

# 海水抽水蓄能与海上光伏一体化发电技术及经济性分析

朱军辉<sup>✉</sup>

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

**摘要:** [目的] 广东省目前暂未对海水抽水蓄能和海上光伏一体化进行研究。由于广东省具有漫长的海岸线, 具备了海上光伏开发的基本条件, 也具备了利用大海作为抽水蓄能下库的近海的海水抽水蓄能开发的基本条件, 并随着国内对海水抽水蓄能难题的研究和关键技术的突破, 因此, 对海上光伏和海水抽水蓄能的一体化进行研究和探索很有必要。[方法] 基于光伏工程的实践, 给出了独立的光伏电站技术配置, 并通过软件模拟光伏电站, 对独立的光伏电站经济性作了测算; 也基于抽水蓄能工程中的实践, 给出了独立的抽水蓄能电站的原则性技术配置, 对独立的抽水蓄能电站的经济性作了测算; 对海上光伏与海水抽水蓄能一体化组合考虑后, 通过经济评价软件对海水抽水蓄能与海上光伏一体化项目的经济性作了测算。[结果] 得出了海水抽蓄与海上光伏一体化项目的原则性技术配置, 及在不同容量配置下的经济性。[结论] 在广东省开展海上光伏和海水抽蓄一体化是基于现实条件下的一个较好的选择, 这种一体化通过海上光伏配置一定容量海水抽水蓄能较好地解决了光伏电源的不均衡性和不稳定性, 在经济性上也具备一定的可行性, 也利于“3060 双碳目标”的实现, 它更多地将电源投资、建设和运营交由电力市场参与主体决策和负责, 当一体化项目实现正向收益并达到一定的投资回报率时, 将极大地推动一体化项目落地和上规模。

**关键词:** 海水抽水蓄能; 海上光伏; 上网电价; 一体化; 经济性

中图分类号: TK02; TK79

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)02-0011-07

开放科学(资源服务)二维码:



## Analysis of Power Generation Technology and Economy on the Integration of Seawater Pump & Storage and Offshore PV

ZHU Junhui<sup>✉</sup>

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

**Abstract:** [Introduction] There is no study on the integration of the seawater pump-storage and offshore PV at present time in Guangdong Province. The basic conditions are available for the development of offshore PV and seawater pump-storage near sea shore while the sea can be used as the lower reservoir. So it is necessary to study and explore the integration of offshore PV and seawater pump-storage given that studies are done for the difficulties of seawater pump-storage and the development on the key technologies. [Method] The technical configuration was presented for the independent PV power station based on the past experience from PV projects. Software was used to simulate the PV power station. And an evaluation on economic performance was done for the independent PV power station. The technical configuration was presented for the independent seawater pump-storage power station based on the past experience from pump-storage projects. And an evaluation on economic performance was done for the seawater pump-storage power station. After consideration of the integration of offshore PV and seawater pump storage, the evaluation on economic performance for the integration of pump-storage & PV project was also made. [Result] The principle technical configuration is provided for the PV & pump-storage integration project. The economic performance with different capacity percentage for the pump-storage & PV integration project is evaluated. [Conclusion] The integration of PV & pump-storage in Guangdong Province area is a relatively feasible choice based on the actual conditions. This method can solve the unbalance and instability of PV power source with a certain capacity of pump-storage. And it also has a certain economic feasibility. This will be conducive to the "3060 Dual Carbon Goals", and provide market players access to

收稿日期: 2022-02-13 修回日期: 2022-02-21

基金项目: 中国能建广东院科技项目“抽水蓄能关键技术研究”(EV11021W)

invest in, build and operate power source projects. When the integration project reaches a positive income and a certain investment return rate, it will greatly promote the implementation and scale up of other integration projects.

