

文章编号:1673-9469(2022)03-0077-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2022.03.012

水面漂浮式光伏电站的适用性及设计要点

高普兵¹,王森¹,高鹏斌¹,赵方奇¹,潘成程²,郭煜³,刘润^{4,5}

(1. 中石化新星(天津)新能源有限公司,天津 300450;2. 阳光水面光伏科技有限公司,安徽 合肥 230000;
3. 江苏一诺电力工程有限公司,江苏 镇江 212000;4. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室,
天津 300072;5. 河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

摘要: 对比分析了多种水面漂浮式光伏电站的浮体结构形式优缺点,阐明了水面漂浮式光伏电站的技术特点与发展方向,并针对漂浮式光伏电站锚固系统所面临的水位变动及锚缆拉力不均等问题提出了应对的锚固系统方案,推导了锚固力及配重块或浮球体积的计算方法。最后,还对漂浮式光伏电站的电气系统设计与安装给出了建议。

关键词: 漂浮式光伏电站;浮体结构;锚固系统;配重块;浮球;电气系统

中图分类号:TM615

文献标识码:A

Floating Photovoltaic Power Plant: Applicability and Design Key Points

GAO Pubing¹, WANG Sen¹, GAO Pengbin¹, ZHAO Fangqi¹, PAN Chengcheng², GUO Yu³, LIU Run^{4,5}

(1. Sinopec Star Tianjin New Energy Co., Ltd, Tianjin 300450, China; 2. Sungrow FPV Sci. &Tech. Co., Ltd., Hefei, Anhui 230000, China; 3. Jiangsu Yinuo Power Engineering Co., Ltd, Jiangsu, Zhenjiang 212000, China;
4. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
5. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

Abstract: This paper compares and analyzes the advantages and disadvantages of various floating structure forms of floating photovoltaic power stations on the water surface, expounds the technical characteristics and development direction of floating photovoltaic power stations on the water surface, puts forward the corresponding anchoring system scheme for the problems of water level fluctuation and uneven tension of anchor cables faced by the anchoring system of floating photovoltaic power stations, and derives the calculation method of the anchoring force and the volume of counterweight or floating ball. Finally, some suggestions on the design and installation of the electrical system of the floating photovoltaic power station are given.

Key words: floating photovoltaic power station; floating structure; anchoring system; counterweight; floating ball; electrical System

近年来,随着我国光伏行业的不断发展,土地资源紧缺已成为限制陆地光伏电站发展的重要原因^[1]。水面漂浮式光伏电站将光伏组件安装在浮体上,浮于水面实现发电,可在水塘、水库、河流等水上建设^[2],不占用土地资源,是人口密集、土地资源有限但水资源丰富的国家和地区发展光伏项目的良好选择^[3]。此外,相较陆地光伏,水面光伏电站发电量可提升5%~10%,发电效率高^[4];漂浮式水面光伏电站发展迅速,根据市场研究机构

Transparency Market Research (TMR) 的数据,2020—2030年全球浮式电站市场的复合年增长率估计为6.5%,到2030年其市场规模将达到5650亿美元^[5]。水面漂浮式光伏电站主要由浮体结构和系泊锚固系统组成,浮体结构的设计应综合考虑经济性、运维便捷性、安全性等因素,优化结构水动力性能,本文对多种浮体结构方案进行了对比,归纳了各种浮体方案的优缺点;水面漂浮式光伏电站的锚固系统多由多根均布的钢缆或高分子

收稿日期:2022-07-07

基金项目:国家自然科学基金联合重点基金资助项目(U21A20164)

作者简介:高普兵(1967-),男,河南滑县人,硕士,高级工程师,从事漂浮电站锚固、电气及浮体方面的研究。

缆组成,相比其他浮体结构的系泊系统具有其特殊性,锚固失效是造成浮体结构破坏的主要原因,但锚固系统的相关研究尚不成熟,本文对锚固方案的设计计算方法开展研究,为漂浮式光伏电站的锚固优化提供参考。

1 浮体结构方案

1.1 浮体结构系统的主要技术要求

内陆淡水水域具有以下特点:(1)水域范围内多为封闭式水域,一般以 1 m 浪高为设计工况;(2)环境腐蚀性较弱,金属件表面防腐通过常规镀锌的处理方式即可满足 25 年使用要求(有规范可依);(3)主要环境载荷为风荷载,一般以 35 m/s 的气象风速(重现期 50 年标准)为设计工况。

