

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.016

海上升压站的抗震性能分析

范少涛, 张力, 王立鹤, 张绍欣

(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]对处于地震活动区域内的海上升压站整体模型进行地震工况下强度和韧性分析,分析海上升压站在设计基准期不同超越概率的海床面运动强度水平下的性能。[方法]强度分析采用响应谱法评估结构的抗震性能,韧性分析采用静力弹塑性分析方法进行倒塌计算来评估结构的抗震性能。[结果]通过对海上升压站主体结构和附属构件的抗震性能进行分析,认为海上升压站在考虑足够安全储备的前提下能满足“小震不坏,中震可修,大震不倒”的抗震设防要求。[结论]研究表明该海上升压站结构体系具有较好的抗震性能。

关键词: 海上升压站; 响应谱法; 静力弹塑性分析方法; 抗震性能

中图分类号: TK89; TM614

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)04-0101-05

Seismic Performance Analysis of Offshore Substation

FAN Shaotao, ZHANG Li, WANG Lihe, ZHANG Shaoxin

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

Abstract: [Introduction] In this paper, strength and toughness analysis under earthquake for the whole model of offshore substation is presented, performance of offshore substation is analyzed under effect of earthquake in the design reference period different exceedance probabilities. [Method] The seismic performance was evaluated by the results from response spectrum method for strength analysis and the pushover analysis method for toughness analysis. [Result] By analyzing performance of substation jacket platform and accessory structures, the seismic performance of the structure meets the requirement of “No damage under minor earthquake, Repairable under moderate earthquake, No collapsing under major earthquake” considering sufficient safety factor. [Conclusion] It shows that the offshore substation has good seismic performance.

Key words: offshore substation; response spectrum method; pushover analysis method; seismic performance

作为最具前景的可再生能源之一,海上风电发展迅速。我国海上风电场开发建设速度亦日趋加快,市场发展前景广阔。海上升压站作为海上风电场成败的关键,其重要性不言而喻。海上风电场内所有的风电机组发出的电能通过集电海底电缆输送到海上升压站,升压后通过送出海底电缆输送到陆上集控中心,再通过输电线路连接到附近的电网系统,从而输送给千家万户。作为海上风电场的电能汇总中心,海上升压站是其中输变电的关键设施。

在对海上升压站设计的讨论方面,张力^[1]等从

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并给出了全过程设计的设计思路;陈珂^[2]等针对海上升压站裙桩型导管架基础的进行了详细的分析设计,证明了海上升压站基础桩靴的适用性。在地震计算方面,彭绍源^[3]总结影响地震荷载的参数规律,并为工程设计人员推荐了影响地震荷载的相关参数的选取;刘福来^[4]等重点介绍了现行国外海洋平台类标准中关于抗震分析的内容,并与我国建筑抗震规范进行了对比分析,建议在海上风电场工程设计中首先确定结构设计执行标准,之后做场地地震安评分析,给出具体、可靠的参数数值,从而保证海上风电场的安全性和经济性。

本文结合我国东部沿海地震多发的背景以及地

收稿日期: 2019-01-18 修回日期: 2019-03-19

基金项目: 中国能建广东院科技项目“海上风力发电机组支撑结构一体化优化设计及极限承载力可靠性分析”(EV04311W)

震荷载的特殊性,在对如此重要的海上升压站的结构设计中,必须充分考虑地震荷载对结构的影响。

一方面,我国大部分近海海域属地震高发区域,地震发生的概率高。地震发生时还可能伴随着复杂的地质变化,特别是粤东地区近海海域还可能存在软土震陷和砂土液化等不良地质作用,当海上风电场地发生地震烈度为8度的地震时,地震荷载以动态荷载的作用方式作用于海上升压站,场地内给基础桩提供承载力的软土层可能发生震陷、固结、下沉,对桩身产生负摩擦力;砂土层可能发生液化,桩身承载力将大打折扣。综合各种不利因素,海上升压站遭遇地震破坏后可能造成重大的损失,比如在电气方面,支撑结构剧烈振动影响上部组块的电气设备的正常运行;在结构方面,导管架基础变形过大而发生结构破坏甚至是发生倒塌。

