

水上光伏电站设计要点和经济性分析

北京计鹏信息咨询有限公司 ■ 高赞 赵娜* 贺文山 焦姣

摘 要: 从技术角度介绍水上光伏电站的基本形式——桩基固定电站和水面漂浮式电站,着重从发电量估算、设备选型和基础形式选择,阐述两种基本形式的水上光伏电站特点及设计要点,并给出初步方案。通过分析水上光伏工程量变化因素、特殊设备单价、发电量变化等,计算不同形式水上光伏电站的收益情况。研究表明,水上光伏电站的收益比传统地面电站的收益相对较好,水面漂浮电站经济性更好的结论。

关键词: 水上光伏电站; 光伏组件; 基础; 经济性; 设计要点

0 引言

水上光伏电站近两年开始在国内发展起步,成为解决光伏电站土地和地域发展瓶颈的又一重点方向。水上光伏电站按基础形式可分为桩基(桩柱式基础)固定电站和水面漂浮电站两种。其中桩基固定电站的基础与传统光伏电站相同,组件支撑于支架上,支架固定于桩上;主要区别是桩布置于水中,增加造价及施工难度,但有利于组件清洗,并可节约用地。水面漂浮电站一般应用于水域深度较大的区域,利用塑料浮体的浮力承受光伏组件及相关设备的重量,并将浮体固定于岸边或水底。按形式分为“浮体+光伏组件”和“浮体+支架+光伏组件”两种。

本文从技术角度介绍不同形式水上光伏电站的特点及设计要点,给出初步方案,并分别分析收益情况。



a. 桩基固定电站



b. 水面漂浮电站

图1 两种形式的光伏电站图

1 水上光伏电站设计要点

水上光伏电站设计主要包括资源分析、发电

收稿日期: 2017-05-26

通信作者: 赵娜(1982—),女,注册咨询师(投资)、经济师、硕士,主要从事太阳能发电技术经济方面的研究。zhaona@ndrc-jp.cn

量估算、设备选型和基础形式选择 4 个方面。其中，资源分析与普通地面电站的方法相同，本文主要论述发电量估算、设备选型和基础形式选择的设计要点。

1.1 发电量估算

水上光伏电站与地面电站相比差异主要体现在温度和反射率两个方面。

1.1.1 温度

在太阳电池温度升高时，其开路电压下降，输出功率减少。夏季水体吸收太阳热量相比陆地更多，水面发挥冷却效应，提高了组件的发电量。冬季虽然水温略高于陆地，但影响较小。综合分析可知，水上光伏电站发电量相比地面电站受气温变化小，发电量比陆地的发电量大。

1.1.2 反射率

光伏组件倾斜面上的辐射量由太阳直接辐照量、散射辐照量和地面反射辐照量 3 部分组成。地面反射辐照量与地面的反射率成正比，反射率越大，反射辐照量越大，发电量也就越大。不同地物表面状态对应的反射率情况见表 1。由表 1 可知，水表面的反射率相对较高，水上光伏电站由于水的反射率会增加光伏电站发电量。

表 1 不同地物表面的反射率表^[1]

地物表面的状态	反射率
沙漠	0.14~0.28
干燥地	0.10~0.20
湿裸地	0.08~0.09
干草地	0.15~0.25
湿草地	0.14~0.26
森林	0.04~0.10
新雪	0.81
残雪	0.46~0.70
水表面	0.69

1.1.3 其他影响因素

其他可使水上光伏电站发电量提高的方法有：

- 1) 桩基础组件可按最佳倾角布置；
- 2) “浮体 + 支架 + 光伏组件”可按最佳倾角布置。“浮体 + 光

伏组件”电站除外，因其倾角一般为 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ ，未必是该地区的最佳倾角，该类型电站主要集中在中东部、南部地区，最佳倾斜角度偏低，角度对于水面电站发电量的影响不大。以安徽某地为例，浮体角度 12° 和最佳倾角条件下，倾斜面上的辐射量相差 1.4%。

根据国内外的水上、传统地面光伏电站对比实验结果，与在屋顶及陆地上以相同角度设置的光伏组件相比，水上光伏发电量可增加 $5\%\sim 15\%$ ^[2]。

1.2 设备选型

1.2.1 组件

水上光伏电站应优选双玻组件。传统晶硅光伏组件的背板有一定的透水率，透过背板的水汽使劣质的 EVA 树脂很快分解析出醋酸，而导致组件内部发生电化学腐蚀，增加了出现 PID 衰减和蜗牛纹发生的概率。

