

# 海上变电站结构设计探讨

张力, 刘晋超

(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:** 按照国家能源局制定的海上风电发展目标, 到 2020 年全国将出现 100 座左右的海上变电站平台, 海上变电站的建设规模巨大。“海上变电站”(OSS)集中体现了电力工程与海洋工程的结合, 建设满足海上风电场电能安全稳定送出的海上升压站, 已然成为我国发展海上风电必须面临和解决的关键问题。文章介绍了 OSS 结构设计思路、设计原则及设计内容等, 并重点探讨了不同设计阶段 OSS 结构的设计考虑及分析内容, 为 OSS 结构设计提供了一套切实可行的设计方法。

**关键词:** 海上变电站; 结构设计; 方法探讨

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)S1-0083-05

## Discussion on Structural Design Method of Offshore Substation

ZHANG Li, LIU Jinchao

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

**Abstract:** According to the established offshore wind power development goal of National Energy Administration, about 100 offshore substation platforms will be built until 2020 which means large construction scale of offshore substations will appear in China. “Offshore substation”(OSS) epitomizes the combination of electrical engineering and ocean engineering, what becomes the key issue of developing offshore wind power is to build OSS for transmitting electricity power generated by offshore wind farms. This paper shows ideas, principles, contents of OSS structural design and then puts emphasis on design considerations and analysis contents of different OSS structural design stages, provides a set of feasible method for structural design of Offshore substation.

**Key words:** offshore substation; structural design; design method

中国海岸线 3.2 万 km, 其中大陆海岸线 1.8 万 km, 岛屿海岸线 1.4 万 km。近海区域、海平面以上 50 m 高度的海上风电技术可开发容量约 200 GW。根据国家能源局的规划, 到 2015 年, 我国将实现海上风电并网装机 5 GW, 到 2020 年, 海上风电并网装机将达 30 GW。预计未来 5 年, 海上风电复合增速为 90%, 远超风电行业整体装机增速, 市场空间可达(4 500~6 000)亿元。随着海上风电场离岸距离以及装机容量不断增大, 建设离岸的海上变电站(后文简称“OSS”)成为海上风电场建设的重要环节之一, OSS 的建设前景及规模巨大。但相比海油行业完善的建设标准, 我国海上变电站的设

计、认证、施工、运维等各方面均缺乏经验, 而且我国尚无专门针对 OSS 的设计规范和标准, 因此建立和完善 OSS 设计规范和标准, 是海上风电场大规模建设的必由之路。基于此种情况, 有必要对 OSS 的结构设计进行较为深入的探讨。

### 1 设计总则

在无专门规范及标准的情况下, OSS 结构设计应参考并遵循现有海洋平台结构设计规范及标准, 下文从设计范围、设计原则、设计依据、设计内容以及设计考虑等方面对 OSS 结构设计进行探讨。

#### 1.1 设计范围

OSS 结构设计包括上部平台结构、下部支撑结构设计。其中, 上部平台结构主要含: 主体结构(腿柱、主梁、支撑)、次要结构(次梁、板)以及

收稿日期: 2015-10-01

作者简介: 张力(1986), 男, 江西南昌人, 工程师, 工学硕士, 主要从事水工/海工结构设计及研究工作(e-mail)zhang@gedi.com.cn。

附属结构(楼梯、栏杆、平台吊机基座等);下部支撑结构形式较为丰富,有桩式(单桩、多桩)、重力式、吸力筒、浮式等。本文仅针对桩式支撑结构进行探讨,桩式结构设计主要包含主体结构(腿杆、撑杆、桩)、附属结构(靠船件、海缆保护管、泵护管、防沉板等)。

一般情况下, OSS 结构设计范围如上所述。对于某些特殊情况,需要对设计范围进行必要的调整与补充。

## 1.2 设计原则

OSS 结构设计原则主要包含总体原则、结构布置原则、材料选择原则。OSS 结构设计总体原则同与常规海洋平台结构设计相同,均遵循如下原则:合理、安全、经济,且方便采购、制造、安装、检验和维护等;结构布置的基本原则是:布局合理,传力路径短,构件综合利用性好,材料利用率高,满足其他专业对结构型式的要求;结构材料选取的基本原则是:既要考虑强度,又要考虑结构所处的环境条件以及在结构中的部位和可能使用的加工方法等。

