

柬埔寨某水面光伏发电工程总体方案比选分析

莫海蓉

云南东南亚经济技术投资实业有限公司, 云南 昆明 650100

[摘要]水面光伏发电工程凭借着发电量大、建设周期短、土地占用少、有利于优化能源消费结构,具备规模化开发的潜力,已逐渐成为投资者争相参与的热点项目。水面光伏发电工程总体方案设计是该工程设计的重要环节,合理的总体方案设计有助于实现项目经济效益、缩短施工周期、便捷运营管理。文章以柬埔寨某水面光伏发电项目为例,通过开发规模、电气系统、土建工程等方面进行方案比选,确定最佳方案,东南亚地区同类水电光伏项目的开发建设提供技术参考和实践经验。

[关键词]柬埔寨;水面光伏发电;总体方案;方案比选

DOI: 10.33142/hst.v8i8.17339

中图分类号: TV672

文献标识码: A

Overall Scheme Comparison and Analysis of a Water Surface Photovoltaic Power Generation Project in Cambodia

MO Hairong

Yunnan Southeast Asia Economic and Technological Investment Industrial Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650100, China

Abstract: Water surface photovoltaic power generation projects have gradually become a hot topic for investors to participate in due to their high power generation, short construction period, low land occupation, and the potential for large-scale development, which is conducive to optimizing energy consumption structure. The overall scheme design of water surface photovoltaic power generation project is an important part of the project design. A reasonable overall scheme design can help achieve project economic benefits, shorten construction period, and facilitate operation and management. The article takes a water surface photovoltaic power generation project in Cambodia as an example, compares and selects the best plan through development scale, electrical system, civil engineering, and other aspects, and provides technical reference and practical experience for the development and construction of similar hydropower photovoltaic projects in Southeast Asia.

Keywords: Cambodia; water surface photovoltaic power generation; overall plan; scheme comparison

引言

近几年,柬埔寨国经济发展迅速,人民生活水平持续提高,电力需求快速增长。然而,该国电力供应结构过度依赖水电,在干旱少雨季节,电力供应缺口严重,严重影响该国的经济发展及社会稳定。亚洲开发银行最新研究报告指出,柬埔寨平均日照时间为6~9h/d,平均日辐射量为5kWh/m²,太阳能资源非常丰富,水平面年太阳总辐射量处于1607~2045kWh/m²的区间,具备大规模开发利用太阳能资源的良好条件。以菩萨省斯某水电站库区为例,该处太阳总辐射量年均超过1700kWh/m²,太阳能资源属“资源很丰富”等级,是理想的光伏发电厂址,另外采用水面光伏技术,可实现“水光互补”的协同效应,是水面光伏发电项目绝佳选址。

本文以柬埔寨某水面光伏发电项目为例,开展水面光伏发电工程总体方案设计。在设计过程中,结合工程实际现状及各方面影响因素,由整体到局部展开分析,通过多方案比选,选择技术合理、设计先进、投资效益好,环境友好的建设方案。

1 项目概况

1.1 地理位置与自然条件

项目位于柬埔寨菩萨省某水电站一级水库水电站坝

前水库中比较开阔的水面区域,场址南面与国公市相距约60km,北面距离列文县城约为60km。光伏场区占水面总面积约237万m²,一级水库正常蓄水位515.0m、设计死水位510.0m,水位变化较大。库区属于典型的热带季风气候,水文气象条件如表1所示。

表1 项目水文气象条件表

序号	气象要素	单位	数值
1	多年平均气温	°C	25.9
2	多年极端最高气温	°C	40.5
3	多年极端最低气温	°C	13.3
4	年平均降水量	mm	2650
5	年平均蒸发量	mm	1440
6	年平均降水量	%	77
7	年最大风速	m/s	20
8	年平均风速	m/s	2.5

经分析,场区水文气象条件对光伏发电电池组件及逆变器安全性影响较小,在进行组件支架设计时需要考虑风荷载的影响,地处水电站水库区,水面不仅可以稳定气温,还对太阳辐射会有一定反射作用,有助于光伏电站的发电