**Key words:** seawater pumped storage plant; offshore PV; feed-in tariff; integration; economic performance

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 0 引言

我国政府已明确提出:力争 2030 年前实现碳达峰,2060 年前实现碳中和<sup>[1]</sup>。而广东省也于 2022 年印发了《关于完整准确全面贯彻新发展理念 推进碳达峰碳中和工作的实施意见》,标志着广东“双碳”新征程全面开启,其中明确了:到 2030 年,非化石能源消费比重达到 35% 左右,非化石能源装机比重达到 54% 左右;2030 年前实现碳达峰,达峰后碳排放稳中有降;到 2060 年,绿色低碳循环的经济体系和清洁低碳安全高效的能源体系全面建成;非化石能源消费比重达到 80% 以上;碳中和目标顺利实现。

目前,广东省电力系统中约 75% 的发电量来自火力发电,其他来自核电、风电、太阳能发电及跨区电力输送(如西电东送等)。随着广东省“双碳”的到来,在目前阶段需要开展相关研究,理清潜在电源的碳排放、技术特点、经济性、年利用小时数和在电网中的定位等,以便为本阶段和后续的项目建设决策提供参考。

海上光伏作为一种新的能源利用方式和资源开发模式,具有无碳排放、土地占用少、易与其他产业相结合等特点,有利于优化能源消费结构。今年以来,山东、浙江等省先后出台支持文件,推动海上光伏规模化发展。根据文献<sup>[2]</sup>,山东省提出了山东海域面积辽阔,日照时间充足,开发海上光伏潜力巨大、前景广阔。山东省计划于 2022—2025 年期间推动海上光伏试点示范。根据文献<sup>[3]</sup>,山东省于 2022 年 7 月发布《山东省海上光伏建设工程行动方案》,明确了统筹推进海上光伏规模化、集约化、协同化发展,打造双千万千瓦级海上光伏基地的目标和任务。

到目前为止,广东省未发布海上光伏发展的规划。广东省海岸线长,开发海上光伏潜力巨大、前景广阔。因此,结合广东省现有土地资源、自然条件及我国制造业水平,有必要对广东省推进海上光伏工作进行研究。

文献<sup>[4]</sup>对国内的储能政策现状进行了梳理。全

国已有 22 个省份要求新能源配置储能,配置比例基本不低于 10%,其中河南、陕西部分要求达到 20%;配置时间大部分为 2 h,内蒙古新能源市场化并网规模项目要求达到 4 h。

抽水蓄能是当前技术最成熟、经济性最优、最具大规模开发条件的电力系统绿色低碳清洁灵活调节电源,与风电、太阳能发电、核电、火电等配合效果较好。国家能源局也于 2021 年发布了《抽水蓄能中长期发展规划(2021—2035 年)》,作为指导未来抽水蓄能发展的纲领性文件,为抽水蓄能快速发展奠定了坚实的基础<sup>[5]</sup>。

2017 年 4 月,国家能源局发布了《海水抽水蓄能电站资源普查成果》,其中广东省近海站点有 31 个,规划装机容量为 10.150 GW<sup>[6]</sup>。

根据文献<sup>[7]</sup>,广东省已有的抽水蓄能电站离最近海岸线的距离均在 50 km 及以上,详细数据如表 1 所示。考虑到海上光伏与离海岸线距离较远的抽水蓄能其空间距离较远,无法耦合成为一体化项目。

表 1 广东省抽水蓄能厂址离最近海岸线的距离

Tab. 1 Distance from the pump-storage site in Guangdong Province to the nearest sea shore

站点名称	所在市县	距离/km
中洞	惠州市惠东县	70
岑田	河源市东源县	140
梅蓄二期	梅州市五华县	130
三江口	汕尾市陆河县	70
龙川	河源市龙川县	220
水源山	云浮市新兴县	160
浪江	肇庆市广宁县	200
阳蓄二期	阳江市阳春市	50
走马坪	阳江市阳东区	90
新丰	韶关市新丰县	230

国家发展和改革委员会在《关于完善抽水蓄能电站价格形成机制有关问题的通知》中提出了两部制电价<sup>[8]</sup>。随着多个投资主体参与到抽水蓄能的项

目开发中,有必要同时考虑海上光伏的不均衡性和不稳定性,抽水蓄能的上网电价的市场化及碳排放问题。

结合新能源配置储能的大环境、广东省潜在的海上光伏开发、广东省潜在的海水抽水蓄能的开发,有必要对海上光伏和海水抽水蓄能一体化进行研究。一体化需要考虑相关的主要边界条件<sup>[9]</sup>:(1)由单一投资主体开展统一规划、设计、建设、运营,实现能源互补和统一调度;(2)海水抽水蓄能抽水电价执行75%的燃煤电厂标杆上网电价的政策<sup>[10]</sup>,目前广东省燃煤电厂上网标杆电价为0.453元/kWh<sup>[11]</sup>;(3)海上光伏在白天发电,而海水抽水蓄能主要承担顶峰发电、低谷调峰和备用的功能<sup>[12-13]</sup>;(4)海上光伏用海与海水抽水蓄能用地用海在位置上接近,海水抽水蓄能的陆上配电装置可公用。

