

S-RC 混合结构在大型风电场柔直户内换流站建筑中的应用

杨雪平, 张肖峰, 韦文兵

(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: 结合 863 大型风电场柔性直流送出的全户内换流站工程实例, 介绍了全户内站工艺布置及荷载特点, 充分利用钢结构及混凝土结构的各自特点进行复杂全户内站的结构设计。详细阐述了该全户内换流站采用 S-RC 混合结构体系的结构选型过程、结构布置特点及工艺优势, 介绍了该全户内站结构整体计算及关键构件设计计算结果, 并同全钢结构方案进行技术经济对比分析, 展望了 S-RC 混合结构在全户内电力建筑中的应用前景和注意事项。为今后 S-RC 混合结构在复杂设计条件下的全户内电力建筑中的应用提供参考。

关键词: 柔性直流; 全户内站; S-RC 混合结构; 钢桁架梁; 组合楼板

中图分类号: TM756.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)03-0095-06

Application of S-RC Hybrid Structure in Indoor Substation of Large Wind Farms Transmission Through VSC HVDC

YANG Xueping, ZHANG Xiaofeng, WEI Wenbing

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

Abstract: Through 863 large wind farms transmission using VSC HVDC technique project, steel-reinforcement concrete hybrid structure was introduced to be used in the indoor converter station structure design, according to its both advantage of steel structure and reinforced concrete structure. This paper gave the process how to select the structural form, the structure characteristics and its technology advantages; the structure integral calculation and key component design calculation results were shown in the design; after comparing with the whole steel structure form both in technical and economic aspect, prospects of using steel-reinforcement concrete hybrid structure in indoor substations and its key matters in design was discussed, which will be a good reference for the design of steel-reinforcement concrete hybrid structure in indoor substation in the future.

Key words: VSC HVDC; indoor substation; steel-reinforcement concrete hybrid structure; steel truss beam; steel deck concrete composite slab

S-RC 混合结构是由钢和钢筋混凝土两种性质不同的材料组合成整体, 共同受力、协调变形的结构, 称之为混合结构。它是在钢结构和钢筋混凝土结构基础上发展起来的一种新型结构, 是继传统的木结构、砌体结构、钢结构和钢筋混凝土结构之后

的第 5 大结构体系。在混合结构体系中, 钢结构材料强度高适用于大跨度、重荷载楼屋面的水平受力构件; 钢筋混凝土抗压能力优异, 不需进行稳定验算, 耐火、造价低适用于框架柱及常规跨度的水平构件。由于混合结构能够充分发挥钢与混凝土两种材料各自的优势, 且具有节约钢材、提高混凝土利用系数、降低造价、承载力高、刚度和延性大、抗震性能好、施工方便等优点, 得到了迅速推广与应用^[1-2]。

随着经济的发展, 土地资源日益紧缺, 用地受限成为电网建设的重要制约因素; 同时当地政府及

收稿日期: 2015-04-09

基金项目: 国家 863 课题“大型风电场柔性直流输电接入技术研究与开发”资助

作者简介: 杨雪平(1983), 男, 江西九江人, 工程师, 硕士, 主要从事特高压输变电结构设计工作(e-mail)yangxueping@gedi.com.cn。

居民对于电力设施越来越排斥,对工业建筑的噪声,环保及外观环境协调性要求越来越高。传统的敞开式电气布置方案,工艺流程虽然清晰明朗,布置简单,但是用地面积大,工业建筑痕迹明显,裸露的配电设备,噪声较大,与当地的环境协调性差,已经难以适应现实需要。因此目前在城市规划中,大中型电力枢纽工程均优先考虑采用全户内建筑,将电气设备隐藏在建筑物内,建筑外立面的设计尽量融入当地风格,去除工业建筑痕迹。全户内电力建筑具有节省用地,减小外部环境对电气设施影响,对电力工业设施进行修饰美化,大大减少对周边的噪音影响等优点,在电力建设中应用越来越多。

传统的敞开式电气布置方案,工艺流程清晰明朗,布置简单,但把这些平面工艺布置到同一栋建筑物中,对工艺和结构设计提出了更高的要求,需要更为密切的配合。全户内变电站或者换流站电压等级越来越高,容量越来越大,工艺越来越复杂。电气设备尺寸大,荷载重,各功能房间对楼层布置,开间尺寸,错层留洞开沟等要求复杂,同时电力设备对结构位移及沉降差要求严格。因此在进行户内站设计时单纯的混凝土结构或者纯钢结构均不能完美满足工艺方便和结构安全的双重要求。S-RC混合结构布置灵活,对荷载大、开间大的房间采用钢结构体系;对工艺要求复杂、留洞开沟要求多的普通房间采用混凝土结构。利用两种结构各自优点较好地满足了复杂全户内电力建筑要求,值得在全户内电力建筑中普及采用。

