

# 海上风电场升压站风险分析与管控研究

郑伯兴<sup>1</sup>, 苏荣<sup>2</sup>, 冯奕敏<sup>1</sup>

(1. 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; 2. 南方海上风电联合开发有限公司, 珠海 519080)

**摘要:** [目的]随着全社会环保呼声和意识的不断提升,我国海上风电事业迎来了蓬勃发展的态势,如何确保海上风电项目的平稳着陆,是当前投资方关注的重点。[方法]以海上升压站为例,应用风险管理理论,对海上升压站勘察设计、建造、施工、运输、安装等方面存在的重要风险点,进行全面深入的风险识别和风险分析。[结果]提出了海上升压站钻孔布置、海洋土力学参数确定、疲劳破坏、建造、沉桩、施工窗口期、整体组装式运输以及安装等风险的控制措施。[结论]对海上升压站的风险识别、分析与控制措施,可作为海上风电场项目风险管控的参考。

**关键词:** 海上升压站; 风险管理; 设计; 施工; 运输

中图分类号: TK89; TM63

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)S1-0228-04

## Research on the Risk Analysis and Control of the Offshore Substation

ZHENG Boxing<sup>1</sup>, SU Rong<sup>2</sup>, FENG Yimin<sup>1</sup>

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;  
2. Southern Offshore Wind Power Joint Development Co., Ltd., Zhuhai 519080, China)

**Abstract:** [Introduction] With the rising of the demand for the environmental protection, Offshore wind power industry in China becomes vigorous, investors pay more attention to make sure the offshore wind power safe. [Method] In this paper, with risk management process, risks of the survey, design, building, construction, transportation, installation of the offshore substation were analyzed comprehensively. [Result] The treatments for the risks of borehole layout, confirmation of marine soil parameters, fatigue failure, building, piling, construction window period, transportation and installation of integral assembling of the offshore substation are put forward. [Conclusion] The conclusion of this paper is the reference for the risk management of offshore wind farm.

**Key words:** offshore substation; risk management; design; construction; transportation

当前,可再生能源规模化利用与常规能源的清洁低碳化将是能源发展的基本趋势,加快发展可再生能源已成为全球能源转型的主流方向,其中海上风电的发展已进入全新的阶段。海上风电场主要由海上风电机组、海上升压站、海底电缆、陆上电缆以及陆上集控中心等组成。国内外学者对海上风电项目的风险管控进行了积极的探索和研究,A. Sannino等人针对海上风电项目运行期间的风险进行了研究,包括行船影响、海浪冲击、海上复杂气象环境等对海上风电项目运行影响的分析<sup>[1]</sup>。李

静等人对海上风电项目的风险评价做出了探索性研究,通过一定的评价方法,建立风险评价模型,针对具体项目进行了风险分析评价。海上升压站集电能聚集、升压、配电和控制为一身,是整个海上风电场的中心枢纽,其重要性不言而喻。因此,把控海上升压站的相关重要风险点关系着海上风电场项目的成败。本文以海上升压站为例,应用风险管理理论,对海上升压站的勘察设计、建造、运输、安装、施工等方面存在的重要风险点,进行全面深入的分析研究,并提出相应的控制措施,为今后海上风电场项目的风险管控提供参考。

## 1 风险管理理论

海上风电场存在台风、盐雾腐蚀、雷击、巨浪、

收稿日期: 2018-01-17 修回日期: 2018-05-21

基金项目: 中国能建广东院科技项目“海上风电技术研究”(EX03911W)

风暴潮等复杂恶劣的海洋环境,涉及海洋、航运等多方面的敏感因素,存在较大的风险。因此,为确保项目安全顺利推进,进行风险管控显得尤为重要。

海上升压站的风险管理主要包括风险识别、风险估计和风险评价等方面,首先采用方法对各种可能的风险进行识别,最终选择规避、控制或者接受风险的过程。本文采用的风险识别方法为一般方法,即对海上升压站的风险因素进行分类逐项识别;海上风电项目风险评估方法则较多,包括层次分析法、调查及专家打分法、敏感性分析法、统计和概率法以及影响图法等<sup>[2]</sup>。本文对海上升压站的风险评估则采用类似调查及专家经验法的方法,即依据以往项目实践或者相关工程经验进行的评估。

