

海上风机基础阴极保护设计与应用

何小华, 张力

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东广州, 510663)

摘要: 海上风机基础是海上风电场风机的重要支撑结构, 也是保证风机正常运行 25 年的重要结构。海上风机基础具有设计寿命长、投资大、检测和维修难度高的特点, 因此必须采取有效的防腐措施保证其能长效安全地服役。结合南海某海上风电工程项目, 详尽地研究和论述了海上风机基础阴极保护的关键环节、合理有效的设计和布置方案, 对阴极保护技术在海上风电领域的设计与应用具有一定的指导意义。

关键词: 海上风电; 风机基础; 防腐; 阴极保护

中图分类号: TU761.13

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)03-0076-04

Cathodic Protection Design and Application of Offshore Wind Turbine Supporting Structure

HE Xiaohua, ZHANG Li

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: The wind turbine foundation (WTF) is key supporting structures of wind turbines in offshore wind farm and also is important structures to ensure the normal operation of wind turbines for 25 years. WTF has characteristics of long design life, large investment and high inspection and maintenance difficulty. Corrosion protection measures must be taken to make sure WTF operates normally in its service life. Combined with an offshore wind farm project in the south China sea, this paper carries out research work on key link of WTF's protection, reasonable and effective design plan.

Key words: offshore wind; wind turbine foundation; corrosion protection; cathodic protection

海上风电具有风速较高、风频稳定、切变小、资源丰富、不占土地、适宜大规模开发等特点, 同时也具有靠近经济发达地区, 距离电力负荷中心近、电力消纳能力强、不存在接入和限电问题等优点, 受到许多国家的关注。

海上风机基础是风机塔重要的支撑结构, 通常采用钢结构, 具有设计寿命长、投资大、检测和维修难度高等难点。阴极保护作为海上钢结构防腐保护的重要措施, 对保证风机基础长期有效的安全运行起到了重要作用。常见的防腐措施有涂层防护、金属热喷涂、阴极保护等方式。近

年来, 国内外对海洋腐蚀与防护日趋重视, 各种防腐蚀施工技术也大有发展, 但仍远不能满足实际需求。我国对海洋工程结构设施的防腐蚀研究与国外发达国家有明显的差距, 一些关键技术尚未解决, 也没有形成具有我国自主知识产权的技术, 而且缺少相应的防腐规范和标准, 这些都严重影响了海上风机基础结构的设计、建造和安全运行。本文结合南海某海上风电场项目, 对海上风机基础阴极保护设计研究与应用进行了探讨。为解决海上风电场风机基础结构防腐蚀问题提供了一定的技术依据和数据基础。

1 海上风机基础阴极保护设计研究

1.1 基本资料

在进行海上风机基础阴极保护设计时, 应对以

下资料进行收集, 并在必要时进行现场测定:

- 1) 钢结构的材质、外形尺寸、表面状况。
- 2) 介质的盐度或化学成分。
- 3) 介质的温度、含氧量、电阻率和 pH 值。
- 4) 波浪、潮位、海水流速和水中泥沙含量等。
- 5) 介质的污染情况等。

