

薄膜型海上漂浮式光伏技术现状及展望

陈继平, 李刚, 刘博[✉], 乔弘

(中国电力工程顾问集团有限公司, 北京 100011)

摘要: [目的]海上漂浮式光伏的研究开发顺应国家能源战略发展的需要, 迎合行业发展科技引领的背景, 助力新兴经济产业链的开拓。为了深入探索海上漂浮式光伏系统的主要组成和核心技术, 为我国发展海上漂浮式光伏提供理论依据。[方法]文章基于国内外关于海上漂浮式光伏的现有研究, 提炼出柔性光伏的相关建设技术, 验证了海上漂浮式光伏开发的商业可行性, 介绍了大型海上漂浮式光伏(LOFPV)系统的配置组成并就柔性膜结构、系泊系统的水动力设计理论和方法依据进行了阐述, 展示了海上漂浮式光伏的典型工程实践。[结果]海上柔性薄膜型漂浮式光伏具备轻质化、小型化、高换电效率、配置灵活等诸多优势, 此外, 膜结构可折叠, 运输方便, 安装便捷, 整体结构无复杂衔接器, 系统可靠性高, 运维方便, 文章的相关成果将对我国的海上漂浮式光伏技术发展具有较高借鉴价值。[结论]文章说明了柔性膜结构漂浮式光伏建造技术的功能性和可靠性, 该结构型式未来必将是海上漂浮式光伏的重要应用型式。

关键词: 海上光伏; 漂浮式光伏; 大型海上漂浮式光伏; 柔性膜结构; 系泊系统

中图分类号: TK519; TU476 文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)02-0001-10

开放科学(资源服务)二维码:



Current Status and Prospect of Membrane-Based Offshore Floating Photovoltaic Technology

CHEN Jiping, LI Gang, LIU Bo[✉], QIAO Hong

(China Power Engineering Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100011, China)

Abstract: [Introduction] The research and development of offshore floating photovoltaic complies with the needs of national energy strategic development, caters to the background of industry development led by science and technology, and helps the development of emerging economic industrial chain. This paper aims to deeply explore the main components and core technologies of offshore floating photovoltaic system, and provide a theoretical basis for the development of offshore floating photovoltaic in China. [Method] Based on the existing research on offshore floating photovoltaic at home and abroad, this paper refined the relevant construction technology of flexible photovoltaic, verified the commercial feasibility of offshore floating photovoltaic development, introduced the configuration and composition of large-scale offshore floating photovoltaic (LOFPV) system, expounded the hydrodynamic design theory and method basis of flexible membrane structure and mooring system, and showed the typical engineering practice of offshore floating photovoltaic. [Result] Offshore flexible membrane-based floating photovoltaic has many advantages, such as lightweight, miniaturization, high power exchange efficiency and flexible configuration. In addition, the membrane structure is foldable, convenient for transportation, and convenient for installation, and the overall structure has no complex connector, so the system has high reliability and is convenient for operation and maintenance. Relevant achievements of this paper will provide great reference value for the development of China's offshore floating photovoltaic technology. [Conclusion] The functionality and reliability of flexible membrane-based floating photovoltaic construction technology are explained, and this flexible membrane structure will definitely be an important application type of offshore floating photovoltaic in the future.

Key words: offshore photovoltaic; floating photovoltaic; large-scale offshore floating photovoltaic (LOFPV); flexible membrane structure; mooring system

收稿日期: 2023-02-01 修回日期: 2023-02-15

基金项目: 中国电力工程顾问集团有限公司科技项目“薄膜腔型海上漂浮式光伏支撑结构及组件耐候性技术研究”(DG2-A03-2022)

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

推动可再生能源的发展、实施可再生能源替代行动,是保障国家能源安全的必然选择,是“十四五”现代能源体系规划提出的美好愿景和宏伟蓝图,也是推进能源革命和构建清洁低碳、安全高效能源体系的重大举措^[1]。

开发利用太阳能资源是我国向可再生能源发展转型的重要代表,有着满足全球能源需求的巨大潜力。在过去十多年中,光伏产业的规模以每年均增长 133% 的速度扩张^[2]。2008 年,全球太阳能光伏的总装机容量约为 10.5 GW,2018 年就迅速达到近 125 GW^[3]。紧跟全球步伐,大力推进太阳能资源的合理利用,符合时代背景和全球战略的需要。海上漂浮式光伏以太阳光为能量来源,是我国实现“碳达峰、碳中和”目标、践行绿色发展的关键技术。发展海上漂浮式光伏,有助于加强我国与周边国家的电网互联,提高新能源产业国际化水平,是中国深度参与到世界能源转型变革的有力佐证。

海上漂浮式光伏的开发符合行业发展的诉求。我国正处于能源产业创新阶段,大力发展海上漂浮式光伏符合我国进一步增强科技创新引领作用、全面提高能源产业基础高级化和产业链现代化水平的需求^[4]。近年来,我国以风电、光伏发电为代表的新能源发展成效显著,但是大规模的陆地光伏占用大量土地,限制了农业和其他工业的发展。而推行海上漂浮式光伏不仅能提高国土空间资源利用效率,还通过“风-光-渔”多能互补融合发展等方式,切实提高海域资源利用效率^[5]。此外,海上风力发电和海上光伏发电等多种形式结合,增强了我国新型电力系统的协调优化运行能力。

海上漂浮式光伏的开发有利于提振区域经济。海上漂浮式光伏建设可为区域经济提供重大助力,相关产业更有助于推动光伏工业园区经济的发展,促进光伏组件回收等新兴产业链的扩张,为沿海相关城市提供大量就业岗位,从而带动区域经济进一步发展。全国各地针对海上光伏的发展提供了一系列补贴和优惠政策。例如,山东省将海上光伏列入省重点项目,享有免配建或租赁储能设施,优先参与