对于海上光伏和海水抽水蓄能形成一体化的组合,既在电力生产环节实现了零碳排放<sup>[14]</sup>,也通过抽水蓄能来解决光伏电源的不均衡性和不稳定性<sup>[15]</sup>,本文针对广东省区域的海上光伏与海水抽蓄的一体化开展了研究。

## 1 海水抽水蓄能和海上光伏典型配置的选择

根据国能新能[2017]68号《国家能源局关于发布海水抽水蓄能电站资源普查成果的通知》,其中包括了海岛站点和近海站点,其中海岛站点的装机总容量均较小(在0~100 MW),而其中广东省有近海站点数量为31个,装机总量为10.150 GW,平均每个站点为327.4 MW。考虑到规模化效应可以增加经济性和竞争力,本次海水抽蓄接近海站址考虑,并选取1套300 MW可逆式水轮机作为研究对象。

根据发改运行[2020]1784号《国家发展改革委国家能源局关于做好2021年电力中长期合同签订工作的通知》,其中提供了广东省的工作日典型负荷曲线,如图1所示。

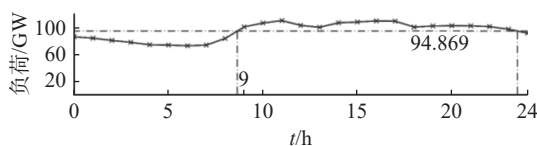


图1 广东工作日典型负荷曲线

Fig. 1 Guangdong working day typical load curve

从图1可以看出,平均负荷为94.869 GW,从23点30分到8点30分,系统负荷在平均负荷以下。最大负荷为110.448 GW,最小负荷为73.008 GW,最小负荷为最大负荷的66%。抽水蓄能处于发电工况的时间段为8点30分到23点30分,历时15 h;抽水蓄能处于水泵工况的时间段为23点30分到8点30分,历时9 h。抽水蓄能的发电工况按5 h考虑,抽水蓄能的抽水工况按7 h考虑。

光伏电站厂址按设置在广东省某地来考虑,其地理坐标为:经度112.561956°,纬度21.776631°。光伏电站直流容量按300 MW<sub>p</sub>选取,容配比考虑1.3。

## 2 光伏电站主要参数

通过PVsyst软件对光伏电站的配置进行了模拟,主要数据如下:

组件按某组件厂家的JKM585M-7RL4-V组件产品,标称功率为585 W<sub>p</sub>,产品为N型单晶硅电池片,半片电池片数目为144(72×2),总装机容量按300 MW<sub>p</sub>。逆变器按某公司的SUN2000-215KTL-H0的组串式逆变器产品,标称功率为200 kW<sub>ac</sub>。容配比按1.3。总的逆变器功率为230 800 kW<sub>ac</sub>。支架按固定支架考虑,倾角按25°考虑。

PVsyst软件模拟的主要结果数据如表2所示。

表2 PVsyst软件模拟主要结果数据  
Tab. 2 Main result data from PVsyst software simulation

月份	总体水平辐射/ [(kWh)·m <sup>-2</sup> ]	并网电量/ MWh	等效运行小时数/ h
1月	93.4	29 455	98.18
2月	80.4	22 668	75.56
3月	83.0	21 510	71.70
4月	98.9	21 983	73.28
5月	119.6	27 738	92.46
6月	133.8	26 383	87.94
7月	160.6	36 063	120.21
8月	140.7	33 563	111.88
9月	128.5	32 947	109.82
10月	123.4	32 632	108.77
11月	99.8	30 030	100.10
12月	95.9	30 759	102.53
第1年	1 358.1	345 729	1 152.43
日平均	3.72	947	3.157

参照国家标准《太阳能资源等级 总辐射》(GB/T 31155—2014)<sup>[16]</sup>, 太阳总辐射年辐照量位于 1 050 ~ 1 400 kWh/m<sup>2</sup> 之间时, 等级为 C-丰富。

