

引用格式: 岳云峰, 彭欣然, 王洪庆, 等. 海上漂浮光伏发电技术及其融合发展展望 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(2): 42-50. YUE Yunfeng, PENG Xinran, WANG Hongqing, et al. Prospect of offshore floating photovoltaic power generation technology and its integrated development [J]. Southern energy construction, 2024, 11(2): 42-50. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.04.

海上漂浮光伏发电技术及其融合发展展望

岳云峰[✉], 彭欣然, 王洪庆, 卢斌

(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]在“双碳”背景下,我国沿海省市逐步加大向海洋开发清洁能源的力度。海上风电场建设已经初具规模并已逐步实现平价上网,海上漂浮式光伏(Floating Photovoltaic, FPV)试点项目正在不断涌现。探索多种海洋资源的综合开发,在能源领域集约用海,打造海上综合能源系统,对于沿海省份高质量地实现碳中和具有重要意义。[方法]总结了目前国内外海上FPV技术发展及工程试点情况,分析了各种海上FPV技术的优势及挑战,预测了在中国近海发展FPV的市场规模,提出并探讨了海上FPV与海上其他基础设施的融合发展方式,并结合案例给出了融合建设场景及经济性分析。[结果]海上FPV技术目前总体处于试验和试点阶段,未来在国内外市场应用空间广阔,其主要技术难点是浮体在严苛海洋环境条件下的生存能力,现有试点工程单位造价相对较高,但与其他海洋设施结合发展潜力巨大。[结论]海上漂浮式光伏与海上风电等其他海上设施融合建设可以有效提高能源设施的利用效率,降低建设和运行的成本。海上风光互补还较好地解决了单一能源供应的稳定性和安全性问题。

关键词: 漂浮式光伏; 海上FPV; 海上风电; 海洋牧场; 融合设计; 浮体结构

中图分类号: TK89; TM615

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)02-0042-09

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.04

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Prospect of Offshore Floating Photovoltaic Power Generation Technology and Its Integrated Development

YUE Yunfeng[✉], PENG Xinran, WANG Hongqing, LU Bin

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

Abstract: [Introduction] Under the backdrop of "carbon peak and neutrality", coastal provinces and cities in China are gradually developing clean energy towards the ocean. The development of offshore wind farm has begun to take shape and achieved equal price of connection to power grid, and pilot projects for offshore floating photovoltaic (FPV) systems are emerging. The comprehensive development of a variety of marine resources, the intensive use of sea resources in the energy sector, and the creation of an integrated marine energy system are of great significance for coastal provinces to achieve high-quality carbon neutrality. [Method] The article summarized the current development and pilot projects of offshore FPV technology both inside and outside of China, analyzed the advantages and challenges of various offshore FPV technologies, predicted the future market size of offshore FPV in China, explored the integration development mode of offshore FPV and other offshore infrastructure, and provided the integration scenarios and economic analysis based on case studies. [Result] The offshore FPV technology is currently at the pilot stage with broad market in the future. The main technical challenge is the viability of floating structure under harsh marine environmental conditions, and the unit cost of the existing pilot projects is relatively high, however, it has enormous potential of combination with other marine facilities. [Conclusion] The integration of offshore FPV and other offshore facilities such as offshore wind power can effectively improve the utilization efficiency of energy facilities and reduce the cost of construction and operation. The complementary use of marine scenery also effectively solves the stability and security problems of a single energy supply.

收稿日期: 2023-05-11 修回日期: 2023-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(42277135)

Key words: floating photovoltaic (FPV); offshore FPV; offshore wind power; marine ranches; integrated design; floating structure

2095-8676 © 2024 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

海上漂浮式光伏(Floating Photovoltaic, FPV)是我国沿海省份实现碳中和路径的关键技术之一。在“碳达峰, 碳中和”政策背景下, 太阳能和风能已经成为最具潜力的可再生资源, 我国沿海省份经济发达, 能源消费量大, 要实现碳中和目标需要生产和消纳更多清洁低碳电力, 但这些地区土地资源稀缺, 无法大量开发集中式光伏和风电的项目。同时, 依靠西电东送、陆上清洁能源等方式较难满足可再生能源电力消纳权重。因此, 将发展清洁能源目标转向海洋成为重要的解决方案之一, 也是顺应国家能源发展战略的需要。

海洋具有丰富的可再生资源可供开发。“十四五”期间, 海上风电已经实现规模化开发, 形成了成熟的产业链并逐步向深远海发展。近几年, 内陆 FPV 技术发展迅速, 因其具有节省土地资源, 操作维护方便等特点, 在湖泊、水库、鱼塘等得到推广。尽管浮体设备增加了设备及安装成本, 但规模化后仍可以实现平价上网, 再结合渔光互补, 可以实现较好的经济效益。内陆 FPV 技术和经验为光伏移植到海上发展奠定了基础, 一些项目率先出现在了近岸低风浪地区, 目前正逐步向更具挑战的海洋环境中发展。文献 [1] 对薄膜型海上 FPV 的海洋技术及应用潜力进行了综述; 文献 [2-3] 探讨了海洋环境对在海上建设 FPV 的影响, 分析了在海洋环境中设计和建造方面的技术挑战和风险; 文献 [4] 研究了海上 FPV 和抽水蓄能联合发展的经济性。很多新能源企业, 海工装备及企业等正在深入开展相关研究、试验和工程试点^[5]。