## 1.3 设计依据

OSS 结构设计,应依据一定的技术文件和标准。但我国尚无专门的设计规范,在进行 OSS 结构设计时,只能参考国外相关技术标准、规范,如: Offshore Wind Farm Substations (DNV-OS-J201)、Rules for the Certification and Construction IV Industrial Services part 7 Offshore Substations, Chapter 2 Structural Design (GL-OS) 等。目前《海上风电场风力发电场设计》规范中的海上升压站结构设计章节正在编制中,规范的编制将为 OSS 结构设计提供可靠的设计依据。

## 1.4 设计内容

一般而言,海上变电站结构设计涉及概念设计、初步设计、详细设计三个阶段。各阶段的设计内容及要求不尽相同。表 1 简述了各个阶段应完成的设计内容。

## 1.5 设计考虑

设计过程中应对荷载取值、荷载系数、荷载组合等环节有充分的了解,务必保证荷载输入、荷载组合符合规范要求。荷载问题是 OSS 结构设计主要考虑的问题,但 OSS 的细节设计对保证 OSS 正常运行也十分重要,不容忽视。

表 1 不同设计阶段的设计内容概述

Table 1 Summary of Design Contents at Different Design Stages

设计阶段	设计内容	备注
概念设计	1) 提出基于特定水文地质条件的下部支撑结构方案。 2) 提出满足各专业要求的上部平台结构方案。 3) 提出满足国内船机施工能力的安装方案及限制条件。	概念设计旨在对海上变电站的建设进行可行性评价。
初步设计	1) 对概念设计阶段提出的下部支撑结构及上部平台结构方案进行深化设计。 2) 次要钢结构初步设计。 3) 技术文件编制,如材料规格书、材料表等。	初步设计旨在对海上变电站建设展开实质性的招标投标工作。
详细设计	1) 次要钢结构及附属结构详细设计。 2) 节点、焊缝、吊点等详细设计。	详细设计旨在对海上变电站进行加工、建造、安装等。

### 1.5.1 重量偶然性系数

由于 OSS 结构设计涉及专业资料类别多,且各设计阶段所掌握的设计输入资料存在一定的不确定性,因此通过重量偶然性系数考虑外部条件的不确定性是一种较为合理的方式。表 2 列出了上部平台在各设计阶段,对应类别的重量偶然性系数的取值。

对于下部支撑结构,根据计算模型的模拟程度和设计阶段的不同,结构的重量偶然性系数取值不同,一般情况下取值见表 2。

表 2 不同设计阶段的重量偶然性系数取值

Table 2 Value of Weight Contingency Factors at Different Design Stages

类别	概念设计	初步设计	详细设计
结构	20%	12%	5%
机械装置	20%	12%	5%
管道	20%	12%	5%
电气设备	25%	15%	5%
建筑	25%	15%	5%
暖通与空调	25%	15%	5%
安全	25%	15%	5%

1) 概念设计:取 1.30(不模拟附属构件)。

2) 初步设计:取 1.10 ~ 1.20(视附属构件的模拟情况取值,如模拟了靠船件、电缆护管、泵护管等,则可取 1.10)。

3) 详细设计:取 1.05 ~ 1.10(视附属构件的模拟情况取值,如模拟了靠船件、电缆护管、泵护管、防沉板等,则可取 1.05)。

1.5.2 预留腐蚀裕量

海洋腐蚀问题是不可避免的一个问题, 为使设计的结构在运行期内安全可靠, 除了进行必要的腐蚀防护(涂层防护、阴极保护等)外, 在设计过程中还应需要基于规范考虑一定的腐蚀裕量, 可参考 DNV-OS-J101 标准。

1.5.3 其他

海上变电站结构设计考虑除重量偶然性系数取值、预留腐蚀裕量外, 还有其他如施工考虑(运输、安装等限制条件)、电缆护管设置、冲刷保护等容易忽视细节设计问题。

2 OSS 结构设计

本文 1.3 节给出了进行 OSS 结构设计应依据的专业规范, 以需满足不同设计阶段的不同需求。一般情况下, 结构设计流程为: 根据总体布置进行结构布置, 确定荷载计算方法, 选取适用的荷载系数, 确定荷载组合, 进行强度、刚度和稳定性计算, 编制相关设计文件等。OSS 结构也不例外, 挪威船级社 DNV-OS-J201 标准明确提出了如图 1 所示的海上变电站设计流程, 但并未针对不同设计阶段的要求给出特殊性的考虑。