1.2 阳极材料及性能

1.2.1 阳极结构

常用的海上工程用牺牲阳极结构示意图如图 1 所示。其中, 各细节尺寸取值可根据实际需求进行设计。

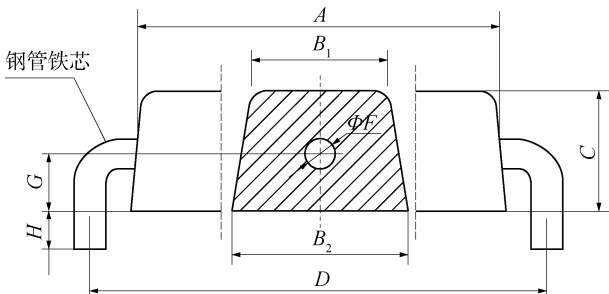


图 1 牺牲阳极示意

Fig. 1 Sacrificial Anode Demo

1.2.2 阳极成分

常见的铝-锌-钢-镁-钛牺牲阳极成分^[4]见表 1, 当有特殊要求时可对化学成分稍作调整, 但其性能与质量应符合相关标准的规定。

表 1 阳极成分

Table 1 Content of Anode

元素	质量分数/%
Zn	4.0~7.0
In	0.020~0.050
Mg	0.50~1.50
Ti	0.01~0.08
Fe	≤0.15
Si	≤0.10
Cu	≤0.01
Al	余量

1.2.3 阳极电化学性能

常见的铝-锌-钢-镁-钛牺牲阳极电化学性能应符合表 2 的规定。

1.3 设计参数设定

在进行阴极保护设计时, 设计参数的选取应基于项目所在区域的水文气象、地质情况的勘察结

果, 且应符合相关标准的规定。

表 2 电化学性能

Table 2 Electrochemical Property

开路电位/V	工作电位/V	实际容量/(Ah/kg)	电流效率/(kg·A ⁻¹ ·a ⁻¹)	消耗率/溶解状况
-1.18 ~ -1.10	-1.12 ~ -1.05	≥2 600	≥90	产物容易脱落, 表面溶解均匀

1.4 牺牲阳极计算

1.4.1 阳极发生电流

单支阳极发生电流计算公式^[2]如下:

$$I_a = \Delta E / R_a \quad (1)$$

式中: I_a ——单块阳极发生电流(A); ΔE ——阳极驱动电位(V); R_a ——阳极接水电阻(Ω)。

阳极接水电阻按下式进行计算:

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right) \quad (2)$$

$$r_c = \frac{C}{2\pi} \quad (3)$$

$$r_m = r_c - (r_c - r_i)\mu \quad (4)$$

式中: ρ ——海水电阻率, $\Omega \cdot \text{cm}$; L ——阳极长度, cm; r ——阳极等效半径, cm; r_c ——初期等效半径, cm; r_m ——末期等效半径, cm; C ——阳极截面周长, cm; r_i ——阳极铁芯半径, cm; μ ——牺牲阳极利用系数, 取 0.85~0.90。

1.4.2 阳极数量和使用年限

牺牲阳极的数量可按下式计算:

$$N = \frac{I}{I_a} \quad (5)$$

式中: N ——阳极数量, 个; I ——总保护电流, A; I_a ——单个阳极的发生电流, A。

牺牲阳极的使用年限可按下式计算:

$$t = \frac{W_i \mu}{EI_m} \quad (6)$$

式中: t ——牺牲阳极使用年限, 年; W_i ——单个牺牲阳极的净重, kg; μ ——详见公式 4; E ——牺牲阳极消耗率, kg/(A·a), 取值见表 7; I_m ——维持保护电流, 单位 A, 其值为 (0.50~0.55) I ; I ——总保护电流, A。

1.5 阳极的布置与安装

牺牲阳极的布置应使被保护钢结构的表面电位分布均匀, 宜采用均匀布置。牺牲阳极的安装位置应满足以下要求^[1-2]:

1) 牺牲阳极的安装顶高程与设计低水位的距离不小于 1.2 m。

2) 牺牲阳极的安装底高程与海泥面的距离不小于 1.0 m。

3) 牺牲阳极与被保护钢结构表面间的距离不宜小于 100 mm。

4) 牺牲阳极的安装方式可采用焊接或螺栓连接, 采用螺栓连接时应确保牺牲阳极在有效使用期内与被保护钢结构之间的连接电阻不大于 0.10Ω 。

5) 牺牲阳极铁脚布置距离结构性焊缝应不少于 150 mm;

