

# 新型阴极保护系统在海上风电基础防护中的研发与应用

张敬涵<sup>1</sup>, 黄国香<sup>2</sup>, 茆明钰<sup>2</sup>

(1. 中电建(温州)绿色能源开发有限公司, 浙江 温州 325800;

2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

**摘要** 在全球能源转型与“双碳”战略深入推进的背景下, 海上风电作为清洁能源的重要组成部分, 其装机规模持续扩大。然而, 海上风机基础长期处于高盐度、高湿度、干湿交替与海水浸泡等恶劣海洋环境中, 导致钢结构面临严重的腐蚀风险。传统牺牲阳极保护方式存在电流不可调、阳极消耗快、维护困难等问题, 尤其对深水导管架基础的结构受力和波浪荷载影响显著。基于此, 本研究系统对比了牺牲阳极与外加电流两种阴极保护方式的原理、设计、施工与运维特点, 并结合实际工程案例, 提出适用于深水导管架基础的外加电流阴极保护系统方案。该方案具备输出电流可调、保护电位自动恒定、远程智能监控、对结构影响小等优势, 旨在为保障海上风电基础的长寿命安全运行提供参考。

**关键词** 阴极保护; 海上风电基础; 牺牲阳极; 外加电流

**中图分类号**: TM62

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.005

## 0 引言

能源是人类生存与发展的重要物质基础, 随着全球能源向清洁低碳转型, 海上风电迎来快速发展期。我国海域广、海上风能资源丰富, 具备大规模开发潜力。但海上风机基础长期处于复杂海洋腐蚀环境, 如高盐高湿、干湿交替、海水浸泡及海生物附着等, 导致钢结构腐蚀, 影响其耐久性与安全性<sup>[1]</sup>。海上风机基础承受着巨大荷载, 需抵抗环境力, 其腐蚀问题与交变应力、疲劳损伤耦合, 加剧安全风险。因此, 采取有效防腐措施是保障风电机组稳定运行的关键。目前, 海上风机基础常采用海工重防腐涂层与阴极保护联合防护, 阴极保护能有效抑制金属腐蚀<sup>[2]</sup>。

阴极保护有牺牲阳极法和外加电流法。牺牲阳极法连接更负电位金属作阳极, 保护钢结构阴极, 具有系统简单、无需外接电源等优点, 但在深水导管架基础应用时, 会增加结构重量与波浪荷载, 后期维护困难。外加电流法通过外部电源施加保护电流, 辅助阳极用惰性材料, 具备输出电流可调等特点, 适用于复杂海洋工程。

近年来, 海上风电向深水、规模化发展, 传统牺牲阳极方案局限性凸显<sup>[3]</sup>。因此, 开展阴极保护技术对比研究与优化设计, 对提升基础防护水平、保障风电场安全意义重大。

## 1 研究内容与方法

本研究以浙江海风苍南示范项目为工程背景, 针对深水导管架基础防腐需求, 系统开展了牺牲阳极与外加电流两种阴极保护方案的对比研究。研究内容包括项目概况介绍、阴极保护系统原理分析、方案设计、施工安装工艺、运维要求以及全生命周期经济性评估, 旨在为深远海上风电基础防护提供优化方案。

### 1.1 项目概况

浙江海风苍南示范项目位于浙江省苍南外海, 总装机规模 200 万千瓦级, 海域面积约 271 km<sup>2</sup>, 场址中心离岸直线距离约 105 km, 水深约 55 ~ 67 m。本项目总装机规模 2015.8 MW。其中, 固定式风电机组共布置 115 台, 包含 61 台 16.7 MW、27 台 16 MW 和 27 台 16.6 MW 机组, 基础采用四桩导管架结构型式, 如图 1 所示。阴极保护系统设计寿命为 25 年, 考虑到 3 年工程建设期, 总设计寿命不低于 28 年。考虑到项目面临恶劣海洋环境, 需采用防腐涂层与阴极保护联合防护措施。

### 1.2 阴极保护系统原理与技术构成

阴极保护基于电化学原理抑制金属腐蚀, 分为牺牲阳极法和外加电流法。牺牲阳极法连接电位更负金属(铝合金阳极), 在电解质中形成腐蚀电池, 以阳极

**作者简介**: 张敬涵(1980-), 男, 本科, 高级经济师、系统分析师, 研究方向: 海上风电建设管理。

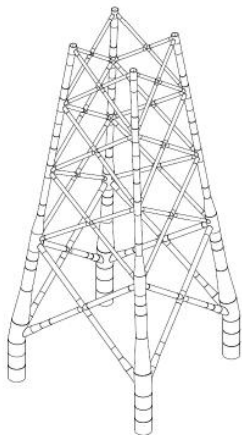


图1 四桩导管架基础模型

消耗提供保护电流；外加电流法通过外部直流电源系统（恒电位仪等）向结构施加可调电流实现阴极极化<sup>[4]</sup>。本研究依据《海上风电场工程防腐设计规范》（NB/T10626-2021）等规范明确系统构成。牺牲阳极系统用铝—锌—铟系合金阳极，其电化学性能为工作电位 $-1.05$ 至 $-1.12$  V、实际电容量不低于 $2\ 600$  Ah/kg、电流效率超 $90\%$ 。阳极块焊接于导管架，输出电流不可调，系统简单无需外部电源。外加电流系统由恒电位仪、钛基混合贵金属氧化物辅助阳极、高纯锌参比电极及电缆组成<sup>[5]</sup>。恒电位仪输入电流 $380$  V/50 Hz，输出电流可调范围 $0$  A至 $200$  A，系统能自动调节，依电位反馈维持保护电位在 $-0.80$  V至 $-1.05$  V间。