本文在已有资料的基础上, 针对 OSS 不同设计阶段考虑的重点问题, 为海上变电站的全过程(概念—初步—详细)设计提出了一条可行的设计思路。

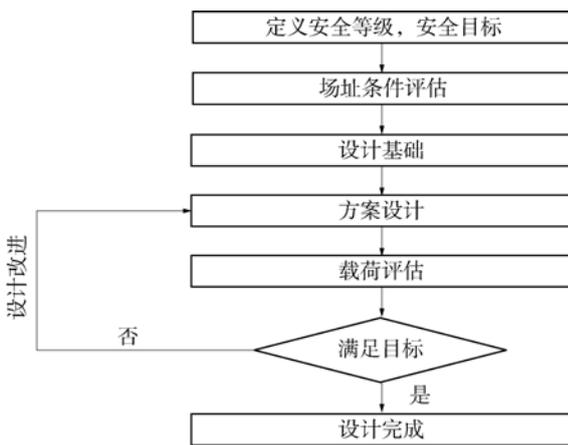


图 1 OSS 设计流程

Fig. 1 OSS Design Flow

2.1 概念设计阶段

概念设计是为减低 OSS 建设的不确定性以及提出可行性方案。概念设计在整个设计过程中是非常重要的阶段, 本阶段需要解决的问题如下:

- 1) 确定变压器的规格及数量。
- 2) 确定 OSS 上部平台结构方案。
- 3) 确定 OSS 下部支撑结构方案。
- 4) 建造及安装方案。

2.1.1 设计输入

设计输入是进行 OSS 结构设计的重要技术文件之一, 概念设计阶段关键的设计输入应包括但不限于: 水文、地质参数; 关键电气设备的尺寸、重量及布置情况; 消防、暖通系统情况; 运维方案; 紧急疏散要求; 电缆安装方法及电缆净空要求; 安装船舶及起吊方案; 恶劣气候条件下电气设备运行要求; 电缆保护管布置方案等。

2.1.2 结构方案比较

2.1.2.1 上部平台

1) 结构总体方案确定

OSS 上部平台结构一般为钢质框架结构, 结构方案的确定需结合电气、水工工艺、暖通等专业要求以及建设场地的环境条件, 施工单位的施工能力。国外常见的 OSS 上部结构有单层结构、双层结构、三层结构等。结构层数不同, 各有优劣, 表 3 简单列出了不同层数 OSS 上部平台的优劣比较。

表 3 上部平台结构方案比较

Table 3 Comparison of Topside Structure Scheme

层数	优势	劣势
单层	1) 如有电缆甲板, 则可实现电缆安装先于上部平台结构安装。 2) 变压器与开关设备在同一平面, 电气接线较为顺畅。 3) 简化了 OSS 平台的建造过程。 4) OSS 平台中设备布置更为简化。	1) 结构平面尺寸变大, 对吊装能力有更高的要求。 2) 单层甲板刚度较小, 易产生变形。 3) OSS 平台上生活区处于火灾风险区。 4) 结构形心与重心偏差较大, 不适合采用单桩型式的下部支撑结构。
双层	1) 与单层相比, 减小了结构平面尺寸, 降低了安装难度。 2) 生活区可置于远离火灾风险区的位置。	1) 结构平面尺寸仍然较大, 限制了安装船的作业范围。 2) 需要更复杂的建造过程。 3) 结构建造同时需完成设备布置以及调试。
多层	1) 平面尺寸缩小, 适合采用单桩型式的下部支撑结构。 2) 最小结构平面尺寸, 安装最为便利(不考虑起吊高度限制的情况下)。 3) 若受起吊高度限制, 可设计成多次吊装, 海上完成层间拼接。	1) 需要最大的起吊高度。 2) 由于甲板数量多, 需要更复杂的建造过程。 3) 结构建造同时需完成设备布置以及调试。 4) 限制了低层甲板设备的移除和更换。

各专业根据实际需求进行专业间及外部协调,完成甲板上设备的布置,再确定结构尺寸,最终完成结构总体布置。

### 2) 甲板高程确定

底层甲板梁底标高确定一般需要考虑水位、波高及空气间隙:

$$E = H_r + H_c + \Delta \quad (1)$$

式中:  $E$  为底层甲板梁底标高, m;  $H_r$  为重现期为 100 年的极端高水位, m;  $H_c$  为重现期为 100 年的最大波峰高度, m;  $\Delta$  为安全气隙, m, 一般情况下取 1.5 m, 对吊高有限制时, 可取计算机计算出的实际波浪高度数据。