双玻组件无铝边框、可抗 PID、玻璃材质散热快、温差小，非常适合水上光伏电站建设使用^[3]。

1.2.2 逆变器、汇流箱

普通地面电站选择的逆变器是室内防护等级为 IP20，可满足防止中等大小的固体侵入，无防水保护，室外采用 IP54 防护等级，可满足防止有害的粉尘堆积；水上光伏电站逆变器宜采用 IP65 防护等级，可满足完全防止粉尘进入，用水冲洗无任何伤害；对于水域情况复杂，建议采用更高的 IP67 防护等级，可满足完全防止粉尘进入，可于短时间内耐浸水 1 m。汇流箱常规电站常采用 IP65 防护等级，水上光伏电站建议使用 IP67 防护等级。汇流箱、逆变器、钢支架等设备防腐能力和电缆抗老化要求相对较高^[4]。

1.2.3 浮体

传统浮体用于码头、浮桥等，经过加工也可用于光伏电站。浮体总分为单体浮体、连体浮体及线管型浮体。光伏浮体主要由主浮体、过道平台和连接销栓组成，目前已有多家厂家生产只用

于光伏项目的光伏专用浮体，倾角在 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ ，寿命为 25~30 年，价格在 1.2~1.5 元/W。

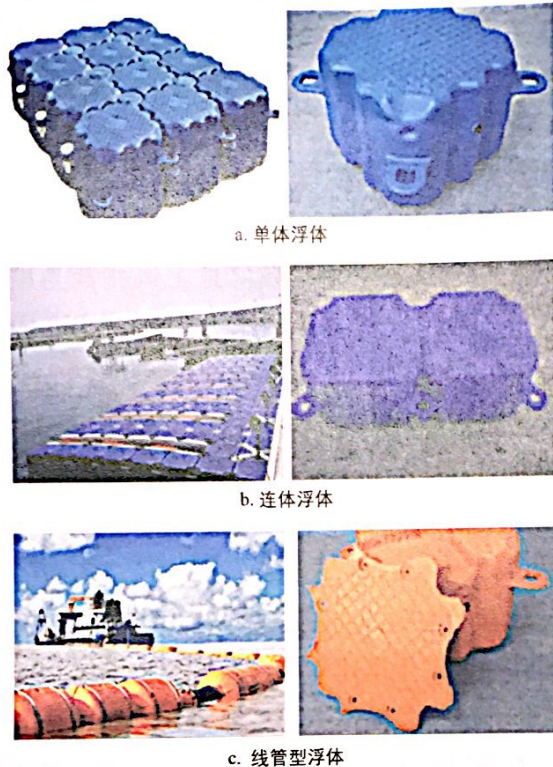


图 2 不同形式的浮体图

主浮体为光伏组件、汇流箱等提供足够的浮力，并将光伏组件、汇流箱安装固定在上面。由于主浮体为一独立体，因此可避免因风浪所引起的力传递到组件上。而且主浮体可根据需求在一定范围内（一般不超过 20° ）调整倾角；过道平台属于维护通道，与主浮体进行连接紧固，保证整个光伏电站平台的稳定性，为客户后续运维提供便捷通道；连接销栓连接主浮体与维护通道，使光伏电站平台成为一个整体，保障整个光伏电站平台的安全性。抗剪切、抗拉伸等力学性能需进行受力计算及相关力学试验。

目前，光伏电站主要采用聚乙烯浮体，其优点是耐腐蚀、低密度、抗冻胀、抗风浪、寿命长、可重复利用；缺点主要是易燃、光氧化、热氧化、臭氧及紫外线分解，支架易腐蚀。处理方法是聚乙烯浮体进行安装前预处理，防止降解，目前专门做光伏浮体厂家的浮体质量较好，符合使用要求，一般抗风性能好（风洞试

验）、抗冲击、耐腐蚀、防紫外线、耐高低温、对水资源无危害，环境温度范围为 $-70\sim 110^{\circ}\text{C}$ 。市面上有不少用竹竿做浮体，具有一定优势，如成本低（约为聚乙烯浮体的 17%）、回收处理简单、可再生、浮力大、吃水浅，但寿命短（只有 2~3 年），需要研究新技术处理。