FPV 是未来海上光伏产业向深远海规模化发展的重点发展方向^[6]。海上 FPV 产业链包括: 晶硅电池、浮体结构、锚固系统、系泊系统、逆变器等生产企业, 涉及规划咨询、勘察设计、工程建设企业以及新能源投资运营公司。通过技术升级创新, 产业链、供应链迭代完善, 在沿海城市可汇聚形成技术研发、整装集成、核心设备等产业集群。海上 FPV 产业得

益于现有光伏技术的不断突破和组件成本快速下降, 再通过一定的政策支持和引导, 海上 FPV 技术将有望成为新一轮海洋新能源产业机会, 促进区域经济发展。

综上所述, 发展海上 FPV 有着巨大潜力。沿海城市海域面积广阔, 尽管部分地区受到生态红线和航道限制, 但仍然有大片海域未经开发和使用。将海上 FPV 与海上风电、海洋牧场、海上制氢等多种类型项目或技术融合, 既能加速海上 FPV 商业化进程, 综合利用基础设施投资, 又能实现高效集约利用海域资源。

1 海上 FPV 技术

1.1 FPV 系统组成

海上 FPV 技术从内陆 FPV 发展而来, 其系统组成基本相似, 如图 1^[7]所示, 系统包括浮体结构、光伏组件、逆变器、系泊系统、锚固系统、海底电缆等。浮体结构为整个光伏系统提供浮力, 为光伏组件、逆变器等设备提供支撑, 整体再通过锚固系统和系泊系统进行固定, 最后光伏组件生产的电力经升压后通过海底电缆输送到电网。

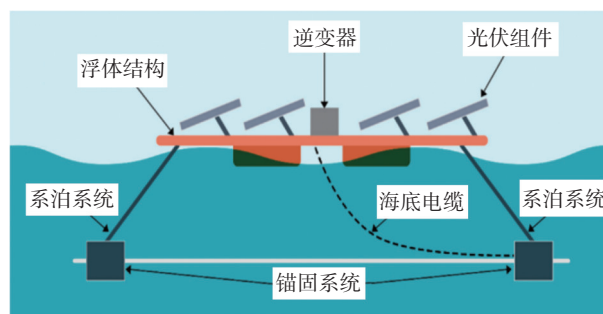


图 1 典型的 FPV 系统组成^[7]

Fig. 1 A typical floating PV system with its key components^[7]

FPV 在浮体设计理念上多种多样, 各种技术的成熟度差别很大。常见的浮体材料有高密度聚乙烯 (HDPE) 材料的浮体, 浮管结合不锈钢支架结构, 高性能混凝土材料浮箱, 桁架式浮体等技术方案^[8]; 近年来又出现了泡沫、弹性薄膜型的漂浮式结构^[1]。

海上 FPV 设备长期受到海风、海浪、海流等多

种荷载共同作用,因此浮体结构设计稳定性、安全性、设备的耐腐蚀性等因素是技术成败的关键。目前,现有的浮体结构设计主要有刚性和柔性 2 种。传统内湖 FPV 采用浮筒式或浮管式支撑结构,海上 FPV 示范和试点项目主要采用浮筒式、高性能混凝土浮箱、半潜式桁架结构平台、弹性膜漂浮结构等,其性能优缺点比较如表 1 所示。

表 1 各种 FPV 浮体结构优缺点比较
Tab. 1 Comparison of FPV structural advantages and disadvantages

浮体结构形式	优点	缺点
浮筒或浮管式结构	成本较低;应用案例多,产品成熟。	结构稳定性差;连接件多,抗腐蚀性差;抗风浪能力差。
高性能混凝土浮箱	防腐性能好,成本较低。	稳定性较差;抗风浪能力较差。
半潜式桁架结构平台	结构强度稳定;防腐性能好;抗风浪能力较好;光伏组件可倾斜安装提升效率。	材料和结构强度要求高;成本较高。
弹性膜漂浮结构	光伏组件自然降温,效率提升;柔性结构抗风性较好;系泊载荷低。	成本较高;抗浪性能一般;存在排水和生物附着问题;材料耐久性和可维护性相对较差。

适用于海洋环境使用的光伏组件主要有晶硅和薄膜 2 类,目前已经有较成熟的产品,刚性和柔性浮体结构均可以采用。半潜式桁架结构还可以通过采用双面玻璃组件,提升发电效率。薄膜型产品可以贴合于浮体表面,特制轻质薄膜材料也可以直接设计浮于水面上^[9],有更好的自然冷却效果和自清洁能力,适合安装在风浪较小,水深较浅的海域环境。

总体上,目前漂浮式光伏从内湖、水库向海洋发展,半潜式桁架结构平台或者弹性膜漂浮式结构结合晶硅光伏组件能够承受更大的波浪载荷,并且能够做到更大尺寸,是目前国内外开发的 2 种主流技术路线,相关论证试点项目正在开展,抗风浪性能需进一步验证。

