

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.017

# 海上风电场海底电缆防护方案研究

苏荣<sup>1</sup>, 元国凯<sup>2</sup>

(1. 南方海上风电联合开发有限公司, 珠海 519080; 2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** [目的]海底电缆防护是海上风电场建设的一种重要组成部分, 海上风电中最大部分的保险理赔主要由于电缆事故造成。由于电缆路由线路较长, 会穿过不同区域, 每个区域的防护方案都不同。[方法]首先简单介绍海底电缆防护作法的基本情况, 然后详细阐述了海底电缆登陆段防护方案, 紧接着描述了海底电缆交越段防护方案以及电缆管附近的海缆防护方案, 最后对海上风电场海底电缆防护方案进行总结。[结果]针对海底电缆登陆段, 多采用套管保护、电缆沟与水平定向钻方案; 针对海底电缆交越段, 多在交越点采用垫块的方案; 针对基础附近的海缆, 主要采用 J 型管与弯曲限制器的方式。[结论]无论采用哪种方式, 应高度重视海上风电场海底电缆的防护, 确保海缆在运行期间的安全。

**关键词:** 海上风电; 海底电缆; 登陆段; 交越段; 防护方案

**中图分类号:** TM614; TM757.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-8676(2018)02-0121-05

## Protection Schemes of Submarine Power Cables in Offshore Wind Farm

SU Rong<sup>1</sup>, YUAN Guokai<sup>2</sup>

(1. Southern Offshore Wind Power Joint Development Co., Ltd, Zhuhai 519080, China;

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

**Abstract:** [Introduction] Protection of submarine power cables is an important part of offshore wind farms construction. The largest insurance claims in offshore wind power are due to cable damages. As the cable routing is long, it will pass through different regions. Therefore, the protection schemes in each area are different. [Method] In this paper, the basic situation of submarine power cable protection is briefly introduced, and then the submarine cable landing scheme is described in detail. Then, the protection scheme of the submarine power cable over other cables or pipes and besides cable tube is described. Finally, the protection schemes of submarine power cable in offshore wind farm is summarized. [Result] For the landing section of submarine cables, casing protection, cable trenches and horizontal directional drilling schemes are mostly used; for the cross-section of submarine cables, cushion block solution is adopted at the crossover point; for the submarine cable near the foundation, J-tube with a bend restrictor is mainly used. [Conclusion] No matter which method is adopted, the protection of submarine cables in offshore wind farms should be highly valued to ensure the safety of submarine cables during operation.

**Key words:** offshore wind; submarine power cable; landing section; crossing section; protection scheme

由于海上风速大、风能产量高, 风力持久稳定、较小的风湍流对风电机组损耗小, 受土地、环境噪声制约也较弱, 海上风电在欧洲发展已日益成熟, 在国内正稳步发展。海上风电场建设涵盖的内容比较广泛, 技术难点比较多, 其中与海底电缆相

关的工程建设就是其中一个。

海上风电的保险理赔案例中, 很大一部分都是由电缆事故造成的。由于所处的环境比较恶劣, 海底电缆在安装过程中或在安装以后容易遭到损坏, 例如在港口装载施工船时造成的扭结和断裂, 在安装到风机基础 J 型管的时候造成过度的抻拉而出现的故障。自升式平台船在升降时压在电缆上, 浮式船舶在抛锚时容易伤及电缆。在安装和掩埋电缆后, 有可能造成一些其它的风险, 包括因海床的变

收稿日期: 2017-07-13 返回日期: 2018-01-02

基金项目: 中国能建广东院 2016 年科技项目“海上风电技术研究”(EX03911W)

动使得电缆暴露等。有时在海底悬空,暴露和保护不好的电缆容易被渔网缠绕,船锚也会掉到电缆上。比较典型的海底电缆损坏事故如图1所示。



图1 海底电缆损伤图例

Fig. 1 Damages of submarine power cables

近海风电场的周围航道一般较为繁忙,其间船舶主要是杂货船、集装箱船和高速客船。对于集电海底电缆与高压送出海底电缆,风险主要存在于登陆段、海底交越段与航道区。有些风场存在多个海底电缆与原有管线、光缆等交越的问题。正是基于海底电缆路由不同位置的特点,本文首先简单介绍海底电缆防护的基本情况,然后详细阐述海底电缆登陆段方案交越段防护方案,继而描述海底电缆交越段防护方案,最后对海上风电场海底电缆防护设计方案进行总结。

