

DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2020.01.008

# 漂浮式光伏电站自适应水位变化的防护系统设计

Design of floating photovoltaic power plants protection  
systems adapting to water level

张莉, 赵进科

ZHANG Li, ZHAO Jinke

(华电郑州机械设计研究院有限公司, 郑州 450046)

(Huadian Zhengzhou Mechanical Design Institute Company Limited, Zhengzhou 450046, China)

**摘要:** 水面漂浮式光伏电站一般应用于水位较浅、水位变化不大且水面较平静的水域。为了拓展水面漂浮式光伏电站的应用范围,设计了一种自适应水位变化的防护系统,该系统主要包括防护钢结构和自适应卷链系统。介绍了该系统的工作原理,并同时考虑水流、风、波浪载荷的影响,对防护钢结构的强度进行了分析计算,对卷链系统进行了选型设计。自适应卷链系统可以使防护钢结构和光伏电站自动适应所处水位的大幅度变化。防护系统为漂浮式光伏电站的安全、可靠运行提供了保证。

**关键词:** 漂浮式光伏电站; 自适应防护系统; 卷链机构; 选型设计分析; 水流载荷

**中图分类号:** TK 519: TH 12      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-1951(2020)01-0041-04

**Abstract:** Floating photovoltaic power plants are generally applied in shallow and calm water areas. In order to expand the application range of floating photovoltaic power plants, a protective system which can adapt to the change of water level is invented. It mainly includes a protective steel structure and an adaptive winding chain system. The working principle of the system is introduced, and the strength calculation of the protective steel structure has considered water flow, wind and wave loads in type selection for the winding chain system. The adaptive chain winding system can make the protective steel structure and photovoltaic power plant automatically adapt to the change of water level, which ensures the safety of floating photovoltaic power plants.

**Keywords:** floating photovoltaic power plant; adaptive protection system; winding chain mechanism; mode selection; water flow load

## 0 引言

随着可用于建设光伏电站的土地资源日益紧张,水面光伏电站的建设正逐渐兴起<sup>[1]</sup>。尤其是在近几年对采煤沉陷区水面的大规模开发利用中<sup>[2]</sup>,水面漂浮电站的建设进入了快速发展阶段。

水面光伏电站目前主要有固定桩式和漂浮式等2种<sup>[3]</sup>:固定桩式主要应用于水深小于3.00 m的浅水区<sup>[4]</sup>,主要施工方法是长将预制管桩打入水底用以固定,可将水塘存水抽空或采用打桩船进行施工;漂浮式光伏电站是一种较为新型的光伏电站,主要应用于

水面径流稳定(水位变化小于6.00 m)的水面。

光伏组件采用浮筒或者浮箱固定,光伏阵列一般采用打桩牵引式或岸边地锚式(即采用拉索对整个漂浮电站进行牵拉)固定,以防止其在风和波浪的作用下大范围移动。虽然在电站设计时考虑了水流对单个浮体的冲击<sup>[5]</sup>,但是在光伏阵列牵引点的局部载荷仍然很大。即使对水面漂浮阵列采取了一定的牵拉措施,国内个别新建水面漂浮电站仍然出现了较大规模的光伏阵列漂移、碰撞等安全事故。

由此可见,漂浮式光伏电站在应用上还存在一些问题,尤其在水位变化较大或者水位较深的水域目前基本没有应用。我国南方广大地区有大量的湖泊和水库,根据水库的蓄洪、调洪和发电需要,水位变化较大、水流也不稳定,应用漂浮式光伏电站的难度较大。

收稿日期: 2019-07-10; 修回日期: 2019-12-24

基金项目: 华电科工集团科技项目(CHECKJ18-01-40)

