

文章编号:1672-3961(2026)01-0142-07

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2025.160

阴极保护在海上光伏钢结构桩基的应用

王峰¹, 林斌²

(1.中广核(山东)新能源投资有限公司, 山东 济南 250003; 2.上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200240)

摘要:针对海洋侵蚀性环境导致海上光伏桩基腐蚀与结构损伤,威胁电站安全运行并增加运维成本的问题,采用外加电流阴极保护(impressed current cathodic protection, ICCP)方法对海上光伏桩基进行腐蚀防护。以中国首座固定桩基式海上光伏电站(HG30项目)为研究对象,通过COMSOL Multiphysics构建化学场-电场耦合仿真模型,分析辅助阳极数量、布置位置对电位分布的影响;在HG30项目典型分区布置电源装置、辅助阳极与参比电极,开展现场馈电试验,验证不同输出电流下的防护效果。试验结果表明,当在水下5 m处配置1个辅助阳极、15 m处配置1个参比电极时,在输出电流为4~5 A条件下,外加电流阴极保护系统可对200 m范围内的桩基进行良好的腐蚀防护。

关键词:海上光伏;外加电流阴极保护;腐蚀防护;仿真模型;馈电试验

中图分类号:U177

文献标志码:A

引用格式:王峰,林斌. 阴极保护在海上光伏钢结构桩基的应用[J]. 山东大学学报(工学版), 2026, 56(1):142-148.

WANG Feng, LIN Bin. Application of cathodic protection system for offshore photovoltaic pile foundation[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2026, 56(1):142-148.

Application of cathodic protection system for offshore photovoltaic pile foundation

WANG Feng¹, LIN Bin²

(1. CGN (Shandong) New Energy Investment Co., Ltd., Jinan 250003, Shandong, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To address the issue of corrosion and structural damage to offshore photovoltaic pile foundations caused by aggressive marine environments, which threatened the operational safety of power plants and increased maintenance costs, the impressed current cathodic protection (ICCP) method was employed for corrosion protection. The investigation utilized the first fixed-pile-based offshore photovoltaic power station in China (project HG30). A coupled chemical field-electric field simulation model was developed using COMSOL Multiphysics to analyze the influence of the number and arrangement of auxiliary anodes on potential distribution. Field current feeding tests were conducted in typical zones of the project HG30, where power supply units, auxiliary anodes, and reference electrodes were deployed to validate the protective effectiveness under varying output currents. The results indicated that with one auxiliary anode installed at 5 m below water level and one reference electrode at 15 m depth, the ICCP system provided effective corrosion protection for pile foundations within a 200 m radius at the output current of 4-5 A.

Keywords: offshore photovoltaic; impressed current cathodic protection; corrosion protection; simulation model; current feeding test

0 引言

随着全球能源转型加速,海上光伏因土地占用少、发电效率高等优势成为可再生能源开发的重要

方向。然而,严酷的海洋环境对海上光伏支撑结构的耐久性构成严峻挑战^[1-2]。钢结构桩基作为固定式海上光伏的核心承载构件,长期处于高盐、高湿及微生物污损等多重腐蚀因素耦合的环境,其腐蚀失效是威胁电站结构安全的核心风险^[3-9]。无防护

收稿日期:2025-08-13

第一作者简介:王峰(1978—),男,江苏徐州人,高级工程师,主要研究方向为新能源领域的工程建设与运维技术。

E-mail:18566287680@163.com

条件下,钢结构桩基的寿命将缩短 60%以上。

海上光伏建设规模不断扩张,使桩基长效防腐成为保障 25~30 a 设计寿命的关键环节。桩基防腐技术主要包括防腐涂层法、牺牲阳极法与外加电流阴极保护法(impressed current cathodic protection, ICCP)^[10-15]。涂层仍是当前海上光伏桩基最普及的防腐手段。山东烟台招远及福建宁德近海光伏桩基均使用涂层防腐,飞溅区、潮差区及全浸区普遍采用环氧封闭底漆-环氧中间漆-脂肪族聚氨酯面漆的重防腐体系,设计寿命约 15~20 a^[16-18]。牺牲阳极法依靠铝合金或锌合金阳极的自然电位差提供保护电流,已成熟应用于海洋平台、海底管道等领域^[19-21]。ICCP 通过外部电源驱动惰性阳极输出可控电流,具备单系统保护范围广、全寿命周期免更换、电流动态可调等优势^[22-23]。文献[24]提出牺牲阳极法后期维护成本高,ICCP 系统的综合成本比牺牲阳极法低。然而,海上光伏桩基现有防护技术难以满足海上光伏的长效防腐需求,