1.2 国内外发展情况

弹性膜型式的浮体结构是 2014 年由 Trapani 和 Millar 受到海洋牧场养殖网箱结构的启发而发明^[10],通过膜的水弹性和阻尼特点能够减少波浪给浮体带来的应力,降低对漂浮系统的影响,提高稳定性。光伏组件直接贴合在膜表面,水对光伏组件有很好的

降温作用,增加了发电量。目前该技术通过 OceanSun 公司实现了一定程度的商业化,该产品在阿尔巴尼亚水电站安装了 2 MW、菲律宾 Magat 水库安装了 200 kW。2022 年 10 月在中国山东海域安装了 500 kW 的示范项目。

奥地利公司 Swimsol 与维也纳理工大学和弗劳恩霍夫研究所合作设计了一套名叫 Solar Sea 的海上 FPV 系统^[11],并在马尔代夫启动了试点项目。该技术采用铝材框架式结构加装泡沫做浮体的半潜式平台桁架结构。单模块装机容量 24 kW,可以承受 1.5~2 m 浪高和 12 级台风。该公司宣称使用寿命达 30 a,度电成本与柴油发电机相当。

荷兰公司 SolarDuck 设计了一种类似半潜式油气平台的三角形 FPV 平台。如图 2^[12]所示,平台采用模块化拼接的方式连接,单个模块设计容量约为 16 kW,由 4 个三角形模块可拼接成 1 个大三角形平台,平台高出水位 3 m^[13]。2021 年 4 月 Solar Duck 第一个海上示范项目在荷兰港口投入使用,并进一步在欧洲北海附近开展更多的商业试点项目。此外,荷兰公司 Ocean of Energy, DNV Kema, Heliofloat, 挪威公司 Moss Maritime 等都在针对海上 FPV 平台提出各自的解决方案,结构设计各有不同,目前技术均处于模型示范或全尺寸示范期^[7,14]。

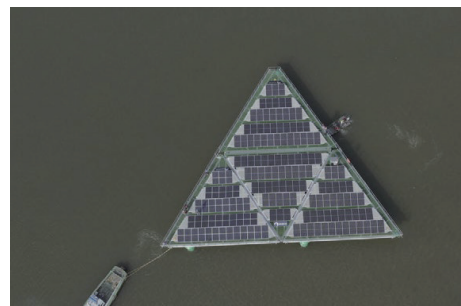


图 2 SolarDuck FPV 平台^[12]

Fig. 2 FPV system of SolarDuck^[12]

在国内,中集来福士设计研发的半潜式海上 FPV 平台在 2023 年 4 月完成下水拖航。图 3^[15]所示方案采用半潜式桁架式结构,配置 4 个单浮体方阵,每个方阵容量 100 kW,可以抵御浪高达 6.5 m 和 12 级台风。一道新能源公司提出了近海 FPV 兆瓦级方阵设计方案,浮体采用超高性能混凝土空箱,内部充填泡沫,上部架设光伏组件。2023 年 4 月该方案在珠三角低风浪区完成小规模下水试验。

图3 中集来福士 FPV 平台^[15]Fig. 3 FPV system of CIMC RAFFLES^[15]

1.3 FPV 发展前景及市场

过去十年,海上风力发电从无到有,加速发展,使海上风电快速进入平价上网时代。FPV 产业近几年发展迅速,据相关机构预测,未来十年 FPV 的复合年增长率预计将增长 15%,到 2031 年全球 FPV 市场预计将突破 6 GW,累计安装量将超过 58 GW^[16]。2022 年,中国、印度和印度尼西亚是 FPV 最大的市场,总需求约占全球的 70%。很多欧洲国家认为海上 FPV 技术在北海区域与海上风电结合很有潜力,荷兰政府设定目标到 2050 年建设 45 GW 海上 FPV。丹麦等国家设想将海上风电、FPV 和海上制氢结合建设一个吉瓦级人工“能源岛”连接的北海可再生能源网络^[17]。

目前绝大多数 FPV 均位于湖泊、水电大坝、水库。随着经验的积累和成本的下降以及政策的收紧,FPV 将转向在近岸、泻湖、赤道无风带等低风浪区域发展,未来跟随海上风电一起向近海和深远海高速发展。海上 FPV 与海上风电有着良好的融合发展潜力,设施共享,出力互补,联合发展将进一步加快海上 FPV 发电实现平价上网的速度。

我国海岸线漫长,发达城市大多位于沿海区域,有着强烈的绿电需求,因此发展海上 FPV 的潜力巨大。“十四五”期间,全国规划了五大十吉瓦级海上基地,各地出台的海上风电发展规划规模已达 80 GW,到 2030 年累计装机将超过 200 GW。在保障海上风电检修空间的条件下,风电海域可布置 3~4 倍容量的 FPV,风光合计装机容量达 0.8~1 TW,理论发电量可达 1400 TWh,约占 2022 年我国全社会用电量的 16%,这将极大改善沿海发达省份能源结构和供需状况。

