

## 集约式海上换流站电气应用技术研究

刘生

引用本文:

刘生. 集约式海上换流站电气应用技术研究[J]. 南方能源建设, 2021, 8(4): 32-36.

LIU Sheng. Research on Electrical Application Technology of Intensive Offshore Converter Station[J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(4): 32-36.

---

### 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

#### 海上柔性直流换流站关键电气设备选型研究

Research on the Selection of Key Electrical Equipments in Offshore VSC-HVDC Converter Station  
南方能源建设. 2019, 6(1): 31-35 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.006>

#### 海上平台柔性直流换流站工程应用方案研究

Research on VSC-HVDC Converter Station Application on Offshore Platform  
南方能源建设. 2017, 4(1): 66-70 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.012>

#### 集约式绿色换流站设备选型及优化布置研究

Research on Equipment Selection and Optimal Layout of Intensive Green Converter Station  
南方能源建设. 2020, 7(1): 107-112 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.017>

#### 大型海上风电项目中的集电海缆研究

Research on Array Submarine Cables in Large Offshore Windfarm  
南方能源建设. 2020, 7(2): 98-102 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.015>

#### 300MW海上风电场电气主接线设计

Electrical Single-line Diagram Design of a 300 MW Offshore Wind Farm  
南方能源建设. 2015(3): 62-66 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.012>

# 集约式海上换流站电气应用技术研究

刘生<sup>✉</sup>

(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] 深远海大规模海上风电送出会选用大容量风机和66 kV集电系统, 风机具备直接接入海上换流站的条件, 从而可以取消海上升压站, 实现集约式设计。针对集约式海上换流站需要关注的电气关键技术点开展初步研究。[方法] 在现有海上风电柔性直流输电技术的基础上, 通过研究集约式海上换流站的主回路拓扑结构、核心电气设备选择和平台布置方案优化, 对电气关键技术点给出了切实可行的技术方案。[结果] 随着海上风电66 kV集电系统的逐渐普及, 集约式海上风电柔直送出将成为以后的主流设计方案。针对集约式海上换流站的电气关键技术点给出了具有指导意义的研究结论。[结论] 集约式海上换流站相比传统海上换流站具有明显的技术优势, 形成的研究结论可以为后续深远海大规模海上风电送出项目的方案设计和实施提供技术支持, 具有很好的示范应用前景。

**关键词:** 海上换流站; 集约式; 海上风电送出; 深远海; 紧凑化

中图分类号: TK89; TM721

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2021)04-0032-05

开放科学(资源服务)二维码:



## Research on Electrical Application Technology of Intensive Offshore Converter Station

LIU Sheng<sup>✉</sup>

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

**Abstract:** [Introduction] Large capacity wind turbines and 66 kV power collection system will be selected for deep sea large-scale offshore wind power transmission. The wind turbines can be directly connected to the offshore converter station, so the offshore booster station can be cancelled and the intensive design can be realized. In this paper, the key electrical technology of intensive offshore converter station was preliminarily studied. [Method] On the basis of the existing offshore wind power flexible DC transmission technology, by studying the main circuit topology, core electrical equipment selection and platform layout optimization of the intensive offshore converter station, a feasible technical scheme for the key electrical technology was given. [Result] With the gradual popularization of offshore wind power 66 kV collection system, intensive offshore wind power flexible direct transmission will become the mainstream design scheme in the future. In this paper, the research conclusions with guiding significance were given for the key electrical technology points of intensive offshore converter station. [Conclusion] Compared with the traditional converter station, the intensive offshore converter station has obvious technical advantages. The research conclusions formed in this paper can provide technical support for the scheme decision-making and implementation of deep sea large-scale offshore wind power transmission project in the future, and have a good demonstration application prospect.