主要存在涂层体系可靠性不足、牺牲阳极经济性差、ICCP 技术在海上光伏桩基中尚无应用等问题^[25-26]。本研究以中国首座 400 MW 桩基固定式海上光伏电站(HG30 项目)为研究对象,从保护原理、系统设计、仿真模拟与现场馈电试验方面开展研究。

1 保护原理

1.1 阴极保护基本原理

阴极保护是对被保护的金属施加一定的阴极电流,使金属的电极电位向负方向偏离,当被保护金属的局部阳极位置和阴极位置之间的电位差降为 0 时,将抑制局部腐蚀过程。随着阴极极化增加,当结构上所有阴极位置的电位均达到最活性阳极位置的开路电位时,被保护金属各局部没有电位差,金属腐蚀丧失驱动力,阳极腐蚀电流降为 0。阴极保护原理如图 1 所示。

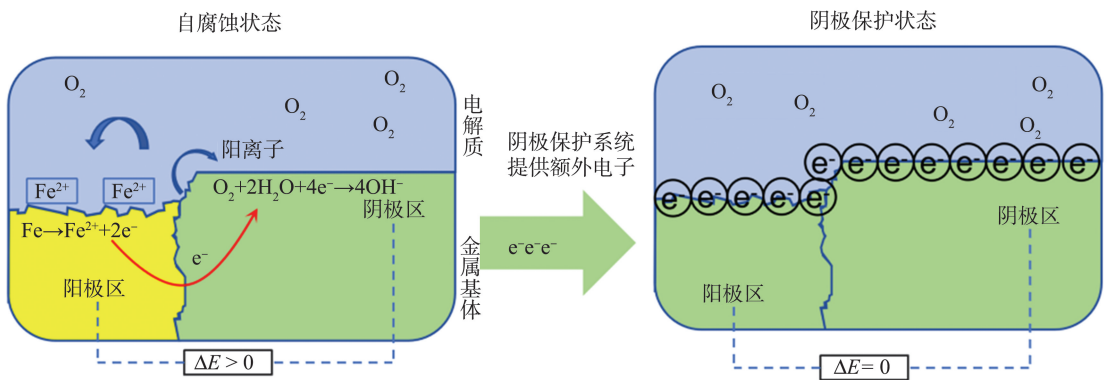


图 1 阴极保护原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of cathodic protection principle

阴极保护技术包括牺牲阳极保护和 ICCP 两种类型。牺牲阳极保护基于钢结构和牺牲阳极之间存在的自然电位差,两种金属电连接后,牺牲阳极优先发生溶解并释放保护电流,桩基结构被阴极极化,从而受到保护。ICCP 是将惰性阳极与直流电源正极相连,将受保护的钢结构(阴极)与直流电源负极相连,保护电流由电源提供,经由辅助阳极流入海水中,使钢结构阴极极化而受到保护。

1.2 研究挑战与创新点

与海上风电相比,海上光伏桩基在工程布局与服役环境上呈现显著差异,具体表现为布设密集、水深差异大、规格与形式多样化等,对阴极保护系统的设计与运行提出特殊挑战。光伏阵列桩基空间布设密度高,间距远小于海上风电单桩的常规间

距,密集分布易引发桩基间的电场屏蔽效应^[27-28],导致保护电流在桩基表面分布不均,增加局部欠保护风险。海上光伏场址水深普遍较浅,受潮汐作用呈现海水反复浸泡与暴露的动态交替特征,导致氧气浓度波动幅度显著。常规 ICCP 系统难以实现该区域电位的精准动态调控。海上光伏桩基规格与形式具有多样性,需针对性设计电流分配方案,确保全域保护效果的一致性。

基于海上光伏桩基特点,本研究创新性提出分布式设计与智能化调控的 ICCP。配置不同数量的分布式电源模块,可使保护电流分布更均匀。智能化调控电源装置集成复合缆结构形式的辅助阳极与参比电极,及时监测与动态调控保护电流,可有效解决海上光伏桩基因密、浅、杂等特点导致的电流分配难题。