结合以上内陆淡水水域特点及国内光伏市场特点,漂浮式光伏结构系统应满足如下要求:

(1)浮体强度及适应性:要求浮体结构具备强度高、水动力性能好,抗灾能力强;

(2)兼容性:可以兼容市面上的大尺寸组件(如 600+组件),做到倾角、间距可调;

(3)经济性:安装、运输、运维等成本低;

(4)环保性:对水面直接覆盖率低,通风透光好;

(5)发电效率:由于水面漂浮式光伏组件通常倾角较小,因此应充分发挥水冷降温优势,最大化提升发电量。

1.2 常用的浮体结构方案对比

目前,应用于内陆淡水水域的漂浮结构形式主要有以下几类:浮体+杆件漂浮系统、纯浮体漂浮系统、浮管漂浮系统、金属+EPS 发泡漂浮系统。漂浮系统选型宜综合考虑浮体结构特点与项目场址环境。下面分别介绍各结构型式特点。

1.2.1 浮体+杆件

浮体+杆件在传统纯浮体拼接基础上镶嵌一层金属加强筋,保留柔性连接的同时增强系统的连接强度。系统包含浮动承载平台,组件连接紧固支架,东西向、南北向等主要运维通道,如图 1(a)所示。该结构型式灵活可调,可兼容最大 650 w 组件;强度高,适应性强,抗掀翻、隆起、碰撞能力强,可有效应对突发自然灾害天气,适用于复杂的安装工况;水面直接覆盖率 $\leq 20\%$;组件正下方无遮挡,组件背面通风好,水冷降温效果突出,发电效率高;成本低于纯浮体形式;单个浮体浮力大,可达 222 kg,后期运维踩踏更稳,更安全。

1.2.2 纯浮体漂浮

纯浮体漂浮每块组件对应一个主要浮体,系统的浮动承载平台完全由浮体之间相互拼接而成,浮体与组件之间通过金属支架连接固定,如图 1(b)所示。该结构柔性较大,可适应较复杂的水面波动性;系统金属件用量占比相对较小;可适应腐蚀性较强的海水等特殊水质。但同时该结构浮体用量较大且集中,一旦发生火灾,浮体损毁率高;水面直接覆盖率较高,对水质影响较大;对突发灾害天气适应性较差,风速大的区域,不适合做单体大方阵^[6];成本略高于浮体+杆件形式;组件背面散热会受到大浮体的影响,进而影响发电效率。

1.2.3 浮管漂浮

浮管漂浮是高密度聚乙烯直浮管或首尾相连形成环形浮管^[7]漂浮于水面上,为光伏组件提供浮力,如图 1(c)所示。这种结构的原材料易获取,加工简单,并可大幅减小连接件数量。但该结构浮力与负重不均衡,造成方阵凹凸不平,浮管横向贯通,一处破损会导致整行浮体下沉。

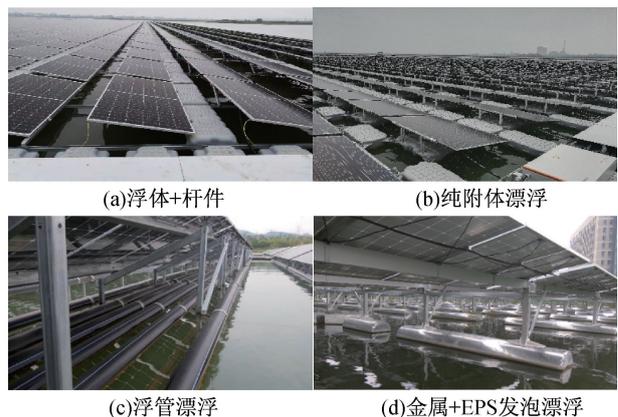


图 1 浮体结构型式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of floating structure type

1.2.4 金属+EPS 发泡漂浮

利用铝合金等金属材料制作薄壁容器,容器中填充泡沫形成具有一定浮力的浮体,在其上安装金属钢结构支架,把组件安装固定在这些支架上。这种结构可实现大间距、大倾角的光伏组件安装;浮体制作原材料简单,加工简单。但系统整体柔性差;浮体极易变形、破损率较高且破损后系统更换修复难度大,后期运行维护费用很高;支架、组件等安装难度高,施工速度慢。