## 1 海底电缆防护作法概述

海底电缆敷设于海床后,为抵御锚害、拖网等外力的冲击破坏,同时为防止在海流的作用下长期疲劳运动造成的海底电缆机械性损伤,必须对海底电缆实施稳固防护,这是海底电缆工程建设中重要的项目之一。

目前,在世界各国区域电网跨海域互联工程中,海底电缆防护常见的措施有:在海底电缆近海岸登陆段浅水区采用水泥砂浆袋埋设防护;在渔业活动频繁且水深30 m以内水域采用少量铁套管防护,在水深30 m以上采用水域水力喷射冲埋防护;在无法进行埋设点和海底电缆悬空段采用抛石堆积防护。吴庆华<sup>[1]</sup>等人对我国首条500 kV海底电缆线路的路由选择、联网方式和电压等级、路由勘察、海底电缆选型、海底电缆敷设、海底电缆保护设计等多方面进行了详细阐述,为其他工程提供了有益参考。针对浅滩区域,王裕霜<sup>[2]</sup>与于俊岭<sup>[3]</sup>根据影响海底电缆的不同因素分别提出了不同的防护方案与实践经验。在海底电缆安装后的悬空段,王裕霜<sup>[4]</sup>重点介绍了后续抛石保护的技术方案与施工

过程中的新技术应用。针对登陆点与路径选择,韩志军<sup>[5]</sup>等人提出了一些设计建议。海底电缆不仅仅应用在海上风电场中,在其他输电工程中也有海底电缆敷设及其保护,王裕霜对<sup>[6]</sup>这类工程做了集中描述,并列举世界范围内相关项目的海底电缆敷设情况,从中可得到一些启发。

## 2 海底电缆登陆段方案研究

海上风电场中的电缆登陆段主要分海滩与海堤两种,一般大陆主要是穿越海堤,也有部分穿越海滩,而海岛大多是穿越海滩,甚至是陡峭的山壁。以下针对这两种典型的登陆段防护方案进行描述。

### 2.1 海滩段防护方案

海滩段的地质情况千差万别,典型的有砂质海滩、堆积少量开山石或裸露礁石,如图2所示。



图2 典型的海滩段类型

Fig. 2 Typical beaches of submarine cable landing

对于海底电缆近海岸登陆段浅水区,划定海底电缆防护区为海底电缆两侧各50 m。电缆防护区周围还应设置禁锚标志,以提醒他人不得在防护区内作业。海底电缆可采取全程埋设并采用套管保护或水泥砂浆袋保护,套管埋入海底2 m,陆上段:海底电缆敷设可以放置在石砌电缆沟或混凝土槽内,再回填细沙,盖上盖板,埋设深度大于1.5 m。

### 2.2 海堤段防护方案

海堤分人工海堤与自然海堤,人工海堤一般为带有胸墙的直立式海堤,沿岸建有长廊、绿化隔离带,隔离带内埋设有市政雨水管和通讯光缆等。典型的自然海岸为基岩岸线,其上山坡生长有茂密的灌木丛,坡度相对较缓,坡前分布有岩石。典型的海堤段类型如图3所示。

对于自然海堤,主要是以修建电缆沟槽为主,而人工海堤,由于很多不利于大开挖,一般采用定向钻方案,定向钻穿越施工具有不会阻碍交通,不会破坏绿地、植被,不会影响商店、医院、学校和居民的正常生活和工作秩序,解决了传统开挖施工



图 3 典型的海堤段类型

Fig. 3 Typical seawalls of submarine cable landing

对居民生活的干扰, 对交通、环境、周边建筑物基础的破坏和不良影响。现代化的穿越设备的穿越精度高, 易于调整敷设方向和埋深, 管线弧形敷设距离长, 完全可以满足设计要求埋深, 并且可以使管线绕过地下的障碍物。