2 阴极保护试验

2.1 阴极保护设计

HG30 项目水深为 8.5~11.0 m, 桩基采用前桩(直径为 0.8~1.0 m)、后桩(直径为 1.0~1.4 m) 钢管桩结构, 腐蚀防护采用涂料与 ICCP 的联合保护系统。选取 HG30 典型光伏矩阵分区作为研究对象。该光伏矩阵由 8 个网架组成, 每个网架由 2 根前桩和 2 根后桩支撑, 单根前桩钢管桩被保护面积为 87.5 m², 单根后桩钢管桩被保护面积为 66.7 m²。

海水中影响保护电流密度的因素主要有涂层状况、环境条件(如海水温度、流速、pH、含盐量、含氧量、导电率等)和金属材质(如碳钢、不锈钢等)等。

涂层破损系数

$$f_c = a + bt, \quad (1)$$

式中, a 、 b 为涂料涂层破坏因子系数, t 为设计寿命。海平面外壁所需保护电流

$$I_{c1} = f_c J_{c1} A_1, \quad (2)$$

式中, J_{c1} 为前(后)桩海平面外壁的平均设计电流密度, A_1 为前(后)桩的海平面外壁表面积。泥面下外壁所需保护电流

$$I_{c2} = f_c J_{c2} A_2, \quad (3)$$

式中, J_{c2} 为前(后)桩泥面下外壁的平均设计电流密度, A_2 为前(后)桩的泥面下外壁表面积。由式(2)、(3)可得总保护电流

$$I_{c3} = I_{c1} + I_{c2}。 \quad (4)$$

单桩平均外加电流计算赋值如表 1 所示。经计算, 前桩总保护电流为 2.856 9 A, 后桩总保护电流为 2.176 1 A。综上, 单分区 8 个网架总保护电流为 80.528 0 A。

表 1 单桩平均外加电流计算赋值
Table 1 Average external current assignment for single pile

a	b	t/a	前桩			后桩				
			$J_{c1}/(\text{A}\cdot\text{m}^{-2})$	$J_{c2}/(\text{A}\cdot\text{m}^{-2})$	A_1/m^2	A_2/m^2	$J_{c1}/(\text{A}\cdot\text{m}^{-2})$	$J_{c2}/(\text{A}\cdot\text{m}^{-2})$	A_1/m^2	A_2/m^2
0.02	0.012	27	0.11	0.08	43.5	44.0	0.11	0.08	33.0	33.7

ICCP 系统由辅助阳极、参比电极和恒电位仪组成。利用比例积分微分(proportional-integral-derivative, PID)控制技术通过双闭环控制对电压环和电流环进行管控, 实现输出电压和电流的稳定。采用创新设计的张拉式混凝土基体辅助阳极电极系统, 阳极为管状混合金属氧化物(mixed metal oxide, MMO), 直径为 0.05 m, 长度为 0.5 m, 单支理论输出电流约为 47.1 A, 接水电阻约为 0.16 Ω 。考虑均匀分布、冗余设计及末期电流需求, 间隔约 80~100 m 布置辅助阳极。参比电极选用高纯锌电极, 耐水压力可达 1.5 MPa。

2.2 仿真模拟与馈电试验

本研究采用仿真模拟与馈电试验验证的方法, 分别对海上光伏桩基 ICCP 系统的保护状态进行验证与分析。仿真模拟通过 COMSOL Multiphysics 构建光伏子阵桩基阴极保护仿真模型, 设计电化场、电场、热场等多物理场的耦合模型, 分析不同辅助阳极数量、电极布置位置对电位分布的影响。其中, 海水电导率为 5 S/m, 保护电位准则选择 -1.10~-0.85 V(相对于饱和 Cu/CuSO₄ 电极)。馈电试验选取典型分区布置电源装置、辅助阳极与参比电极, 通过改变输出电流, 采用便携式高纯锌参比电极检测钢桩基的保护电位, 确认阴极保护系统

的保护范围。馈电试验的检测过程以辅助阳极为起始点, 每 15 m 测试 1 个电位数据, 当电位超出 0.250 V 时, 停止测试或调整输出电流。

3 试验结果

试验以文献[29]与文献[30]所要求的保护电位范围 -1.10~-0.80 V(相对于 Ag/AgCl 电极)、0~0.250 V(相对于高纯锌电极)作为阴极保护系统是否合格的判断标准。