分布式发电市场化交易的优惠政策,同时还对相应的海域使用租金进行了减免^[6]。这有助于带动各界对海上光伏项目的关注和投入,进而通过相应的工业发展提高区域经济发展自由度,为区域经济注入强劲动力。

海上漂浮式光伏的开发将有效降低我国沿海城市的用电成本。随着我国光伏工业园区的技术创新与模式创新,光伏板成本逐年下降。预计到 2030 年和 2050 年,光伏板的平均成本分别为 340~834 美元/kW 和 165~481 美元/kW,而在 2018 年,这一价格为 1 210 美元/kW^[7]。海上光伏发电成本大大降低,从而节省了我国沿海城市的用电成本。

海上漂浮式光伏开发还有助于相关技术领域的理论及技术创新。海上漂浮式光伏的建设离不开多学科先进理论和技术支撑,其产业化的过程又促进相关科学技术领域的理论创新及成果转化。海上漂浮式光伏建设又是一个复杂的、跨学科支持的系统工程,包括材料学、生态环境学、海洋工程及岩土工程等学科。例如,从材料科学来说,氯化镉^[8-9]是光伏太阳能电池的主要成分,但其高毒性和高成本会影响太阳能电池的资金投入和生产进度。而海洋中丰富的氯化镁可以替代剧毒且昂贵的氯化镉^[10]。从海洋工程来说,安全经济的上部漂浮结构及海床锚固基础结构迫切需要新型的设计理论和方法支撑,以满足不同海洋环境的漂浮式光伏开发需要。

综上所述,基于太阳能的海上漂浮式光伏的开发,不仅能切实提高海域资源利用效率,还能助力区域经济的发展,降低我国沿海城市的用电成本,且是促进相关技术领域的理论技术创新的重要举措。

1 海上光伏的发展回顾和关键技术

海上光伏的发现有处于科研及示范验证阶段,其前期的技术积淀与近 10 a 来水上光伏产业的发展密不可分。自 2007 年日本建立了首个实验性水上光伏项目后^[11],全球水面光伏产业开始缓慢发展。得益于单、多晶硅光伏技术的迅猛发展和光电转换率大幅提升^[12],以及多国鼓励发展光伏产业的相应政策,水上光伏产业快速增长,近 5 a 有大批内陆淡

水水上光伏项目相继投产,成为光伏产业发展领域的绝对主力^[13]。随着陆上可用于光伏开发的用地面积收紧和我国对淡水水上光伏开发的限令,探索海上光伏开发的可行性势在必行^[14]。鉴于淡水水上光伏开发的设计、施工及运维等经验,并充分考虑海洋环境对光伏发电的影响,对适应海上漂浮式光伏发电的相关设计、建造技术进行了总结。

1.1 光伏模块

光伏模块在光照下,通过吸收光能在两端积累异性电荷形成电势差,产生伏特效应^[15],从而将太阳的光能直接转化为电能。

光伏模块需在高湿度、强腐蚀性的海洋环境中稳定工作,对封装材料耐久性和抗腐蚀性的要求异常严格。现已出现适应海洋环境的光伏电池板的封装保护技术^[16],即把太阳能电池板嵌入双层聚乙烯胶膜,并用几毫米厚的高透双层玻璃板和背侧电绝缘柔性箔进行封装。聚乙烯胶膜以其高透光性、高粘结性和良好的耐久性成为封装的首选材料,粘着力不受湿度和吸水性胶片的影响,适用于各种界面,包括玻璃、金属及塑料等,良好的耐久性表现于能抵抗高温、潮湿、紫外线等^[17],确保光伏组件能够在海洋环境中长期稳定工作。另外,封装玻璃的渗透性接近零,力学性能稳定,可有效避免模块内部与水接触引起化学侵蚀,最小化电势诱导衰减效应的风险,逐渐成为光伏产业的主流安装型式。

1.2 支撑结构型式

在海洋环境中,支撑结构是光伏系统长期正常运行的保障,需要具备抵抗各种极端长期的外界荷载(如风、浪、流荷载)的能力,以更高效地利用太阳能。

传统的水上光伏支撑结构一般采用桩基固定式支撑技术^[18],如图1所示,与传统陆上光伏电站采用的安装方式一致,金属支架支撑着光伏组件,以固定倾角和方位角安装在桩基上,但若应用于海上光伏电站,安装及建造成本都将大幅增加,其经济可行性低。

漂浮式支撑技术能够更好地适应海洋环境,一般选用高密度聚乙烯、高性能钢筋混凝土和不锈钢等材料建造支撑主体结构,以有效维持海水长期侵蚀过程中材料的稳定性^[19],且可借助施动系统调整光伏组件的方位角^[20]。漂浮式光伏支撑系统主要有



图1 正泰 550 MW 海洋光伏电站桩基支撑结构

Fig. 1 Pile foundation support structure of Chint 550 MW offshore photovoltaic power station