1 柔性直流全户内换流站结构——S-RC 混合结构

1.1 工程概况

柔性直流是近年来发展较快的一种新型高压直流输电技术。主要应用于风力发电、电力交易、电网互联、海上钻井平台供电等领域,掌握大型风电场柔性多端直流接入的相关技术,有利于降低风电对电网稳定性的影响,降低风电接入标准、提高风电等新能源应用比例。直流换流站是直流输电技术最主要的组成部分,南方电网选择在南澳岛风电场附近进行“大型风电场柔性直流输电接入技术与开发”示范工程建设,规划建成一个电压等级为 ± 160 kV,输送容量为200 MW的4端柔性直流输电系统,服务于青澳、牛头岭、云澳和塔屿风电场。

工程在汕头南澳岛上建设2个送端换流站,在澄海区塑城变电站内建设1个受端换流站,3个换流站电气布置均为全户内方案,所有电气设备均布置在一栋建筑物内(以下简称为配电装置楼)。建筑平面尺寸约为 $55.5\text{ m}\times 34.5\text{ m}$,高度约28 m。各层平面布置如下: -1.5 m 层为局部半地下层,布置电缆间、泵房及消防水池(消防水池底标高 -4.0 m); $\pm 0.0\text{ m}$ 层布置连接变压器室、阀电抗器室、交流GIS室及110 kV站用变室; 1.5 m 层、 5.5 m 层、 9.5 m 层布置有10 kV/380 V配电室、备用品间、主控室、继电器室、通信机房、蓄电池室、阀冷设备间等设备房间及其它办公房间; 13.5 m 层布置有阀厅和直流场;屋面布置空调机和阀冷设备。根据设备布置的要求,阀厅、直流场、变压器室及阀电抗器室等4个房间内均不得设置柱位,且其净空不低于 10.5 m 。典型结构断面图如图1所示。

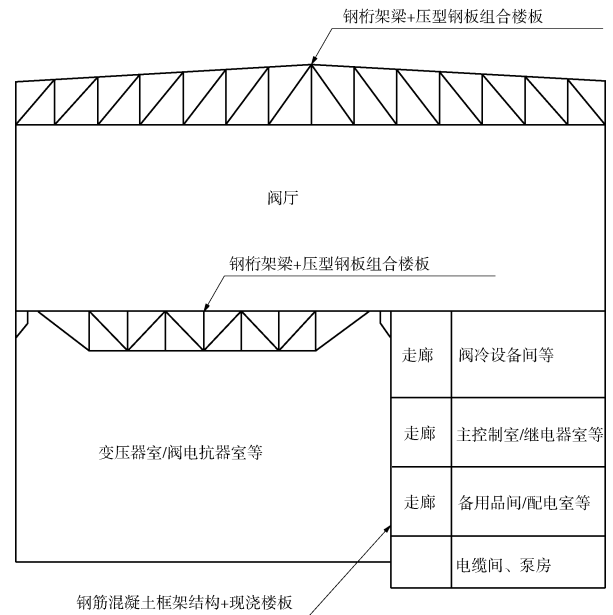


图1 典型结构断面图

Fig. 1 Typical Structure Profile

本期3个换流站均位于沿海地区。抗震设防烈度8度,设计基本地震加速度 0.2 g ,地震分组第一组;基本风压 0.85 kN/m^2 ,地面粗糙度A类。

本工程3个换流站从2013年3月份开始施工,在2013年8月底即完成结构封顶,2013年12月三个换流站均竣工投产。

1.2 结构选型

该工程属于产学研一体化工程,没有以往工程可以参考,主要的电气设备在立项时还未完全定

型,但是业主对工程竣工日期要求非常严格,因此在进行结构选型,建设工期成为重要的考虑因素。

从工期和满足抗震安全性出发,可研阶段结构选型为全钢结构,钢结构强度高、自重轻,特别适用于大跨度、超高和超重型的建筑物;同时塑性、延性好,变形能力强,抗震性能优越;最重要的是可以工厂加工,现场安装,建设工期短。对于常规的民用建筑来说的确是在满足功能和安全的前提下大大缩短建设工期,但是对于工业建筑来说,工艺流程太复杂,特别是对于本工程来说,部分设备只有一个大概的形状和重量,具体的构件及安装方式并不能完全确定。采用钢结构将导致主次梁布置将非常复杂,节点非常多,设计和加工将非常麻烦,同时由于上游设备资料不能及时提供,纯钢结构的包络和容错能力都相对较差。