光伏电站的主要经济评价数据如表 3 所示。

表 3 光伏电站的主要经济评价数据

Tab. 3 Main economic performance evaluation data of PV power station

项目	数据
装机容量(直流)/MWp	300
静态投资/亿元	13.757 4
单位瓦投资/(元·Wp <sup>-1</sup> )	4.585 8
上网电价/(元·kWh <sup>-1</sup> )	0.453
资本金内部收益率/%	9.87
投资回收期/a	12

根据 PVsyst 中的输出, 典型日的发电上网时间为约 7 点 30 分到 16 点 30 分。

从表 3 可以看出, 由于广东省标杆上网电价相对其他省份高一些, 在太阳能资源等级不是“A-最丰富”和“B-很丰富”的情况下, 其资本金内部收益率仍然可以高于行业的整体水平(约 7.5%), 而具有一定的经济性。

### 3 抽水蓄能主要参数

根据正在进行设计的几个广东省区域的抽水蓄能电站的参数, 汇总如表 4 所示。

由于海水抽水蓄能在国际和国内工程实践很少, 日本有一个小型的海水抽蓄目前已拆除。针对工程中需要解决的难题、关键技术和设备, 文献<sup>[17]</sup>说明

目前已对 10 MW 的海水水泵水轮机进行了水力开发和模型试验, 对于 300 MW 和 400 MW 容量的水泵水轮机预计可以适当研发后实现国产化。文献<sup>[18-19]</sup>针对海水抽水蓄能, 针对海洋环境带来的海水腐蚀、生物附着、库水渗漏、台风及盐雾影响等特殊问题, 开展水工和机电设备设计共性关键技术研究; 构建实证平台, 研究可变速机组动态特性和控制策略。文献<sup>[20]</sup>依托国家重点研发计划项目《海水抽水蓄能电站前瞻技术研究》, 考虑海水环境、海洋边界带来的特殊性, 如海水的高腐蚀性以及海洋微生物的附着问题等, 对海水抽水蓄能水工建筑物主要部位的防护条件进行分析, 提出了水工建筑物的防护范围、适用工况。

考虑到目前近海海水抽蓄站址未确定详细的位置, 结合表 4 中抽蓄机组的参数, 本次按单机容量 300 MW, 电站循环效率按约 78.5%, 考虑到海水抽水蓄能投资高于常规抽水蓄能; 文献<sup>[21]</sup>提出南方区域的常规抽水蓄能静态投资为 5 800 元/kW, 海水抽水蓄能的静态投资按约 18 亿元估算。

对于独立的海水抽蓄电站, 按两部制电价对其经济性进行评价。主要的经济评价数据见表 5。

从表 5 可以看出, 两部制电价模式下, 初投资考虑由容量电价进行回收。目前单位千瓦的静态投资约 6 000 元/kW, 则容量电价就达到 600 元/kW。两部制电价下, 广东省区域的电费, 由广东省电网公司支付给抽水蓄能电站。考虑到海水抽水蓄能电站的投资构成中, 上库投资较为确定, 主要包括了大坝费用; 而下库则利用了大海, 主要是考虑尾水道的消浪及保护; 而输水系统中, 水道和地下厂房也较为确定,

表 4 广东省若干区域的抽蓄电站主要参数

Tab. 4 Main parameters of several pump-storage power stations in Guangdong Province

抽蓄电站	岑田	潮州青麻园	新丰	清远英德天堂	德庆石曹
所在市县	河源市东源县	潮州市	韶关市新丰县	清远市英德市	肇庆市德庆县
装机容量/MW	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200
单机容量/MW	300	400	300	300	300
额定水头/m	464	640	420	375	375
转速/(r·min <sup>-1</sup> )	428.6	500	375	428.6	428.6
水轮机额定功率/MW	306.1	408.16	306.12	306.1	306.1
水泵最大入力/MW	320.1	430	331	320.1	320.1
静态投资/亿元	65	110	105	约65	约65
静态单位千瓦投资/(元·kW <sup>-1</sup> )	5 417	4 589	4 381	5 417	5 417