从上述对比分析可以看出,浮体+杆件的漂浮结构形式是内陆淡水漂浮式光伏电站的首选方案。

2 锚固系统方案

2.1 锚固系统的组成及设计流程

锚固系统主要由锚固桁架、系泊缆及锚固基础组成,可控制浮体结构的运动范围,如图2所示。其中,锚固桁架通常固定在浮体方阵边缘,一般为金属焊接件;系泊缆上端通过导缆孔连接到浮式结构物上,利用起链机调整系泊线的长度和顶端张力,下端连接在锚固基础上,系泊线可将环境荷载传递至下部海床内的锚固基础,从而限制平台的运动并防止倾覆。系泊缆通常有锚链、钢丝绳及合成纤维绳等几种材质;锚固基础依靠土体与锚块的摩擦力、被动土压力或者粘聚力来抵抗缆绳的拉力。

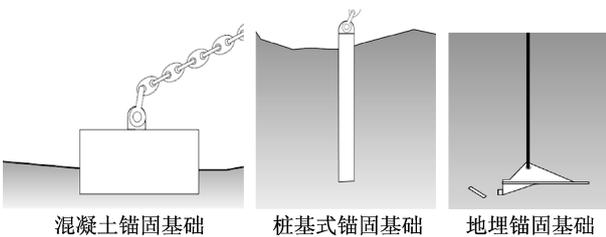


图2 锚固基础示意图

Fig. 2 Schematic diagram of anchor base

在锚固系统设计时,锚固基础在任何情况下不允许发生移位,否则会造成缆绳受力不一,个别缆绳张力过大,超过其极限强度,从而导致锚固系统失效。水面漂浮式光伏锚固系统设计应充分考虑水域环境,选择一种或两种锚固方式的组合,实现对漂浮方阵的水面固定。锚固系统设计流程可以简化为以下几个步骤:(1)确认最大风,波浪和水流条件;(2)风浪流动力模型或模型风洞实验分析;(3)锚固基础布局的选择;(4)极端条件下水动力与锚固系统的耦合分析;(5)确认系泊绳的最大张力;(6)确定漂浮方阵的安全距离。锚固系统的设计方案具有特异性,需结合风、浪、流以及水深和水位变化等信息进行综合分析。

锚固点数量的确定是锚固系统的关键环节之一,锚点点较少会导致单个固定点受力过大,方阵出现损坏甚至导致整个电站出现故障,而锚固点过多又会增加建设投资成本^[8]。因此,应结合具体工程水位变动特点开展有针对性的设计。

2.2 常见的锚固基础形式

现阶段在漂浮式光伏电站的建设中,针对不同的水文地质条件,有三种锚固形式,即岸边锚

固、桩锚、沉锚或称重力式锚。下面分别介绍各自的特点。

2.2.1 岸锚

岸锚适用于漂浮方阵离岸边较近的情况,如图3(a)所示。该型式承载能力高,水位变化适应能力强,不受水深、水底地形限制,安装方便,环保,允许较小的系泊半径,不需要拖拽,成本低;但该型式只能在岸边或浅水区安装,适合小型池塘等应用场景,需要特殊的作业设备,且缆绳在水面附近,螺旋桨船只无法通航,对运维通航有一定的影响。

2.2.2 桩锚

桩锚适用于水深较浅的水域,一般小于15 m,如图3(b)所示。该型式承载能力高,允许较小的系泊半径,不需要拖拽,经济性好。但该型式需要水中打桩,设备租赁费用较高,钻桩作业水深有限,有可能破坏水库的防渗层,且很多水域不允许打桩,限制了其适用范围。

2.2.3 沉锚

沉锚适用于水深较大,水面开阔的水域,如图3(c)所示。沉锚可以现场制造,允许较小的系泊半径,锚链连接处维护方便,不影响后期集电线路的敷设及运维船只的通航。但水平承载力较低,可能成为水下障碍物,需要重型机械起吊安装,整体成本较高。

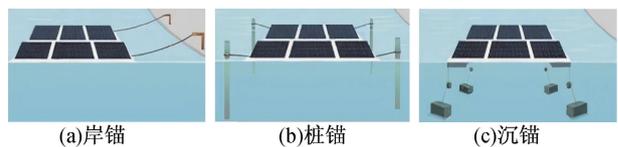


图3 系泊结构型式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of mooring structure type

锚固基础设计关注的重点是确定锚固力,以下分别给出锚固方案的推荐设计方法和锚固力计算方法。

2.3 推荐的锚固方案

2.3.1 岸锚配重块设计

当岸锚采用图4所示配重块设计时,可消除帽绳拉力不均匀导致的锚泊系统失效风险。配重块的水平分力可以抵抗外部载荷,给光伏方阵提供持续拉力,配重块的竖直分力则由岸边锚固力及光伏浮体方阵浮力承担。配重块的大小和位置由所需的水平分力以及方阵提供的浮力综合确定。