## 2 海上升压站勘察设计技术风险及控制

经过近几年海上风电事业的发展,海上升压站的勘察设计技术有了一定的积累和提升,《海上风力发电场设计规范》等相关规程规范也即将出版,但由于海上升压站所处的海洋环境的特殊性,仍存在一定的勘察设计技术风险:

### 1) 钻孔布置的风险及控制

海上升压站的定位是风电场总体布局确定的内容之一,通常根据风机总体布置、海床水文条件、集电海缆及送出海缆等条件,进行经济性比较后综合确定。海上升压站的位置确定之后,施工图阶段的勘察钻孔有时为节约成本,仅在升压站的导管架基础中心位置布置钻孔,若钻孔揭露的中微风岩面较深,导管架的四个基桩设计为非嵌岩桩基,后续的基桩施工则按照后桩法进行打桩作业。但实际上,海底岩面起伏较大,个别基桩位置的实际上微风岩面可能较浅,则此时该基桩的设计必须改为嵌岩做法,相应的施工方案和措施也须进行调整,此时往往引起工期和费用的大幅增加。

因此,应认真分析前期阶段地质资料,若海上风场中微风化岩面起伏较大,建议施工图勘察阶段在海上升压站每个基桩位置单独布置一个钻孔。

### 2) 海洋土力学参数确定风险及控制

在海上进行勘察作业,海况(如海浪大小等)直接影响海上取土和静力触探等现场操作的质量。在海况较好的时候,也就是风平浪静的时候,现场勘测获取的土样较好,实验室实测出来的侧阻力、端阻力以及剪切强度等力学参数较为准确,能够较好

反映实际土层的力学性能;在海况较差的时候,也就是风浪较大的时候,现场勘察获取土样较差,后续试验的结果跟实际偏差较大。

对于海上升压站的桩基设计而言,岩土参数的准确度直接影响桩基设计的安全性和经济性,是一个客观存在的技术风险。对于不同海况下获得的勘测成果,应进行客观分析,建议参考同一片海域已有的土层参数成果,综合评价海洋土的力学性能。

### 3) 海水波流反复作用导致的疲劳破坏及控制

海上升压站跟海洋石油平台有类似之处,虽然海洋石油平台的设计有几十年的经验,但却有不少石油平台垮塌事故的发生,大多数是由于海面以下的结构节点在海水波流的反复疲劳作用下导致的破坏。如何吸取石油平台的疲劳破坏,避免海上升压站垮塌的风险,是一个技术上应该重视的难点。

目前对节点的疲劳强度分析通常有简单疲劳分析法、详细疲劳分析、断裂力学分析等方法。在设计过程中,应根据输入资料的情况选取适合的方法,其中断裂力学分析法虽是目前管节点疲劳破坏研究的前沿,但由于其中一些具体的参数和因素还未得到很好的解决,因此实际工程上一般不使用;在项目的前期阶段,由于波浪分布图等参数未明确,推荐采用简单疲劳分析法进行分析;在项目的施工图阶段,水文各相关参数均已明确,此时推荐详细疲劳方法进行疲劳分析,以获取更加准确的疲劳结算结果。

## 3 海上升压站建造风险识别及控制

海上升压站项目的建造通常指的是上部组块和下部结构在陆地上的建造。上部组块通常由四层钢平台组成,钢平台的建造一般分为小组件预制、单层平台结构拼装、合拢拼装三个阶段。下部结构一般由钢板卷成的钢管桩以及导管架(部分导管架构件由钢板卷成,部分导管架构件轧制而成)组成<sup>[3]</sup>。