而且中国已实现了 300 MW、400 MW 的抽水蓄能机组国产化<sup>[22]</sup>,而目前已对 10 MW 的海水水泵水轮机进行了水力开发和模型试验,对于 300 MW 和 400 MW 容量的水泵水轮机预计可以适当研发后实现国产化,其费用也无法大幅减低。目前来看,海水抽水蓄能电站的投资无法在短时间大幅度下降。在目前抽水蓄能采用两部制电价的情况下,考虑到电费是由电网公司支付,因此海水抽水蓄能项目是否核准,电网公司的意见发挥着关键性的因素。

表 5 海水抽蓄电站的主要经济评价数据

Tab. 5 Main economic performance evaluation data of seawater pump storage power station

项目	数据
装机容量/MW	300
静态投资/亿元	1.8
单位千瓦投资/(元·kW <sup>-1</sup> )	6 000
年等效发电小时数/h	1 600
年发电量/GWh	480
上网电量电价/[元·(kWh) <sup>-1</sup> ]	0.401
容量电价/(元·kW <sup>-1</sup> )	600
资本金内部收益率/%	6.5
投资回收期/a	20.46

#### 4 海上光伏海上抽水蓄能一体化项目分析

针对广东省区域,由于广东电力系统中,电网填谷需求是在 23 点 30 分到 6 点 30 分。光伏抽蓄一体化电站中,光伏在 7 点 30 分到 16 点 30 分有上网电量<sup>[23-24]</sup>。将海上光伏与海水抽水蓄能一体化考虑后,在光伏处于有太阳辐射条件下向电网供电时,抽水蓄能出于电网调峰的考虑,也向电网供电;而当出现太阳辐射受天空中云朵影响而出现出力大幅下降的情况下,抽水蓄能可以继续提供部分出力;或某个阴天或下雨的天气条件下,光伏无法发电,抽水蓄能也可以继续提供部分出力。这样,一体化项目可以有效改善独立光伏项目的不均衡性和不重稳定性。抽水蓄能抽水电价按煤电标杆上网电价的 75% 考虑,发电时按平价上网考虑。

假定光伏抽蓄一体化项目采用平价上网,基于广东省工作日典型负荷曲线的情况,在晚上时段,抽蓄发挥为广东电网填谷的作用,从电网取电泵水,考虑 75% 煤电标杆上网电价买电;不再对抽水蓄能考

虑两部制电价。这种一体化的边界下,更多地将电源投资、建设和运营交由电力市场参与主体决策和负责,当一体化项目实现正向收益并达到一定的投资回报率时,将极大地推动一体化项目落地和上规模。

本文对几种组合情况进行分析,方案一:光伏 900 MW<sub>p</sub>+抽蓄 300 MW(简称为容量 3 比 1 方案);方案二:光伏 1 200 MW<sub>p</sub>+抽蓄 300 MW(简称为容量 4 比 1 方案);方案三:光伏 1 500 MW<sub>p</sub>+抽蓄 300 MW(简称为容量 5 比 1 方案);方案四:光伏 3 000 MW<sub>p</sub>+抽蓄 300 MW(简称为容量 10 : 1 方案)。抽蓄均假定按 5 h 发电。

项目的资本金内部收益率是衡量一个项目的投资收益率。从表 6 可以看出,光伏和抽蓄一体化项目的 IRR,随着配置储能容量的比例加大而减低;储能容量一定的情况下,光伏装机规模越大,越有利于 IRR 向纯光伏项目靠拢。在抽蓄容量 10% 的情况下,光伏和抽蓄一体化项目的 IRR 约 6.47%。目前各投资主体,对于项目的 IRR 要求一般情况下要达到 7.5%,最低不低于约 6%。一体化项目基于平价上网的情况,目前暂无法达到商业化投资的经济性要求。

表 6 光伏和抽蓄一体化项目的主要经济评价数据

Tab. 6 Main economic evaluation data of PV &amp; pump-storage integrated project

项目	数据1	数据2	数据3	数据4
光伏装机容量(直流)/MW <sub>p</sub>	900	1 200	1 500	3 000
单位瓦投资/(元·W <sub>p</sub> <sup>-1</sup> )	4.585 8	4.585 8	4.585 8	4.585 8
光伏部分静态投资/亿元	41.27	55.03	68.79	137.76
抽水蓄能装机容量/MW	300	300	300	300
抽水蓄部分静态投资/亿元	18	18	18	18
比例(抽蓄/光伏)/%	33	25	20	10
上网电价(平价上网)/ [元·(kWh) <sup>-1</sup> ]	0.453	0.453	0.453	0.453
资本金内部收益率(IRR)/%	0.45	2.27	3.47	6.47
投资回收期/a	21	21	20	18
上网电价(合理回报率)/ [元·(kWh) <sup>-1</sup> ]	0.555 0	0.524 3	0.505 8	0.465 2
资本金内部收益率(IRR)/%	7.5	7.5	7.5	7.5
投资回收期/a	16	16	16	16