6) 牺牲阳极铁脚布置距离节点区域不少于 600 mm。

某海上风机基础结构牺牲阳极布置如下图 2 所示。

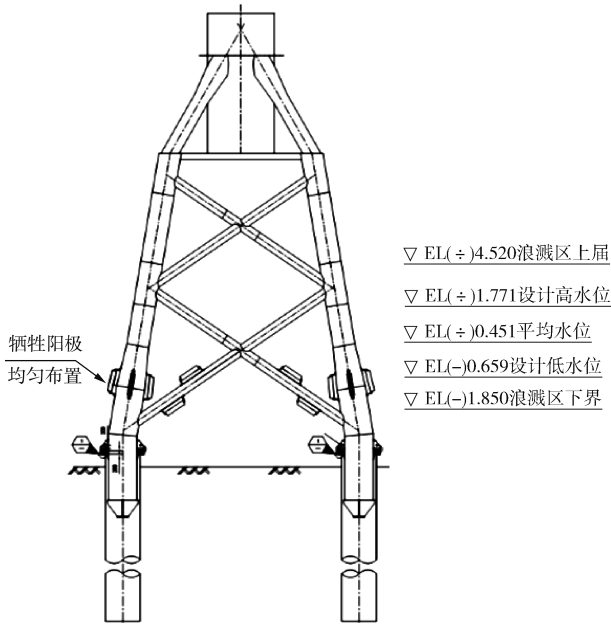


图 2 牺牲阳极布置示意

Fig. 2 Sacrificial Anode Arrangement Demo

2 某海上风机基础阴极保护设计

2.1 基础资料

某海上风电场工程位于南海珠江口出海海域, 场区内海底地貌形态简单, 水下地形较平坦, 海底泥面标高为 $-6.4 \sim -10.5 \text{ m}$, 平均水深 $7 \sim 11 \text{ m}$, 属于近海风电场。规划海域面积约 62.3 km^2 , 装机容量为 200 MW。工程所在海域, 属于亚热带

季风气候, 当地水文环境: 平均气温 $20 \sim 24^\circ\text{C}$, 日照时间 $1\,700 \sim 2\,000 \text{ h}$, 全年平均相对湿度 $75\% \sim 85\%$, 其中 5~8 月平均相对湿度 $85\% \sim 88\%$, 年降水量 $2\,000 \sim 2\,800 \text{ ml}$, 气温高、日照强、相对湿度高, 属于典型的高温高湿海洋大气环境。

根据基础资料选定的导管架基础方案见图 3, 工程水位信息见表 3。

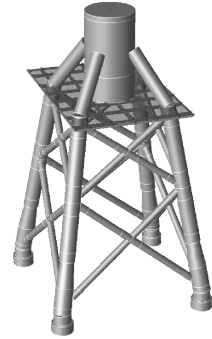


图 3 导管架基础方案

Fig. 3 Jacket Foundation Type

表 3 工程水位信息

Table 3 Water Level Information

水位	数值/m
极端高水位	$\nabla 3.410$
设计高水位	$\nabla 1.771$
设计低水位	$\nabla -0.659$
极端低水位	$\nabla -1.290$

2.2 设计参数

某海上风电场工程的防腐设计包括大气区、浪溅区、水下区、泥下区域, 腐蚀环境分区^[2]见下表 4。

表 4 腐蚀环境分区

Table 4 Division of Corrosion Environment

环境类别	大气区	浪溅区	水下区	泥下区
工程设计水位	设计高水位加 1.5 m 以上	大气区下界至设计低水位减 1.0 m 之间	浪溅区下界至海泥面	海泥面以下
钢结构单面平均腐蚀速度/(mm/a)	0.05 ~ 0.10	0.20 ~ 0.50	0.12	0.05

根据风机基础所处的环境特点, 水下区采用涂层加牺牲阳极的联合保护方式, 泥下区采用牺牲阳极保护方式, 浪溅区及大气区采用涂层保护方式。依据相关规范对牺牲阳极进行设计计算^[2-3], 所需参数见表 5~7。