刚性支撑结构和柔性支撑结构两种型式。

刚性支撑结构多为浮管式或浮筒式^[21-22]。浮管式漂浮结构将浮管连接成排,前后排支架通过连接杆连成整体,这种结构连接节点多,结构稳定性较差,但是在安装时能够灵活调节倾角(如图2所示)。图3展示了应用浮筒式支撑结构的漂浮光伏电站,按照浮筒安装形式不同可分为3种:专用一体化浮筒、独立浮筒和标准浮筒。专用一体化浮筒多数以高密度聚乙烯专用浮筒为浮体,浮体根据组件倾角制作成相应的角度,为了抗风载,固定倾角一般较小($10^{\circ} \sim 15^{\circ}$)且不可调,该系统由主浮模块、次浮模块、连接耳环、垫片、光伏组件组成,使用少量的钢连接片,无须设计钢支架,能够较好地适应水面波动,并可模块化制作安装,但其成本高且不能够灵活地调节倾角。独立浮筒与专用一体化浮筒的安装形式基本一致,需附加金属支架以便调整光伏模块的倾角。标准浮筒则是先将浮筒连接到一起形成漂浮平台,再用钢结构固定支架支撑光伏板,这种安装方式整体的水稳性高,能够很好地抵抗外界荷载,同时能够灵活地调节光伏板的倾角,安装时更加灵活便捷,但系统连接节点多,系统长期的稳定性难以保证,后期运维成本可能增加,对系泊锚固系统的要求也很苛刻。



图2 浮管式漂浮光伏电站

Fig. 2 Floating tube based photovoltaic power station



图 3 浮筒式漂浮光伏电站

Fig. 3 Floating bowl based photovoltaic power station

柔性薄膜支撑结构是近年来出现的一种创新结构,主要由光伏组件、水弹性柔性薄膜、浮力环及阻尼线等组成,可将光伏组件贴敷安装固定在一层柔性膜上,柔性膜可承受巨大的结构应力与长期的日光照射。柔性膜本身可有效适应水面波动,使整个系统随波浪起伏。此外,紧贴水面的布局,可充分借助水冷效应来提升光伏换电效率。由于支撑结构无复杂连接件,系统可靠性高,运维方便。柔性膜采用高密度聚乙烯材料,已经在全世界广泛运用,膜结构自身可折叠,运输方便,安装便捷。首个原型尺寸示范项目于 2017 年在挪威西海岸近岸建成,体量为直径 20 m 的单柔性膜浮体,并陆续推出直径 50 m 200 kW、72 m 500 kW 的圆形水面系统,以及适用于溪流河道的长方形 100 kW 系统。

1.3 系泊锚固技术

借鉴海洋油气和海洋牧场的建设经验,系泊型式一般采用悬链线式、绷紧式或半绷紧式系泊^[23]等。悬链线式多采用钢制海工锚链,用海面积大。绷紧式或半绷紧式可以用轻质复合材料或者跟锚链结合,能有效优化漂浮结构的水动力性能,并可采用共享式系泊型式,使多个浮体结构共享锚固基础,以节约用海面积。系泊线的数量及系泊半径主要取决于漂浮式结构的尺寸、形状及承受荷载的方向和幅值^[24]。系泊线底部则与锚固基础连接,一般有重力式基础、吸力锚及大抓力锚等多种型式可采用,锚固基础类型的选择常依赖于场地的水文和地质条件,对水深、海底土层性质及系泊线的荷载水平等最为敏感,且需要充分考虑系泊占地面积、安装难度及材料成本等多方面因素,才能给出可行的系泊锚固方案。

1.4 电气工程技术

电气工程在光伏发电领域有着长期的服务经验,

已建立了较为完善的技术体系,但是面临恶劣海洋环境挑战,需充分考虑电缆和其他电气装置的布设,应合理安排逆变器、汇流箱和配电柜以减短电缆的布设长度^[25]。光伏系统一般有两种逆变器布置方案^[26]。一般大型工程选用集中式逆变器布置,中小型工程选择组串式逆变器布置^[27-28],也可根据应用场地,跟已有逆变器共用。光伏系统的直、交流电缆应用于海洋环境时,一般采用浮箱固定或设置桥架的方式^[29]。高压交流电缆敷设优先采用水面漂浮敷设方式,其次选用水下敷设的方式,设计时需充分考虑电缆和逆变器的防护安全级别,确保电缆能够在海洋环境中长期工作且不受侵蚀^[30]。对于波荷载较大的海上光伏电站,其电缆敷设及接地系统敷设需充分考虑海面波动变化及支撑结构的运动响应,可漂浮敷设在水面并采用冗余的“S”弯布置,为电缆产生位移预留一定的安全储备。

2 薄膜型海上漂浮式光伏系统 (LOFPV)

2.1 系统组成

考虑到刚性支撑结构系统可借鉴海洋油气领域的丰富经验,本文重点介绍近些年兴起的新型柔性支撑结构海上光伏平台,图 4 展示了其主要的系统布局,其主要由光伏模块、水弹性膜、浮力环、系泊缆、锚、逆变器和变压器等组成。其中,水弹性膜提供了 1 个安装光伏模块的平台,轻质的光伏模块安装在水弹性膜上或与水弹性膜集成,水弹性膜的边缘固定在浮力环的内圈上。浮力环负责提供整个系统的大部分浮力,使得柔性薄膜漂浮在自由水面上,同时还起到保护墙的作用,可以防止波浪撞击膜和光伏模块平台。系泊线和锚固系统起到固定柔性支撑结构的作用,为系统提供抵抗风、波浪和流载荷的