1.3 基础形式

1.3.1 桩柱式基础

桩柱式基础的原理就是组件支撑于支架上，支架固定于桩上，桩布置于水中，用于水深较浅（一般小于 3 m）的池塘。该基础适用性广泛、造价合适、施工速度快，水域可兼做鱼塘，提高经济效益。缺点是船运维护、施工难度大^[4]、造价高。技术要求为：采用预制管桩、端头制作光伏支架系统。桩径需根据工程条件确定，不同水深，其作业方式不同（见表 2）^[5]。

桩柱式基础方案可行性判断步骤为：收集水域水深及地质勘察报告，根据地质勘察报告确定桩长及施工方式，进行经济性比选，评价项目

表 2 不同作业方式及特点对比表

水深/m	作业方式	特点
<3	放水清淤后打桩施工	造价低
3~6	不能放水清淤时，采用打桩船施工	需进行经济性比选
>6	打桩船施工	桩长长，不利施工，造价过高

表 3 水上打桩施工程序表

施工阶段	施工程序
设备调运	调运一台或数台水上作业平台
施工准备	使用 GPS 和测深仪，在施工区域进行探测
测量放样	以标杆标定每个桩位
桩的采购与运输	道路运输
打桩施工	使用水上定位打桩平台施工，配合驳船、液压挖泥船，路上仪器和 GPS 施工定位，将桩打至设计标高
复核桩顶标高	检查桩头和桩身是否完整，检查桩身倾斜度，不符合要求立刻补桩或重新打桩，确保质量复合要求

对水质影响的后果, 以及综合判断桩柱式基础方案可行性。

1.3.2 漂浮基础

漂浮基础应用于水域较深的区域(一般水深大于6 m的湖泊), 利用塑料浮体的浮力承受电池板及相关设备的重量, 并将浮体固定于岸边或水底。按形式分为“浮体+支架+光伏组件”和“浮体+光伏组件”两种。

1) 浮体+支架+光伏组件。通过设计合理的浮体, 将光伏组件安装于支架上, 支架固定于浮体上, 浮体漂浮于水面上。主要包括浮体、铝合金支架、浮动平台的定泊系统等。该结构可按最佳倾角进行布置, 发电量得到提高, 但铝合金及浮体用量大。

2) 浮体+光伏组件。通过设计合理的浮体, 将光伏组件用螺栓直接安装于浮体上, 浮体漂浮于水面上, 并对浮体进行固定, 主要包括浮体、浮动平台的定泊系统等。该结构用钢量少, 减轻了浮体上的重量, 安装、维护方便等, 但光伏组

件倾角受浮体限制(一般不超过 20°), 无法达到最佳倾角, 影响发电量。

浮体允许随水位变化, 但应防止其碰到岸边, 故需根据浮体离岸距离、水深等确定漂浮固定浮体的方式。浮体固定在岸边的方式为: 用绳索将浮体固定于岸边, 适用于距离岸边较近的浮体; 浮体固定在桩上, 并用绳索固定浮体, 适用于距离岸边较远的浮体, 且水深较浅水域; 浮体固定于锚块上, 适用于水深较大, 且距离岸边较远的水域。

2 水上光伏电站经济性分析

2.1 工程量

与地面光伏电站相比, 水上光伏工程变化的工程量主要有电力电缆、电缆沟、基础、支架、汇流箱、占地面积等, 从而形成水上光伏造价自身的特点。主要变化项目分类和在水上光伏电站用的特殊设备的价格总结见表4和表5。

对于桩基固定电站和水面漂浮电站两种基础

表4 水上光伏工程量变化因素表(价格以2016年第二季度为基期)

主要变化项目	普通地面电站	打桩水上光伏互补	传统浮体带支架	专用浮体不带支架
电力电缆	约2.5 km/MW		与地面光伏基本相当	
电缆沟等	5300 m ³ /MW		电缆沟土方量下降90%, 根据施工方案增加桥架等工程量	
组件基础	灌注桩约125 m ³ /MW	1330 m/MW	场区无土建基础, 增加浮体	
支架	约50 t/MW	基本不变	比常规电站增加约60%~100%	无需支架
汇流箱	约3000元/台, 67000元/MW		防水型, 提高约40%, 约5000元/台, 94000元/MW	
占地面积	30~40亩/MW	与地面基本相当	约15~20亩/MW	

表5 水上光伏特殊设备单价表(价格以2016年第二季度为基期)