由图4可知,漂浮方阵边缘与岸边的距离为

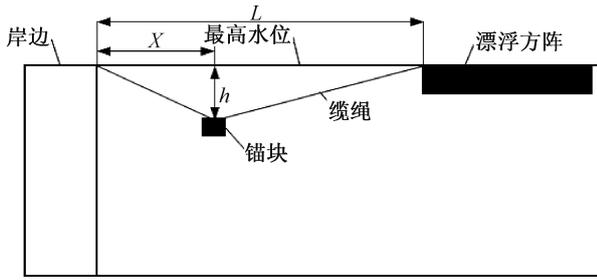


图4 岸边锚固配重分析示意图

Fig. 4 Analysis diagram of shore anchor with additional weight

L ,距岸边的水平距离为 x ,锚固块距水面的垂直距离为 h 。对缆绳的受力分析可知:缆绳拉力的水平分量即为漂浮方阵所需水平抗力。当 L 固定时,配重块提供的水平向拉力可由 x 、 h 、配重块重量 G 以及方阵浮力 F 确定^[9]。同时需满足配重块重力不大于漂浮方阵浮力的要求。经过受力分析可知配重块提供的水平拉力为

$$F_h = \frac{(L - x) \cdot F}{h} \quad (1)$$

对配重块进行平衡受力分析,其中水平向及竖直向的平衡分析可用下式表示:

$$T_1 \cos \theta_1 = T_2 \cos \theta_2 \quad (2)$$

$$G = F_M + T_1 \sin \theta_1 + T_2 \sin \theta_2 \quad (3)$$

式中, T_1 为锚块左侧缆绳所受拉力, T_2 为锚块右侧缆绳所受拉力, θ_1 、 θ_2 分别为左侧缆绳及右侧缆绳与水平面夹角, F_M 为锚块所受浮力。

联立公式(2)、(3),结合阿基米德定律,求得配重块的体积为

$$V = \frac{F \cdot L}{(\gamma - \gamma_{water}) \cdot x} \quad (4)$$

式中, γ 为配重块的重度, γ_{water} 为水的重度。

以 $L=20$ m, $x=6$ m, $F=1\ 000$ N, $h=1.5$ m,配重块采用混凝土材质为例,计算可得缆绳总长为 20.3 m,水平力 F_h 为 9.3 kN,锚块的体积为 0.24 m³。

配重块的存在实现了缆绳受力的一致性,即方阵到岸边的距离不同时,每根缆绳都按照上述方式设计计算,可使缆绳从最高水位到最低水位都有足够的拉力抵抗外载荷。这样使得岸边锚固方式对地形地势的适应能力大大提高,尤其对于地形复杂的场合更加适合。同时,因为方阵边缘有持续向下的作用力,可使缆绳一直处于绷紧状态,当风载荷作用于方阵组件背面时,对组件产生向上推力,此推力会由配重块的竖直分力抵消,因此该设计起到抗风作用。

2.3.2 沉锚与桩锚浮球设计

对于沉锚和桩锚,在缆绳上固定一个浮球,如下图5所示,浮球的水平分力作用于光伏浮体方阵边缘,抵抗外部载荷。浮球可以给浮体方阵提供持续向下的拉力,浮球的竖直分力由沉锚的重量或桩锚的抗拔力承担。浮球的大小由浮体方阵浮力以及所需的水平抗力决定。