它主要的工艺流程为: 施工准备 - 导向孔施工 - 反拉扩孔、成孔 - 牵引管道 - 清场, 具体流程如图 4 所示。定向钻施工关键工序与技术措施主要有进出口措施、泥浆配比、防止钻具断裂、防止回拖失败、防渗水与防管涌、保障定向钻出土点不偏差、地上地下设施保护等。

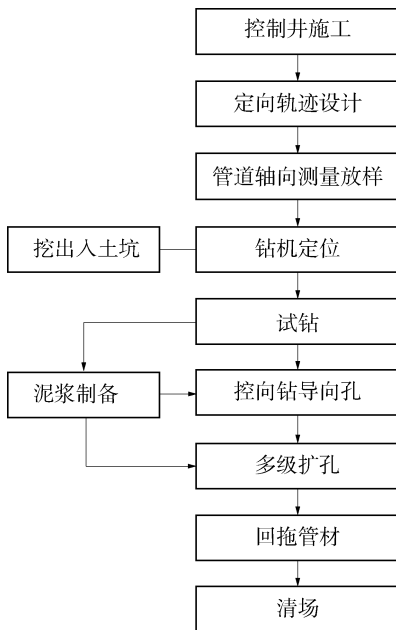


图 4 定向钻主要施工流程

Fig. 4 Main procedures of horizontal direct drilling

### 3 海底电缆交越段方案研究

#### 3.1 交越天然气管道方案

对于海上风电场内存在多个海底电缆与原有管线、光缆等交越的情况, 首先应给予足够的重视,

制定周详的防护方案, 最好在正式开工前征求原管线所属单位的意见和同意, 必要时需请专家论证。

对于天然气管道, 不可能按照切断后穿越的方法进行, 只能采用跨越的方法。得到跨越位置点的管道实际埋深数据后, 制定具体的跨越方法。

在施工前, 要对交越海底电缆进行实际位置测量, 获得海底电缆的精确坐标, 为海底电缆能安全交越提供可靠的依据。同时获得管线的埋设深度与走向。

在施工时, 在管线交越前后各 50 m 处设置浮漂, 以明确交越位置, 交越作业采取跨越式交越法, 在正常敷设至被交越缆线或管线前方 100 m 处, 停止埋深作业, 起出埋设机, 采用抛放作业的方式跨越交越点, 待过交越点 100 m 之后, 再由潜水员确认水下情况安全, 之后重新投放埋设机进行后续的敷埋作业。

根据现行行业标准《海底管道系统》(SY/T—10037)<sup>[7]</sup>, 交越的两管线必须是分离的, 且要永久保持不少于 0.3 m 的垂直距离, 因此要在交越点位置原有管道和新敷缆线之间采用预制混凝土垫块对原有管道进行覆盖保护, 以此隔离原有管道及新敷缆线, 避免运行时产生相互影响, 立面图如图 5 所示。此外, 要进行沉降分析, 确保永久变形满足要求, 同时也是设计垫块大小厚度等的依据之一。实际工程采用的垫块如图 6 所示。该方案的优点在于海上安装时间比较少, 安全性比较高, 长期稳定性较好。交越天然气管道的防护方案同样适用于光缆。

