, 常东旭, 陈锦昌, 等. 基于蓄能切泵的南方电网低频综合稳定控制策略与应用[J]. *南方电网技术*, 2022, 16(12): 68-75.
- CHEN Xinghua, CHANG Dongxu, CHEN Jinchang, et al. Low frequency integrated stability control strategy and application of CSG based on pump storage cutting[J]. *Southern Power System Technology*, 2022, 16(12): 68-75(in Chinese).
- [63] TIWARI R, NILSEN R, MO O, et al. Control Methods for operation of pumped storage plants with full-size back-to-back converter fed synchronous machines[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2023, 59(6): 6792-6803.
- [64] GAO Chunyang, YU Xiangyang, NAN Haipeng, et al. Stability and dynamic analysis of doubly-fed variable speed pump turbine governing system based on Hopf bifurcation theory[J]. *Renewable Energy*, 2021, 175: 568-579.
- [65] 陈亚红, 邓长虹, 刘玉杰, 等. 抽水工况双馈可变速抽水蓄能机组机电暂态建模及有功-频率耦合特性[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(3): 942-956.
- CHEN Yahong, DENG Changhong, LIU Yujie, et al. Electromechanical transient modelling and active power-frequency coupling characteristics of doubly-fed variable speed pumped storage under pumping mode[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(3): 942-956(in Chinese).
- [66] 庄凯勋, 孙建军, 丁理杰, 等. 提升双馈变速抽水蓄能机组频率响应特性的控制策略[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(23): 6292-6304.
- CHUANG K, SUN Jianjun, DING Lijie, et al. A control strategy with improved frequency response characteristics of variable speed DFIM pumped storage [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(23): 6292-6304(in Chinese).
- [67] ZHAO Chong, WANG Longze, MA Yiyi, et al. Transient stability simulation analysis of multi node power network with variable speed pumped storage units[J]. *Journal of*

- Electrical Engineering & Technology, 2023, 18(4): 2811-2822.
- [68] QIN Yonglin, LI Deyou, WANG Hongjie, et al. Optimization on high-pressure side of pump-turbine runner based on high efficiency and stability criterion via multi-objective genetic algorithm method [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2023, 237(8): 1743-1761.
- [69] 田其生. 基于区域电网动态无功优化的 AVC 系统控制参数整定方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
TIAN Qisheng. AVC system control parameter setting method based on dynamic reactive power optimization of regional power grid[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020(in Chinese).
- [70] ALI S, STEWART R A, SAHIN O, et al. Spatial bayesian approach for socio-economic assessment of pumped hydro storage[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 189: 114007.
- [71] CHEN Yonghong, LEONARD R, KEYSER M, et al. Development of performance-based two-part regulating reserve compensation on MISO energy and ancillary service market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 142-155.
- [72] 关玉衡, 张经纬, 张轩, 等. 美国电力市场环境下抽水蓄能调度模式分析及启示[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(13): 1-11.
GUAN Yuheng, ZHANG Jingwei, ZHANG Xuan, et al. Analysis and enlightenment of pumped storage dispatch modes under american electricity market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(13): 1-11(in Chinese).
- [73] LIU Yikui, WU Lei, YANG Yafei, et al. Secured reserve scheduling of pumped-storage hydropower plants in ISO day-ahead market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(6): 5722-5733.
- [74] 乔洪奎, 张义晗, 高美婷, 等. 关于新型电力系统中抽水蓄能电价机制的思考[J]. 水电与抽水蓄能, 2021, 7(6): 24-27.
QIAO Hongkui, ZHANG Yihan, GAO Meiting, et al. Thinking about the price mechanism of pumped storage in new power systems[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2021, 7(6): 24-27(in Chinese).
- [75] ZENG Ming, ZHANG Kun, LIU Daoxin. Overall review of pumped-hydro energy storage in China: status quo, operation mechanism and policy barriers[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 17: 35-43.
- [76] 王进, 张粒子, 赵志芳, 等. 抽水蓄能电站市场化运行机制和日前市场出清模型[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(12): 145-153.
WANG Jin, ZHANG Lizi, ZHAO Zhifang, et al. Marketization operation mechanism and clearing model of day-ahead market for pumped storage stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(12): 145-153(in Chinese).
- [77] 中国水利水电科学研究院. iP9000 助力国内首个抽水蓄能多厂站集控中心进入试运行[EB/OL]. (2022-12-20) [2023-02-20]. <http://www.iwhr.com/zgskywnew/kydt/webinfo/2022/12/1671017061146871.htm>.
China Institute of Water Resources and Hydropower Research. iP9000 supports the trial operation of the first centralized control center for multiple pumped hydro energy storage plants in China[EB/OL]. (2022-12-20) [2023-02-20]. <http://www.iwhr.com/zgskywnew/kydt/webinfo/2022/12/1671017061146871.htm>(in Chinese).
- [78] 林立乾, 米增强, 贾雨龙, 等. 面向电力市场的分布式储能聚合参与电网调峰[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(2): 276-283.
LIN Liqian, MI Zengqiang, JIA Yulong, et al. Distributed energy storage aggregation for power grid peak shaving in a power market[J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(2): 276-283(in Chinese).
- [79] 彭煜民, 王雪林, 刘德旭, 等. 考虑混蓄与纯蓄配置方式的水风光蓄互补系统调度运行对比研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 179-187.
PENG Yumin, WANG Xuelin, LIU Dexu, et al. Comparative research on the dispatching operation of a hydro-wind-solar-storage complementary system considering configurations with hybrid and pure pumped-storage hydropower plants[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 179-187(in Chinese).



刘德旭

在线出版日期: 2024-08-27。

收稿日期: 2024-04-02。

作者简介:

刘德旭(1996), 男, 工程师, 研究方向为水库调度及新型电力系统低碳经济运行, liudexus@outlook.com;

杨迎(1994), 女, 工程师, 研究方向为水电及抽水蓄能, yangy2937@163.com;

黄宏旭(1997), 男, 博士, 研究方向为综合能源系统优化运行, hongxuhuang@outlook.com;

*通信作者: 钟海旺(1986), 男, 副教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 主要研究方向为电力系统优化运行、电力市场等, zhonghw@tsinghua.edu.cn。

(编辑 乔宝榆, 李新洁)