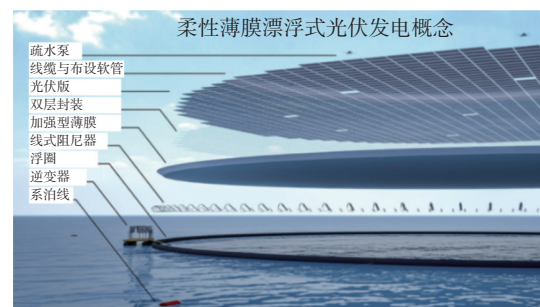


图 4 LOFPV 的详细配置

Fig. 4 Detailed configuration of LOFPV

恢复力, 限制其自由移动, 以防止损坏或危害自身或其他浮体。

迄今为止, LOFPV 装置的光伏组件几乎全部采用了基于晶体硅片的光伏电池板^[31]。在海洋环境中, 光伏组件将被要求抵抗高负荷, 耐海水腐蚀。双玻晶体光伏组件具有高度的防水性能, 确保了 LOFPV 在海水环境下的基本工作能力。同时, 水弹性膜的灵活性有助于提高 LOFPV 系统承受波浪载荷的能力^[32], 其力学性能可以通过增加面板刚度或通过在中性轴上安装线单元来提高^[33]。膜与海水的大接触面积可提高水冷效率, 增加发电量。浮力环通常由抗紫外线光、无害、免维护的高拉伸强度聚乙烯材料制成, 如高密度聚乙烯^[34]。同时, 一些更致密的材料, 例如混凝土或钢, 也已经纳入考虑的范畴^[35-36]。每个 LOFPV 平台都有一个逆变器, 通过电缆传输至变压器并完成并网^[37-38]。

2.2 柔性膜结构的水动力设计

海上漂浮式光伏结构属于大尺度、柔性海洋工程结构物, 其在波浪作用下的动力响应是一个典型的流固耦合问题^[39], 需要计算其惯性力, 水动力和弹性力三者相互耦合作用以求解水弹性响应^[40]。目前, 处理这一问题的常见方法有以下3种:

2.2.1 模态叠加法

该方法最早由 Bishop 和 Price^[41] 提出, 历经多年发展已趋于成熟^[42-44]。模态叠加法将大尺度柔性结构物的水弹性响应问题分解为每个模态的绕射和辐射问题, 大致包含如下3个步骤: (1) 对结构进行有限元划分, 分析结构的固有振动频率(干、湿模态), 确定参振模态组合; (2) 对每个参振模态进行水动力分析, 求解附加质量、辐射阻尼和波浪激励力等水动力系数; (3) 叠加所有模态得到最终的水弹性响应。

模态叠加法通常用于简单形式的大尺度浮式结构物, 如狭长形超大型浮体。当结构自身具有较为复杂的几何形状属性和内部连接特征时, 模态分析较为困难。此外, Kim 等^[45] 指出, 由于模态叠加法仅选取了有限个模态, 因此无法精确评估结构的应力响应。而且, 在进行模态分析时, 学术界也没有建立确定、统一的标准或原则。

2.2.2 直接法

直接法是一种全耦合方法, 对结构本身进行有限元离散, 对流体进行边界元(Boundary Element

Method, BEM)离散, 将水动力外载荷和结构自身变形进行直接耦合, 求解水弹性响应^[46]。

从某种程度上说, 直接法的求解包含了结构所有的振动模态, 并且理论上, 直接法可以考虑全非线性因素。但是, 直接法是一个非常耗时的方法, 在处理海上漂浮式光伏平台这类大尺度海洋结构物的水弹性问题时更是如此。Seto 等^[47] 指出, 对于大尺度海洋结构物来说, 系统离散之后的未知数量级将会达到惊人的 $10^5 \sim 10^6$, 求解单个工况需要耗费大量的时间和计算资源。

2.2.3 离散模块梁单元法

离散模块梁单元方法(Discrete Module Beam, DMB)近年来渐渐走进人们的视野^[48]。对于一个大型浮式结构物静止于静水面, 受到波浪作用, 其入射角为 ϕ 。浮体可被分为 N 个子模块, 将每个子模块抽象为一个集中质量, 该集中质量包含子模块所有质量并承受作用于上的所有外荷载。每两个相邻的集中质量间用等效欧拉-伯努利梁连接。通过多刚体水动力分析求解相关水动力系数矩阵。基于梁弯曲理论, 根据节点受力平衡构建频域运动方程。目前, 已经有诸多学者使用 DMB 方法解决了若干工程问题^[49-51], 证明了 DMB 方法的准确性。此外, 有学者通过引入有限元进行结构分析, 使 DMB 方法可以处理更为复杂的大尺度海洋工程结构物。

对于大尺度膜结构来说, 其弯曲刚度非常小, 采用何种有限元离散方式仍是值得研究的方向。模态叠加法和 DMB 方法基本上都是采用线性梁单元或板单元对结构进行离散, 这对于具有一定刚度的结构物来说是合理的, 但是在膜结构上是否适用依然值得商榷。首先, 学术界目前少有模态叠加法分析膜结构水弹性相应的文章, 如何处理非狭长形、高柔性膜结构的模态分析, 如何确定模态选取的原则都存在很大的挑战。其次, 大尺度膜结构在波浪作用下具有较大的横向和垂向变形, 并不满足小变形假设, 因此, 需要考虑非线性因素对于水弹性响应的影响。最后, 膜结构特有的褶皱和弯折等非线性变形, 是线性模型无法描述的。虽然采用 FEM-BEM 全耦合的直接法可以考虑全非线性因素, 但是大尺度结构带来的巨大的计算耗时和资源占用, 同样令人望而却步。因此, 对大尺度膜结构的水动力分析仍可在现有水弹性方法下进行, 但是如何对膜结构进