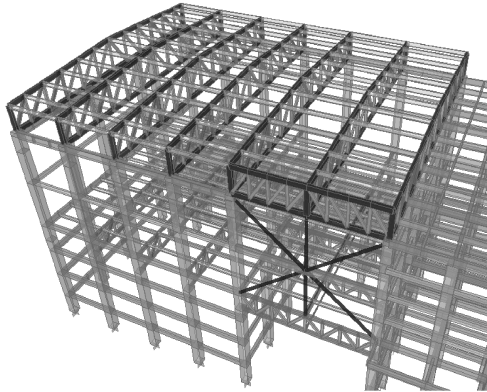


图2 钢-钢筋混凝土混合结构全户内换流站模型

Fig. 2 Steel-Concrete Hybrid Structure Model

从经济性和工艺方便出发,结构选型可采用钢筋混凝土结构,混凝土材料来源广泛,工程造价和维护费用低;一般采用现场浇注,可以方便工艺开孔,预留埋件等;同时耐久性和耐火性好。但是混凝土结构自重比钢结构大,延性差,特别是在高烈度区域不适宜建造大跨度结构,特别是大跨度的阀厅及屋顶,采用混凝土结构将导致梁高特别大;混凝土结构需要支模浇注,对大跨度高楼层房间需要满堂脚手架支模,影响施工安全性及施工速度。

综合考虑功能要求,施工速度,同时考虑经济性,根据柔性直流换流站的“交流场—联接变压器—阀厅—直流场”工艺流程,以及辅助设备及房间的布置特点,对全户内柔性直流换流站提出了钢-钢筋混凝土混合结构方案。即主体结构为混凝土

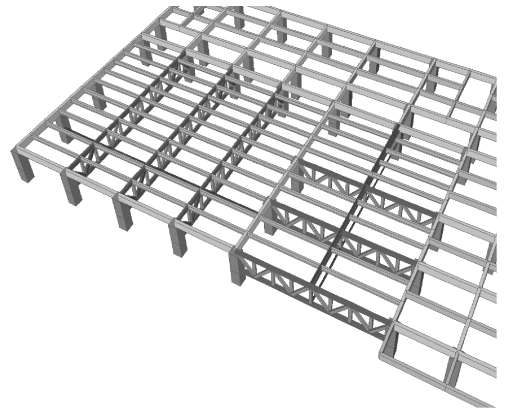


图3 阀厅楼层钢结构布置图

Fig. 3 Valve Hall Floor Plan

框架结构,大跨度及重荷载楼面梁及转换梁采用钢桁架梁,楼面板采用压型钢板组合楼板。屋盖结构采用平面钢桁架屋架梁,屋面板采用压型钢板组合屋盖。所有竖向构件及辅助房间全部采用钢筋混凝土结构。既利用混凝土结构在常规跨度范围内的对工艺的良好适应性,又利用钢结构在大跨度及重荷载房间的高强度优点。同时采用了组合楼板,使整个站的施工过程属于半装配式,节省了施工工期。

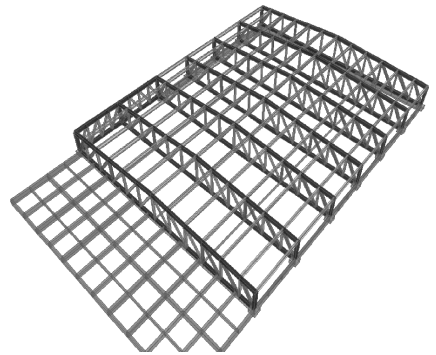


图4 屋面层钢结构布置图

Fig. 4 Roof Structural Plan

1.3 结构计算

本结构的整体分析采用SAP2000进行,结构设计时,钢结构部分采用SAP2000软件进行,混凝土部分采用PKPM软件进行计算。先进行整体分析,保证结构的整体振型及位移满足规范要求,混凝土结构设计时将钢桁架梁按照抗弯刚度等效为实腹梁建模到PKPM中进行混凝土结构部分设计,保证支座荷载和刚度等效。

结构整体分析结果如下:

1) 自振周期

表1 自振周期表

Table 1 Structural Vibration Period

振型	周期/s	振型类别	周期比
第一振型	0.95	X方向平动	
第一振型	0.93	Y方向平动	0.89 < 0.9
第一振型	0.85	扭转振型	

根据计算结果可以看出, X向和Y向的总体抗侧刚度相差不大,但由于结构本身的不规则性,导致结构的抗侧力构件沿建筑周边布置不均匀,靠近辅助房间的抗侧刚度较大,大开间的阀厅、换流变及阀电抗器房间侧抗侧刚度较小,使结构的扭转周期较大,扭转刚度相对较小,但是未超过A级建筑高度的规范限制。

1) 层间位移

表2 层间位移

Table 2 Interlayer Displacement

位移方向	层间位移角	工况	位移比
X方向	1/676	X向地震	1.50
Y方向	1/642	Y向地震	1.60

本户内站结构属于混合结构,且含错层,平立面均不规则,进行层间位移角计算时,主要是以框架结构要求来控制结构的变形。根据计算的位移比,扭转不规则分类为II类^[4]。

本结构的设计难点为控制整体结构的扭转不规则,由于工艺开间限制,没办法通过结构布置上进行调整,只能根据规范要求,通过结构构件的内力调整和构造措施来进行构件设计。

1.4 关键构件及节点设计

结构阀厅房间的跨度和荷载非常大,因此主要的关键构件为钢筋混凝土柱,钢桁架梁。钢桁架为梁式构件,主要承受整体弯曲作用,具体表现为上下弦杆的拉压轴力,钢桁架的腹杆则代替了实腹式钢梁腹板的作用,以轴力的形式将桁架上的剪力传递到端部。其杆件的受力特征呈现为轴心受力,是一种较为高效的水平承力构件。

本工程桁架承受荷载较大,钢桁架均采用箱型截面结构,能有效提高下弦的抗侧刚度,提高下弦杆的平面外稳定性,减少下弦水平支撑的数量。关键构件的设计计算结果如表3所示。

钢桁架梁与混凝土柱牛腿采用铰接连接,且释

放水平轴向力,减少节点位置桁架梁对混凝土柱的弯矩影响,大大减少框架柱的弯矩。压型钢板组合楼板布置在钢桁架层的次梁上,并设置剪力键^[3]。

表3 主要构件设计计算结果

Table 3 Key Members Calculation and Design Result

构件	设计最大内力	设计尺寸	挠度
钢筋混凝土柱	6 900 kN(N)		
	1 500 kN·m (M)	1 000 mm × 1 000 mm	—
	430 kN(V)		
22.0 m 跨度 楼面钢 桁架梁	5 550 kN(Nmax)	焊接箱型梁	0.23 mm
	5 400 kN(Tmax)	500 mm × 300 mm × 20 mm	
34.5 m 跨 度屋面钢 桁架梁	3 070 kN(Nmax)	焊接箱型梁	5 mm
	3 020 kN(Tmax)	450 mm × 250 mm × 12 mm	

2 全钢结构方案与 S-RC 混合结构方案经济技术比较

由于本工程存在16 m、22 m和34.5 m的大跨度结构,且属于高烈度大荷载建筑物,纯混凝土结构在本工程明显不经济,本文就全钢结构以及S-RC混合结构进行初步计算和分析,估算其造价,比较两种结构方案的技术经济性。所有计算均在相同计算假定和荷载条件情况下进行。

由于本工程位于8度区,全钢结构方案由于钢柱整体抗侧刚度较差,造成用钢量的上升,故造价较高;S-RC混合结构方案工程量主要由横向地震作用下的结构侧移限值控制,采用较大柱截面后,可有效控制结构整体抗侧刚度,造价稍低。

两个结构方案的造价对比详见表4。通过两个结构方案的造价对比来看,全钢结构方案与S-RC混合结构方案相比,造价高出11%,S-RC混合结构方案经济效益明显。

表4 结构方案造价对比

Table 4 Different Structure Cost Comparison 万元

结构方案	主结构	楼屋盖	地基基础	合计	相对值
全钢结构	1 064	288	281	1 633	111%
S-RC混合结构	842	264	365	1 471	100%