上部组块建造过程中,各层平台的平整度控制、平台层间的支撑设置是较大的风险点,过程中应控制好平台的四角水平度,确保后续其他结构构件能够顺利安装,同时布置好平台层间的支撑位置、数量以及型号,避免整体结构组装过程出现坍塌。下部结构建造过程中,钢卷筒纵向焊缝以及各钢卷筒之间的对接装焊是较大的风险点,建造过程中应设置专人监督焊缝的施工以及施工完成后的焊

缝检测, 确保达到设计要求。

#### 4 海上升压站基础施工风险识别及控制

海上升压站的基础形式一般有单桩、重力式以及导管架等, 上部结构总重量约 1 kt 及以下时可采用单桩基础形式, 在水深较小(不超过 10 t)且海床表面没有淤泥质土或淤泥质土较薄的情况下, 可考虑采用重力式基础形式, 其他条件宜采用导管架基础形式。本文以导管架桩基为例, 阐述如下较为突出的施工风险点及控制方法:

##### 1) 沉桩的风险及控制

海上升压站的桩基施工有先桩法和后桩法两种施工方法, 采用先桩法施工则事先应设置导向架平台, 如图 1 所示。后桩法施工则利用导管架自身的固定作用, 无须设置导向架, 可在船舶上直接施打基桩。整体上来说, 先桩法的施工费用较高、工期较长。目前国内已施工或正在施工的海上升压站基本采用后桩法施工。



图 1 导向架平台

Fig. 1 Jacket platform

不管先桩法还是后桩法施工, 可能由于海床地质条件与地勘资料存在偏差(如土层过于软弱, 贯入度偏大等), 导致钢管桩沉入标高与设计标高不符的风险, 此时应结合入土深度及贯入度综合判定是否加长桩长来满足原设计的承载力要求。国内普遍采用后桩法施工, 若海上升压站个别桩位由于岩面起伏较大, 出现嵌岩桩位, 此时采用“打钻打”的施工方式, 则可能存在打桩船舶撞击嵌岩施工平台的风险(嵌岩施工平台往往比较轻巧, 撞击易导致垮塌), 因此, 不建议采用此类施工方式, 建议采用在施工平台上钻孔、灌倒入岩端混凝土成桩的形式。

##### 2) 海况施工窗口风险及控制

海上施工经常面对的是强风及波浪, 一般只有在一定的海况条件下才可以进行桩基施工。从 2016 年和 2017 年这两年国内实施的海上风电场实施项目来分析, 尤其是 11~12 月期间, 可用于桩基施工的有效天数非常少, 平均每个月少于 1/3 的时间, 有些项目甚至更少, 如果在此时段投入大量的船只和人员, 势必造成极大的误工经济损失, 若强行施工, 则存在人身安全和设备损坏的风险。因此, 务必根据各个项目本身的海况, 分析有效的施工窗口期, 合理安排人力、物力及施工进度, 避免造成经济和人员损失。

#### 5 海上升压站运输安装风险识别及控制

海上升压站上部钢结构的组装方式, 一般有两种: 模块装配式和整体式, 模块化是各个模块(变压器模块、高压模块等等)在陆上组装调试完成, 然后再到现场起吊就位, 整体式是将整个升压站上部结构作为一个整体, 陆上完成组装调试后到现场整体安装, 目前海上风电场通常采用整体式组装方式, 本文仅探讨整体组装方式运输, 如图 2 所示。



图 2 升压站整体运输图

Fig. 2 The photo of substation's overall transportation

安装方面存在的风险及控制措施:

##### 1) 运输风险及控制

海上运输条件复杂, 容易出现延误、设备倾覆等现象, 导致延误的风险来源可能是恶劣的天气、不合理的运输路径或者不切实际的运输计划。对于此类风险, 可通过事先了解天气和海况、探明运输路径上的海水深度和运输障碍, 选择较好的天气、避让不利航运的路径、制定切合实际的运输计划来规避。但是, 由于客观原因, 运输路