行有限元离散、如何考虑波浪与结构的非线性因素、如何模拟膜结构特有的非线性变形现象、如何在保证计算准确性的同时具有较高的计算效率, 仍需开展深入理论及设计研究。

2.3 系泊系统的设计

为了严格控制浮式结构的运动幅值, 系泊线的选取、布置方式尤为重要。系泊线的选取受水深和系泊载荷影响显著^[52]。传统的钢制悬链线系泊由“锚链-钢缆-锚链”3部分组成, 一般适用于 1 000 m 水深以下的浮体定位。当水深增大后, 系统的不足之处开始显现, 系泊荷载随水深增加而显著提升, 占用浮体大量储备浮力; 导缆孔处缆绳与铅垂线夹角减小, 水平回复刚度降低, 整体定位能力变差; 且水中缆绳长度长, 用料多; 还增加了与其他水下设施碰撞的风险^[53-54], 因此逐渐被新型深水系泊系统取代。系泊线的布置方式包括系泊线的数量、系泊线布置的方位角、抛锚距离及系泊线的长度等。系泊系统的方位角和抛锚距离一般基于风、浪、流载荷作用下浮式结构/系泊系统的耦合水动力时域分析进行优化^[55-56]。系泊线各段长度可基于多成分悬链线方程, 以最大回复刚度、最小系泊线重量为优化目标进行回归分析。与之匹配的锚定基础可有多种选择^[57], 主要包括桩基锚、吸力锚、平板锚、重力锚、动力贯入锚、大抓力锚等, 用以承受来自锚链的拉拔荷载, 拉力方向和系泊线形态有关, 可以竖直向上, 也可倾斜, 甚至为水平方向。

综上可知, 目前对系泊技术的研究多集中于锚系海洋船舶和刚性结构方面, 对柔性浮体的系泊研究鲜有报道。为保证本项目研究的大型柔性膜结构水动力性能, 研发与之适配的系泊型式、系泊布置等关键系泊方案尤为重要, 属海上大型浮式光伏场区建设中亟待解决的技术难题。

3 典型工程实践案例

3.1 MAGAT 项目

MAGAT 项目如图 5 所示, 于 2019 年 6 月建成, 是菲律宾首个 200 kW 漂浮式光伏项目, 位于占地 1 170 hm² 的 Magat 水库中。该项目已稳定运营两年以上, 经历两个台风季并未发生损伤。规模为 50 m 直径单浮体, 可抵抗 4 级台风(270 km/h)。



图 5 MAGAT 项目漂浮式光伏系统

Fig. 5 Floating photovoltaic system of MAGAT project

3.2 Banja 项目

Banja 项目建设始于 2020 年, 位于阿尔巴尼亚, 规模为四浮体 2 MWp 如图 6 所示。项目采用的膜结构, 可在岸上预安装或直接在水上安装, 且膜结构可折叠直接装入一个 40 ft 的集装箱里。对于许多温暖干燥的地区, 膜结构可有效减少水下阳光的照射, 缓解了藻类的生长问题, 可起到改进水质的作用。



图 6 Banja 项目漂浮式光伏系统

Fig. 6 Floating photovoltaic system of Banja project

3.3 国家电投山东半岛南 3 号海上风电场 20 MW 深远海式漂浮式光伏 500 kW 实证项目

2022 年 10 月, 国家电投山东半岛南 3 号海上风电场 20 MW 深远海式漂浮式光伏 500 kW 实证项目发电成功, 成为全球首个投入使用的深远海风光同场漂浮式光伏实证项目, 如图 7 所示。



图 7 500 kW 漂浮式海上光伏项目环形浮体单元

Fig. 7 Ring floating unit of 500 kW floating offshore photovoltaic project

该项目位于山东省海阳市南侧海域,距海岸 30 km,水深 30 m。首次建设的 500 kW 漂浮式海上光伏由两个环形浮体单元组成,每个浮体单元装机容量 250 kW,直径 53 m,其上共安装有 770 块光伏组件,产生的清洁电能将汇流到逆变器,送至同场运行的半岛南 3 号风机平台后经海上升压站送出至电网。该实证项目验证了浮体、锚固、发电组件抗风浪能力和海洋环境耐候性,从而验证风光同场并网的技术可行性。

4 LOFPV 面临的技术挑战

当前阶段,建设薄膜型海上漂浮式光伏电站尚且面临很多技术挑战。例如,柔性膜结构工作环境复杂,长期面临风、浪、流等多重荷载的侵袭,还有可能面对海冰的冲击,这对膜结构的抗隐裂能力和系泊系统的设计提出了较高要求;海洋环境的腐蚀等级最高,而光伏组件长期处于潮湿环境中,可靠性和使用寿命等问题有待进一步验证;附着生物对海上漂浮式光伏系统产生影响,例如腐蚀、浮体负重增加和遮挡光伏组件等,这要求浮体吃水深度冗余量要覆盖 25 a 附着生物增重。

薄膜型海上漂浮式光伏技术是对海洋空间的有效利用,是顺应国家能源战略发展的需要,是迎合行业发展科技引领的背景、助力新兴经济产业链开拓的创新之举,虽然距离大面积、大规模开发还有一定距离,但随着产业发展和技术进步,薄膜型海上漂浮式光伏技术定能蓬勃发展。

5 结论

本文对海上漂浮式光伏的光伏模块、支撑结构形式、系泊锚固系统、电气工程技术进行了全面的回顾,详细介绍了薄膜型海上漂浮式光伏(LOFPV)系统的配置组成并就柔性膜结构、系泊系统的水动力设计理论和方法依据进行阐述,并结合工程实践验证了海上漂浮式光伏开发的商业可行性。结论如下:

1)在光伏模块的产品研发上已形成关键突破,已有技术可充分兼顾海洋环境中光伏换电效率和长期工作的稳定性及耐久性。

2)系泊锚固技术可借鉴海洋油气领域的经验,同时须充分考虑应用场地的水文及地质条件,开展

针对性的方案设计。

3)较为成熟的电气工程建设方案可为海上光伏建设提供技术及设计支撑。

4)漂浮式支撑技术中柔性膜支撑技术在结构对复杂海洋环境的适应性、电能转换效率、材料、运输、安装及运维成本控制、系泊锚固基础适配性以及整体系统的可靠性等方面均具有显著优势。

