

Analysis of Offshore Photovoltaic Support Structures Selection in Shallow Waters Near Shandong, China

Guixue Liu Zhenjing Wei Zhen Li

National Energy Group Shandong Electric Power Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250000, China

Abstract

In June 2022, Shandong Province issued the Action Plan of Shandong Province Offshore Photovoltaic Construction Project, which will build an offshore photovoltaic base of “around the Bohai Sea and along the Yellow Sea”, which opened the prelude to the development and utilization of offshore photovoltaic resources. However, compared with onshore photovoltaic, the development of offshore photovoltaic resources will face a complex and harsh Marine environment, and the selection of offshore foundation is particularly important. Based on this, this paper describes the different types of offshore photovoltaic support structures of the offshore (or water surface) photovoltaic, combined with the current mainstream structural forms of photovoltaic support, and comprehensively analyzes their advantages and disadvantages, so as to provide reference for the development of subsequent offshore photovoltaic projects.

Keywords

shallow coastal waters; offshore photovoltaic; support structure

中国山东近海浅海水域海上光伏支撑结构选型分析

刘贵学 魏振景 李振

国家能源集团山东电力有限公司, 中国 · 山东 济南 250000

摘 要

2022年6月, 山东省发布《山东省海上光伏建设工程行动方案》, 将打造“环渤海、沿黄海”双千万千瓦级海上光伏基地, 拉开了海上光伏资源开发利用的序幕。但相比于陆上光伏, 海上光伏资源的开发将面临复杂恶劣的海洋环境, 海上基础选型尤为重要。基于此, 论文结合目前光伏支撑主流结构物形式, 描述了已建或已开展实证试验的海上(或水面)光伏的不同海上光伏支撑结构型式, 并综合分析其优缺点, 为后续海上光伏项目开发提供借鉴参考。

关键词

浅海水域; 海上光伏; 支撑结构

1 引言

海上光伏是为了新能源开发的趋势, 目前山东省已完成 10 个场址的竞配工作, 竞配场址位于“环渤海、沿黄海”海域, 水深为 10m 以内, 基础结构推荐选用桩基固定式结构。

目前海上光伏建设尚无成熟建设方案, 论文结合已实施的陆上、滩涂及实证的海上光伏支撑结构等, 从结构特点、海洋环境特点、施工方案的可行性等方面分析了漂浮式、柔性支架固定式方案、单桩联排固定式方案、单向桁架固定式方案、小型双向钢桁架方案、大型双向桁架方案的特点及其适用性, 为后续海上光伏项目开发提供参考。

2 漂浮式方案

漂浮式方案目前主要是应用于湖面、水库光伏系统的

型式, 常见的结构浮体型式主要为 HDPE 浮体 + 不锈钢支架。浮体系泊系统的系泊缆一般采用钢丝绳、纤维绳、电焊锚链或其相互组合, 下部的锚固基础可采用桩基固定。漂浮式结构方案成熟, 安装灵活, 运维可达性强。同时, 水体距离光伏组件距离近, 对组件冷却效果好, 可以抑制组件表面温度上升, 从而获得更高的发电量。浮体多用高密度聚乙烯材料, 抗腐蚀耐老化能力强。应用于湖面、水库光伏的该支撑结构方案具有一定的承载能力局限性, 不适用于海上光伏恶劣环境。

目前实证的海上漂浮式光伏项目方案有环形抗风浪浮体光伏支撑结构、半潜式光伏支撑结构等。

环形抗风浪浮体光伏系统由环形抗风浪浮体、耐海洋环境高强弹性薄膜、光伏系统和风光送出系统等组成。其中, 环形抗风浪浮体由高密度聚乙烯管件预制, 高度 0.6~0.8m, 通过 4 个系泊点和 12 条缆索锚固于海床浮体中间安装新型光伏组件平台, 依据海况采用定制化光伏发电组件, 可减少