另一方面,地震发生时,海床面的剧烈运动造成海上升压站受到动态荷载,这些作用在海上升压站的地震力大小取决于海上升压站的质量、刚度以及所在位置的地基条件。地震荷载跟其他大多数环境荷载不同的是会随着整体结构及基础刚度的变小而变小,而如果是由结构构件或基础构件的非弹性屈服或屈曲所引起刚度变小,如果这种非弹性效应可能发生,并且结构物在重力荷载作用下没有失去稳定,则此结构可经受比第一次屈服时所承受过的更为严重的地面运动而不致倒塌^[5-6]。此外,如果在结构设计阶段就考虑通过降低海上升压站结构及基础的刚度来减小结构所受到的地震力,虽然这种方法能够有效减弱地震作用对结构的影响,但是处在外部条件相当恶劣的海洋环境中,结构将无法提供足够的强度和刚度来抵抗环境荷载带来的冲击。

综上所述,为了确保海上升压站的安全稳定运行,针对地震活动区域内的海上升压站的设计需要进行合理的主体结构设计和附属构件布置,从而满足抵抗地震地面运动的要求。本文以我国沿海某海上升压站项目为例开展海上升压站的抗震性能计算。

1 结构抗震设防性能目标

根据规范^[5]规定,平台要满足指定的强度和韧性要求,所以应该考虑两个地面运动强度水平。相应地,本工程强度分析采用50年重现期超越概率

为10%的地面水平峰值加速度;韧性分析采用50年重现期超越概率为2%的地面水平峰值加速度^[7]。

根据规范^[8]总则要求,对建筑提出“小震不坏,中震可修,大震不倒”这三个水准的抗震设防目标,其中小震、中震、大震分别指的是50年重现期超越概率为63%、10%、2%的多遇地震、设防烈度地震、罕遇地震。综上所述,确定海上升压站主体结构和附属构件50年设计基准期内应有如下抗震设防目标,如表1所示。

表1 抗震设防目标

Tab. 1 Seismic fortification target

超越概率水平/%	地震影响	结构抗震设防性能目标
63	多遇地震	正常使用,主体结构和附属构件不允许出现任何破坏
10	设防地震	主要结构不出现影响正常使用的破坏,允许附属构件出现一定程度的破坏
2	罕遇地震	主体结构不发生倒塌

2 工程概况及参数选取

2.1 工程概况

1)以某海上升压站项目为例,场址区域水深约为25m。海上升压站结构安全等级为一级,设计使用年限为50年。

2)场地类别和设防烈度:

场地类别是Ⅲ类,抗震设防烈度为8度;抗震设防类别为标准设防类(丙类)。

3)计算模型建立:

海上升压站结构有限元模型如图1所示,上部平台和下部基础导管架结构采用空间梁单元模拟,上部平台采用带支撑的钢框架多层平台结构,下部导管架采用4腿基础导管架结构型式,基础导管架结构模型包括主体结构和附属构件,主体结构主要有主腿杆、水平撑杆、X斜向撑杆等,导管架局部节点加强。附属构件主要有J形管、靠船件、牺牲阳极等,牺牲阳极主要通过重量以及增加杆件表面粗糙度的方式考虑。钢结构的设计参考相关规范^[9-10],结构主框架连接处采用刚度连接,保证整体能够有效传递地震力。

2.2 地震响应谱曲线

作为地震工况计算分析中的输入条件,地震响应谱曲线的选取至关重要,采用不同的地震响应谱

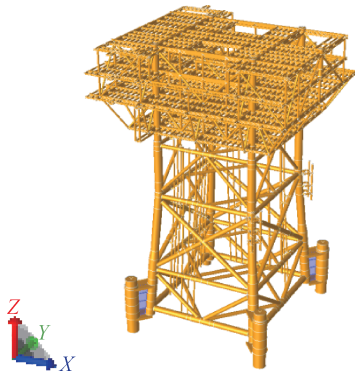


图1 海上升压站结构有限元模型

Fig. 1 The finite element model of offshore substation

曲线会对分析结果有很大的影响。本工程开展了场地地震安全性评价,从场地基本烈度、场地类别、地震分组等因素定义地震响应谱曲线。根据本工程项目的特点,在地震动参数的基础上,给出场地相关谱,并以此为目标函数,计算得到满足本场地条件的地震响应谱,如图2所示。本工程场地海床面各地震动参数如表2所示取值。