5)为保证大型柔性膜结构水动力性能,研发与之适配的系泊型式、系泊布置等关键系泊方案尤为重要,属海上大型浮式光伏场区建设中亟待解决的技术难题。

参考文献:

- [1] 国家发展改革委,国家能源局.“十四五”现代能源体系规划 [EB/OL].(2022-03-22) [2023-01-26].https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202203/t20220322_1320017.html. National Development and Reform Commission, National Energy Administration. "Fourteenth Five-Year Plan" modern energy system planning [EB/OL].(2022-03-22) [2023-01-26]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202203/t20220322_1320017.html.
- [2] ROSA-CLOT M, TINA G M. Current status of FPV and trends [M]//ROSA-CLOT M, TINA G M. Floating PV Plants. Amsterdam: Elsevier, 2020: 9-18. DOI: 10.1016/B978-0-12-817061-8.00002-6.
- [3] KOMUSANAC I, FRAILE D, BRINDLEY G. Wind energy in Europe in 2018 - trends and statistics [R]. Brussels, Belgium: European Wind Energy Association, 2019.
- [4] 国家发展改革委,国家能源局.关于促进新时代新能源高质量发展的实施方案的通知:国办函[2022]39号 [EB/OL].(2022-05-14) [2023-01-26]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-05/30/content_5693013.htm. National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Implementation plan for promoting highquality development of new energy in the new era: State Office Letter [2022]NO.39 [EB/OL].(2022-05-14) [2023-01-26]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-05/30/content_5693013.htm.
- [5] GOLROODBARI S Z, VAN SARK W. Simulation of performance differences between offshore and land-based photovoltaic systems [J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2020, 28(9): 873-886. DOI: 10.1002/pip.3276.
- [6] 卢纯.开启我国能源体系重大变革和清洁可再生能源创新发展新时代——深刻理解碳达峰、碳中和目标的重大历史意义 [J]. *人民论坛·学术前沿*, 2021(14): 28-41. DOI: 10.16619/j.cnki.rmltxsqy.2021.14.004.

- LU C. Opening a new era of major changes in China's energy system and innovative development of clean and renewable energy—deeply understanding the great historical significance of the targets of carbon peak and carbon neutralization [J]. *People's Forum Academic Frontiers*, 2021(14): 28-41. DOI: 10.16619/j.cnki.rmltxsqy.2021.14.004.
- [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] YOUSUF H, KHOKHAR M Q, ZAHID M A, et al. A review on floating photovoltaic technology (FPVT) [J]. *Current Photovoltaic Research*, 2020, 8(3): 67-78. DOI: 10.21218/CPR.2020.8.3.067.
- [9] NOOKUEA W, CAMPANA P E, YAN J Y. Evaluation of solar PV and wind alternatives for self renewable energy supply: case study of shrimp cultivation [J]. *Energy Procedia*, 2016, 88: 462-469. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.06.026.
- [10] 刘石磊. 氯化镁太阳能电池低本无毒 [J]. *化工管理*, 2014(22): 62. DOI: 10.3969/j.issn.1008-4800.2014.22.020.
- LIU S L. Magnesium chloride solar cells with low cost and non-toxic [J]. *Chemical Management*, 2014(22): 62. DOI: 10.3969/j.issn.1008-4800.2014.22.020.
- [11] 张木梓, 王艺澄. 全球水上光伏产业的发展现状及市场前景分析 [J]. *太阳能*, 2020(7): 19-24. DOI: 10.19911/j.1003-0417.2020.07.003.
- ZHANG M Z, WANG Y C. Global floating PV industry development status and market prospect analysis [J]. *Solar Energy*, 2020(7): 19-24. DOI: 10.19911/j.1003-0417.2020.07.003.
- [12] 刘洋. 太阳能电池用多晶硅材料生产现状及发展 [J]. *科技风*, 2018(2): 36. DOI: 10.19392/j.cnki.1671-7341.201802034.
- LIU Y. Production status and development of polysilicon materials for solar cells [J]. *Scientific and Technological Wind*, 2018(2): 36. DOI: 10.19392/j.cnki.1671-7341.201802034.
- [13] 吴继亮, 梁甜, 糜文杰, 等. 水上漂浮式光伏电站的发展及应用前景分析 [J]. *太阳能*, 2019(12): 20-23. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0417.2019.12.003.
- WU J L, LIANG T, MI W J, et al. Analysis on the development and application prospect of floating photovoltaic power stations [J]. *Solar Energy*, 2019(12): 20-23. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0417.2019.12.003.
- [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] 胡俊鹏, 韩本帅, 林泽源, 等. 光伏发电系统在智能变电站中的应用规模研究 [J]. *电气应用*, 2013, 32(19): 29-31.
- HU J P, HAN B S, LIN Z Y, et al. Research on the application scale of photovoltaic power generation system in intelligent substation [J]. *Electrical Application*, 2013, 32(19): 29-31.
- [16] 董劲. Eu配合物/EVA复合膜的制备及在晶体硅太阳能电池中的应用研究 [D]. 南京: 东南大学, 2017.
- DONG J. Preparation of Europium complex/EVA composite film and its application in crystalline silicon solar cells [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [17] 太阳能光伏网. EVA胶膜是什么材料?EVA胶膜产品规格和优点介绍 [EB/OL].(2022-08-18) [2023-01-26]. <http://www.zceva.cn/hangye/2298.html>.
- Solar Photovoltaic Network. What material is EVA film? EVA film product specifications and advantages [EB/OL].(2022-08-18) [2023-01-26]. <http://www.zceva.cn/hangye/2298.html>.
- [18] 孙祖峰, 陈佩杭. 漂浮式光伏应用及技术难点简析 [J]. *科技创新与应用*, 2016(12): 37-38.
- SUN Z F, CHEN P H. Brief analysis of floating photovoltaic applications and technical difficulties [J]. *Technology Innovation and Application*, 2016(12): 37-38.
- [19] 常颖, 马建军, 陈博, 等. 东北寒冷地区水面漂浮式光伏电站关键技术综述 [J]. *水电与抽水蓄能*, 2021, 7(6): 98-102. DOI: 10.3969/j.issn.2096-093X.2021.06.025.
- CHANG Y, MA J J, CHEN B, et al. The introduction of key technology of floating photovoltaic power station in cold area of northeast China [J]. *Hydropower and Pumped Storage*, 2021, 7(6): 98-102. DOI: 10.3969/j.issn.2096-093X.2021.06.025.
- [20] 王宏宇, 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 generation system [J]. *Huadian Technology*, 2017, 39(3): 74-76. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2017.03.028.
- [21] 孙杰. 水上光伏电站应用技术与解决方案 [J]. *太阳能*, 2017(6): 32-35. DOI: 10.19911/j.1003-0417.2017.06.009.
- SUN J. Application technology and solution of water photovoltaic power station [J]. *Solar Energy*, 2017(6): 32-35. DOI: 10.19911/j.1003-0417.2017.06.009.
- [22] PINTO S O, STOKKERMANS J. Assessment of the potential of different floating solar technologies—overview and analysis of different case studies [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 211: 112-747. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112747.
- [23] Research and Markets. Offshore mooring systems market: global industry analysis, size, share, growth, trends and forecast 2015-2021 [R]. Ireland: Taylors Lane, 2016.
- [24] 肖福勤, 孔耀华, 余德海, 等. 漂浮式光伏电站漂浮方阵多点系泊特性研究 [J]. *人民长江*, 2020, 51(4): 168-173. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.04.028.
- XIAO F Q, KONG Y H, YU D H, et al. Study on multi-point