3.1 仿真模拟

海上光伏桩基的腐蚀防护是电化学反应、电流传导、海洋环境干扰的复杂过程, 仅单一物理场模拟无法精准反映真实防护效果。COMSOL Multiphysics 可实现多物理场耦合分析的高精度数值仿真, 构建化学场-电场耦合模型用于真实模拟特定海洋环境下保护电位的分布规律, 量化评估辅助阳极数量及分布对保护效果的影响, 提出优化方案, 为经济、安全地设计阴极保护系统提供新方法。控制方程采用拉普拉斯方程描述电势分布, 边界条件包括阳极表面施加恒定电流密度边界、阴极表面满足恒电位边界条件、电解质外边界设置为绝缘边界。该模型可实现对电位场、电流密度场的联合求解。

设定所处区域的空气、海水、海泥介质均匀且不随时间变化,电解质电荷守恒模型为

$$J_1 = -\sigma_1 \nabla \varphi_1, \quad (5)$$

式中, J_1 为电解质电流密度, σ_1 为电解质电导率, $\nabla \varphi_1$ 为电解质电位梯度。

光伏桩基基础表面会发生氧化反应,其电流和电势关系遵循 Tafel 公式:

$$J_a = J_0^{Fe} \cdot \exp\left(\frac{\varphi_s - \varphi_{Fe}}{B_{Fe}}\right), \quad (6)$$

$$J_c = J_0^{O_2} \cdot \exp\left(\frac{\varphi_s - \varphi_{O_2}}{B_{O_2}}\right), \quad (7)$$

式中, J_a 、 J_c 分别为阳极电流密度、阴极电流密度, φ_s 为海水电位, φ_{Fe} 、 φ_{O_2} 分别为铁和氧的平衡电位, J_0^{Fe} 、 $J_0^{O_2}$ 分别为铁和氧的交换电流密度, B_{Fe} 、 B_{O_2} 分别为铁和氧的 Tafel 斜率。

当外电源向桩基表面注入电流时,电流通过接触面注入海水,注入的电流密度 J_{inject} 和海水电导率 σ 的关系为

$$J_{inject} = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{\delta_\varphi}{\delta_n}, \quad (8)$$

式中, δ_φ 为电位穿透深度, δ_n 为法向衰减深度。

将 SolidWorks 中建成的桩基模型导入 COMSOL Multiphysics, 设定常数、边界条件、材料属性, 采用自由四面体网格划分进行数值仿真。网格划分图如图 2 所示。在阳极表面和阴极表面分别采取细化网格处理, 以保证计算精度, 减少计算时间。通过调整模型参数, 对比阴极保护电位分布规律的变化趋势。

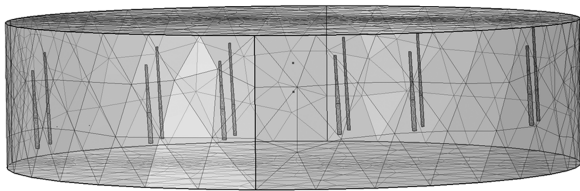


图 2 网格划分图

Fig.2 Diagram of grid division

仿真模拟过程中重点改变辅助阳极数量、电极布置位置及输出电流, 分析电极表面附近、电解质中的电位变化。在水下 5 m 处布置 1 个辅助阳极、15 m 处布置 1 个参比电极时, 光伏子阵桩基三维电位分布图及电流密度流线图如图 3 所示。由图 3 可知: 相对于 Ag/AgCl 电极, 被保护金属电位 φ 稳定在 $-0.960 \sim -0.880$ V, 整体电位分布始终稳定在 $-1.100 \sim -0.800$ V 的有效保护电位区间内; 电流密度流线在桩基区域呈现均匀化分布特征, 电流密度

J 为 $0.2 \sim 1.2$ A/m², 流线密集且颜色偏红表示电流密度大, 保护电流集中流入该区域, 流线稀疏且颜色偏蓝表示电流密度小。针对阴极保护有效性评估可知, 通过电流流向(流向桩基)与电位分布(整体为负电位)相互印证, 确认该阴极保护系统能够有效运行, 桩基未处于腐蚀状态。针对保护度均匀性评估可知: 电流集中流入区域对应的电位更负, 表明该区域获得极强的保护, 但可能消耗过多的保护电流, 或发生析氢反应导致涂层剥落; 电流流入较少区域对应的电位相对较正, 是保护的薄弱点, 虽然仍在保护范围内, 但需重点关注。