以广东省为例,根据相关水文、地理数据进行推测,近岸 5~10 m 水深总海域面积约为 2500 km²,除

去生态保护、航道及港口等设施,可用面积按 10% 计算,海上 FPV 市场规模可达 25 GW。在近海 10 m 及以上水深海域,按照海上风电和 FPV 联合建设进行测算。根据《广东省海上风电发展规划(2017—2030 年)(修编)》,广东省规划的海上风电总装机容量达 66.85 GW,其中近海浅水区约 9.85 GW,近海深水区约 57 GW。若在广东省海上风电规划海域部署 FPV,近海浅水区 10~35 m 水深可开发 FPV 装机容量超 30 GW,近海深水区 35~50 m FPV 的装机规模可达到 170 GW 以上。

目前,山东已经公布了海上光伏发展规划,将打造环渤海、沿黄海双十吉瓦级海上光伏基地,并且出台了相应的海域使用政策,走在发展海上光伏的最前沿。2022 年山东政府还发布政策支持海上光伏的发展,减免项目的海域使用金,并对“十四五”期间投产的 FPV 项目给予一定的财政补贴。规划争取 2025 年海上 FPV 开工 2 GW,投产 1 GW,后续将有望在全国其他省市推广。

1.4 海上 FPV 优势与挑战

发展海洋 FPV 有着诸多优势。我国沿海省份能源消费量大,要实现碳中和目标需要大规模的清洁能源电力供给,但同时我国沿海省份陆上土地资源紧张,对未来陆上集中式风电和光伏持谨慎态度。海上发展 FPV 有明显的空间优势,靠近东部负荷中心,可以就地消纳。其次,海面阳光无遮挡,海水具有反射和冷却效果,能够增加太阳辐射的吸收,提高光伏组件的发电效率。根据相关研究,陆上水面光伏发电量可提升 5%~10%^[18],FPV 效率提升有一定的不确定性,总体效率提升在 1.5%~22%^[19]。

相比海上风电,海上 FPV 无需考虑复杂的地质构造和基础设计,工程实施难度相对低,但按照光伏组件发电效率,单位海域面积所生产的电能较少。在现阶段,海上 FPV 需大面积采用浮体支撑结构,并考虑长期承受风浪作用,工程建设成本大幅增加。尽管过去几年内陆淡水 FPV 技术快速发展,积累了大量的技术和经验,光伏组件和浮体材料成本大幅降低,但移植到海上仍然面临诸多困难和挑战。其中最主要的是海上严苛的水文气象条件,包括高温、风浪、盐雾、海流、腐蚀、生物附着和极端自然灾害等。这些挑战使得海上 FPV 的技术安全性要求更高,光伏组件和电气设备需要更好的耐候性,结构材料

更加结实可靠,并且能够满足 20~30 a 使用寿命,因此开发成本也更高。

目前,海上 FPV 标准尚不完善,浮体设计需要参照已有的海工设计如海上平台、海上风电设计等,涉及到许多待解决的问题。首先浮体结构安全设计最为关键,不仅需要考虑风、浪的长期水文环境荷载,还需要能够承受极端气候条件下短时集中荷载。浮体结构设计需要建立水动力数值模型,研究结构与锚泊系统、多浮体结构间以及结构与动力环境的耦合作用,同时结合物理模型试验,开展多种风、浪、流组合作用下浮体结构的荷载研究。

其次是系统安全和可运维性。海上漂浮设施需要严格考虑系统安全监测和事故预案,浮体设备解体和脱离将影响周边航道,影响海底电缆、船只、码头设施等的安全运行。运维设计需要方便现场监测、更换关键易损部件。FPV 对海洋环境影响也不容忽视。FPV 将覆盖大片海域,可能会对底栖生物、浮游生物、海洋渔业等海洋生态环境产生影响。在规模化开发设计时仍需进一步论证,并采取环境监测和生态保护措施。随着光伏组件效率的不断提高和海工技术的不断突破,海上建设 FPV 的平准化成本将不断降低,逐步实现全面商业化。

2 海上 FPV 融合

海上 FPV、海上风电、海洋牧场等技术融合发

展可以共享空间、共用设施,共享能源也将推动海洋资源综合开发,实现海上清洁能源规模化发展。

2.1 与海上风电场融合

近几年,海上风光同场联合发电已经成为一个重要研究课题。海上风电产业、设施和产业链已经相对成熟,海上 FPV 发展有望借助海上风电已经搭建的能源系统更快实现商业化。与海上风电项目结合优势主要体现在:增加清洁电力的输出,提高单位用海面积的发电量;共用接入电力系统的设备,共享设备基础设施,降低工程造价;平滑单一绿电的输出波动性,风电和光伏可以实现高度互补,实现稳定连续的电力供应;运维方面可以共享运维人力和设备资源,同时海上设备可以在一定程度上抑制风电场的波浪。

欧洲学者通过建立模型,探讨近海海上风电和 FPV 同场建设的潜力^[20]。结果表明,FPV 与海上风电合建后单位海域面积的装机容量和发电量分别高了 10 倍和 7 倍,电力输出更加平顺,功率波动性降低了 68%。这个计算是基于简单模型的推演计算融合后海上发电密度可达 57.5 MW/km²。但这一模型并没有充分考虑融合后风光同场的运行维护空间需求。