- mooring characteristics of floating array in floating photovoltaic power station [J]. *Yangtze River*, 2020, 51(4): 168-173. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.04.028.
- [25] 李童. 近海石油平台电缆敷设工艺 [J]. *石油和化工设备*, 2021, 24(11): 45-49+44. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8980.2021.11.010.
- LI T. Cable laying process for offshore oil platform [J]. *Petro & Chemical Equipment*, 2021, 24(11): 45-49+44. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8980.2021.11.010.
- [26] 高立刚, 田莉莎, 张堃, 等. 大型光伏电站组串式逆变器布置方案分析 [J]. *西北水电*, 2021(2): 96-99. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2610.2021.02.020.
- GAO L G, TIAN L S, ZHANG K, et al. Analysis of the layout scheme of string inverters in large-scale PV power stations [J]. *Northwest Hydropower*, 2021(2): 96-99. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2610.2021.02.020.
- [27] 张玺. 谈大型地面集中式光伏电站的方案设计 [J]. *红水河*, 2022, 41(3): 62-65. DOI: 10.3969/j.issn.1001-408X.2022.03.013.
- ZHANG X. Scheme design of large-scale ground centralized photovoltaic power station [J]. *Hongshui River*, 2022, 41(3): 62-65. DOI: 10.3969/j.issn.1001-408X.2022.03.013.
- [28] 袁海山, 叶响, 杨俊杰, 等. 光伏发电系统及其并网技术 [J]. *智能建筑*, 2021(4): 63-68.
- YUAN H S, YE Y, YANG J J, et al. Photovoltaic power generation system and its grid connected technology [J]. *Intelligent Building*, 2021(4): 63-68.
- [29] 石涛. 水上光伏电站站址选择及总平面布置设计要点探讨 [J]. *太阳能*, 2021(6): 50-57. DOI: 10.19911/j.1003-0417.tyn20200522.01.
- SHI T. Discussion on site selection and design points of general layout of PV power station above water [J]. *Solar Energy*, 2021(6): 50-57. DOI: 10.19911/j.1003-0417.tyn20200522.01.
- [30] 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 application of water solar photovoltaic power station [J]. *Engineering Technology Research*, 2017(10): 76-77. DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2017.10.044.
- [31] BJØRNEKLETT B. Offshore floating solar-a technical perspective [N]. *PV Tech Power*, 2018-11-11.
- [32] 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.
- [33] CLAUS R, LÓPEZ M. Key issues in the design of floating photovoltaic structures for the marine environment [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 164: 112502. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112502.
- [34] SAHU A K, SUDHAKAR K. Effect of UV exposure on bimodal HDPE floats for floating solar application [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8(1): 147-156. DOI: 10.1016/j.jmrt.2017.10.002.
- [35] LEE T D, EBONG A U. A review of thin film solar cell technologies and challenges [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 70: 1286-1297. DOI: 10.1016/j.rser.2016.12.028.
- [36] TRAPANI K, SANTAFÉ M R. A review of floating photovoltaic installations: 2007-2013 [J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2015, 23(4): 524-532. DOI: 10.1002/pip.2466.
- [37] KOUGIAS I, SZABÓ S, MONFORTI-FERRARIO F, et al. A methodology for optimization of the complementarity between small-hydropower plants and solar PV systems [J]. *Renewable Energy*, 2016, 87: 1023-1030. DOI: 10.1016/j.renene.2015.09.073.
- [38] SAHU A K, YADAV N, SUDHAKAR K. Floating photovoltaic power plant: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 66: 815-824. DOI: 10.1016/j.rser.2016.08.051.
- [39] XU P P, WELLENS P R. Theoretical analysis of nonlinear fluid-structure interaction between large-scale polymer offshore floating photovoltaics and waves [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 249: 110829. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.110829.
- [40] HELLER S R, ABRAMSON H N. Hydroelasticity: a new naval science [J]. *Journal of the American Society for Naval Engineers*, 2009, 71(2): 205-209. DOI: 10.1111/j.1559-3584.1959.tb02326.x.
- [41] BISHOP R E D, PRICE W G. Hydroelasticity of ships [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1979.
- [42] WU Y S, DING J, LI Z W, et al. Hydroelastic responses of VLFS deployed near islands and reefs [C]// Anon. ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Trondheim, Norway: ASME, June 25, 2017. [s.l.]: [s.n.], 2017. DOI: 10.1115/OMAE2017-62680.
- [43] FU S X, MOAN T, CHEN X J, et al. Hydroelastic analysis of flexible floating interconnected structures [J]. *Ocean Engineering*, 2007, 34(11/12): 1516-1531. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2007.01.003.
- [44] SENJANOVIĆ I, MALENICA Š, TOMAŠEVIĆ S. Investigation of ship hydroelasticity [J]. *Ocean Engineering*, 2008, 35(5/6): 523-535. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2007.11.008.
- [45] KIM K H, BANG J S, KIM J H, et al. Fully coupled BEM-FEM analysis for ship hydroelasticity in waves [J]. *Marine Structures*, 2013, 33: 71-99. DOI: 10.1016/j.marstruc.2013.04.004.
- [46] DAS S, CHEUNG K F. Hydroelasticity of marine vessels advancing in a seaway [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2012, 34: 271-290. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2012.05.015.
- [47] SETO H, OHTA M, OCHI M, et al. Integrated hydrodynamic-