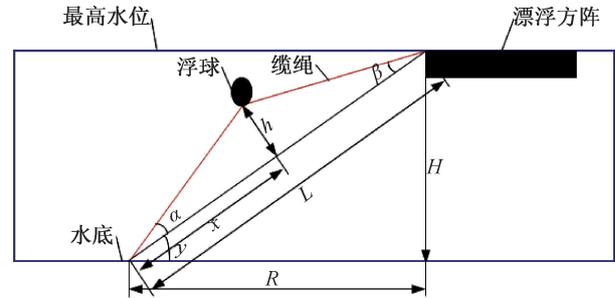


图5 水底锚固配浮球分析示意图

Fig. 5 Analysis diagram of underwater anchor with floating ball

由图5可知,漂浮方阵边缘与水底锚固点的最大距离为 L ,浮球距离缆绳水底固定处沿斜边距离为 x ,浮球距离斜边的垂直距离为 h 。对缆绳进行受力分析可知:缆绳拉力的水平分力起到抵抗外在载荷的作用。由于方阵距离岸边的锚固半径 R 和最大水深 H 是固定的,因此可通过 x 、 h 、浮球的大小以及方阵浮力 F 关系确定水平拉力。同时需满足浮球重量不大于漂浮方阵浮力的要求。设浮球左侧缆绳与方阵及水底间所连直线的夹角为 α ,浮球左侧缆绳与方阵及水底间所连直线的夹角为 β ,方阵及水底间所连直线的夹角为 γ ,则浮球左侧缆绳与水平面夹角为 $\alpha+\gamma$,浮球右侧缆绳与水平面夹角为 $\gamma-\beta$ 。

由图5的几何关系可得,

$$\tan(\alpha) = h/x \quad (5)$$

$$\tan(\beta) = \frac{h}{\sqrt{R^2 + H^2} - x} \quad (6)$$

$$\tan(\gamma) = H/R \quad (7)$$

$$\tan(\alpha + \gamma) = \frac{\tan(\alpha) + \tan(\gamma)}{1 - \tan(\alpha) \cdot \tan(\gamma)} \quad (8)$$

$$\tan(\gamma - \beta) = \frac{\tan(\gamma) - \tan(\beta)}{1 + \tan(\beta) \cdot \tan(\gamma)} \quad (9)$$

推导可得浮球提供的水平拉力为

$$F_h = \frac{F}{\tan(\gamma - \beta)} \quad (10)$$

浮球受力平衡可得:

$$T_1 \cos(\alpha + \gamma) = T_2 \cos(\gamma - \beta) \quad (11)$$

$$T_1 \sin(\alpha + \gamma) = F_f + T_2 \sin(\gamma - \beta) \quad (12)$$

式中, T_1 为浮球左侧缆绳所受拉力, T_2 为浮球右侧缆绳所受拉力, F_f 为浮球所受浮力。

联立公式(11)、(12), 结合公式(5)~(10), 浮球的体积为

$$V = \frac{(\tan(\alpha + \gamma) - \tan(\gamma - \beta))}{\gamma_{water} \cdot \tan(\gamma - \beta)} \cdot F \quad (13)$$

式中, γ_{water} 为水的重度。

以 $R=50\text{ m}$, $x=20\text{ m}$, $F=1\ 000\text{ N}$, $h=8\text{ m}$, $H=30\text{ m}$ 为例, 计算可得缆绳总长为 61 m , F_h 为 4.2 kN , 浮球的体积 $V=0.28\text{ m}^3$ 。

沉锚或者桩锚的浮球锚固方式, 能解决水位变化时缆绳受力的一致性问题。当水底不平造成锚固点到水平面的距离不同时, 每根缆绳都按照上述方式单独设计计算, 可使方阵在最高水位和最低水位变化时, 每根缆绳都有足够的拉力抵抗外载荷。

3 电气系统设计与安装

漂浮式光伏电站的主要电气设备包括: 光伏组件、汇流箱、逆变器、箱变、电缆等。其中组件串联数及接线设计与陆地光伏设计方法相同^[10], 但水面光伏组件多为单片横排布置, 因此正负极出线长度较长, 在组件采购时需考虑预留足够的出线长度, 汇流箱、逆变器及4平方直流电缆等的接头处理(如MC4插头)防护等级需满足至少IP67的等级。其它电气设备选型与安装建议如下:

3.1 组件选型

水面光伏组件通常最低端距离水面高度约 150 mm , 安装倾角较小多为 12° 。考虑水汽对组件的影响(PID等影响), 建议组件使用双玻带边框组件^[11]。组件背面能接收到的反射光有限, 出于经济性考虑, 建议选用单面发电组件即可。

3.2 逆变器选型

漂浮电站对于逆变器的形式没有严格限制, 集中或组串即可兼容。需要注意的是, 若选用油变箱变, 其承载平台在后续设计采购时需注明配备储油槽。箱变或箱逆变一体机可就近布置于大型浮体上(图6), 实现就近升压。