如图 4 和图 5 所示,以广东近海某海上风电场为例,在风机间区域布置 FPV 设施。海上风电项目用海面积约 64 km²,共布置 72 台风机,总装机容量

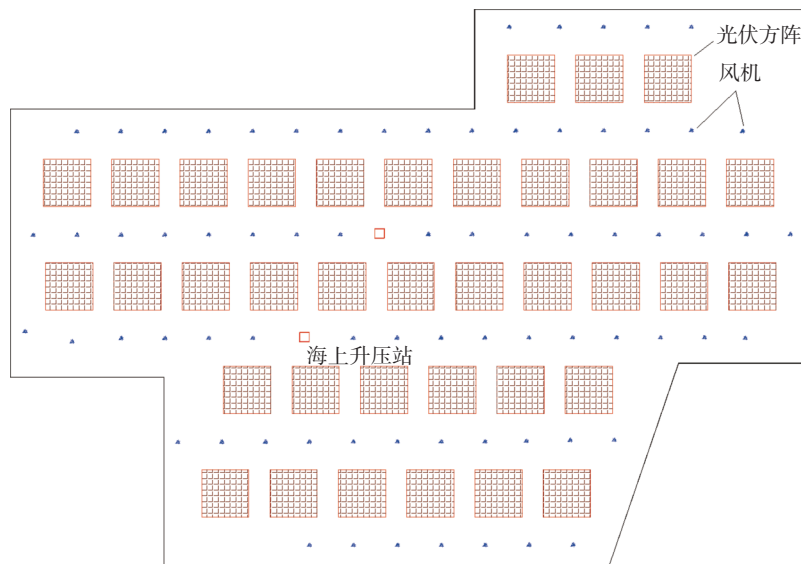


图 4 海上风光融合设计平面布置图

Fig. 4 Layout design for the integration of offshore wind farm and FPV



图5 海上风光融合设计方案效果图

Fig. 5 Indicated picture for the integration of offshore wind farm and FPV

400 MW, 风电场区域内建设了一座 220 kV 海上升压站通过 220 kV 海底电缆连接陆上电力系统, 海上风光融合设计如图 5 所示。每台风机布置间隔约 600 m, 每行风机间距约为 1500 m。

考虑海上风机运行维护和安全距离需求, 在 FPV 模块与风机之间设置 400 m 通道, FPV 模块间设置 300 m 通道。整个风电场可利用建设 FPV 的面积约 16.60 km², 再考虑锚固系统、系泊系统和漂浮移动空间等因素后, 最终可建设 FPV 容量约 1.5 GW, 首年发电量约 1.8 TWh, 等效利用小时数约 1 200 h, FPV 发电量约是风电发电量的 1.8 倍。融合后海上发电密度可达 29.7 MW/km²。

海上 FPV 与风电融合也存在着诸多挑战。目前还没有海上风光同场建设的成功案例, 运行维护方式仍需要进一步研究。在规划阶段, 挑选同时满足海上风光建设条件的站址较困难。通常风资源良好的海域, 对浮体结构抗风浪设计是很大的挑战; 海上风光同场设计也要充分考虑风机和 FPV 的双重运维需求, 为运维工船留出足够的检修通道, 并且需要考虑在极端风浪条件下防止 FPV 浮体结构和风机基础碰撞。在已有海上风电场址新建 FPV 设施的过程中, 可能会对已建设施产生影响。

海上 FPV 主要成本在于浮体的抗风浪特性设计, 未来风光同场设计可考虑结合风机基础增加防浪堤设计, 从整体上考虑保护设施, 降低单个浮体结构设计的成本, 提高 FPV 的生存能力。

2.2 与海洋牧场融合

现代化海洋牧场是一项集生态、生物、生产等全程科学管理的系统工程, 通过生态环境修复实现海洋生物资源增殖和渔业可持续健康发展^[21]。近年来, 我国加大了对于海洋牧场建设的政策支持力度,

山东、江苏陆续出台相应的发展规划支持海上能源设施与海洋牧场融合发展, 海上能源与海洋牧场结合产生了新的产业模式, 实现海上发电、海下养殖、科技创新、产业带动等多元目标的产出。

发展海洋牧场过程中, 绿色能源供应问题是困扰海洋牧场平台发展的一大难题^[22]。融合发展方向和优势体现在: (1) 共享海域, 实现生态融合。能源设施与海洋养殖可以实现立体用海, 海底锚固基础增加了海洋生物栖息地, 能够改善海洋环境, 修复生态, 促进渔业的增产增值; (2) 共享基础设施, 实现结构融合。设备桩基础可以作为鱼类养殖共用的固定设施; 浮体结构和养殖网箱、筏架可以联合设计; (3) 共同运营, 实现管理融合。海洋牧场养殖装备需要大量的电力供应, FPV 发电不仅能够满足照明、监测等小功率用电设备, 还可以兼顾大型器械设备用电需求。建设海上智能监测平台可以兼顾渔业养殖管理和 FPV 运营, 提升渔业和电力的生产运维效率; 通过监测天气与海流等气象水文信息, 提高海洋牧场与 FPV 应对台风、大潮、高温等极端自然灾害的能力^[23]。目前在山东等地已经陆续出现海上风电、光伏与海洋牧场结合的小规模试点工程案例。