### 1.3 牺牲阳极保护方案设计与计算

针对本项目深水导管架基础，牺牲阳极方案通过三维软件 Prostructure 建立模型，计算保护面积。全浸区面积为 $4\ 050$  m<sup>2</sup>，考虑附属构件后暂取 $200$  m<sup>2</sup>，泥下区面积为 $4\ 500$  m<sup>2</sup>。依据规范选取保护电流密度，全浸区初期为 $3$  mA/m<sup>2</sup>、维持期为 $15$  mA/m<sup>2</sup>、末期为 $48$  mA/m<sup>2</sup>，泥下区统一为 $20$  mA/m<sup>2</sup>。计算所得保护电流需求为初期 $82.75$  A、维持期 $133.75$  A、末期 $274$  A。选用 A11D-1 型铝合金牺牲阳极，单块净重 $311$  kg，经公式计算单台基础需阳极 $80$ 块，总重约 $27$  t。阳极布置于导管架水下区，需避开电缆管等位置，但大量焊接会增加局部应力及波浪荷载。

### 1.4 外加电流保护方案设计与优化

外加电流方案采用智能恒电位仪、8组支架式混合贵金属氧化物辅助阳极和4支高纯锌参比电极，辅助阳极布置于 $-17$  m和 $-55$  m高程，参比电极布置于 $-42$  m高程。保护电流计算考虑涂层破损率，浸水区初期破损系数 $2\%$ ，每年增 $1\%$ ；泥下区初期 $10\%$ ，每年增 $1\%$ 。系

统输出电流自动调整，确保全寿命周期保护效果稳定。设计预留 $20\%$ 阳极冗余，单台基础设备含恒电位仪 $1$ 台、辅助阳极 $8$ 个、参比电极 $4$ 个及配套电缆。施工期配备 $10$  t辅助牺牲阳极作临时保护措施。系统集成远程监控功能，可实时采集电位数据并通过云平台管理。

### 1.5 施工安装与运维工艺对比

两种保护方案的施工安装均以陆上为主、海上为辅。牺牲阳极安装主要在加工厂完成，阳极块焊接固定于导管架主体，随结构一同吊装，安装后需测量保护电位，要求相对于 Ag/AgCl 电极为 $-0.80$ 至 $-1.05$  V。运维中需定期水下检查阳极消耗情况，若阳极耗尽则需进行复杂的水下焊接更换。外加电流系统安装包括陆上电极与电缆敷设、恒电位仪就位及海上调试，安装流程强调水密性和绝缘测试。系统具备远程监控功能，可实时监测设备状态，短期停电依赖极化膜保护，长期停电需备用电源。

### 1.6 全生命周期经济性分析

经济性分析基于单台基础工程量与成本计算。牺牲阳极方案的主要成本包括阳极材料费 $86.4$ 万元，但阳极重量导致导管架主体增量成本 $195.2$ 万元和桩基增量 $78$ 万元，总一次性成本约 $359.6$ 万元，未包含主机载荷增加可能带来的额外费用。外加电流方案设备费为 $40$ 万元，施工期辅助阳极 $32$ 万元，运营期电费 $13.3$ 万元，基于 $30$ 年总耗电量 $265\ 454$ 千瓦时及电价 $0.50$ 元每千瓦时计算，总成本 $85.3$ 万元。分析表明，外加电流系统在全生命周期内具有显著优势

## 2 阴极保护系统技术性能与工程应用成果

本研究依靠对系统的原理分析、方案设计、工艺对比及经济性评估，在海上风电深水导管架基础阴极保护技术方案的选择与优化上取得的主要成果为以下几个方面。

### 2.1 两种阴极保护系统的技术特性得以明确

研究中对牺牲阳极与外加电流两套技术体系的核心差异展开分析。牺牲阳极依靠活性金属材料的电化学溶解提供保护电流，其输出电流不可调节，可能导致保护不足。该系统结构简单、无需外接电源，但所需阳极数量较多，单台深水导管架基础约需 $80$ 块铝合金阳极，总重量达 $27$  t，会增加结构荷载与阻水面积。

此外，外加电流系统通过恒电位仪供电，借助惰性辅助阳极（MMO/Ti）传递电流。该系统的优势在于输出电流可根据实时电位信号自动调节，使结构电位维持在最佳保护区间，且具备远程监控与数据采集功

能, 实现智能化与可视化<sup>[6]</sup>。在满足相同保护需求的情况下, 仅需 8 个辅助阳极与 4 个参比电极, 对结构自重与流体动力的影响远小于牺牲阳极系统。