**Key words:** offshore converter station; intensive; offshore wind power transmission; deep sea; ompact

2095-8676 © 2021 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

集约式是指在技术先进和安全可靠的前提下, 电时间和节省人力等)来增进效益的建设方式<sup>[1]</sup>。以最大限度节约资源(节地、节能、节材、节省停从全球海上风电发展与规划的情况来看, 近年

收稿日期: 2021-02-09 修回日期: 2021-05-06

基金项目: 中国能建广东院科技项目“深远海大规模风电直流集中送出工程应用方案研究”(EV05511W)

来，全球海上风电发展呈现大容量、高电压和远距离的特点<sup>[2]</sup>。针对大容量和远距离海上风电送出项目，风机单机容量不断提升，风电场集电系统电压等级也随之升高，对应 8~10 MW 大容量风机的集电系统电压已由 35 kV 升高至 66 kV<sup>[3]</sup>。

采用 66 kV 集电系统具备取消海上升压站，直接接入海上换流站的条件，实现集约式，在深远海大型海上风电项目中已呈现出明显的技术优势<sup>[4]</sup>。因此，随着海上风电场 66 kV 集电系统的逐渐普及，集约式海上风电柔直送出将成为以后的主流设计方案。

集约式海上换流站的主回路拓扑结构、电气设备关键技术和平台布置方案与常规海上换流站有所区别。集约式海上换流站已在海外风电柔直送出项目中应用，如正在建设中的 DolWin5、规划中的 BorWin5 工程<sup>[5]</sup>。国内目前在这方面的研究尚属空白。

本文针对上述电气关键技术开展研究，形成具有指导意义并切实可行的研究结论，为未来深远海风电的送出应用提供技术积累和实践证明。

## 1 集约式海上换流站的特点

### 1.1 传统海上换流站介绍

对于传统海上换流站，海上风电场通过 35 kV 海缆将电能输送至海上升压站汇总和升压后，通过 220 kV 海缆输送至海上换流站，然后通过直流海缆输送至陆上换流站，逆变后送入陆地电网<sup>[6]</sup>。