海洋牧场与海上 FPV 融合设计的问题主要体现在: 首先是负责管理能源和渔业项目的政府机构不同, 融合设计的管理审批流程有待完善, 海洋立体确权和海域试用金征收尚不明确; 其次是两者融合后, 减少光照对海洋系统的生态影响; 再次是融合设计采用的建设标准和监管方式尚不明确, 包括用海性质和年限等; 最后还要考虑融合项目的商业模式设计及风险分担方式。

2.3 与海水淡化和海上制氢的结合

全球有许多岛屿由于距离远、经济性差等原因, 没有和主干电网相连。能源的主要供应方式依靠柴油发电机, 既不环保也不经济; 同时很多岛屿的淡水供应依靠高耗能的海水淡化装置。FPV 与海水淡化可以从多个维度为海岛经济提供资源。目前已有一些利用光伏组件余热海水淡化耦合装备、光伏光热耦合驱动海水淡化技术等^[24-25], 可以利用太阳能通过加热和冷凝实现淡水与卤水分离。

由于海上风光发电的不确定性, 作为一种储能方式利用绿电制氢和制氨具有很好的发展潜力, 生产的氢可直接为远洋航运提供动力能源, 还可以与

海上加氢站融合建设。西班牙石油公司 Repsol 旗下实验室正在开展海上 FPV 制氢试点项目,项目拟设计和建造海上制氢和制氨工厂,将漂浮式风机和 FPV 发电就地转化成氢能用于附近港口的船舶和设备的供能^[26]。

3 海上 FPV 经济性分析

海上 FPV 属于新兴技术,目前正处于商业化初期、全尺寸示范和试点阶段。试点项目建设情况说明海上建设 FPV 在技术上可行,但工程综合成本较高,目前尚不具备经济性。初步测算,近海 FPV 系统整体造价在 5 500 ~ 12 000 元/kW 之间,取决于不同的海上风浪情况和对应的结构方案。选址在波浪小于 1 m 的近海海湾或泻湖区时,浮体可以沿用内湖漂浮式方案,造价相对较低;当风浪超过 5 m 时,考虑采用抗风浪能力强的半潜式刚性平台结构,造价相对较高。

从近期开展了小规模试点项目看,采用半潜式桁架式结构设计方案建造及施工成本在 10 000 ~ 12 000 元/kW,其中浮体结构造价占比约 48%,光伏组件占比约 18%,锚固和系泊系统、防腐涂层约各占 8%,海上施工、设备运输及其他 18%。其中,半潜式漂浮平台设计考虑材料、结构强度和防腐等因素,建造成本占比较高;光伏组件需考虑海水侵蚀和浪击因素,成本高于陆上光伏 15% ~ 20%。

当产品实现规模化形成产业后,整体成本会进一步降低。目前阶段按照建设 50 MW 海上桁架式平台 FPV 项目测算,工程造价预估如表 2 所示。该方案 FPV 系统单位造价约 9 798 元/kW。按照首年无衰减用小时数 1 265 h 计算,度电成本约为 0.9 元。按融合设计考虑,可节省部分系统接入成本、锚固成本和其他费用,总体造价可以再降低约 10%。

从经济可行性角度,海上 FPV 场址选择优先考虑近海浅水区和风浪较小海域,以降低浮体结构的造价。走向深远海后,则优先考虑与海上风电场、海洋牧场等融合建设模式。通过融合设计和联合运营,降低电力系统接入成本和管理费用。未来降低度电成本的路径主要依靠技术迭代、发电效率高、设计优化、浮体结构和光伏组件价格的下降等因素。尽管当前海上 FPV 约是陆上光伏造价的 2 倍以上,但从过去十年新能源发展的速度看,实现平价上网是可能的。

表 2 50 MW 海上 FPV 示范项目造价预估

Tab. 2 Cost estimation of 50 MW offshore FPV demonstration project

编号	费用名称	造价/万元	占比/%
一	施工辅助工程	1 000	2.0
二	设备及安装工程	—	36.1
1	光伏组件	10 800	22.0
2	逆变器及箱变	1 200	2.4
3	集电电缆	4 500	9.2
4	升压站设备	1 200	2.4
三	漂浮系统	—	51.5
1	浮体结构	25 000	51.0
2	锚固、系泊	250	0.5
四	其他费用	—	10.3
1	海域使用费	150	0.3
2	建设管理费	2 445	5.0
3	勘察设计费	1 465	3.0
4	其他	980	2.0
五	总静态投资	48 990	100.0

4 结论

文章对国内外海上 FPV 技术的发展做了全面回顾,分析了向海洋发展 FPV 的未来市场空间、技术优势和挑战,对海上 FPV 与其他海洋工程融合发展进行详细论述,结合案例讨论了海上 FPV 经济性和发展前景。结论如下:

1) 向海洋发展 FPV 有着诸多优势和巨大的市场潜力,主要挑战在于复杂恶劣的深远海环境中的生存能力。

2) 海上 FPV 具备与海上风电、海洋牧场等多种海上设施技术融合发展优势,可增加未来收益,加速商业化进程。

3) 按目前海上风电技术,在风场内布置 FPV 阵列,在充分考虑运维检修通道后,FPV 装机可达风电装机 3 倍以上。

4) 近海 FPV 造价介于 5 500 ~ 12 000 元/kW,其中浮体结构造价占比超过 50%,并网发电还需要投资建设变电站、储能等配套设施,因此短期内规模化开发尚不具备经济性。