注:该造价对比仅为按市场单价的估算;地基基础工程量按本工程中的塑城站进行计算,采用PHC500C管桩;本部分造价仅指主体结构部分造价。

除了经济对比,表5对S-RC混合结构和纯钢结构方案进行了详细的技术对比。主要对比的要素

表5 结构方案技术对比

Table 5 Different Structure Technique Comparison

方案	S-RC 混合结构	纯钢结构
安全性	纯混凝土结构延性稍差, 自重较大, 为满足抗震要求会导致截面很大, 配筋较密, 采用钢-混凝土结构, 并适当加支撑, 可以充分发挥钢结构和混凝土结构各自特点。提高抗震安全性。	钢结构延性较好, 自重轻, 具有较好的抗震安全性。
工艺适用性	混凝土结构采用整体浇筑, 容易满足工艺的开洞或错层下沉等要求。	户内站工艺布置复杂, 钢结构节点较多, 处理较为复杂。
建造工期	施工工期: 混合结构混凝土部分需要现场施工, 现场施工工期比钢结构长。 设计及加工工期: 设计和钢结构二次深化简单, 设计和加工工期较短。	施工工期: 全钢结构所有构件均在工厂加工, 现场安装工期较快。 设计及加工工期: 全钢结构节点复杂, 钢结构设计、二次深化以及加工工期较长。
防火防腐处理	由于大部分构件采用的是混凝土构件, 能够较好地满足防腐防火要求。后期维护方便。	无论是场地特殊环境还是电气设备的防火要求, 均对该结构的防腐防火要求较高, 处理较复杂。后期维护较多, 费用较高。
经济性	造价稍低	造价比 S-RC 混合结构高 11% 左右。

为: 结构安全性; 全户内站建筑复杂工艺的适用性; 施工便易性; 建筑物的防火要求以及在海岸环境的特殊防盐雾腐蚀要求; 造价经济性等。对比结果表明 S-RC 混合结构体系在复杂全户内电力建筑中的优势明显^[5]。

3 S-RC 混合结构在电力建筑中的应用展望

3.1 电力建筑特点

1) 电力规划建设用地越来越紧张: 由于国土资源的稀缺, 以及电力工程本身的特性, 当地政府及当地居民均对建设电力设施存在一定的抵触, 征地问题日趋严峻。

2) 全户内站将成为潮流: 全户内电力建筑具有节省建设用地, 减小外部环境对电气设施影响, 对电力工业设施进行修饰美化, 大大减少周边噪音的影响等优点, 应用将越来越多。

3) 工艺愈见复杂: 随着技术进步, 工艺更新, 户内站建筑物内的工艺错层, 开洞, 沟道越来越复杂多样。

4) 设计条件复杂: 为满足工艺要求, 一般的电力建筑物均存在建筑大跨度, 设备重荷载, 含转换梁及大错层。

5) 建设工期紧张: 电力工程由于电网运行的需要, 有时候由于前期规划和征地耗时较多, 真正施工工期都非常紧张, 因此设计方案对施工工期的考虑越来越重要。

3.2 S-RC 混合结构适用情况

1) S-RC 混合结构分别利用了钢筋混凝土抗压

性能好, 耐火耐腐蚀性能好, 应用在竖向构件及小跨度房间水平构件经济合理, 利用钢结构梁强度高, 抗弯能力强, 应用在大跨度和重荷载房间水平构件。很好综合了两种结构体系的优点, 规避了缺点, 应用到全户内换流站, 变电站等特殊工业建筑中安全可靠, 经济合理。

2) 大跨度房间采用钢结构及压型钢板组合楼板, 可以大大减少混凝土结构的高支模和面积支模, 实现半装配式施工, 大大加快了施工进度。

3) 混凝土结构可以适用复杂工艺要求, 沟道, 开洞等方便, 钢结构可以适用大荷载, 大开间工艺要求, 两种结构优势互补, 可以满足全户内站对建筑物的复杂工艺要求。

4) 工业建筑采用 S-RC 混合结构比采用全钢结构及钢筋混凝土结构, 造价更低, 工期更短。

3.3 电力建筑中应用 S-RC 混合结构的注意事项

1) 钢结构属于导体, 因此需要严格核对钢结构部分与电气设备的带电安全距离要求, 同时做好构件的接地设计。

2) 全户内站含有较多的带油设备, 部分房间的防火等级较高, 因此需要特别注意钢结构构件的防火设计。

3) 部分户内站位于海岸地区, 需要做好盐雾地区的防腐措施。

4 结论

随着科技进步, 电力技术将会出现越来越多的

新技术,新工艺,同时国土资源越来越稀缺,环境要求越来越高,传统敞开式布置将越来越受限制,电力枢纽建设将会朝集约式绿色化发展,全户内站将成为趋势,但以往简单的混凝土结构已经不能满足复杂全户内站设计要求,依据本工程建设经验,以及本文的技术经济分析,S-RC混合结构具有受力明确,工艺适应性强,造价经济的优势,在今后的电力建设中值得优先考虑选用。