效率,需要注意的是水面周边湿度较大,在进行设备选型要考虑具有抗 PID 功能的设备。

1.2 太阳能资源

按照《太阳能资源评估方法》(GB/T 37526—2019)要求,太阳能资源丰富程度以太阳总辐射年总量为指标可划分成 4 个等级,如表 2 所示。

表 2 太阳能资源丰富程度等级

序号	太阳总辐射年总量	资源丰富程度
1	$\geq 1750\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$	资源最丰富
	$6300\text{MJ}/(\text{m}^2\text{a})$	
2	$1400\sim 1750\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$	资源很丰富
	$5040\sim 6300\text{MJ}/(\text{m}^2\text{a})$	
3	$1050\sim 1400\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$	资源丰富
	$3780\sim 5040\text{MJ}/(\text{m}^2\text{a})$	
4	$< 1050\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$	资源一般
	$< 3780\text{MJ}/(\text{m}^2\text{a})$	

依据 Meteoronorm7.1 数据库综合评估可得到所在地水平面太阳总辐射量年均均为 $6182.68\text{MJ}/\text{m}^2$,经换算约为 $1717\text{kWh}/\text{m}^2$,按照太阳能资源评估标准,属于“资源很丰富”等级,接近于“资源最丰富”程度,且光资源稳定,因此,所选场址具有较高的太阳能资源开发利用价值,适合建设大型光伏发电。

1.3 方案设计背景

柬埔寨经济发展迅速,对电的需求日益增强;该国太阳能资源充足,光伏发电技术成熟,可进行光伏发电开发以增加发电量;既有水电站受雨水影响,发电量不稳定,而水面光伏电站通过“水光互补”协同机制,采取“日夜互补”“季节互补”等方式,可实现“水电+光电”形式电力的稳定可靠供应。

2 总体布置方案设计

工程总体方案设计的选定需要通过多方案比选,本次结合开发规模、电气工程及土建工程等方面因素,综合开展水面光伏电站工程总体方案设计。

2.1 开发规模

既有水电站为坝后式电站,水库设计正常蓄水位 515m,死水位 510m,经现场调查,电站在枯水期的实际运行水位已低于死水位 510m,大约为 508m。因此,水面光伏项目漂浮式光伏发电系统按照水位高程低于 510m 与 508m 这两种情况,进行不同方案规划。

鉴于工程所处水域面积较大,为降低成本,设计、组装方便,采用了“分块发电、集中并网方案”的“模块化”技术方案。分块发电基本单元为光伏子方阵,方阵采用两级汇流的方案,每 30 块 690Wp 单晶硅光伏组件组成一个光伏串列,每 14~15 串接入一台直流汇流箱,每 14 台直流汇流箱接至 1 台 3150kVA 的箱变逆变一体机(含低压柜),从而组成一个 4.14MWp 的光伏子方阵。

规划一(508m 水位线)可利用水域面积 2051012m^2 ,按照规则布置原则,可布光伏子方阵 27 个,光伏电站占用面积 880020m^2 ,占用面积比 42.91%,装机容量直流侧 111.78MW、交流侧 84.375MW,年均发电量 15224.20 万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

规划二(510m 水位线)可利用水域面积 3614197m^2 ,按照规则布置原则,可布光伏子方阵 41 个,光伏电站占用面积 1336327m^2 ,占用面积比 36.97%,装机容量直流侧 173.88MW、交流侧 131.25MW,年均发电量 23682.09 万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

综上,规划二的装机规模、水面利用面积和年发电量均优于规划一,因此选择规划二。

2.2 电气工程

2.2.1 接入系统方案

本水面光伏项目依托于既有水电站,而现有的一级电站~欧桑 115kV 线路容量无法满足光伏电站输送容量要求,需单独新建送出线路至 230kV 欧桑变。

通惠水面光伏电站拟新建一回 115kV 或 230kV 线路至欧桑变,线路长度约为 10.5km,两种接入方案具体如下:

方案一:水面光伏电站以 115kV 电压等级接入 230kV 欧桑变。本方案水面光伏电站新建一台 115kV 主变压器,采用一回 115kV 线变组间隔送出,送出线采用一回 115kV 架空线路接入 230kV 欧桑变,线路长度约为 10.5km,230kV 欧桑变侧新建一个 115kV GIS 间隔,一台 230kV 主变。

方案二:水面光伏电站以 230kV 电压等级接入 230kV 欧桑变。本方案水面光伏电站新建一台 230kV 主变压器,采用一回 230kV 线变组间隔送出,送出线采用一回 230kV 架空线路接入 230kV 欧桑变,线路长度约为 10.5km,230kV 欧桑变侧新建一个 230kV 常规设备间隔。

两个方案均能满足输送要求,从成本投入方面分析两种方案主要不同处工程量,得出:方案一较方案二电气一次设备投资高约 258 万元、送出线路部分设备投资低约 680 万元,电气二次设备投资低约 81 万元,总设备投资低约 503 万,因此优选方案一,光伏电站以 115kV 电压等级接入对侧 230kV 欧桑变。