【作者简介】刘贵学(1983-), 男, 中国山东菏泽人, 工程师, 从事新能源项目开发研究。

波浪对光伏面板的冲击和腐蚀；光伏组件采用预制滑轨与弹性薄膜连接，并通过薄膜直接与海水接触。环形抗风浪浮体光伏方案示意图如图1所示。

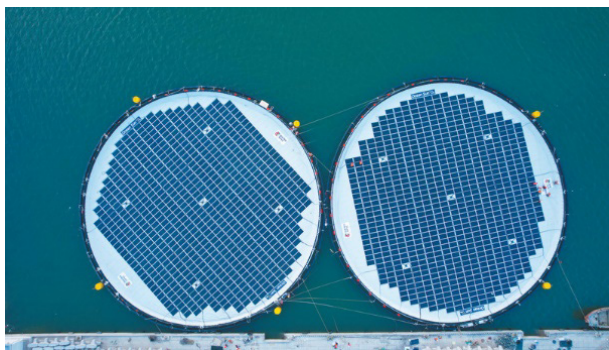


图1 环形抗风浪浮体光伏方案示意图

半潜式光伏支撑结构目前实证项目有多体支撑结构和单体支撑结构两种方案。

多体支撑结构由浮式结构支撑系统、浮力材料系统、多体连接及系泊系统、护舷防撞系统、光伏发电及逆变系统、智能监测系统、动态海缆输电系统及电力消纳系统等八个系统构成。4个单个浮体方阵平台总净甲板面积约为1900m²，装机总容量达400kWp，方案设计可满足浪高6.5m、风速34m/s、4.6m潮差的开阔性海域安全运行。

单体支撑结构由浮筒、浮筒间连系梁结构、系泊系统、光伏发电系统、监测系统、通航警示系统等构成。平台甲板面积约300m²，是国内首个用于海上光伏关键设备技术实证和发电系统方案测试的海上漂浮式平台，平台采用“田”字浮管和锥型浮筒框架平台体系，结合重力锚和悬链线系统，有效克服了外海高波浪和高潮差造成的水动力稳定性影响，并实现了消解波浪响应，避免工作条件下光伏板上浪问题。此外，平台还通过多种材料综合应用和优化结构平台—锚泊系统施工技术，一定程度上解决了海上漂浮式光伏低成本开发问题。可用于水深20m、设计波浪5m、设计潮差5m的复杂条件外海环境。

漂浮式结构存在的主要缺点有：湖泊、水库漂浮式结构整体结构承载能力弱，恶劣环境适应性差；浮体结构不抗冻胀，在冰区较严重海域不适用；浮体高度不大，抗水位变动及波浪变幅能力差。实证漂浮式海上光伏系统仍处于研究阶段，可成熟商业化应用的方案尚未形成，且目前投资较高，项目收益低，短时间内难以商业化大面积推广。

3 柔性支架固定式方案

柔性支架固定式结构是指由柔性承重索、钢立柱、钢斜柱或斜拉索、钢梁及基础组成的一种支架，具有结构简单、材料使用少、质量轻、建设周期短等传统支架所缺乏的优点。柔性支架具有跨度大且跨度范围灵活可调、布置方案灵活、用钢量较少、基础占用面积小、安装灵活方便等优点。柔性支架方案示意图如图2所示。



图2 柔性支架方案示意图

柔性支架主要的缺点有：具有非常大的几何非线性特征，自振频率比较低，对风荷载非常敏感，在风荷载作用下易于产生较大的变形和振动，风荷载将成为柔性光伏支架的控制荷载，大风天气容易发生风振现象，导致组件出现隐裂。由于海上环境恶劣且复杂，需承受风、浪、流等动荷载作用，柔性支架易发生不规则变形等，为抵抗外荷载作用，桩基及拉索等设计刚度要求很高，工程量降低优势不明显。此外，柔性支架需海上组装，施工难度及风险极大。

4 单桩联排固定式方案

单桩联排方案是借鉴陆地光伏支撑结构设计方案，考虑近岸海域海洋环境特点，进行设计改进形成的一种设计方案，目前多用于滩涂光伏项目。结构采用单排PHC管桩上支撑支架结构，支架上铺设檩条支撑光伏组件，每排桩支撑两排光伏组件。前后排桩通过水平撑和剪刀撑进行加固，增加整体的承受外荷载能力，结构型式简单。

本方案整体刚度较低，随着海洋水深增加，桩基长度及直径快速增加，工程造价也大幅提高，经济性较差。此外，该方案的海上支架、组件安装和电气接线和桩间撑杆连接等人工散装工程量较大，存在海上人工散装作业风险大、海事审批难、工期长等问题，在海上实施难度极大。