自适应水位变化的防护系统可以根据水位变化自动升降,对光伏阵列进行防护,可有效保证漂浮光伏电站在水位变化的水面上安全、稳定运行,具有较大的应用前景。

## 1 布置与构成

防护系统布置在水面光伏组件阵列周围,主要由防护钢结构、锚链、锚块及卷链机构组成,如图 1 所示。

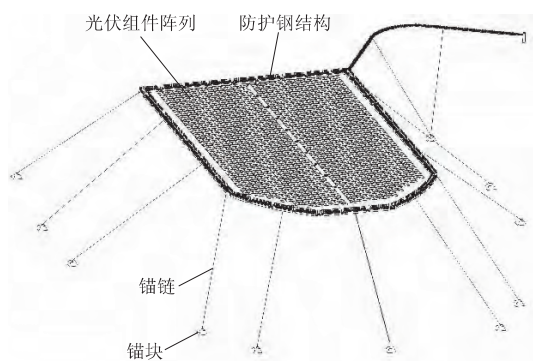


图 1 防护系统布置

Fig. 1 Layout of the protection system

防护钢结构可以根据所在水域的水流情况围成不同的形状,以抵御水流和污物的冲击。

防护系统与光伏组件阵列的浮箱支架之间采用柔性耐腐蚀的绳索连接,如图 2 所示。当光伏组件阵列之间发生相对运动时,防护系统可以对其进行牵拉,以避免较大的冲击。

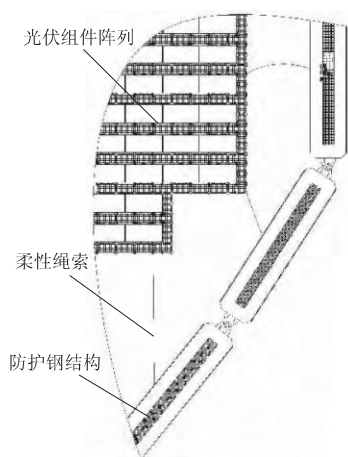


图 2 防护系统与光伏阵列的连接

Fig. 2 Connection between the protection system and PV array

防护钢结构的钢梁间通过销轴进行铰接。钢梁采用 4 个密封空心的箱型梁焊接而成,钢梁顶面用作检修通道。钢梁分为主动钢梁和被动钢梁,主动钢梁上布置有卷链机构,如图 3 所示。

卷链机构用来控制锚链的收放,主要由电动机、回转减速机、主动链轮、导向链轮和盛链箱组成,如

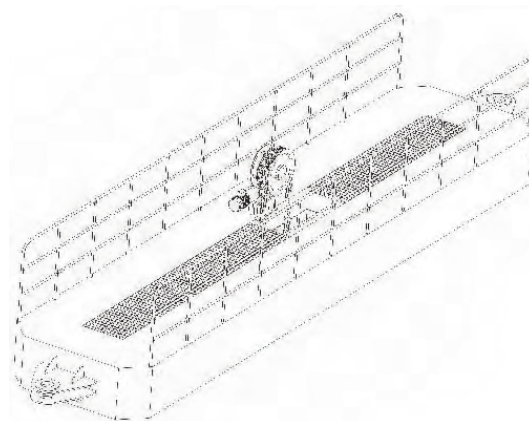


图 3 设置有卷链机构的防护钢梁

Fig. 3 A protective steel beam with a chain mechanism

图 4 示。锚链一端固定在水底的锚块上,另一端绕过导向链轮和驱动链轮,放置在盛链箱内。

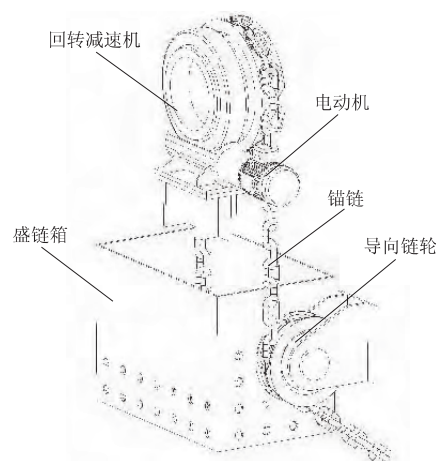


图 4 卷链机构

Fig. 4 Structure of the chain mechanism

## 2 工作原理

自适应防护系统具有专门的控制中心。控制中心设置有人机交互界面,可以实时读取、视频监控漂浮电站所处水域的水位信号、风速信号、水流信号。在安装防护系统时,根据水位情况设置漂浮光伏电站的初始水位高度和所有卷链机构的锚链长度。防护系统运行时,如果所在水域水位上升并达到设定的差值时,卷链机构电动机启动,驱动链轮带动锚链转动,放下锚链,防护钢结构和光伏组件阵列可以随水位上浮,当锚链长度达到新的计算值时,电动机停止运行。反之,水位下降时,系统收起锚链进盛链箱,保持锚链对漂浮光伏电站的固定作用,保持漂浮电站在水平面内相对稳定,阻止在水面上的大幅度漂移。此外,根据现场情况和视频监控情况,当防护钢结构或浮箱阵列发生设计外的偏移时,也可以通过单独控制防护系统的单个卷链机构,调整各个锚链的长度以获得需要的防护系统位置。

### 3 主要部件的设计和受力分析

以某蓄洪发电水库 1 MW<sub>p</sub> 漂浮光伏电站为例, 单个组件峰值功率为 355 W<sub>p</sub>, 组件倾角暂为 12°, 组件尺寸为 1 956 mm × 992 mm × 40 mm, 18 个组件为一串, 16 串组件分别接入 16 路光伏汇流箱, 汇流箱接入岸上的集中逆变器。光伏电站宽约 85.00 m, 长约 135.00 m, 约占用水域面积 11 000 m<sup>2</sup>, 水深约 60.00 m, 光伏电站在寿命时间内水域最大水位变化为 40.00 m, 这一变化范围基本上可以适用于大部分的水库或者湖泊。