设备	规格型号	单价
组件	300/265/260 W	单玻3.8元/W, 双玻4元/W
支架	铝合金, 镀锌层加厚	0.37元/W
光伏专用浮体	倾角 12° 、 15° 、 20°	1.7元/W
标准浮体	规格为500 mm×500 mm×400 mm	400~500元/m ² , 合1.2~1.5元/W
混凝土预制管桩	打桩水上电站用	125~198元/m
汇流箱	IP67防护等级	5000元/台

形式,其电气设备与安装费总体变化不大,区别是:1)桩基固定电站,基础增加量较大,总体造价比传统地面电站略高;2)漂浮电站,无基础工程量,主要增加浮体、锚固件等设备、施工组织与措施的工序复杂、工期长,工程量与常规电站相比有增有减,总体造价相差不大,甚至更节约成本。

2.2 发电量

1)桩基固定电站发电量。由于水体效应,桩基固定光伏电站与漂浮(支架)电站发电量在各类地区的发电量约提高5%~10%。

2)漂浮电站发电量。按三类电价区不同资源区分析发电量提高幅度。地面电站发电量主要取决于斜面上的辐射量,由于水上光伏电站倾角均为 12° ,与当地最佳倾角相比,在高纬度地区(I类电价区居多)斜面上的辐射量损失较低纬度地区要大,所以整体发电量的提高随着纬度提高而明显。我国中东部、南部漂浮(浮体一体化)光伏电站的发电量提高较明显。总体而言,发电量在5%~10%范围内有不同程度的提高,具体数值见表6。

表6 水上光伏特殊设备单价表

电价区	发电量比地面电站提高 (按浮体 12° 倾角)
I类电价区	0.48%~1.89%
II类电价区	4.99%~7.38%
III类电价区	4.68%~9.82%

3)收益分析。相对于地面电站,桩基固定光伏电站随着基础量增加而增加的成本抵消了发电量的提高带来的收益^[6],故体现在收益率的提高并不明显。具体数值见表7。

表7 不同电站收益率对比表

电站形式	收益率提高		相当于电价提高 /元·kWh ⁻¹
	融资前税前	资本金税后	
桩基固定	0.05%~0.77%	0.16%~2.38%	0.004~0.049
水上漂浮 (支架式)	0.6%~1.4%	1.8%~7%	0.071~0.088

漂浮(浮体一体化)电站的收益在三类电价区下,都有不同程度的提高。其中以III类电价区提高最为明显。漂浮式电站整体收益比地面光伏电站提高明显,其融资前税前内部收益率最高可提高近2%,资本金后内部收益率最高可提高8%,相当于同等资源地区提高了上网电价。具体数值见表8。

表8 漂浮(浮体一体化)电站
不同电站收益率对比表

电价区	收益率提高		相当于电价提高 /元·kWh ⁻¹
	融资前 税前提高	资本金 税后提高	
I类电价区	0.08%~0.35%	0.25%~1.4%	0.004~0.015
II类电价区	1.2%~8%	2.3%~4.5%	0.045~0.065
III类电价区	1.85%~8%	2.6%~7.9%	0.047~0.092

3 结论

综上所述,随着规模的扩大,施工经验的累积,漂浮水上光伏电站经济性更好。

水上光伏电站的建立,一方面可利用闲置或废弃的水面资源开发出清洁电力能源,提高土地综合利用效益,另一方面也可有效解决煤矿采空区路面沉降等矿区治理再利用问题。目前,我国水上光伏电站刚起步,普及并不广泛,相关政策和制度规范还未建立完善。但随着土地利用形势的紧张,光伏发电转移到水上或将成为我国光伏发电的另一重点方向。

参考文献

- [1] 杨金焱. 太阳能光伏发电应用技术(第2版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [2] 焦姣. 水上漂浮式光伏电子发展现状. 太阳能发电[J]. 2015, (75): 49-52.
- [3] 万小强, 高杨. 高效抗PID双玻光伏组件, CN104157711A[P]. 2014.
- [4] 戚小园, 袁勤. 水上太阳能光伏电站电气系统设计研究[J]. 电子世界, 2016, (24): 173.
- [5] 焦家训, 王直成. 水上钻孔灌注桩施工技术及应用探讨[A]. 第八次水利水地地基与基础工程学术会议论文集[C], 2006.
- [6] 国家发展改革委, 建设部. 建设项目经济评价方法与参数(第三版)[M]. 北京: 中国计划出版社, 2005.