传统海上换流站对应的系统方案如图 1 所示。

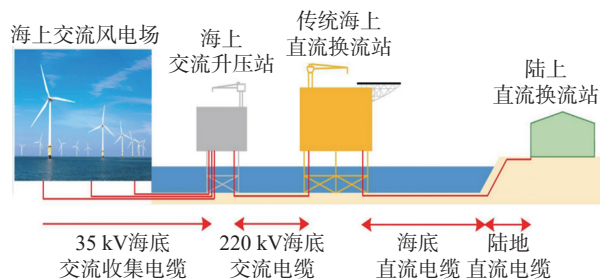


图 1 传统海上换流站系统方案

Fig. 1 System scheme of traditional offshore converter station

### 1.2 集约式海上换流站介绍

集约式海上换流站是在传统海上换流站的基础上，海上风电场 66 kV 风机通过 66 kV 集电线路直接接入海上换流站。

集约式海上换流站对应的系统方案如图 2 所示。

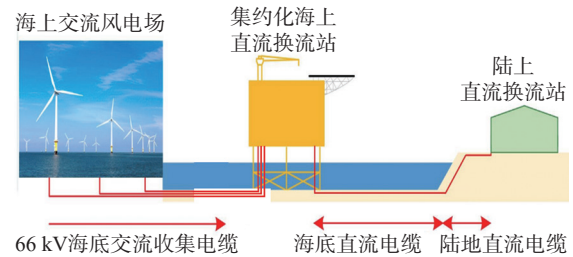


图 2 集约式海上换流站系统方案

Fig. 2 System scheme of intensive offshore converter station

### 1.3 集约式海上换流站与传统海上换流站差异

集约式海上换流站与传统海上换流站的主要差异如下：

#### 1) 系统方案

集约式海上换流站省去了传统的 220 kV 升压汇集环节，改为 66 kV 集电系统在换流站汇集后直接接入联接变压器。

#### 2) 换流站网侧设备

传统海上换流站网侧为 220 kV 配电装置，集约式海上换流站网侧为 66 kV 配电装置，设备选型的不同造成布置方案也有所差异。

#### 3) 联接变压器

由于网侧电压等级的不同，联接变压器的选型和结构也有所区别。

## 2 电气应用技术研究

### 2.1 主回路拓扑结构研究

集约式海上换流站与传统海上换流站直流侧拓扑结构相同，本文仅研究网侧拓扑结构的差异。

海上换流站网侧电气接线可选择单母线、双母线、一个半断路器接线三种方式之一，三种接线方式如图 3 所示<sup>[7]</sup>。

单母线分段接线优点是接线简单清晰，设备少，操作方便，缺点母线或母线设备故障或检修

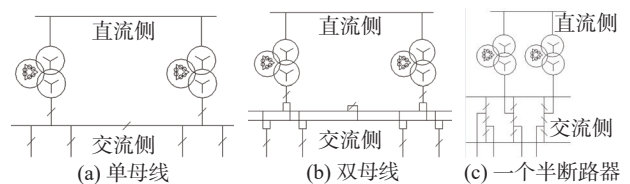


图 3 海上换流站电气接线

Fig. 3 Electrical wiring of offshore converter station

时,需要母线和进出线回路停电,可靠性低<sup>[8]</sup>。

双母线接线优点是供电可靠性适中,运行较灵活,缺点是每回进出线对应一个断路器,母线切换过程中仍需短时停电<sup>[9]</sup>。

一个半断路器接线每回进出线对应两个断路器,母线或断路器故障不会造成线路停电,供电可靠性最高,运行方式灵活,缺点是断路器数量多<sup>[10]</sup>。

传统海上换流站网侧进线来自2~3个海上升压站,每个升压站有两回线路,总的进线数量约为4~6回,断路器数量较少,适用一个半断路器接线,同时可以保障高可靠性。因此,目前欧洲北海已建的大部分海上换流站和国内江苏正在实施的如东海上换流站均采用一个半断路器接线。

但是当采用66 kV集电线路直接接入的集约式海上换流站方案后,进出线回路数较多,一般为15~20回,若仍采用一个半断路器接线,断路器数量较多,不但增加投资,并且会增大平台尺寸,因此推荐采用单母线或双母线接线方式。

66 kV集电线路在换流站66 kV母线汇集后,母线短路容量变大,可能会超过配电设备开断短路电流的能力值,因此,母线需要分列运行,为了保证其中一台变压器故障时,风场电能可以通过健全变压器继续送出,有以下两种解决方案:

1) 66 kV母线设置联络开关,当变压器故障时,对应的负荷通过联络开关切换至健全变压器送出。电气接线如图4所示。

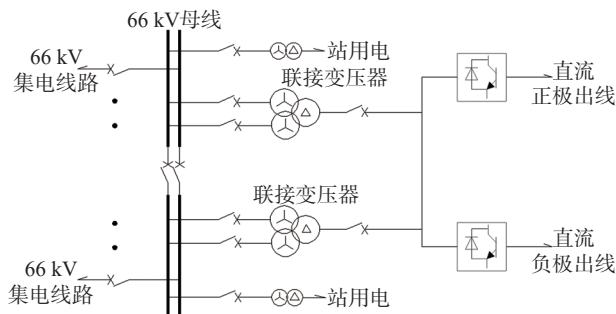


图4 集约式海上换流站电气接线1

Fig. 4 Electrical wiring of intensive offshore converter station 1

2) 66 kV母线不设联络开关,与联接变压器之间采用交叉连接的方式。典型电气接线如图5所示。

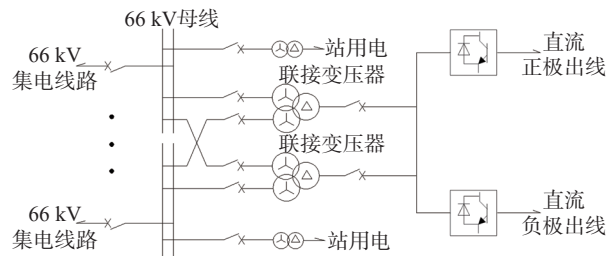


图5 集约式海上换流站电气接线2

Fig. 5 Electrical wiring of intensive offshore converter station 2

## 2.2 联接变压器关键技术研究

海上换流站网侧选用66 kV GIS设备后,在相同输送容量下,联接变压器回路电流增大较多。

以某1 000 MW海上风电直流送出工程为例,典型应用场景为海上换流站设置两台联接变压器,变压器容量为700 MVA。此时联接变压器回路最大电流为6 124 A,超出了现有66 kV GIS设备的制造水平,联接变压器网侧绕组需要特殊设计。

有以下两种解决方案:

### 1) 单绕组双出线型式

联接变压器网侧绕组仍为单绕组,但是引出导体由单回路改造为双回路。该方案的优点是变压器内部结构仍是传统的双绕组结构,改造成本低,容易实现;缺点是需要对变压器内部进行回路拆分,拆分位置的联接结构比较特殊,需研发。

### 2) 分裂绕组型式

联接变压器网侧绕组由单绕组改为分裂绕组。该方案的优点是当分裂绕组其中一个支路短路时,短路电流经过半穿越阻抗,半穿越阻抗比穿越阻抗大,可以起到限制短路电流的作用,缺点是结构比传统的双绕组型式复杂,改造成本也相对较高<sup>[11]</sup>。

目前分裂绕组型式的联接变压器在国内虽然尚无应用案例,但是用于海上升压站的常规变压器已大量采用分裂绕组变压器,其原理和结构与联接变压器基本相似,因此,分裂绕组型式的联接变压器在设计和制造上无技术障碍。

以上两种解决方案推荐分裂绕组型式。

## 2.3 66 kV GIS关键技术研究

上节提到的典型案例中联接变压器回路最大电流为6 124 A,网侧采用分裂绕组后,每个绕组对应回路最大电流为3 062 A,目前66~110 kV断路器最大载流为3 150 A,可以满足要求。

需要注意的是,针对66 kV GIS设备,ABB和

西门子均有成熟的产品。由于国内配电系统没有这一电压等级，国产厂家大多会用成熟的 110 kV GIS 设备代替 66 kV GIS 设备。110 kV GIS 设备体积相对较大，会对海上换流站平台布置造成一定影响<sup>[12]</sup>。

### 2.4 站用电关键技术研究

传统海上换流站联接变压器大多选用三绕组变压器，站用电引自第三绕组，这样可以取消单独的站用变压器，减轻平台的尺寸和重量，具有较大的经济价值。

集约式海上换流站联接变压器采用分裂绕组型式后，无法再为站用电提供电源，因此需配置专门的高压站用变。高压站用变数量为两台，互为备用，高压侧接入 66 kV 配电装置，低压侧接入站用 10 kV 配电系统。

### 2.5 换流站平台布置关键技术研究

换流站各功能分区间工艺流程如图 6 所示<sup>[13]</sup>。

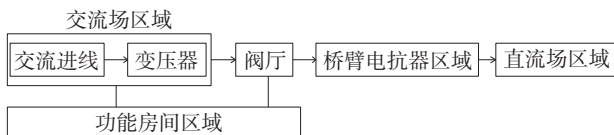


图 6 换流站的工艺流程

Fig. 6 Technological process of converter station

集约式海上换流站交流进线选用 66 kV GIS 设备，相比传统海上换流站的 220 kV GIS 设备，66 kV GIS 设备单间隔体积小，但是间隔数量多，从而造成设备房间高度降低，宽度变小，但是长度增加较多。