除了水库水位变化, 水面漂浮光伏电站还应能够承受水流、风力和波浪的荷载<sup>[6]</sup>。适当考虑电站的实际运行情况、水面漂浮物的冲击等<sup>[7]</sup>, 在光伏电站不出现解体、不影响水力发电的前提下, 对防护系统的主要部件进行设计和受力分析。

#### 3.1 防护钢结构受力分析<sup>[8-9]</sup>

防护钢结构受到的主要荷载包括水流、风和波浪荷载。

水流对防护钢结构的水平力集度

$$p_c = K_c \gamma_c h_c \frac{u_c^2}{2g} = 0.097 \text{ (kN/m)},$$

式中:  $K_c$  为水流阻力系数, 取 1.8;  $\gamma_c$  为水重度, 取 9.800 kN/m<sup>3</sup>;  $u_c$  为水流流速, 需要根据水库的具体运行情况进行实测, 这里暂时取 0.6 m/s;  $h_c$  为浮箱入水深度, 根据该防护钢结构的质量可以计算得到其入水深度约为 0.30 m;  $g$  为重力加速度, 取 9.8 m/s<sup>2</sup>。

风对防护钢结构的水平力集度

$$p_a = K_a \gamma_a h_a \frac{u_a^2}{2g} = 0.168 \text{ (kN/m)},$$

式中:  $K_a$  为空气阻力系数, 取 1.9;  $\gamma_a$  为空气重度, 取 0.012 kN/m<sup>3</sup>;  $u_a$  为风速, 取 17.0 m/s;  $h_a$  为钢结构露出水面高度, 为 0.50 m。

波浪对防护钢结构的水平力集度

$$p_w = \eta \frac{\gamma_c}{2} (2h_1 + h_0) L_1 = 4.650 \text{ (kN/m)},$$

式中:  $\eta$  为波浪压力修正系数, 取 0.365;  $2h_1$  为波浪高, 取 0.50 m;  $h_0$  为波浪中心线距离水面的距离, 取 0.15 m;  $2L_1$  为波长, 取 8.00 m。

为了考虑极端天气水流情况, 这里将 3 种荷载进行简单的叠加, 这个运行工况可能出现在防护钢结构的迎水迎风面上。水流、风和波浪共同作用下的水平力集度

$$p = p_c + p_a + p_w = 4.915 \text{ (kN/m)}。$$

#### 3.2 防护钢梁的有限元分析

防护系统中未设置卷链机构的钢梁最大连续长

度为 4 节, 每节钢梁长度 10.00 m。以 4 节自由钢梁为分析对象, 计算钢梁在极端天气水流情况下的强度和变形情况。

首先建立 4 节钢梁的实体模型并进行装配, 钢梁材料为 Q235B。然后对 4 节钢梁的两端进行铰接约束, 相邻的钢梁之间设置铰接连接。最后对每节钢梁按照叠加计算的水平力集度 4.915 kN/m 施加荷载, 进行仿真运算<sup>[10]</sup>。

在荷载作用下 4 节防护钢梁的变形情况如图 5 所示, 钢梁跨中发生弯曲, 最大的位移约为 0.40 m。由于钢梁和光伏组件阵列之间采用了柔性连接, 且 4 节钢梁总长约 40.00 m, 该位移不会对光伏组件阵列产生明显影响。



图 5 防护钢梁位移图

Fig.5 Protective steel beam displacement diagram

钢梁最大应力的发生位置位于两端的铰接约束位置, 局部超出屈服强度是由应力集中引起的 (如图 6 所示)。这一情况在具体的工程中可以通过合理的结构设计进行缓解。钢梁主体部分的等效应力在 70 MPa 左右, 钢梁的强度可以满足材料的许用应力要求。

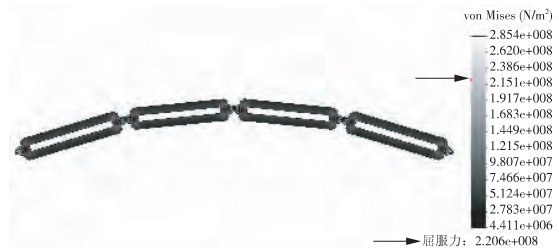


图 6 防护钢梁应力图

Fig.6 Stress diagram of protective steel beam

#### 3.3 卷链机构设计

当水库水位变化较大时, 卷链机构需要根据水位的变化情况在控制中心的自动控制下调整每条锚链的长度, 以保证整个防护钢结构和光伏阵列漂浮在一个安全可控的范围内。卷链机构的运行工况为正常的风力、水流和波浪, 所以不考虑极端情况下 3 个荷载的叠加作用。正常天气情况下, 风力、水流和波浪的综合作用水平力集度暂按 1.000 kN/m 考虑, 具体设计时需要根据所在水域的实际情况设计。由于水库水位变化慢, 卷链机构的运行速度要求不高,