## 2.2 设计方案与施工运维要点形成完整体系

本研究所形成的两种方案的完整设计体系均给予具体工程项目参数。牺牲阳极方案需要针对保护面积、设计寿命及电流密度进行阳极选型与数量计算, 该方案的安装包括了大量陆上焊接工作, 且与主体结构一同吊装。在运维期间内, 需要人员定期进行水下巡检以检查消耗情况, 更换作业难度大、成本极高。

外加电流的设计涵盖了恒电位仪选型、辅助阳极与参比电极布置、电缆敷设及监控系统集成。在施工中, 主要设备与管线在陆上安装, 海上仅进行最终调试。运维通过远程监控平台实现, 实时掌握系统状态与保护效果, 日常需对水上电气设备定期维护。短期停电可由极化膜提供暂时保护, 但长期停电则需启动备用电源。

## 2.3 全生命周期经济性对比结论显著

研究对两种方案的全生命周期成本进行了定量分析与对比。牺牲阳极方案的单台基础一次性材料与安装费用较高。此外, 因其附加重量导致的导管架主体及桩基结构增量成本估算超过 200 万元, 且可能引发主机载荷的进一步增加。包含设备及施工期辅助阳极, 外加电流方案单台基础一次性投入较低, 按现行电价估算, 结合 28 年运营期电费支出不足百万元。经对比, 外加电流系统虽需运营期电费支出, 但避免了因附加巨大重量产生的显著结构增量成本, 全生命周期总成本优势明显。

## 2.4 深水导管架项目推荐方案得以确立

综合技术性能、施工可行性、运维便利性及经济性分析, 研究成果明确指出, 本深水导管架海上风电项目建议采用外加电流阴极保护方案。该结论依据如下: 外加电流系统电流可调、保护效果稳定、智能化程度高、对结构受力影响小, 更适应深水复杂环境与长寿命设计要求; 计入结构影响后, 其经济性显著优于牺牲阳极方案; 国内外工程实践, 尤其是近年来深水导管架项目, 已普遍采用并验证了该系统的可靠性。研究还建议, 风机并网前的施工期, 采用临时性牺牲阳极作为过渡保护措施。

## 3 结论

本项目通过原理分析、方案设计、施工运维对比及全生命周期经济性评估, 深入研究海上风电深水导管架基础应用的牺牲阳极与外加电流两种阴极保护方式, 主要结论如下:

第一, 合理设计与有效维护下, 两种阴极保护方案均能为海上风机基础钢结构提供腐蚀防护, 但技术适应性差异显著。牺牲阳极系统结构简单, 但保护参数不可调, 阳极块焊接安装使局部应力集中, 增加导管架自重与阻水面积, 恶化受力与服役性能, 对深水导管架基础影响更突出。外加电流系统输出电流可自动调节、保护电位恒定、可远程智能监控, 辅助阳极少且轻, 对结构整体性能影响小, 更适用于深水、复杂、长寿命工程场景。

第二, 已明确具体深水导管架工程项目的外加电流阴极保护设计方案。单台基础配置智能恒电位仪、8 组钛基复合贵金属氧化物辅助阳极、4 支高纯锌参比电极及配套电缆与远程监控系统, 施工期配套约 10 t 辅助牺牲阳极临时保护, 该方案可与风机载荷协同迭代, 设计闭环度高。

第三, 经济性分析显示, 牺牲阳极方案成本除材料与安装费外, 还有阳极附加重量导致的主体结构增量成本, 总额显著。外加电流方案虽有运营期电费, 但避免了巨额结构增量成本, 全生命周期总成本优势明显。

第四, 综合技术先进性、结构适应性、运维便利性及全生命周期经济性, 本研究涉及的深水导管架海上风电项目, 推荐外加电流阴极保护方案作永久防护措施, 施工期采用临时性牺牲阳极过渡保护。该结论与国内外普遍选择趋势一致, 可为类似工程提供决策参考与实践指导。

## 参考文献:

- [1] 杨道武, 李景禄, 朱志平. 接地网防腐工程中的阴极保护设计 [J]. 电瓷避雷器, 2004(01):36-38,43.
- [2] 回世翔, 张冉, 徐亚茜, 等. 海上风电机组桩基腐蚀防护研究进展 [J]. 全面腐蚀控制, 2023,37(09):8-13.
- [3] 陈亚林, 黄卫国, 盛家程, 等. 高温低氧环境下铝、锌阳极在高盐度海水中的性能研究 [J]. 环境技术, 2023,41(10):76-81.
- [4] 黄家坪. 牺牲阳极的阴极保护在港工钢管桩防腐中的应用 [J]. 中国水运: 下半月, 2020(06):152-153,155.
- [5] 栾媛, 马长江, 胡校革. 自升式平台外加电流阴极保护技术 [J]. 全面腐蚀控制, 2015(10):33-37.
- [6] 任伟, 陈有登, 谢志猛, 等. 海上风电防腐蚀研究现状与前景 [J]. 应用能源技术, 2022(02):49-52.