3.3 电缆敷设

漂浮方阵内部出线电缆一般为直流电缆或低压交流电缆, 这些电缆一般数量较多, 长度相对较短, 宜采用适应方阵漂移或者相对运动的S型铺

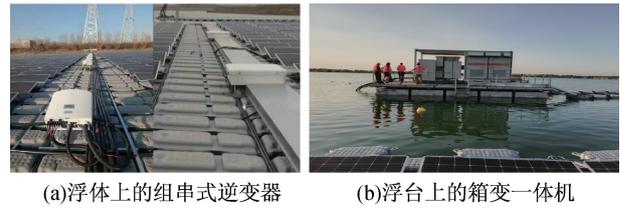


图6 逆变器的安装

Fig. 6 Inverter installation

设方式连接至逆变升压一体机或者箱变设备, 进行一次升压, 如图7所示。



图7 S型漂浮电缆通道

Fig. 7 S-type floating cable channel

不同漂浮方阵之间的箱变中压出线需做环网布置, 最后由集电线路将光伏厂区的电能输送至岸边。这部分电缆敷设可分为水下和水面两种方案。当水深小于 10 m , 水质为淡水且冬天水面冰层较薄或不结冰时, 应采用水下敷设方案。该方案箱变中压出线后直接下水, 中压电缆沿水下河床敷设, 目前市场主流电缆厂家(双登、远东等), 已经有成熟的关于漂浮电站水下敷设的电缆解决方案, 淮南煤炭塌陷区的漂浮电站环网和集电线路均采用水下敷设电缆的方案。水下敷设方案综合经济性优, 电缆对水域没有分割, 方便后期运维船只的通行, 但每根水下敷设的电缆长度均为定制, 中间不能有接头。

当最大水深超过 10 m , 冬季结冰期较长、冰层厚且水底地形复杂时宜采用水面敷设方案。该方案箱变中压出线后, 电缆通过固定在浮体漂浮于水面上进行环网及集电线路的敷设。水面敷设方案电缆后期故障排查及维修较容易, 但众多的电缆将水域分割, 船只运维通行不便; 长度较大的漂浮电缆通道需要额外做锚固系统, 集电线路电缆敷设难, 成本相对较高。

3.4 接地系统方案

水面漂浮式光伏电站需要做接地系统设计。由于水体电阻率极低, 接地导体接入水中即可保证接地电阻小于 $4\ \Omega$ 的设计要求。因此, 可采用明敷水平接地母线作为整个电站的均压带, 使用

水下接地装置将异常电流导入水体。针对水面光伏项目具有湿度大、太阳辐射强、水位变化多样的特点,水下接地装置需特别加强抗腐蚀、抗老化、耐盐碱的特性,并且长度需灵活可调以满足项目的接地需求^[12]。水下接地放电板可采用铝合金材质或者铜板,具体投放的放电板数量根据实际测量接地电阻来具体投放。

4 结论

本文系统分析了水面漂浮式光伏电站的建设优势和发展前景,梳理了水面漂浮式光伏电站设计环节的基本流程及需考虑的关键问题,针对水面光伏水位变动的特点,提出了保证缆绳拉力一致性的岸锚配重块方案及沉锚和桩锚的浮球方案,给出了各设计方案锚固力的计算方法,供同类工程参考使用。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 赵宇航.争夺水面光伏[J].能源,2016(03):60-63.
- [4] 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(03):74-76+80.
- [5] 索比光伏网.2020—2030年全球浮式电站市场的复合年增长率估计为6.5%[EB/OL].<https://news.solarbe.com/202012/08/332910.html>.
- [6] 刘汉元,钟雷,谢伟,等.“渔光互补”在江苏地区发展前景及应用思考[J].当代畜牧,2014(32):94-95.
- [7] 崇禅.水面光伏发电在生态环境治理中的运用[J].中国资源综合利用,2022(04):45-47.
- [6] 周萍,赵南,纪肖.超大型浮体结构碰撞损伤研究[J].舰船科学技术,2021(23):50-54.
- [7] 刘宏.浮管式光伏电站设计与施工技术[J].重庆电力高等专科学校学报,2018(06):31-33+40.
- [8] 林舟曦,何世平.系有绳索的水下浮体上浮性能仿真及实验研究[J].舰船电子工程,2020(09):87-90+152.
- [9] 肖越,王言英.浮体锚泊系统计算分析[J].大连理工大学学报,2005(05):682-686.
- [10] 刘军红,田立.光伏发电场分站房布置方案探讨[C]//中国电机工程学会;中国华电集团公司.中国电机工程学会;中国华电集团公司,2014.
- [11] 孙杰.水上光伏电站应用技术与解决方案[J].节能与环保,2017(02):48-51.
- [12] 吴月仪,张峰.一体式漂浮光伏发电站子方阵优化设计[J].太阳能,2018(1):37-40+54.

(责任编辑 王利君)