暂按 1.5 m/min 考虑。另外,根据锚链的型号设计驱动链轮,驱动链轮分度圆直径设计为 560 mm。

计算卷链机构的负载功率

$$P_1 = Fv = 750(\text{W}),$$

式中:  $F$  为锚链拉力,通过计算取 30 kN;  $v$  为锚链的运行速度,为 1.5 m/min。

考虑传动机构的效率,选择 YE2-80M2-2 型电动机,额定功率 1.1 kW,同步转速 2800.00 r/min。由链轮直径可以计算出回转减速机的输出转速需要 1.00 r/min,需要的减速比为 2800。电机输出端设置行星减速机,选择行星减速机型号为 ZB115-L2,速比为 30,额定输出转矩为 235 N·m。回转减速机速比高,运行稳定,具有反向自锁功能,适合用于该卷链机构的运行工况。选择回转减速机型号为 SD17,速比为 102,额定输出扭矩 10 kN·m,保持力矩 1356 kN·m,径向静载荷 970 kN。

在完成卷链机构的电动机、行星减速机和回转减速机的选型后,可以计算出卷链系统的总减速比 3060,额定输出转速 0.92 r/min,卷链机构的收放速度为 1.6 m/min,满足系统运行需求。

#### 4 结束语

为了使漂浮式光伏电站克服当前应用过程中的困境,拓展应用范围,适应水位变化和水流冲击,设计了一套能够自动适应水位变化的漂浮光伏电站防护系统。通过计算和仿真,防护系统的钢结构可以在极端天气、水流情况下抵御水流、风力和波浪的冲击,对漂浮电站进行可靠防护。卷链机构可以在水位发生变化时,自动收放锚链,保持防护系统和光伏组件阵列的相对稳定。在未来的漂浮式光伏电站建设中,可以对该技术进行实际的验证并逐步推广。

#### 参考文献:

- [1] 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): 74-76,80.  
WANG Peiming, LI Yanhong, ZHAO Xiaoguang, et al. Floating photovoltaic power generating system[J]. Huadian Technology, 2017, 39(3): 74-76.
- [2] 杨静静. 两淮采煤沉陷区水面光伏发电规划[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [3] 商长征. 水面光伏电站设计要点分析[J]. 电力勘测设计, 2017(S2): 325-330.  
SHANG Changzheng. The key point of design for the water surface floating photovoltaic power station[J]. Electric Power Supply & Design, 2017(S2): 325-330.
- [4] 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.  
SUN Jie. Application technology and solution for floating photovoltaic power station[J]. Solar Energy, 2017(6): 32-35.
- [5] 曾杰,李德,陈卫鹏,等. 水面漂浮式光伏电站浮式基础动态稳定性分析[J]. 人民长江, 2018, 49(2): 79-83.  
ZENG Jie, LI De, CHEN Weipeng, et al. Dynamic stability analysis for foundation of floating PV power station[J]. Yangtze River, 2018, 49(2): 79-83.
- [6] 水工建筑物荷载设计规范: DL 5077—1997[S].
- [7] 郭子珍,杨斌,钟全胜. 桃源水电站锚链悬索拦污排研究[J]. 水力发电, 2014, 40(6): 45-48.  
GUO Zizhen, YANG Bin, ZHONG Quansheng. Research on anchor chain cable-suspended trash barrier[J]. Water Power, 2014, 40(6): 45-48.
- [8] 徐远杰,杨建东,陈辉春,等. 水电站进水口漂浮式拦污排张力计算[J]. 水利学报, 2005(3): 303-308.  
XU Yuanjie, YANG Jiandong, CHEN Huichun. Calculation method for tensile force of drift trash barrier installed at the inlet of hydropower station.
- [9] 徐远杰,杨建东. 索状柔系结构稳定平衡形状和张力的计算[J]. 工程力学, 2002(4): 71-74.  
XU Yuanjie, YANG Jiandong. The stable curve and tension for a cable-like flexible structure[J]. Engineering Mechanics, 2002(4): 71-74.
- [10] 赵进科,陈江义,王少伟. 3-CRR 并联机构动力学分析与仿真[J]. 机械工程与自动化, 2014(1): 79-80, 83.  
ZHAO Jinke, CHEN Jiangyi, WANG Shaowei. Dynamics analysis and simulation for 3-CRR parallel manipulator[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2014(1): 79-80, 83.

(本文责编: 陆华)

#### 作者简介:

张莉(1973—),女,河南三门峡人,正高级工程师,从事水工机械、升船机及光伏电站的设计与研究工作(E-mail: 524006606@qq.com)。