5 单向桁架固定式方案

单向桁架固定式方案下部采用桩基础固定于海床，南北向采用单向桁架结构支撑于桩顶，上部光伏板主要是坐落在两榀钢桁架之间的檩条上。相比于漂浮式方案、柔性支架固定式方案和单桩联排固定式方案，整体结构刚度明显提高，结构抗外荷载能力强，海上恶劣环境适用性更强。

但檩条受限于本身结构安全性，使得两榀钢桁架之间的间距较小，基础用桩数量较大。

此外，该方案相比于单桩联排固定式方案，海上作业明显减少。但桁架及檩条、组件安装和电气接线等工程量仍较大，存在海上人工作业风险大、海事审批难、工期长等问题，海上实施难度很大。

6 小型双向钢桁架方案

小型双向钢桁架方案为光伏组件基础采用标准化小型钢结构模块设计，上部满铺光伏组件，提高上部面积利用率，

无需再设支架,结构整体性好,刚度高,抵抗外荷载能力强。小模块倾角更接近最佳倾角,尽量增加发电量,提高收益。小型桁架方案一般由4根PHC管桩基础和上部桁架结构组成,整体结构刚度较大,抗风、浪、流等环境荷载能力强。上部桁架结构及上部组件、附属电气等设备可实现陆上整体预制与安装,海上整体吊装,可大大减少海上作业工程量。模块小型化、轻量化,吊装施工资源适用性较强。小型桁架对水深及船机资源等限制较小,方案具备广泛适用性,方案可复制性较高。小型双向钢桁架方案示意图如图3所示。



图3 小型双向钢桁架方案示意图

7 大型双向桁架方案

双向桁架方案为光伏组件基础采用标准化大型钢结构模块设计,上部满铺光伏组件,面积利用率高。结构一般由4根钢管桩基础和上部桁架结构组成,整体结构刚度较大,抗风、浪、流等环境荷载能力强。上部桁架结构及上部组件、附属电气等设备可实现陆上整体预制与安装,海上整体吊装,可大大减少海上作业工程量。相比于小型桁架方案,双向桁架尺寸更大,上部桁架、桩基数量明显减少,海上施工作业工作量明显降低。可将组件、逆变及组件间和组件与

逆变器间的电缆陆上敷设,集成化程度更高。但大型双向桁架方案对船机资源及其适用水深等环境要求高,需针对不同场址情况定制化设计。

8 结语

受限于结构自身特点,漂浮式方案和柔性支架方案结构整体刚度弱,抵御恶劣环境条件差,很难应用于海上光伏项目。

单桩联排固定式方案和单向桁架固定式方案结构整体刚度较弱,能够抵御一定强度的环境载荷,但其需海上作业工程量较大,项目实施安全风险较大,工期较长,可用于环境相对较好,施工船舶无法进场施工的滩涂、海湾内等海洋区域。

小型双向钢桁架方案和大型双向桁架方案整体刚度大,抵御恶劣环境条件能力强,可应用于环境较为恶劣的外海海域环境。同时,两种方案大部分作业实现了陆地化,钢结构的加工制作、光伏组件安装、逆变器安装、部分线路接线均可在陆域码头完成,大大降低了海上工作量。但小型双向钢桁架方案可适用于水深更浅和对船机资源要求低,外海环境适用性更好。大型双向桁架方案集成化程度更高,相比于小型双向钢桁架方案同等规模桩基及上部桁架结构工程量明显减少,经济性更好。因此,在外海海域海上光伏开发中,尽量选用大型双向桁架方案。若受限于水深、施工船机资源等外在因素的影响,可考虑选用小型双向桁架方案。

参考文献

- [1] 刘飞.柔性光伏支架结构设计探讨[J].中国电气工程学报,2023(4).
- [2] 王雨.光伏组件柔性支架技术方案[J].太阳能,2018(3):37-40.
- [3] 全球首个深远海风光同场漂浮式光伏实证项目成功发电[J].建材技术与应用,2022(6):80.
- [4] 高彤.向海追光[J].创新世界周刊,2022(11):54-55.