2.2.2 115kV 配电装置选型与布置

水面光伏项目升压站 115kV 进线 1,出线 1 回,采用线变组接线。115kV 配电装置可选方案有两个:(1) SF6 全封闭组合电器(GIS)设备户外布置,(2) 常规设备户外敞开式布置,两者对比分析如表 3 所示。

表 3 115kV 配电装置方案对比分析表

序号	方案名称	方案特点
1	方案 1: 采用 GIS 设备户外布置	占地面积少;运行可靠性高,外绝缘事故少;GIS 设备价格与常规敞开式设备相比稍高
2	方案 2: 采用常规设备户外敞开式布置	设备成熟可靠,与 GIS 设备相比具有价格优势;设备状态明晰,符合常规调度命令,维护简单;占地面积较大

经分析,方案1虽然价格高于方案2,但其具有占地面积少、可靠性高、免维护等优点,出于安全考虑,优选方案1,即采用SF6全封闭组合电器(GIS)设备户外布置。

2.3 土建工程

本工程大部分设备置于水面之上,因依托水体环境,其土建设计、施工及材料选择需充分适应水上特殊条件。下面重点分析光伏板基础开展材料及结构分析。

(1) 浮体材料

对比分析高密度聚乙烯、发泡混凝土及竹子,见表4。

表4 浮体材料方案对比分析表

序号	材料名称	材料特点
1	高密度聚乙烯	耐腐蚀,耐气候性强,寿命长,维修成本低,无污染、不破坏环境,浮筒韧性好,抗环境应力开裂性强,承载力高,重量轻,耐磨性强,便于安装和搬运,运输转移成本低,材料成本相对较高
2	发泡混凝土	轻质,整体性能好,低弹减震性好,耐腐蚀性能好,环保性能好,材料价格低,强度偏低,易开裂、吸水
3	竹子	易获取,环保性能好,易腐蚀生虫,加工、运输麻烦

对比分析可知,高密度聚乙烯由于其耐腐蚀等优点,依然是现在水面光伏浮体的主要材料,其主要缺点是造价较高会随着材料制造技术的进步而逐渐弱化。

(2) 支架材料

对比分析玻璃钢、不锈钢及镀锌钢,见表5

表5 支架材料方案对比分析表

序号	材料名称	材料特点
1	玻璃钢	质轻而硬,不导电,性能稳定,机械强度高,回收利用少,耐腐蚀,弹性模量低,长期耐温性差,易老化
2	不锈钢	耐化学腐蚀和电化学腐蚀,耐热、耐温,力学性能好,工艺性能好,造价昂贵
3	镀锌钢	耐腐蚀能力强,力学性能较低,使用寿命较低,材料价格中等

由于考虑到老化等情况,镀锌钢或者不锈钢是现在主要的选择,但不锈钢造价较高,因此一般离水面较远的地方首选镀锌钢,离水面较近的地方需要选择不锈钢。本项目考虑到经济性及使用寿命等情况,不采用支架形式,而是采用全浮体形式支撑光伏组件,既比不锈钢具有更好的经济性,也避免了镀锌钢的使用寿命问题。

(3) 光伏阵列浮体

本工程光伏组件采用全漂浮式水上固定方式,利用漂浮物柔性相连形成漂浮式基础,将光伏组件、逆变器、汇流箱、电缆等器件固定在漂浮式基础上,利用锚固系统形成可抵抗风、浪、流的漂浮式水面光伏浮体阵同时也减少维护时的停电时间方面远高于敞开设备列。目前漂浮式水面光伏浮体形式主要有全浮体式、浮体支架式和浮管式。其特点见表6。

表6 支架材料方案对比分析表

序号	结构名称	结构特点
1	全浮体式	优势:该支架系统仅使用少量的钢连接件,无须钢支架,用钢量少,减轻浮体上重量。连接件少,安装及维修更换简单方便。环境友好,对环境产生的影响小。 劣势:需要浮体数量较大,成本稍高
2	浮体支架式	优势:可调整光伏组件倾角,以达到最佳照射角度,提高发电量。 劣势:连接件多,安装复杂;用钢量大,光伏电站总体重量大导致浮体用量有一定的增加。由于钢结构用量大,方阵整体刚性强、柔性不足,整体稳定性差。
3	浮管式	优势:浮管作为浮体主要优点是原材料易获取,加工简单,通过浮管的长度优势,可以大幅减小连接件数量。 劣势:浮管形式最大的问题是浮力与负重不均衡,造成方阵凹凸不平。且浮管式因为横向贯通,一处破损会导致整行浮体下沉。