5) 未来 FPV 发展应考虑由近及远,先易后难,携手海上风电等设施、海洋渔业系统、海洋运输和海洋旅游等联合发展,培养产业集群和新的经济增长点。

参考文献:

- [1] 陈继平,李刚,刘博,等.薄膜型海上漂浮式光伏技术现状及展望[J].南方能源建设,2023,10(2):1-10. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.001.
CHEN J P, LI G, LIU B, et al. Current status and prospect of membrane-based offshore floating photovoltaic technology [J]. Southern energy construction, 2023, 10(2): 1-10. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.001.
- [2] 鲁文鹤,练继建,董霄峰,等.波浪作用对海上漂浮式光伏光照辐射能的影响[J].水力发电学报,2023,42(5):35-42. DOI: 10.11660/slfdbx.20230505.
LU W H, LIAN J J, DONG X F, et al. Effect of sea waves on radiant energy of floating photovoltaic [J]. Journal of hydroelectric engineering, 2023, 42(5): 35-42. DOI: 10.11660/slfdbx.20230505.
- [3] 徐姗姗,姚敬华,黄东亚.漂浮式光伏发电系统材料在海洋环境中的腐蚀效应分析[J].太阳能,2022(10):27-32. DOI: 10.19911/j.1003-0417.tyn20220707.01.
XU S S, YAO J H, HUANG D Y. Analysis of corrosion effect of materials in floating PV power generation system in marine environment [J]. Solar energy, 2022(10): 27-32. DOI: 10.19911/j.1003-0417.tyn20220707.01.
- [4] 朱军辉.海水抽水蓄能与海上光伏一体化发电技术及经济性分析[J].南方能源建设,2023,10(2):11-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.002.
ZHU J H. Analysis of power generation technology and economy on the integration of seawater pump & storage and offshore PV [J]. Southern energy construction, 2023, 10(2): 11-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.002.
- [5] 姚金楠,董梓童.海上光伏商业化渐行渐近[N].中国能源报,2023-04-03(010). DOI: 10.28693/n.cnki.nshca.2023.000606.
YAO J N, DONG Z T. The commercialization of offshore photovoltaics is gradually approaching [N]. China Energy News, 2023-04-03(010). DOI: 10.28693/n.cnki.nshca.2023.000606.
- [6] 李华军,刘福顺,杜君峰,等.海洋工程发展趋势与技术挑战[J].海岸工程,2022,41(4):283-300. DOI: 10.12362/j.issn.1002-3682.20220518001.
LI H J, LIU F S, DU J F, et al. Development trend and technical challenges of ocean engineering [J]. Coastal engineering, 2022, 41(4): 283-300. DOI: 10.12362/j.issn.1002-3682.20220518001.
- [7] VO T T E, KO H, HUH J, et al. Overview of possibilities of solar floating photovoltaic systems in the offshore industry [J]. Energies, 2021, 14(21): 6988. DOI: 10.3390/en14216988.
- [8] 王方毓.水上太阳能光伏电站的技术特点及应用[J].工程技术研究,2017(10):76-77. DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2017.10.044.
WANG F Y. Technical characteristics and applications of water solar photovoltaic power plants [J]. Engineering and technological research, 2017(10): 76-77. DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2017.10.044.
- [9] PV Magazine. Dutch developer secures funds for flexible floating solar pilot in North Sea [EB/OL]. (2022-12-02) [2023-05-10]. <https://www.pv-magazine.com/2022/12/02/dutch-developer-secures-funds-for-flexible-floating-solar-pilot-in-north-sea/>.
- [10] TRAPANI K, MILLAR D L. The thin film flexible floating PV (T3F-PV) array: the concept and development of the prototype [J]. Renewable energy, 2014, 71: 43-50. DOI: 10.1016/j.renene.2014.05.007.
- [11] PUTSCHEK M. Experiences of marine floating PV projects [EB/OL]. [2023-05-10]. http://scholar.google.com/scholar_lookup?hl=en&publication_year=2018&conference=Intersolar+Conference+2018%2C+Munich%2C+Germany&author=M+Putschek&title=Experiences+of+marine+floating+PV+projects.
- [12] Offshore Energy. Watch: solarDuck debuts its floating solar platform [EB/OL]. (2021-04-30) [2023-05-10]. <https://www.offshore-energy.biz/watch-solarduck-debuts-its-floating-solar-platform/>.
- [13] PV Magazine. Dutch startup develops offshore floating PV platform [EB/OL]. (2021-03-05) [2023-05-10]. <https://www.pv-magazine.com/2021/03/05/dutch-startup-develops-offshore-floating-pv-platform/>.
- [14] OLIVEIRA-PINTO S, STOKKERMANS J. Marine floating solar plants: an overview of potential, challenges and feasibility [J]. Proceedings of the institution of civil engineers-maritime engineering, 2020, 173(4): 120-135. DOI: 10.1680/jmaen.2020.10.
- [15] 中集集团官网.国内首个半潜式海上光伏发电平台交付由中集来福士研发制造[EB/OL].(2023-04-06)[2023-05-10]. <https://www.cimc.com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=17&id=3073>.
China International Marine Containers, Official Website. The first semi-submersible offshore photovoltaic power generation platform in China is delivered and developed by CIMC Raffles [EB/OL]. (2023-04-06) [2023-05-10]. <https://www.cimc.com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=17&id=3073>.
- [16] Wood Mackenzie. Global floating solar to top 6 GW threshold by 2031 [EB/OL].(2023-05-24)[2023-05-30]. <https://www.woodmac.com/press-releases/global-floating-solar-to-top-6gw-threshold-by-2031/>.
- [17] TNO. Floating solar panels [EB/OL]. [2023-05-10]. <https://www.tno.nl/en/sustainable/renewable-electricity/sustainable-solar-land-water/floating-solar-panels/>.
- [18] 王浚宇,王佩明,李艳红,等.水上漂浮式光伏发电系统[J].华电技术,2017,39(3):74-76. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2017.03.028.
WANG H Y, WANG P M, LI Y H, et al. Floating photovoltaic power generating system [J]. Huadian technology, 2017, 39(3): 74-76. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2017.03.028.
- [19] LIU L Y, WANG Q X, LIN H Y, et al. Power generation efficiency and prospects of floating photovoltaic systems [J].