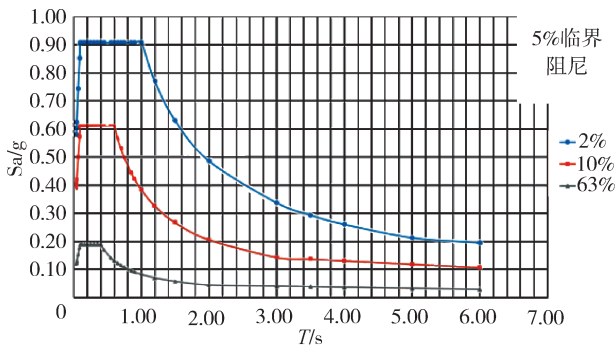


图2 地震响应谱

Fig. 2 Earthquake response spectrum

表2 三个概率水准的各地震动参数建议取值

Tab. 2 Three ground motion parameters in different exceedance probabilities

超越概 率水平	PGA /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)/s	T_0 /s	T_g /s	β_{\max}	γ	α_{\max}	K
63%	74.27	0.1	0.45	2.5	0.9	0.189	0.076
10%	238.79	0.1	0.70	2.5	0.9	0.609	0.244
2%	356.17	0.1	1.20	2.5	0.9	0.909	0.909

注:PGA为地表地震动峰值加速度; T_0 为场地设计地震动加速度响应谱上升段的周期; T_g 为场地设计地震动加速度响应谱的特征周期; β_{\max} 为放大系数响应谱的特征参数; γ 为场地设计地震动加速度响应谱下降段的衰减指数; α_{\max} 为地震影响系数最大值; K 为地震系数。

2.3 设计荷载

1) 恒荷载

主要包括导管架、上部组块、附属构件等建进模型中的结构自重和电气设备、舾装、牺牲阳极等未建进模型中的结构自重,未建进模型结构的自重及上部各层平台荷载根据设备实际的布置情况单独加载。

2) 上部结构活荷载

上部结构活荷载包括设备运行荷载、设备检修和人群引起的活荷载,以及吊机吊装时的荷载。由于升压站设备重要,因此升压站基础必须具备一定的富余度,活荷载的取值对于精确值有一定的放大。

3) 消耗品等

消耗品荷载根据工艺需要添加,上部结构配备较多容器,在容器填满时上部重量达到最大,容器空置时上部重量最小。

4) 地震荷载

根据规范要求^[5],应用响应谱方法时,取自图2的谱纵坐标应乘以平台所在区域的系数G,得到的谱值应施加在结构的两个正交的水平主方向上,所在区域加速度谱值的一半应施加在竖直方向上。所有三个谱应该同时施加,最后将各个模态响应进行完全二次组合(CQC)。在进行强度分析时,采用地面水平动峰值加速度0.244g;在进行韧性分析时,采用地面水平动峰值加速度0.363g;同时,垂直方向峰值加速度均采用0.5倍的水平值。在计算中,取前50阶模态采用CQC方法在三个方向合并。

5) 其他环境荷载

不考虑对升压站结构质量模拟基本无影响的风、浪、流等环境荷载。

3 结果与分析

3.1 强度分析

响应谱法采用50年设计基准期超越概率为10%的海床面地震加速度进行荷载等效,将迭代计算得到的等效荷载与其他设计荷载作用于结构模型,最终计算得到结构强度和位移等结果。

结构动力分析是进行结构地震分析的前提。经过计算,海上升压站的自振特性前三阶如图3所示。通过观察模态分析的前三阶振型,可知海上升

压站结构整体性能好,上部平台与导管架间并无明显薄弱环节,前三阶振型振动特性分别以整体X向平动、Y向平动、扭转为主,结构刚度能够满足要求。从整体结构布置上,本工程海上升压站平台结构布置合理,能满足结构使用要求。

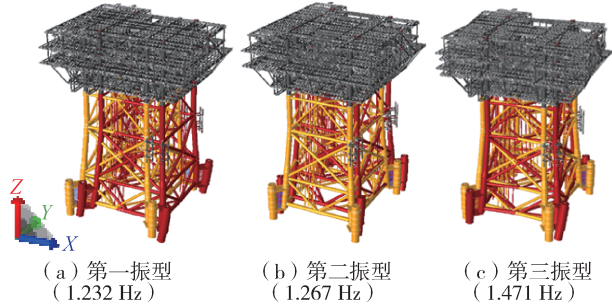


图3 强度水平下结构前三阶振型图

Fig. 3 Three modes of offshore substation at the strength level

地震作用下计算得到桩端最大轴压力为 22.274 MN,此时考虑砂土液化折减后钢管桩的竖向承载能力抗压设计值为 30.330 MN,满足承载力的设计要求;桩泥面处竖向最大位移为 2.0 cm,满足竖向沉降的要求;管节点的最大冲剪应力 UC 值为 0.92,满足节点冲剪要求。计算得到结构的应力水平如图 4、表 3 所示。