#### 3.2 交越航道方案

海上风电场目前都规划并建设在近海海域, 这些海域的航线非常繁忙, 尤其是风场周边通常有大型码头, 各种船型穿梭来往, 大型船只紧急抛锚很容易对海底电缆造成威胁。

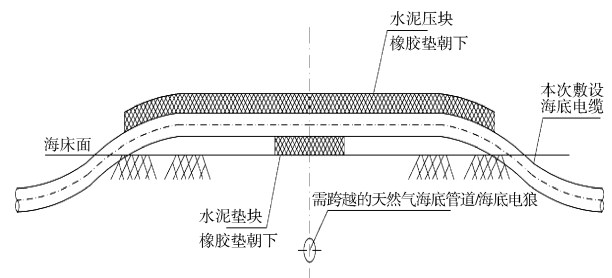


图 5 交越点保护方案立面图

Fig. 5 Protection scheme of crossing section





图6 交越点保护用垫块

Fig. 6 Cushion block used in crossing section

对于穿越航道区的海底电缆可加大电缆的埋深。在航道内施工时,需向海事主管机关申请交通管制,同时尽量避免航道封航。划定海底电缆防护区:海港区内为海底电缆两侧各50 m。电缆防护区周围还应设置禁锚标志,以提醒过往船舶不得在防护区内锚泊。考虑到大型船只紧急抛锚的概率极低,海底电缆可采取全程埋设并采用套管保护、加盖保护件(碎石、混凝土件、沙包等)的保护方式。

#### 4 风电机组基础附近的方案研究

风电机组基础附近的海缆防护对于该条集电线路上的风机正常输电具有重要影响,电缆保护管处若无有效防护,受冲刷很快容易导致海缆在管口处裸露与悬空,在后期的运行过程中,海缆不断与保护管发生摩擦,最终导致铠装破坏,海底电缆发生破损,电能无法传输至升压站,这在国内外工程上均有教训。随着海上风电的发展,电缆保护管处的海缆防护越来越得到重视。

在该部位主要有以下种方式:电缆自身外防护、J/I型管保护、弯曲限制器、海缆柔性保护管以及地基处理。海底电缆自身外防护,通常是在电缆外层增加金属丝编织的防护层(铠装),其优点是增加电缆的抗磨损能力,缺点是减少了电缆的柔韧性,如果电缆的弯曲半径太小,将减少海底电缆的抗弯强度。此外,增加电缆的防护层将增加电缆的制造成本。一般情况下,前几种的成本较电缆铠装要小很多,其中J型管是目前海缆防护的通常做法,必要时再辅以后面三种做法。

对于表层土为淤泥及淤泥质土的海域,冲刷的影响较小,可将J型管插入到淤泥一定距离,在电

缆基本完成穿J型管施工时,由潜水员水下安装橡胶块封堵,避免电缆与J型管在喇叭口处摩擦。

对于表层土为粉砂或其他砂土时,J型管可以配合弯曲限制器或柔性管使用,弯曲限制器由多个互锁元件组成,互锁元件包括聚合物元件、金属元件及混合元件。当弯曲限制器受到外部载荷时,互锁元件就会锁在一起,使弯曲限制器具有一定的锁定弯曲半径(大于等于软管的最小弯曲半径),从而限制复合软管的进一步弯曲<sup>[8]</sup>。目前国内海上风电场应用最广泛的防护方案也是采用J型管结合弯曲限制器。根据类似的功能,国内设计了一种海缆上平台保护装置,该装置的工作原理就相当于将“J”形管的末端采用柔性结构延长,延长部分长度需要超过可能被冲刷的范围,末端埋于原始海床下作为固定端<sup>[9]</sup>,该方案在国内工程中得到应用。此外,海缆柔性保护管在福建某工程也得到应用<sup>[10]</sup>。

地基处理主要是在安装基础结构前通过挖掉或清除上表层软弱土以及加固表层土等方法对表层土进行处理,使得其承载能力达到设计强度要求,该方法在单桩基础与表层土为砂土时用得较多,因为砂土容易被冲刷,且大直径单桩的冲刷效更显著,必须在桩周围铺设一定厚度的砂石垫层,防止冲刷导致的海缆悬空以及所造成的损伤。典型的地基处理海缆防护图如图7所示。

地基处理常见于海上石油平台基础,可以作为—种好的推荐方法,但海上石油平台一般为单个大型结构,如果整个风场几十台都采用此类方式,处理费用将是惊人的。

基础附近的最终海缆防护方案因结构形式、施工技术及施工经验、风险等因素综合考虑确定。

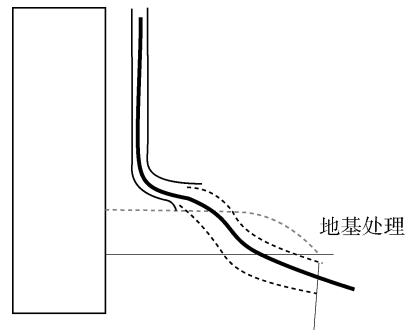


图7 典型的地基处理海缆防护图

Fig. 7 Typical ground treatment protection scheme

## 5 结论

海底电缆防护是海上风电场建设的重要组成部分,其效果将直接影响风电场运维成本。本文总结了海底电缆在不同区域段的防护方案,主要总结如下:

1) 海上风电中最多的保险理赔都是由电缆事故造成,在项目全寿命阶段均应重视海底电缆防护,尤其应注重在前期采用可靠的和适用的防护方案。

2) 针对海底电缆登陆段,具体分海滩段与海堤段。对于海滩段,多综合采用套管保护、水泥砂浆袋保护,电缆沟或混凝土槽等。对于海堤段,推荐采用水平定向钻方案。

3) 针对海底电缆交越段,具体分交越管道与航道讨论。对于交越管道情况,应给予足够的重视,制定周详的跨越防护方案,在交越点采用垫块,确保跨越与被跨越的电缆(管线)的安全。对于航道段,建议深埋,甚至加套管保护等方式。

4) 针对基础附近的海缆,需根据基础型式与表层地质综合判断。一般而言,主要采用J型管入泥、J型管辅以弯曲限制器等方式。

### 参考文献:

- [1] 吴庆华. 电缆线路工程的设计 [J]. 中国电业(技术版), 2014(10): 46-54.
- [2] 王裕霜. 500 kV 海底电缆浅滩铸铁套管保护实践与思考 [J]. 南方电网技术, 2011, 5(2): 92-94.
- [3] 于俊岭, 吴海洋, 张轶, 等. 海底电缆登陆浅滩防冲刷措施研究 [J]. 中国电业(技术版), 2014(10): 85-88.
- [4] 王裕霜. 500 kV 海底电缆后续抛石保护工程建设 [J]. 电力

建设, 2012, 33(8): 116-118.

- [5] 韩志军, 陈光. 海底电缆登陆点及路径选择研究 [J]. 吉林电力, 2013, 41(2): 7-9.
- [6] 王裕霜. 国内外海底电缆输电工程综述 [J]. 南方电网技术, 2012, 6(2): 26-30.
- [7] 国家能源局. 海底管道系统: SY/T 10037—2010 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
- [8] 安世居, 杨强, 白海洋, 等. 柔性软管弯曲限制器的设计 [J]. 油气储运, 2016, 35(5): 551-554.
- [9] 李银, 刘永辉, 叶修煜. 水下J形海缆保护管的安装 [J]. 港工技术与管理, 2015(3): 4-7.
- [10] 朱荣华, 张美阳, 田振亚, 等. 海上风机基础新型安全J型管技术方案 [J]. 福建水力发电, 2016(2): 87-90.

### 作者简介:



苏荣

1983-, 男, 广东汕头人, 工程师, 学士, 主要从事新能源风力发电工程、智能微电网工程、项目管理等工作 (email) surong@csg.cn.

SU R



元国凯

1986-, 男, 湖南岳阳人, 高级工程师, 硕士, 主要从事海上风电海工结构设计与研发、设计管理工作 (email) yuanguokai@gedi.com.cn.

YUAN G K

(责任编辑 高春萌)

## 第四届中国海上风电产业发展国际峰会

2018年5月24日至25日,第四届中国海上风电产业发展国际峰会暨第80期广东科协论坛在广州市增城区举行。这次国际峰会论坛主题是:“绿色能源—海上风电—广东蓝海—扬帆起航”,由广东省科协、中国质量认证中心和中国海上风电网等主办。中国能源建设集团规划设计公司总经理、党委副书记,中国能建广东院董事长、党委书记罗必雄在会上指出:“发展海上风电产业是调整能源结构、建设现代化经济体系、实现经济高质量发展的必然要求。广东院愿携手海上风电全产业链企业,加强国际合作,推动规模化、集约化连片开发建设海上风电,共同为培育中国的海洋经济、打造海洋强国贡献一份力量”。中国能建广东院总工程师、《南方能源建设》主编裴爱国在会上作《广东省海上风电开发实践与创新》报告。

(郑文棠)