- Energy procedia*, 2017, 105: 1136-1142. DOI: [10.1016/j.egypro.2017.03.483](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.483).
- [20] LÓPEZ M, RODRÍGUEZ N, IGLESIAS G. Combined floating offshore wind and solar PV [J]. *Journal of marine science and engineering*, 2020, 8(8): 576. DOI: [10.3390/jmse8080576](https://doi.org/10.3390/jmse8080576).
- [21] 陈勇. 中国现代化海洋牧场研究与建设 [J]. *大连海洋大学学报*, 2020, 35(2): 147-154. DOI: [10.16535/j.cnki.dlhyxb.2019-260](https://doi.org/10.16535/j.cnki.dlhyxb.2019-260).
CHEN Y. Research and construction of modern marine ranching in China: a review [J]. *Journal of Dalian ocean university*, 2020, 35(2): 147-154. DOI: [10.16535/j.cnki.dlhyxb.2019-260](https://doi.org/10.16535/j.cnki.dlhyxb.2019-260).
- [22] 赵振营, 孙利元, 丁金强, 等. 山东海洋牧场平台发展现状及未来发展重点浅析 [J]. *中国水产*, 2020(9): 49-52.
ZHAO Z Y, SUN L Y, DING J Q, et al. Analysis of the development status and future development focus of Shandong ocean farm platform [J]. *China fisheries*, 2020(9): 49-52.
- [23] 姜洪予, 王沛伦, 葛泉波, 等. 漂浮式光伏网格对海上天气突变的感知方法 [J]. *上海交通大学学报*, 2022, 56(12): 1584-1597. DOI: [10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.526](https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.526).
JIANG H Y, WANG P L, GE Q B, et al. A sensing method based of floating photovoltaic grids to sudden changes in marine weather [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2022, 56(12): 1584-1597. DOI: [10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.526](https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.526).
- [24] 路裕, 何伟峰, 姚照辉, 等. 光伏光热双热质耦合海水淡化系统数值研究 [J]. *工程热物理学报*, 2023, 44(4): 871-878.
LU Y, HE W F, YAO Z H, et al. Numerical study of a dual heat and mass transfer coupled humidification and dehumidification system driven by PV/T module [J]. *Journal of engineering thermophysics*, 2023, 44(4): 871-878.
- [25] LIU P, REN T T, GE Y L, et al. Performance analyses of a novel finned parabolic trough receiver with inner tube for solar cascade heat collection [J]. *Science China technological sciences*, 2023, 66(5): 1417-1434. DOI: [10.1007/s11431-022-2201-3](https://doi.org/10.1007/s11431-022-2201-3).
- [26] PV Magazine. Offshore hydrogen production powered by floating PV [EB/OL]. (2021-01-15) [2023-05-10]. <https://www.pv-magazine.com/2021/01/15/offshore-hydrogen-production-powered-by-floating-pv/>.

作者简介:



岳云峰

岳云峰 (第一作者, 通信作者)

1982-, 男, 满族, 高级工程师, 上海交通大学电力系统专业硕士, 主要从事电力系统、新能源、电网技术研究及设计工作 (e-mail) yueyunfeng@gedi.com.cn。

彭欣然

1996-, 女, 华南师范大学产业经济学硕士, 主要从事行业研究工作 (e-mail) pengxinran@gedi.com.cn。

王洪庆

1986-, 男, 高级工程师, 哈尔滨工程大学硕士, 主要从事海洋结构物设计与研究工作 (e-mail) wanghongqing@gedi.com.cn。

卢斌

1983-, 男, 高级工程师, 浙江大学技术经济及管理硕士, 主要从事海上风电技术经济研究工作 (e-mail) lubin@gedi.com.cn。

(编辑 叶筠英)