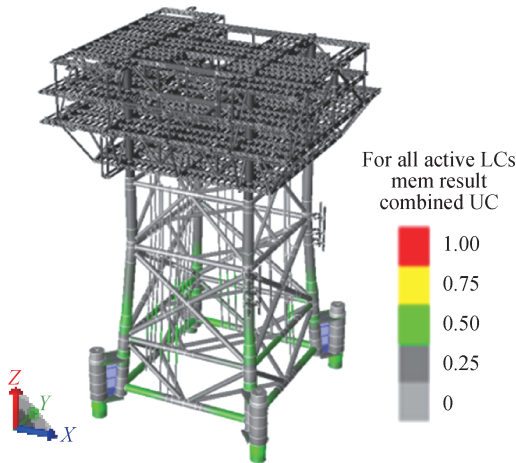


图4 结构杆件应力 UC 图

Fig. 4 UC diagram of structural member

从计算结果可以看出,在强度水平地震作用下,海上升压站结构承载力、导管架基础和上部平台的结构强度、位移等指标均符合现行规范的要求;结构达到“中震可修”的抗震设防目标:主要结构不出现影响正常使用的破坏,允许附属构件出现一定程度的破坏。在本例中附属构件也未出现破坏。

表3 结构杆件应力安全 UC 值

Tab. 3 UC value of structural member

位置	构件名称	最大 UC 值	允许 UC 值	复核结论
上部平台	主柱	0.841	1.00	满足
	主梁	0.78	1.00	满足
	斜撑	0.862	1.00	满足
导管架	主腿	0.457	1.00	满足
	支撑	0.436	1.00	满足
钢管桩	—	0.401	1.00	满足

3.2 韧性分析

静力弹塑性分析方法采用 50 年设计基准期超越概率为 2% 的海床面地震加速度进行荷载等效,将迭代计算得到的等效荷载与其他设计荷载作用于结构模型,倒塌分析通过乘以荷载放大系数进行,当海上升压站承载不了持续放大的等效荷载导致倒塌,荷载放大系数即为平台强度储备系数,将该荷载放大系数与特定的数值进行比较。如果荷载放大系数大于该数值(进行韧性分析时采用地面水平动峰值加速度与进行强度分析时采用地面水平动峰值加速度的比值),则认为海上升压站结构满足韧性要求。

在韧性分析前,为了保证韧性分析结构模型的准确合理性,首先比较了整体模型与强度分析的整体模型。如图 5 所示,用于韧性分析的模型前三阶自振频率为 1.214 Hz、1.249 Hz、1.449 Hz,用于强度分析模型的前三阶自振频率为 1.232 Hz、1.267 Hz、1.471 Hz。说明这两个用于计算的结构模型动力特性吻合较好。

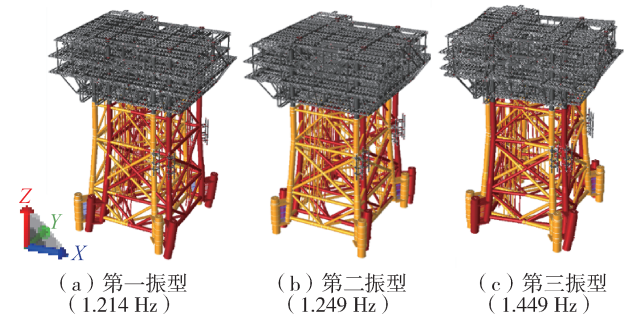


图5 韧性水平下结构前三阶振型图

Fig. 5 Three modes of offshore substation at the toughness level

以 X 方向海上升压站弹塑性变形为例,当海上升压站遭遇罕遇地震作用时,主体结构构件可能出现影响正常使用的破坏,但是要求主体结构不发生倒塌。通过韧性分析可以得到每步等效荷载放大后

对结构弹塑性变形的影响,并最终得到海上升压站各个方向地震强度储备系数。

如图6和图7静力弹塑性分析结果所示,在罕遇地震作用下,海上升压站附属构件J型管发生塑性破坏的荷载放大系数为2.15,海上升压站钢管桩出现损坏的荷载放大系数为2.63,强度储备系数大于1.49,即韧性水平下地面加速度与强度水平下地面加速度的比值,平台结构强度满足韧性要求。