### 3) 结构构件设计

结构杆件的设计要遵循以下几个原则: (1) 主、次梁尺寸要有明显差别, 以便区分和连接; (2) 杆件类型、材料规格不宜太多; (3) 管件的设计要考虑径厚比  $D/t$  比、长细比  $kl/r$ 、简单节点  $d/D$  比, 其中  $D/t$  比一般取值在 20 ~ 60 之间(最好大于 30),  $kl/r$  对主要杆件不宜大于 120, 主要节点  $d/D = 0.4 \sim 0.8$ , 次要节点  $d/D$  取值可稍小。

4) 结构材料选择: (1) 结构材料的选取既要考虑强度的要求, 又要考虑工作环境的要求; (2) 在性能指标满足设计要求的情况下, 尽量使用国产钢材。

## 2.1.2.2 下部支撑

### 1) 结构总体方案确定

OSS 下部支撑结构选型主要取决于 OSS 平台所在区域的水文气象、地质条件决定, 同时, 上部平台结构型式对下部支撑结构型式的选择有一定程度的影响, 见表 3。国内外常见海上平台结构支撑结构主要有: 单桩型式、四桩导管架型式, 如图 2 所示。表 4 对两种常见 OSS 支撑结构进行了比较。

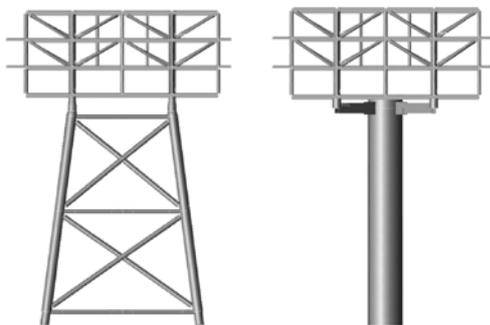


图 2 两种典型 OSS 下部支撑结构示意图

Fig. 2 Two Typical OSS Substructure Demo

表 4 下部支撑结构方案比较

Table 4 Comparison of Substructure Scheme

层数	优势	劣势
单桩	1) 成本较低。 2) 国外已有成熟的案例以及设计方法。 3) 对海床变化不敏感。 4) 安装便捷, 建造简单。 5) 运输需求空间最低。 6) 单桩内部空间可作为油储罐等容器。	1) 电缆及电缆 J 形护管拥挤。 2) 过渡段灌浆时的临时稳定性可能是一个问题。 3) 对甲板偏心(例如: 变压器等大型设备更替、外挑直升机甲板等)的适应性较差。 4) 结构刚度低、环境力作用下产生侧向位移较大, 运行期间产生的加速度可能会影响电气设备的正常运转。
四桩导管架	1) 电缆接入较为便捷。 2) 平台登入更方便。 3) 对荷载偏心具有更强的适应性。 4) 保证未来平台运行的灵活性(可新增、更替大型设备)。 结构冗余度较高。	1) 同单桩结构相比, 建造复杂。 2) 增加了安装时间及成本。 3) 海床变化及打桩前临时稳定性可能是个问题。 4) 低潮时桩靴是潜在的风险(若有桩靴)。 5) 由于构件尺寸缩小, 更易受损。

一般情况下, 应结合上部平台结构方案以及 OSS 所在区域的环境条件, 确定下部支撑结构总体方案。

### 2) 结构构件设计

(1) 结构构件的设计要综合考虑强度、刚度、稳定性和经济性的因素。

(2) 无论是成品钢管还是卷制钢管, 尽量减少所用材料的规格。

(3) 管件的设计要考虑径厚比  $D/t$  比(取值于 20 ~ 60); 长细比  $kl/r$  (不宜大于 120); 简单节点  $d/D$  比(取值于 0.4 ~ 0.8)。

### 3) 结构材料选择

#### (1) 基本原则

结构材料的选取既要考虑强度要求, 又要考虑结构工作场所的环境条件, 在结构中的部位和可能使用的加工方法等。

#### (2) 一般考虑

卷制钢管, 组合梁的尺寸应满足规格书中规定的有关国内和国外的标准, 还应考虑制造商的卷制能力, 对于关键管节点部位还要考虑材料的 Z 向性能。

## 2.2 初步设计阶段

初步设计阶段的主要任务是对概念设计提出的结构方案进行深化设计, 该阶段需对次要钢结构进行设计, 并编制相应技术规范书、材料表等技术文件, 为业主单位进行工程招标提供技术支持。