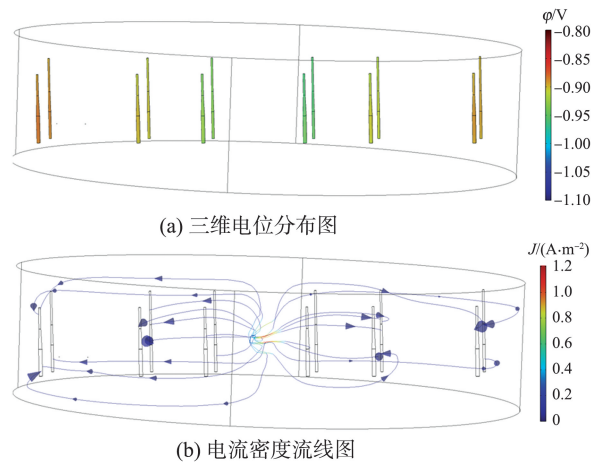


图 3 水下 5 m 布置 1 个辅助阳极、15 m 布置 1 个参比电极时的光伏子阵桩基三维示意图

Fig.3 Three-dimensional schematic diagram of the pile foundation of a photovoltaic sub-array when one auxiliary anode arranged 5 m underwater and one reference electrode arranged 15 m underwater

当辅助阳极数量增加至 2 个, 参比电极数量及位置不变时, 光伏子阵桩基三维电位分布图与电流密度流线图如图 4 所示。

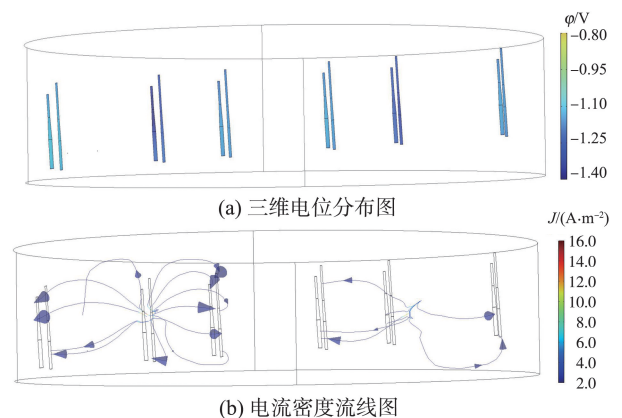


图 4 水下 5 m 布置 2 个辅助阳极、15 m 布置 1 个参比电极时的光伏子阵桩基三维示意图

Fig.4 Three-dimensional schematic diagram of the pile foundation of a photovoltaic sub-array when two auxiliary anodes arranged 5 m underwater and one reference electrode arranged 15 m underwater

由图4可以看出:被保护金属的整体电位 φ 分布在 $-1.380 \sim -0.956$ V,负电位下限小于 -1.10 V,超出有效保护电位区间,呈现过保护状态,并且 -1.380 V明显小于析氢电位 -1.20 V,导致涂层存在析氢剥离的风险;电流密度 J 约为 $2.0 \sim 16.0$ A/m²,保护电流的分布模式和强度基本稳定,但电流密度过大。由上述分析可知,2个辅助阳极的设计超出阴极保护有效范围,存在过保护风险。

当参比电极位置上移至水下10 m处,辅助阳极数量及位置不变时,光伏子阵列桩基三维电位分布图及电流密度流线图如图5所示。由图5可知:被保护金属的整体电位分布在 $-0.848 \sim -0.779$ V,不在有效保护电位区间内,呈现欠保护状态;电流密度流线图独立证实阴极保护系统仍在有效运行。因此,当参比电极离辅助阳极过近时,所监测的局部高电位将导致恒电位系统自动调低阳极输出电流,使区域电位变正,出现欠保护。

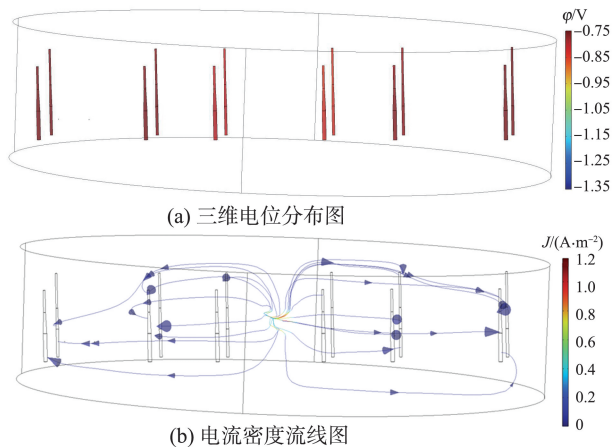


图5 水下5 m布置1个辅助阳极、10 m布置1个参比电极时的光伏子阵列桩基三维示意图
Fig.5 Three-dimensional schematic diagram of the pile foundation of a photovoltaic sub-array when one auxiliary anode arranged 5 m underwater and one reference electrode arranged 10 m underwater