表 6 也对在合理回报率(IRR=7.5%)的情况下进行反推算,在抽蓄容量 10% 的情况下,上网电价需

达到 0.465 2 元/kWh 才行, 相比目前煤电标杆上网电价, 增加了 0.012 2 元/kWh, 增加了 2.7%。

## 5 结论

通过上述分析, 得出结论如下:

1) 抽水蓄能是当前技术最成熟、经济性最优、最具大规模开发条件的电力系统绿色低碳清洁灵活调节电源。

2) 中国已实现了 300 MW、400 MW 的抽水蓄能机组国产化, 目前已对 10 MW 的海水水泵水轮机进行了水力开发和模型试验, 对于 300 MW 和 400 MW 容量的海水水泵水轮机预计可以适当研发后实现国产化。

3) 广东省海岸线漫长, 虽然受台风的影响较大, 但仍具备开展海上光伏的基础条件。

4) 由单一投资主体开展统一规划、设计、建设、运营, 实现能源互补和统一调度, 既在电力生产环节实现了零碳排放, 也通过抽水蓄能来解决光伏电源的不均衡性和不稳定性。

5) 抽水蓄能容量一定的情况下, 光伏装机规模越大, 越有利于资本金内部回报率(IRR)向纯光伏项目靠拢。在抽水蓄能容量为 300 MW(5 h)(占一体化项目 10%)的情况下, 光伏和抽蓄一体化项目的 IRR 约 6.47%。一体化项目基于平价上网的情况, 目前暂无法达到商业化投资的经济性要求。

6) 随着一体化项目中各部分成本下降, 包括了光伏组件的成本下降和采用更高水头的可逆式水轮机带来抽水蓄能的初投资下降, 光伏和抽蓄一体化的经济性将会有一定程度的提高, 进而对电力市场参与主体形成有效的吸引力。

海上光伏和海水抽水蓄能一体化的情况, 符合新能源配置储能的政策导向, 也利于“3060 双碳目标”的实现, 它更多地将电源投资、建设和运营交由电力市场参与主体决策和负责, 当一体化项目实现正向收益并达到一定的投资回报率时, 将极大地推动一体化项目落地和上规模。

### 参考文献:

[1] 周沛婕, 潘翔龙, 李娟, 等. 基于“双碳”背景下的电力行业节能减排分析 [J]. *能源与节能*, 2023(1): 63-65. DOI: 10.16643/j.cnki.14-1360/td.2023.01.065.  
ZHOU P J, PAN X L, LI J, et al. Energy conservation and emission reduction in power industry based on background of

"double carbon" [J]. *Energy and Energy Conservation*, 2023(1): 63-65. DOI: 10.16643/j.cnki.14-1360/td.2023.01.065.

[2] 人民日报社. 山东: 支持海上风电、光伏及氢能发展预计形成千亿级投资规模 [J]. *新能源科技*, 2022(4): 19-20. DOI: 10.3969/j.issn.2096-8809.2022.04.012.  
People's Daily. Shandong: support offshore wind power, photovoltaic and hydrogen energy development is expected to form 100 billion investment scale [J]. *New Energy Technology*, 2022(4): 19-20. DOI: 10.3969/j.issn.2096-8809.2022.04.012.

[3] 邱燕超. 山东海上光伏驶向“深蓝” [N]. *中国电力报*, 2022-08-05(02). DOI: 10.28061/n.cnki.ncndb.2022.001070.  
QIU Y C. Shandong offshore PV heading for "deep blue" [N]. *China Electric Power News*, 2022-08-05(02). DOI: 10.28061/n.cnki.ncndb.2022.001070.