- structural analysis of very large floating structures (VLFS) [J]. *Marine Structures*, 2005, 18(2): 181-200. DOI: 10.1016/j.marstruc.2005.07.008.
- [48] LU D, FU S X, ZHANG X T, et al. A method to estimate the hydroelastic behaviour of VLFS based on multi-rigid-body dynamics and beam bending [J]. *Ships and Offshore Structures*, 2019, 14(4): 354-362. DOI: 10.1080/17445302.2016.1186332.
- [49] BAKTI F P, JIN C, KIM M H. Practical approach of linear hydroelasticity effect on vessel with forward speed in the frequency domain [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2021, 101: 103204. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2020.103204.
- [50] JIN C, BAKTI F P, KIM M. Multi-floater-mooring coupled time-domain hydro-elastic analysis in regular and irregular waves [J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 101: 102276. DOI: 10.1016/j.apor.2020.102276.
- [51] ZHANG X T, LU D, GAO Y, et al. A time domain discrete-module-beam-bending-based hydroelasticity method for the transient response of very large floating structures under unsteady external loads [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 164: 332-349. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.06.058.
- [52] 李志海, 徐兴平, 王慧丽. 海洋平台系泊系统发展 [J]. *石油矿场机械*, 2010, 39(5): 75-78. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3482.2010.05.022.
- LI Z H, XU X P, WANG H L. Development of offshore platform mooring systems [J]. *Oil Field Equipment*, 2010, 39(5): 75-78. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3482.2010.05.022.
- [53] 王言英, 肖越. 深水锚泊的新概念与新技术 [J]. *船舶工程*, 2004(2): 1-3. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2004.02.001.
- WANG Y Y, XIAO Y. New concept and technology of deepwater mooring system [J]. *Ship Engineering*, 2004(2): 1-3. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2004.02.001.
- [54] 陆忠杰, 周国平. 深水锚系泊作业技术应用初探 [J]. *船舶设计通讯*, 2011(增刊1): 67-72.
- LU Z J, ZHOU G P. Preliminary study on the application of anchor mooring technique in deep water [J]. *Journal of Ship Design*, 2011(Supp. 1): 67-72.
- [55] LEHANE B M, GAVIN K G. Base resistance of jacked pipe piles in sand [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, 127(6): 473-480. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:6(473).
- [56] FU D F, ZHANG Y H, AAMODT K K, et al. A multi-spring model for monopile analysis in soft clays [J]. *Marine Structures*, 2020, 72: 102768. DOI: 10.1016/j.marstruc.2020.102768.
- [57] NG K W, SULEIMAN T M, SRITHARAN S. Pile setup in cohesive soil. II: analytical quantifications and design recommendations [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(2): 210-222. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000753.

作者简介:



陈继平 (第一作者)

1964-, 男, 陕西蒲城人, 正高级工程师, 主要从事能源电力、新型电力系统等方面的勘察设计、技术管理、项目管理和研究工作 (e-mail) jpchen@cpecc.net。

陈继平

李刚

1975-, 男, 广东揭阳人, 正高级工程师, 主要从事电力设计及管理工作 (e-mail) gli@cpecc.net。



刘博 (通信作者)

1989-, 男, 河南三门峡人, 高级工程师, 上海交通大学岩土工程专业博士, 主要从事海上风电、海上光伏基础的设计和科研、水动力载荷下海床及海床结构物失稳机理研究工作 (e-mail) bliu@cpecc.net。

刘博

乔弘

1981-, 男, 内蒙古呼伦贝尔人, 高级工程师, 工学博士, 主要从事火电厂热工过程参数建模及海上风电、海光伏、洋流能等海洋能源工程技术研究工作 (e-mail) hqiao@cpecc.net。

(编辑 孙舒)