### 2.3 详细设计阶段

详细设计阶段的主要任务是服务于海上变电站的建造与安装。该阶段需要对海上变电站上部平台结构主体结构进行细化, 对次要结构及附属结构进行详细设计, 如构件间连接方式的选择、节点构造设计、吊点设计等。详细设计阶段需要编制用于指导 OSS 建造及施工的技术规格书, 如结构建造技术规格书、结构防腐技术规格书、结构运输技术规格书、结构安装技术规格书等。详细设计阶段包括但不限于表 5 所述工作内容。

表 5 详细设计阶段主要工作内容  
Table 5 Main Tasks at Detail Design Stage

类型	设计内容	技术文件
附属结构设计	电缆保护管、靠船件、防沉板、吊点等	结构设计技术规格书
		结构建造技术规格书
细部结构设计	流体致涡激振动分析、上部平台节点连接、上部平台次梁、复杂节点有限元分析	结构防腐技术规格书
		结构运输技术规格书
		结构安装技术规格书
		结构焊接与检验规格书
		结构灌浆与密封规格书

### 3 OSS 结构计算分析

海上平台结构计算分析一般分为两类: 在位分析、施工分析。在 OSS 从概念设计到详细设计的过程中始终穿插着不同内容的计算分析。本文简单叙述这两类分析的主要内容以及分析方法, 见表 6。

表 6 OSS 计算分析内容  
Table 6 Calculation Contents of OSS

类型	分析内容	典型分析方法
在位分析	极端环境条件分析(ULS 分析)	依据相关技术标准, 基于海洋工程结构设计软件 SACS 进行分析。 典型分析过程: 建模、编制相应的海况文件、桩土文件、相应模块求解器求解。
	正常环境条件分析(SLS 分析)	
	疲劳环境条件分析(FLS 分析)	
	事故环境条件分析(ALS 分析)	
施工分析	装船分析、运输分析、吊装分析、桩身稳定性分析、坐底稳定性分析	

### 4 结论

“海上变电站”集中体现了电力工程与海洋工程的结合, 建设满足海上风电场电能安全稳定送出的海上变电站, 已然成为我国发展海上风电必须面临和解决的关键问题。由于目前国内尚无专门的海上

变电站结构设计规范, 因此对海上变电站结构设计进行探讨具有重大的意义。

为了设计一座兼具安全与经济的海上变电站平台, 首先要进行上部平台总体规划。所谓总体规划通常是指按照一般的设计准则、法规和标准确定平台上部的电气、水工工艺、暖通等设施的布置与支承结构选型的总体问题。根据使用要求决定的上部设施与设备的总体布置是支承结构规划布置的依据, 反过来支承结构的选型也必须满足电气、水工工艺、暖通等设施布置的要求。两者之间有着极为密切的关系。完成上部平台总体结构布置后, 结合平台所在位置水文地质条件进行下部支撑结构布置。

本文从设计原则、设计内容及计算分析等方面对海上变电站结构设计进行了探讨。总结了海上变电站结构全过程设计的设计思路, 重点介绍了概念设计、详细设计阶段的设计工作内容及相应的设计方法, 所提思路可适用于指导用于海上风电场的海上变电站结构设计。

#### 参考文献:

- [1] DET NORSKE VERITAS AS. DNV-OS-J201 Offshore Wind Farm Substations [S]. Oslo, 2014.
- [2] DET NORSKE VERITAS AS. DNV-OS-J101 Design of Offshore Wind Turbines Structures [S]. Oslo, 2014.
- [3] DET NORSKE VERITAS AS. DNV-OS-C101 Design of Offshore Steel Structures, General (LRFD Method) [S]. Oslo, 2014.
- [4] 《海洋石油工程设计指南》编委会, 海洋石油工程平台结构设计 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
- [5] 刘福来, 张略秋, 武江. 海上风电场海上升压站抗震设计 [J]. 武汉大学学报, 2013(S1): 144-147.
- [6] 马红艳, 刘书田, 顾元宪, 等. 海洋平台结构形状与拓扑优化设计 [J]. 海洋工程, 2001(4): 21-24.
- [7] 马红艳, 刘书田, 顾元宪, 等. 考虑设计规范的海洋平台结构选型优化 [J]. 计算力学学报, 2004(1): 38-40.
- [8] 胡涛, 肖熙, 孟庆毓. 海洋平台结构整体优化设计 [J]. 中国海洋平台, 2001(1): 15-18.
- [9] 封盛. 海洋平台结构优化设计理论和方法研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2000.
- [10] 李常, 吕云山, 赵云, 等. 欧洲四大海上变电站设计案例对比分析 [N]. 北极星风力发电网, 2014-10-14.

(责任编辑 郑文棠)