综上,仿真结果表明,在水下5 m处配置1个辅助阳极、15 m处配置1个参比电极时,辅助阳极释放的保护电流通过电解质介质可高效、均衡地传递至各桩基表面,整体电位分布始终稳定在有效保护电位区间内,证明本研究系统设计、辅助阳极与参比电极配置方案合理,可确保全区域桩基避免因电流分布不足与不均所引发的腐蚀风险。

3.2 现场馈电试验

通过改变电源装置的输出电流,测试并得出相对辅助阳极不同距离 D 的桩基电位 φ_{pf} (参比电极

为高纯锌),具体结果如图6所示。

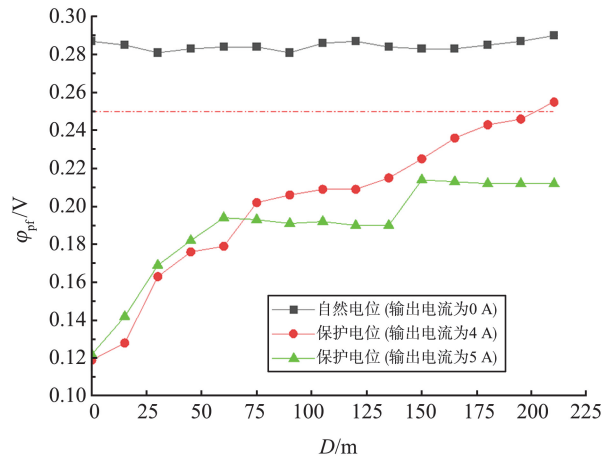


图6 相对辅助阳极不同距离的桩基电位变化
Fig.6 Pile foundation potential changes at different distances from the auxiliary anode

由图6可知:当输出电流为0 A时,自然电位均大于0.250 V,超出有效保护范围,桩基处于欠保护状态;当输出电流提高至4 A时,相对距离小于200 m的桩基保护电位处于有效保护范围,随着相对距离增加,保护电位呈缓慢正移趋势,在210 m处电位大于0.250 V,出现欠保护状态;当输出电流为5 A时,相对距离210 m范围内的保护电位均处于有效保护范围,且电位随相对距离的增加呈正移趋势。试验结果表明,在输出电流为4~5 A的条件下,ICCP系统可对200 m范围内的桩基进行良好的腐蚀防护,保障系统对光伏子阵列桩基的全域防护。

4 结论

本研究通过对国内首个海上光伏桩基外加电流的仿真模拟与现场馈电试验结果进行分析可知,ICCP系统可有效保护海上光伏桩基,具体结论如下。

(1)通过仿真模拟,在水下5 m处配置1个辅助阳极、15 m处配置1个参比电极时,海上光伏的保护电位始终稳定在有效保护电位区间内,系统设计、阳极配置和参比电极配置方案具有合理性,能够有效避免桩基整个区域因电流分布不足和不均匀导致的腐蚀风险。

(2)在输出电流为4~5 A的条件下,200 m范围内海上光伏桩基的保护电位均处于有效保护区间,首次验证ICCP系统可实现200 m有效防护半径,为海上光伏桩基ICCP系统的规模化应用提供关键参数。