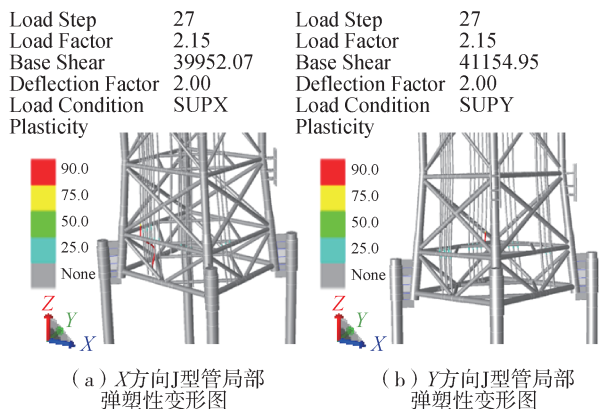


图6 局部结构弹塑性变形图

Fig. 6 Local elastoplastic deformation of J tube

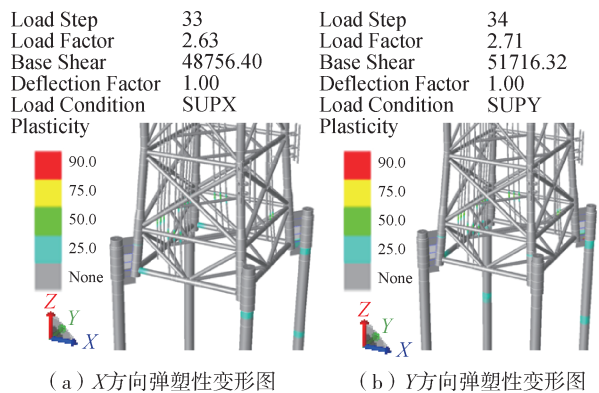


图7 整体结构弹塑性变形图

Fig. 7 Elastoplastic deformation of offshore substation

海上升压站结构X方向和Y方向发生弹塑性变形的形式和强度储备系数基本一致,这是由海上升压站近似正方形平面以及地基条件造成的,最终分析认为海上升压站结构在罕遇地震作用下未出现严重的变形和破坏,只有J型管部位出现了极少部位的塑性变形,能满足主体结构不发生倒塌的设防要求。

4 结论

本文对海上升压站主体结构和附属构件的抗震

性能进行分析并给出了具体算例,本算例中海上升压站在考虑足够安全储备的前提下能满足“小震不坏,中震可修,大震不倒”的抗震设防要求。

韧性分析采用静力弹塑性分析方法进行倒塌分析来评估结构的抗震性能,结构中附属构件与主体结构相连接部分容易发生塑性变形、J型管和导管架桩靴等附属构件在罕遇地震中容易发生损坏,应该有针对性加强最开始发生塑性变形的杆件及节点的薄弱部分。

研究表明:海上升压站支撑结构采用四桩导管架基础型式,具有较好的抗震性能。

参考文献:

- [1] 张力,刘晋超. 海上变电站结构设计探讨[J]. 南方能源建设, 2015, 2(增刊1): 83-87.
- [2] 陈珂,马兆荣. 海上升压站裙桩型导管架基础设计分析[J]. 南方能源建设, 2018, 5(2): 93-98.
- [3] 彭绍源. 固定式海洋平台地震荷载计算参数分析[J]. 中国海洋平台, 2013, 28(3): 49-52+56.
- [4] 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(工学版), 2013, 46(增刊1): 144-147.
- [5] 国家能源局. 海上固定平台规划、设计和建造的推荐作法工作应力设计法: SY/T 10030—2018[S]. 北京: 石油工业出版社, 2018.
- [6] 赵阔,沈留兵,张法富,等. 基于倒塌法的固定式海洋平台地震分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013, 34(2): 228-229.
- [7] 左文安. 升压站导管架平台地震分析[J]. 船舶工程, 2015, 37(增刊2): 88-91+94.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [9] 中华人民共和国建设部. 钢结构设计规范: GB 50017—2003[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [10] 挪威船级社. 海上钢结构设计方法: DNVGL—OS—C101[S]. 挪威船级社, 2017.

作者简介:



范少涛(通信作者)

1989-,男,广东汕头人,工程师,硕士,主要从事海上结构物设计与分析工作(e-mail) fanshaotao@gedi.com.cn.

FAN S T

(责任编辑 李辉)