图1 全浮体式



图2 浮体支架式



图3 浮管式

以上三种支架形式,全浮体形式的稳定性、可靠性更好。基于目前市场上全浮体形式应用最多,本项目推荐使用全浮体式水面光伏发电系统。

3 总体方案确定

本水面光伏项目采用510水位线规划规模,采用41

个光伏子方阵,实现装机容量直流侧 173.88MW、交流侧 131.25MW,年均发电量 23682.09 万 kW·h。电气一次接入系统以 1 回 115kV 线路接入 230kV 欧桑变电站,线路长度约 10.5km;电气主接线采用防水电缆敷设在设备平台上的槽盒内,再接至新建的 1 个 115kV 升压站,各光伏方阵配套的箱变逆变器一体机布置于方阵中心或靠近道路处,直流防雷汇流箱就近安装于浮体上,115kV 配电装置、35kV 配电装置、接地变、二次设备、储能系统、无功补偿装置均采用预制舱布置,主变压器设计采用户外布置型式,115kV 配电装置采用 GIS 设备,35kV 配电装置室布置 35kV 户内手车式开关柜,主变 35kV 侧与 35kV 屋内配电装置连接采用全绝缘铜管母线;光伏组件拟采用全漂浮式水上固定方式,利用漂浮物柔性相连形成漂浮式基础,将光伏组件、逆变器、汇流箱、电缆等器件固定在漂浮式基础上,利用锚固系统形成可抵抗风、浪、流的漂浮式水面光伏浮体阵列。

经测算,项目静态总投资 73918.46 万元,工程建设动态投资(不含流动资金)75710.64 万元,工程总投资(含流动资金)76232.28 万元,建设期利息 1792.18 万元。单位千瓦静态投资 4251 元/kW,单位千瓦动态投资 4354 元/kW。建设工期为 12 个月。

经评估,项目按上网电价 0.5039 元/kWh 进行测算,相应项目投资财务内部收益率所得税前为 13.72%,税后为 13.15%;资本金财务内部收益率 20.82%;投资回收期为 7.61 年;总投资收益率为 9.16%,投资利税率为 7.19%,资本金净利润率为 21.09%,因此项目具有较好的盈利能力,在财务上是可行的。

4 结论与建议

本文从开发规模、电气工程及土建工程三个方面进行了多方案比选,分析各方案的优缺点,综合考虑水位情况、

施工条件、运营管理、工程投资、经济效益等方面,最终确定水上光伏发电工程的总体方案:510m 水位线设计 173.88MWp 装机规模的水电光伏工程,一次电气以 1 回 115kV 线路接入 230kV 欧桑变电站,进而并入当地电网;光伏组件采用全漂浮式水上固定方式,利用漂浮物柔性相连形成漂浮式基础,将光伏组件、逆变器、汇流箱、电缆等器件固定在漂浮式基础上,利用锚固系统形成可抵抗风、浪、流的漂浮式水面光伏浮体阵列。电站建成后运行期 20 年内的平均上网电量 23682.09 万 kWh,年等效满负荷运行小时数约为 1361.98h,经财务评价,投资回收期为 7.61 年,总投资收益率为 9.16%。以本水面光伏项目为例的工程布置科学合理,可为类似水上光伏项目布置提供参考。

【参考文献】

- [1]丁晓霞.山西开发水上光伏项目的技术方案研究与应用[J].山西水利科技,2023(1):34-36.
- [2]赵树林,柳振海,黄玉佩.水上光伏电站支架基础形式研究[J].中国勘察设计,2023(1):53-55.
- [3]陈传帅.煤矿塌陷区 90MW 水面光伏项目结构优化和可靠性分析[J].四川建材,2025,51(3):118-120.
- [4]徐冬华.水上光伏发电升压站结构设计探讨[J].居舍,2025(12):115-118.
- [5]喻旭明,张可,陈睿锋.模块化大跨度水上光伏支撑系统[J].太阳能,2024(1):89-94.
- [6]翁赞,李德江,苏丽君,等.“以竹代塑”产品在海洋领域新应用:竹基海上光伏平台[J].世界竹藤通讯,2023,21(6):51-54.

作者简介:莫海蓉(1988.6—),女,毕业院校:湖北工业大学,所学专业:工程管理,当前就职单位:云南东南亚经济技术投资实业有限公司,职务:计划风险,职称级别:工程师。