[4] 文婷, 陈雷, 曾鹏骁, 等. 广东新型储能配套政策建议 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(4): 70-77. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.009.  
WEN T, CHEN L, ZENG P X, et al. Suggestions on supporting policies for new energy storage in Guangdong [J]. *Southern Energy Construction*, 2022, 9(4): 70-77. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.009.

[5] 张蓉. 平价上网遇储能强配新能源企业面临生存之战 [J]. *中国电力企业管理*, 2020(19): 39-41.  
ZHANG R. New energy enterprises are facing a battle for survival [J]. *China Power Enterprise Management*, 2020(19): 39-41.

[6] 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. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2022.05.001.  
HAN D, ZHAO Z H, YAN B Z, et al. Status and prospect of China's pumped storage development in 2021 [J]. *Water Power*, 2022, 48(5): 1-4+104. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2022.05.001.

[7] 杨建东. 海水抽水蓄能专题·编者按 [J]. *中国农村水利水电*, 2022(1): 158. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2022.01.026.  
YANG J D. Special topics on seawater pumped storage-editor's note [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(1): 158. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2022.01.026.

[8] 袁鹰, 吴伟杰, 张伊宁, 等. 基于AHP-熵权法-TOPSIS的广东省抽水蓄能站点优选评价 [J]. *广东水利水电*, 2023(1): 37-42.  
YUAN Y, WU W J, ZHANG Y N, et al. Evaluation of sites selection of pumped storage power stations in Guangdong Province based on the AHP-entropy weight method-TOPSIS [J]. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2023(1): 37-42.

[9] 李华, 郑洪伟, 周博文, 等. 综合智慧能源系统中抽水蓄能电站两部制电价研究 [J]. *综合智慧能源*, 2022, 44(7): 10-18. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0706.2022.07.002.  
LI H, ZHENG H W, ZHOU B W, et al. Two-part tariff for pumped storage power plants in an integrated intelligent energy system [J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2022, 44(7): 10-18. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0706.2022.07.002.

[10] 程瑜, 邵振州, 张金波, 等. 火电与风光储耦合规划设计 [J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(11): 82-89. DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.RE21113001.  
CHENG Y, SHAO Z Z, ZHANG J B, et al. Planning and design of thermal power and wind solar storage coupling [J]. *Clean Coal Technology*, 2022, 28(11): 82-89. DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.RE21113001.