(3)本研究系统设计可满足水深为10 m、保护范围为200 m的腐蚀防护效果,解决传统腐蚀技术在密集阵列中存在电场屏蔽、潮间区电位难控、多规格桩基电流分配不均等技术痛点,实际验证了国内首个桩基式海上光伏 ICCP 项目的可行性,为同类项目提供可复制的技术范式,对推动海上光伏产业长效安全发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] TRAPANI K, MILLAR D L. Proposing offshore photovoltaic (PV) technology to the energy mix of the Maltese islands[J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 67: 18-26.
- [2] LIU C K, KONG Z R, KAO M J, et al. A novel accelerated corrosion test for supporting devices in a floating photovoltaic system[J]. *Applied Science*, 2021, 11(8): 3308.
- [3] 郑洁, 杨淑涵, 柳存根, 等. 海洋可再生能源装备技术发展研究[J]. *中国工程科学*, 2023, 25(3): 22-32.
- ZHENG Jie, YANG Shuhan, LIU Cungen, et al. Development of marine renewable energy equipment and technologies[J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(3): 22-32.
- [4] 王天宇. 海上光伏发展现状及开发前景展望[J]. *船舶标准化与质量*, 2024(5): 24-33.
- [5] 徐卫兵, 惠星, 李东侠, 等. 桩基固定式海上光伏项目开发建设策略[J]. *西北水电*, 2023(5): 118-122.
- XU Weibing, HUI Xing, LI Dongxia, et al. Development and construction strategies for fixed offshore photovoltaic projects with pile foundation[J]. *Northwest Hydropower*, 2023(5): 118-122.
- [6] 黄鑫. 基于 Z-number 的海上光伏发电项目投资风险决策研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021: 3-5.
- HUANG Xin. Study on investment risk decision of offshore photovoltaic project based on Z-number[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021: 3-5.
- [7] 水电水利规划设计总院. 中国可再生能源发展报告[R]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021: 35-36.
- [8] 惠星, 穆鹏飞, 张艳, 等. 海上光伏项目的前期开发: 以山东省沿海为例[J]. *西北水电*, 2023(1): 96-101.
- HUI Xing, MU Pengfei, ZHANG Yan, et al. Early-stage development of offshore PV projects: taking the coastal areas of Shandong Province as an example[J]. *Northwest Hydropower*, 2023(1): 96-101.
- [9] 姜冠男. 我国海上光伏产业现状及发展趋势分析[J]. *现代工业经济和信息化*, 2024, 14(1): 77-79.
- JIANG Guannan. Analysis of the current situation and development trend of China's offshore photovoltaic industry[J]. *Modern Industrial Economy and Informationization*, 2024, 14(1): 77-79.
- [10] 董建业, 黄凯龙, 许立, 等. 海上固定式光伏薄壁型钢桁架耐腐蚀性研究[J]. *涂层与防护*, 2024, 45(1): 8-12.
- DONG Jianye, HUANG Kailong, XU Li, et al. Research on anticorrosion performance of fixed thin steeltruss for photovoltaic energy at offshore area[J]. *Coating and Protection*, 2024, 45(1): 8-12.
- [11] ALTAF K. Part-II: optimum designing of cathodic protection systems of marine platforms[C]//2019 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST). Islamabad, Pakistan: IEEE, 2019: 842-845.
- [12] MOMBER A. Corrosion and corrosion protection of support structures for offshore wind energy devices (OWEA)[J]. *Materials and Corrosion*, 2011, 62(5): 391-404.
- [13] 任伟, 陈有登, 谢志猛, 等. 海上风电防腐研究现状与前景[J]. *应用能源技术*, 2022(2): 49-52.
- REN Wei, CHEN Youdeng, XIE Zhimeng, et al. Research status and prospect of corrosion prevention for offshore wind power[J]. *Applied Energy Technology*, 2022(2): 49-52.
- [14] 任伟, 陈亚宾, 徐华利, 等. 海上风电设备腐蚀机理及腐蚀现状研究[J]. *船舶工程*, 2021, 43(增刊1): 1-5.
- REN Wei, CHEN Yabin, XU Huali, et al. Study on corrosion mechanism and corrosion status of offshore wind power equipment[J]. *Ship Engineering*, 2021, 43(Suppl.1): 1-5.
- [15] 徐初琪, 董建业, 彭儒, 等. 海上光伏防腐防护系统性解决方案[J]. *上海涂料*, 2023, 61(4): 33-37.
- XU Chuqi, DONG Jianye, PENG Ru, et al. Systematic solution for corrosion protection of offshore photovoltaics[J]. *Shanghai Coatings*, 2023, 61(4): 33-37.
- [16] MOMBER A W, MARQUARDT T. Protective coatings for offshore wind energy devices (OWEAs): a review[J]. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2018, 15(1): 13-40.
- [17] 苏芳眉, 谢小松. 光伏支架用微型钢桩的防腐措施及其适用性综述[J]. *太阳能*, 2023(12): 82-90.
- SU Fangmei, XIE Xiaosong. Overview of anti-corrosion measures and their applicability for micro steel piles for PV brackets[J]. *Solar Energy*, 2023(12): 82-90.
- [18] 谈诚, 许一川, 任剑锋, 等. 沿海环境中光伏钢结构支架的常用防腐技术[J]. *腐蚀与防护*, 2023, 44(7):