参考文献:

- [1] 汪大绥,周建龙.我国高层建筑S-RC混合结构发展与展望[J].建筑结构学报,2010,31(6):62-70.
WANG Dasui, ZHOU Jianlong. Development and Prospect of Hybrid High-rise Building Structures in China [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(6): 62-70.
- [2] 黄宇星,祝磊,张艳霞.钢-混凝土混合结构研究综述[C]//中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会第13届(ISSF-

2012)学术交流会暨教学研讨会论文集,武汉,2012.

- [3] 唐蓉琴,黄勇.钢桁架-混凝土板组合屋盖结构静力特性研究[J].贵州大学学报(自然科学版),2013,30(5):104-125.
TANG Rongqin, HUANG Yong. The Static Study on Steel Truss Concrete Slab Composite Structure [J]. Journal of Guizhou University(Natural Science), 2013, 30(5): 104-125.
- [4] GB 50011—2010,建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2010, Code for Seismic Design of Buildings [S].
- [5] 陈传新,王静,朱功辉,等.±800 kV换流站阀厅和主控楼结构选型[J].南方电网技术,2009,3(5):10-14.
CHEN Chuanxin, WANG Jing, ZHU Gonghui, et al. Structure Form Selection of the Valve Hall and Control Building of ±800 kV DC Converter Station [J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(5): 10-14.

(责任编辑 张春文)

(上接第94页 Continued from Page 94)

参考文献:

- [1] 史磊.海上升压站设备冷却技术研究[D].广州:华南理工大学,2012.
SHI Lei. Cooling System Study for Transformer Substation of Offshore Wind Power Station [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [2] 陈敏,余双翔,刘小松,等.基于LCC的海上风电场主变压器冗余配置经济性对比与分析[J].电力系统自动化,2015,39(14):168-174.
CHEN Min, SHE Shuangxiang, LIU Xiaosong, et al. Economical Assessment on Redundancy Configuration of Main Transformers for Offshore Wind Farm Based on Life Cycle Cost [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 168-174.
- [3] 闫培丽,袁兆祥,齐立忠,等.海上风电场二次系统设计关键技术[J].电力建设,2015,36(4):129-133.
YAN Peili, YUAN Zhaoxiang, QI Lizhong, et al. Key Technology of Offshore Wind Farm Secondary System Design [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(4): 129-133.
- [4] 张明,张哲,叶军.海上风电场升压平台布置研究初探[J].上海节能,2015(2):80-84.
ZHANG Ming, ZHANG Zhe, YE Jun. Research On Boost Platform Layout on Offshore Wind Farm [J]. Shanghai Energy Conservation, 2015(2): 80-84.
- [5] 施群.海上平台高压开关装置的研究[D].合肥:合肥工业

大学,2003.

- SHI Qun. Study of High Voltage Switchgear for Offshore Platform [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2003.
- [6] 刘新.海上风电场的防腐涂装[J].材料保护,2011,44(4):20-23.
LIU Xin. Anticorrosive Coating of Offshore Wind Farms [J]. Materials Protection, 2011, 44(4): 20-23.
- [7] 王胜.海上生产装置闭式循环冷却系统[J].中国造船,2007(11):13-15.
WANG Sheng. Closed Cycle Cooling System for Offshore Production Device [J]. SHIPBUILDING OF CHINA, 2007(11): 13-15.
- [8] QHS300—2003,海上平台暖通空调系统设计方法[S].
- [9] 李佰贵,宋建伏.除盐雾空气净化装置在海洋钻井平台上的应用[J].中国修船,2012(6):43-44.
LI Baigui, SONG Jianfu. Salt Fog Releasing and Air Filtrating Equipment Used on Drilling Platform [J]. CHINA SHIPREPAIR, 2012(6): 43-44.
- [10] 王华军,郇国华.三峡水电站主变压器冷却方式的选择[J].人民长江,2009(1):67-68,104.
WANG Huajun, XUN Guohua. Selection of Main Transformer Cooling Method of Three Gorges Hydropower Station [J]. Yangtze River, 2009(1): 67-68, 104.
- [11] 广东省电力设计研究院.用于海上风电场升压站的降温冷却系统:CN 202523989 U [P]. 2012-11-07.

(责任编辑 高春萌)