- [11] 缪晓丹, 朱朱, 谢会玲. 福建省抽水蓄能电站运营模式展望 [J]. *能源与环境*, 2019(6): 9-10,15. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9064.2019.06.004.  
MIU X D, ZHU Z, XIE H L. Prospect of operation mode of pumped storage power station in Fujian Province [J]. *Energy and Environment*, 2019(6): 9-10,15. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9064.2019.06.004.
- [12] 何璞玉, 焦杰, 王超, 等. 基于容量补偿和绿电价值的水电上网电价研究——以四川省为例 [J]. *中国农村水利水电*, 2022(11): 172-178. DOI: 10.12396/znsd.220107.  
HE P Y, JIAO J, WANG C, et al. Research on the hydropower on grid price feed-in tariff based on capacity compensation and green value: a case study of Sichuan Province [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(11): 172-178. DOI: 10.12396/znsd.220107.
- [13] 乔志园. 电改形势下抽水蓄能电站电价市场化疏导机制探讨 [J]. *水电与新能源*, 2020, 34(12): 58-62. DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.12.014.  
QIAO Z Y. On the market-oriented guiding mechanism of electricity price for pumped storage power stations under the electricity reform situation [J]. *Hydropower and New Energy*, 2020, 34(12): 58-62. DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.12.014.
- [14] 王鑫淼, 马志勇, 周旺盛, 等. 光伏发电系统碳中和及其影响因素 [J]. *资源科学*, 2022, 44(8): 1735-1744. DOI: 10.18402/resci.2022.08.15.  
WANG X M, MA Z Y, ZHOU W X, et al. Carbon neutralization in photovoltaic power generation system and influencing factors [J]. *Resources Science*, 2022, 44(8): 1735-1744. DOI: 10.18402/resci.2022.08.15.
- [15] 田旭, 姬生才, 张婷, 等. 青海光伏与风力发电出力特性研究 [J]. *西北水电*, 2019(2): 1-6. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2610.2019.02.001.  
TIAN X, JI S C, ZHANG P, et al. Study on the output characteristics of photovoltaic and wind power generation in Qinghai [J]. *Northwest Hydropower*, 2019(2): 1-6. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2610.2019.02.001.
- [16] 梁玉莲, 申彦波, 白龙, 等. 华南地区太阳能资源评估与开发潜力 [J]. *应用气象学报*, 2017, 28(4): 481-492. DOI: 10.11898/1001-7313.20170409.  
LIANG Y L, SHEN Y B, BAI L, et al. Assessment of solar energy resource and its exploitation potential in South China [J]. *Journal of applied meteorological Science*, 2017, 28(4): 481-492. DOI: 10.11898/1001-7313.20170409.
- [17] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2022.01.027.  
TENG J, WU X P, WU L B, 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. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2022.01.027.
- [18] 吴秋芳, 林文婧, 陈志伟, 等. 海水抽水蓄能电站水工建筑物防护条件研究 [J]. *中国农村水利水电*, 2022(1): 163-165,170. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2022.01.028.  
WU Q F, LIN W J, CHEN Z W, et al. Research on the protection conditions of hydraulic structures of seawater pumped storage power stations [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(1): 163-165,170. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2022.01.028.
- [19] 陈仕贝, 吴新平, 高彦明, 等. 海水抽水蓄能电站水力机械辅助系统防腐与防污方案研究 [J]. *中国农村水利水电*, 2022(1): 166-170. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2022.01.029.  
CHEN S B, WU X P, GAO Y M, et al. Research on the anticorrosive and antifouling scheme of hydraulic machinery auxiliary system of seawater pumped storage power stations [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(1): 166-170. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2022.01.029.
- [20] 彭潜, 顾志坚, 陈弘昊, 等. 大型抽水蓄能电站机组国产化关键技术与工程应用 [J]. *水力发电*, 2021, 47(2): 9-13. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2021.02.003.  
PENG Q, GU Z J, CHEN H H, et al. Research and engineering application of key technologies for localization of large pumped-storage power station units [J]. *Water Power*, 2021, 47(2): 9-13. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2021.02.003.
- [21] 段敬东. 新价格形成机制下抽水蓄能电站投资建设盈利能力研究 [J]. *水电与抽水蓄能*, 2021, 7(6): 69-73. DOI: 10.3969/j.issn.2096-093X.2021.06.019.  
DUAN J D. Study on the profitability of pumped storage power station investment and construction under the new price formation mechanism [J]. *Hydropower and Pumped Storage*, 2021, 7(6): 69-73. DOI: 10.3969/j.issn.2096-093X.2021.06.019.
- [22] 路振刚, 陈顺义, 郑小康, 等. 国产化高水头抽水蓄能机组研发与现场试验验证 [J]. *人民长江*, 2021, 52(7): 129-134. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.07.022.  
LU Z G, CHEN S Y, ZHENG X K, et al. Independent development and field test verification of high head pumped storage units [J]. *Yangtze River*, 2021, 52(7): 129-134. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.07.022.
- [23] 蒋智弘. 海水抽水蓄能电站应用的展望 [J]. *电子技术*, 2022, 51(10): 230-231. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6825.2017.06.071.  
JIANG Z H. Prospect of application of seawater pumped storage power station [J]. *Electronic Technology*, 2022, 51(10): 230-231. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6825.2017.06.071.
- [24] 李明阳, 柴建峰, 凌超. 可与离岸风电光伏电配套的海水抽水蓄能电站探讨 [J]. *山西建筑*, 2017, 43(6): 135-136. DOI: 10.13719/j.cnki.cn14-1279/tu.2017.06.071.  
LI M Y, CHAI J F, LING C. Brief analysis on offshore wind power, photovoltaic power and seawater pumped storage station [J]. *Shanxi Architecture*, 2017, 43(6): 135-136. DOI: 10.13719/j.cnki.cn14-1279/tu.2017.06.071.

## 作者简介:



朱军辉

朱军辉 (通信作者)

1973-, 男, 浙江温岭人, 副总工程师, 正高级工程师, 重庆大学电厂热能动力工程专业, 学士, 主要从事燃煤电厂、燃机电厂和抽水蓄能电站的勘察设计技术管理工作(e-mail) zhujunhui@gedi.com.cn.

(编辑 孙舒)