- 81-85.
TAN Cheng, XU Yichuan, REN Jianfeng, et al. Common anti-corrosion technology of photovoltaic steel structure supports in coastal environments[J]. Corrosion & Protection, 2023, 44(7): 81-85.
- [19] PRICE S J, FIGUEIRA R B. Corrosion protection systems and fatigue corrosion in offshore wind structures: current status and future perspectives[J]. Coatings, 2017, 7(2): 25.
- [20] VITTONATO J, PELLET M A. Platform cathodic protection retrofit with anodes racks and subsea current measurement[C]//Corrosion 2016. Vancouver, Canada: NACE International, 2016: 1-12.
- [21] 刘骁, 贾志军. 海上光伏的腐蚀破坏与防护措施[J]. 环境技术, 2024, 42(3): 38-41.
LIU Xiao, JIA Zhijun. Corrosion damage and protective measures of offshore photovoltaic[J]. Environmental Technology, 2024, 42(3): 38-41.
- [22] 和一帆, 金曦, 孙吉星, 等. 海上风电基础阴极保护技术研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(1): 89-95.
HE Yifan, JIN Xi, SUN Jixing, et al. Cathodic protection technology for offshore wind power foundation [J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(1): 89-95.
- [23] HAJIGHOLAMI M, RAEISSI K, JAZI H S, et al. Modeling the cathodic protection system for a marine platform jacket[J]. Materials Performance, 2017, 56(4): 34-38.
- [24] 刘则宏, 舒文豪. 外加电流阴极保护技术在海洋平台防腐中的应用[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2023(12): 5-8.
- [25] HUCK T, JAVIA S. Impressed current anode systems for jetty piling protection [J]. Materials Performance, 2016, 55(10): 22-25.
- [26] 高俊杰, 鲁成林, 张继超. 海上光伏的腐蚀破坏与防护策略研究[J]. 科技资讯, 2025, 23(5): 190-192.
GAO Junjie, LU Chenglin, ZHANG Jichao. Research on corrosion damage and protection strategies of offshore photovoltaics [J]. Science & Technology Information, 2025, 23(5): 190-192.
- [27] MAKAA O M, CHAUDHARY T N, ALASWAD G, et al. Applications of solar photovoltaics in powering cathodic protection systems: a review[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2024, 26: 2755-2776.
- [28] LIU G C, SUN W, WANG L, et al. Modeling cathodic shielding of sacrificial anode cathodic protection systems in seawater[J]. Materials and Corrosion, 2012, 63(12): 1117-1124.
- [29] 国家能源局. 海上钢质构筑物外加电流阴极保护: SY/T 7699—2023 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2023: 5.
- [30] DNV. Cathodic protection design: DNV-RP-B401—2021 [S]. Oslo, Norway: Global IHS Markit, 2021: 17.

(编辑:孙亚彤)

(上接第141页)

- [23] 贾丽莉. 丙烯酸盐对水泥性能及水化进程的影响[D]. 济南: 济南大学, 2012: 44.
JIA Lili. Effect of acrylate on the mechanical performance and the hydration process of cement [D]. Jinan: Jinan University, 2012: 44.
- [24] 杨娟. 基于丙烯酸盐喷膜防水的 CSL 隧道支护结构研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020: 55-56.
YANG Juan. A study of an acrylate-based sprayed membrane for waterproofing of composity shell lining tunnels [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020: 55-56.
- [25] 慕儒. 冻融循环与外部弯曲应力、盐溶液复合作用下混凝土的耐久性与寿命预测 [D]. 南京: 东南大学, 2000: 102-111.
MU Ru. Durability and service life prediction of concrete subjected to the combined action of freezing-thawing, sustained external flexural stress and salt solution [D]. Nanjing: Southeast University, 2000: 102-111.
- [26] 达波, 卿家骏, 刘金文, 等. 海洋工程混凝土结构服役寿命预测及耐久性设计方法 [J]. 中国表面工程, 2025, 38(3): 285-296.
DA Bo, QING Jiajun, LIU Jinwen, et al. Service life prediction and durability design method of marine concrete structures [J]. China Surface Engineering, 2025, 38(3): 285-296.
- [27] YAKOVCHUK P V, SAVCHUK E V, SHUKAYEV S M. Critical plane approach-based fatigue life prediction for multiaxial loading: a new model and its verification [J]. Strength of Materials, 2024, 56(2): 281-291.

(编辑:熊小原)