表5 保护电流密度

Table 5 Protection Current Density

环境介质	钢结构表面状态	保护电流密度/(mA/m ²)		
		初始值	维持值	末期值
静止海水	裸钢	100~130	55~70	70~90
流动海水	裸钢	150~180	60~80	80~100
海泥	裸钢	25	20	20

表6 钢结构的保护电位

Table 6 Protective Potential of Steel Structure

环境、材质		保护电位/V		
		饱和硫酸铜电极	海水氯化银电极	锌合金电极
含氧环境中的钢	最正值	-0.85	-0.78	+0.25
	最负值	-1.10	-1.05	+0.00
缺氧环境中的钢	最正值	-0.95	-0.90	+0.15
	最负值	-1.10	-1.05	+0.00

表7 涂层的破损系数

Table 7 Coating Damage Coefficient

设计使用年限/年		破损系数/%		
		初始值	平均值	末期值
10	2	7	10	
20	2	15	30	
30	2	25	60	
40	2	40	90	

2.3 阳极计算结果

根据基础结构阴极保护区域的面积以及所选择的保护电流密度等数据分别计算出导管架服役初期、中期、末期以及满足末期单个阳极最大保护时间所需要的阳极数量,取三者之中最大的作为最终设计选择的阳极数量,计算结果见表8。

表8 阳极需求

Table 8 Demand of Anode

项目	单位	JTS 标准	DNV 标准
总最终电流需求值	A	57.70	49.94
阳极块总质量	kg	4347.86	4073.02
阳极块总数	—	40	90

2.4 阴极保护设计结果

通过布置一定数量的阳极块,再通过符合规范

要求的计算公式进行计算,现有牺牲阳极布置满足各阶段保护电流需求。

4 结论

海上风机基础是海上风电场重要的海工结构,是确保风机正常运行的支撑结构,需要承受各种不确定因素的影响,如腐蚀存在不确定性等,其防腐设计必须针对具体项目和具体腐蚀环境进行全面的考虑分析与设计^[5-11]。

阴极保护要充分考虑涂层防腐的设计与施工情况,结合项目实际需要,选取合理的最小保护电位、保护电流密度、电阻率等设计参数,合理计算涂层破损率、阳极数量等数据,确定有效的布置和安装方法,最终确定合理有效的阴极保护方案,有效避免设计浪费,并保障风机基础长效安全运行。

参考文献:

- [1] DNV-OS-J101—2014. Det Norske Veritas: Offshore Standard. Design of Offshore Wind Turbine Structures [S].
- [2] JTS 153-3—2007. 海港工程钢结构防腐蚀技术规范[S].
- [3] NB/T 31006—2011. 海上风电场钢结构防腐蚀技术标准[S].
- [4] GB/T 4948—2002. 铝-锌-钢系合金牺牲阳极[S].
- [5] 李美明,徐群杰,韩杰. 海上风电的防腐蚀研究与应用现状[J]. 腐蚀与防护, 2014(6): 585-588.
- [6] 乐治济,林毅峰. 海上风机基础钢结构防腐蚀设计[J]. 中国港湾建设, 2013(4): 19-20.
- [7] 余越泉. 导管架平台防腐技术研究[J]. 中国海洋平台, 2011, 16(4): 37-41.
- [8] 侯保荣,杨小刚,贾淑香. 海洋浪溅区钢结构腐蚀与复层包覆防护实践[J]. 中国港湾建设, 2012(2): 70-72.
- [9] 刘建国,李言涛,侯保荣. 海洋浪溅区钢铁腐蚀与防护进展[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(10): 833-836.
- [10] 邹辉. 海上风机基础结构防腐蚀研究[J]. 华东电力, 2014, 42(12): 2529-2534.
- [11] 张贤慧,方大庆,钟承珠,等. 海洋工程装备重防腐涂料的应用研究[J]. 南方能源建设, 2015, 2(3): 23-27.

(责任编辑 高春萌)