径有时需要绕过一些锚地、暗礁等不可穿越的地带, 导致运输路径过长, 长距离运输往往导致各种风险的概率加大, 因此建议事先做好各种应对措施, 比如尽量避免经过恶劣海况的海域, 必要时停船靠港<sup>[4]</sup>。

## 2) 安装风险及控制

整体升压站上部结构作为一个整体, 体型高大, 运输过程中受天气、海况等影响较大, 存在出现整体倾覆的风险。规避此类风险, 首先应选择有效宽度大于升压站整体边界的船舶, 使升压站底部 4 根立柱能够在船舶上进行有效固定, 其次在进行绑扎设计时, 应考虑极端工况, 最后在解释放固定的时候, 尤其是剩下最后一个固定点未释放的时候, 应做好临时固定措施<sup>[5]</sup>。

## 6 结论

我国海上风电事业迎来了蓬勃发展的态势, 海上风电的风险管理也显得尤为重要。本文以海上升压站为例, 应用风险管理理论, 对海上升压站的勘察设计、建造、运输、安装、施工等方面存在的重要风险点, 进行全面深入的分析研究, 并提出相应的控制措施, 结论如下:

1) 若海上风场的中微风化岩面起伏较大, 建议施工图勘察阶段在海上升压站每个基桩位置单独布置一个钻孔。

2) 对于不同海况下获得的勘测成果, 应进行客观分析, 建议参考同一片海域已有的土层参数成果, 综合评价海洋土的力学性能。

3) 在项目的前期阶段, 推荐采用简单疲劳法进行疲劳分析, 在项目的施工图阶段, 推荐详细疲劳方法进行疲劳分析。

4) 上部组块建造过程中, 应控制好平台的四角水平度, 布置好平台层间的支撑位置、数量以及型号, 避免整体结构组装过程出现坍塌。下部结构建造过程中, 应设置专人监督焊缝的施工以及施工完成后的焊缝检测, 确保达到设计要求。

5) 海床实际地质条件与地勘资料存在偏差时, 应结合入土深度以及贯入度综合调整桩长, 来满足原设计的承载力要求。

6) 后桩法施工过程中, 出现个别嵌岩桩位, 建议采用在施工平台上钻孔、灌倒入岩端混凝土成桩的形式。

7) 应根据各个项目本身的海况, 分析有效的施工窗口期, 合理安排人力、物力及施工进度, 避免造成经济和人员损失。

8) 长距离运输, 应选择较好的天气、避让不利航运的路径、制定切合实际的运输计划, 同时做好各种可能出现的风险应对措施。

9) 绑扎设计应考虑极端工况, 解释放固定应做好临时固定措施。

## 参考文献:

- [1] 李焯. 海上风电项目的经济性和风险评价研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2014.
- [2] 杜肖洁. 海上风电项目风险分析研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [3] 孙云. 浅谈海上升压站钢结构建造 [J]. 中国战略新兴产业, 2017, 1(12): 122+124.  
SUN Y. Built analysis of the steel structure of offshore substation [J]. China Strategic Emerging Industry, 2017, 1(12): 122+124.
- [4] 杨建军, 俞华锋, 赵生校, 等. 海上风电场升压变电站设计基本要求的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3781-3789.  
YANG J J, YU H F, ZHAO S J, et al. Research on basic requirements of offshore substation design [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3781-3789.
- [5] 元国凯, 朱光涛, 黄智军. 海上风电场施工安装风险管理研究 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(增刊 1): 190-193.

## 作者简介:



ZHENG B X

郑伯兴 (通信作者)

1981-, 男, 广东汕头人, 高级工程师, 硕士, 主要从事结构设计以及海上风电场项目管理的工作 (e-mail) zhengboxing@gedi.com.cn。

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 (e-mail) surong@csg.cn。

冯奕敏

1977-, 男, 广东阳江人, 高级工程师, 学士, 主要从事传统电力工程和新能源工程的项目管理工作 (e-mail) fengyimin@gedi.com.cn。

(责任编辑 高春萌)