传统海上换流站为了方便来自升压站的 220 kV 海缆进线，在有条件的情况下，GIS 室一般布置在平台下端<sup>[14]</sup>。基于上文的分析，集约式海上换流站的 66 kV GIS 室若仍布置在下端，会影响同层其他设备房间的布置，因此推荐将 66 kV GIS 室布置在平台上端，考虑到房间高度降低，可以在 GIS 室上方布置站用电室等其他设备房间，通过错层实现紧凑化布置，减少平台尺寸<sup>[15]</sup>。

集约式海上换流站需要增加专门的高压站用变。高压站用变设备较重，应尽量布置在平台中央，重心居中有利于结构设计，同时为了方便运维和检修，应尽量布置在平台上层，顶部设置检修孔。

基于上述研究结论，集约式海上换流站典型布置方案，如图 7~图 8 所示。



图 7 上端布置图

Fig. 7 Upper layout



图 8 下端布置图

Fig. 8 Lower layout

## 3 结 论

针对集约式海上换流站的主回路拓扑结构、电气设备关键技术和平台布置方案与常规海上换流站的差异展开研究，充分考虑建设可行性、经济性及运行可靠性、灵活性等要求，得出以下结论：

- 1) 主回路拓扑结构：通过对单母线、双母线和半断路器接线的对比分析，推荐 66 kV 配电装置选用单母线或双母线接线，同时为了抑制母线短路容量，提出了两种解决方案实现母线分列运行。
- 2) 联接变压器：根据典型应用场景通过参数分析对联接变压器网侧绕组的特殊设计给出了推荐解决方案，即选用分裂绕组型式。
- 3) 66 kV GIS：通过对比设备制造水平与系统参数，提出设备选型要求以匹配联接变压器回路的通流需求。
- 4) 站用电：通过与传统海上换流站站用电设计方案的对比，提出配置专门高压站用变的要求。

5) 平台布置: 针对66 kV GIS室和高压站用变室的特点, 在传统海上换流站平台布置方案的基础上提出了适用于集约式海上换流站的典型布置方案。

我国海上风电项目正逐渐由近海走向远海, 远海风电的风资源决定了更大容量和更高电压等级的风机输出电能是最佳选择。因此, 对应即将应用的8~10 MW大容量风机和66 kV集电系统, 本文集约式海上换流站电气关键技术对指导后续大规模深远海海上风电送出项目实施具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] 黄碧斌, 张运洲, 王彩霞. 中国“十四五”新能源发展研判及需要关注的问题 [J]. 中国电力, 2020, 53(1): 1-9.  
HUANG B B, ZHANG Y Z, WANG C X. New energy development and issues in China during the 14th five-year plan [J]. Electric Power, 2020, 53(1): 1-9.
- [2] 刘卫东, 李奇南, 王轩, 等. 大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望 [J]. 中国电力, 2020, 53(7): 55-71.  
LIU W D, LI Q N, WANG X, et al. Application status and prospect of VSC-HVDC technology for large scale offshore wind farms [J]. Electric Power, 2020, 53(7): 55-70.
- [3] 迟永宁, 梁伟, 张占奎, 等. 大规模海上风电输电与并网关键技术研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3758-3771.  
CHI Y N, LIANG W, ZHANG Z K, et al. An overview on key technologies regarding power transmission and grid integration of large scale offshore wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3758-3771.
- [4] 汤东升. 海上风电大数据分析技术及应用前景初探 [J]. 南方能源建设, 2018, 5(2): 65-66.  
TANG D S. Preliminary study on the big data technology and its application prospect for offshore wind farm [J]. Southern Energy Construction, 2018, 5(2): 65-66.
- [5] 郝为瀚. 海上平台柔性直流换流站工程应用方案研究 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(1): 66-70.  
HAO W H. Research on VSC-HVDC converter station application on offshore platform [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(1): 66-70.
- [6] 挪威船级社. 风电场海上变电站: DNV—OS—J201 [S]. 挪威: 挪威船级社, 2009.  
Det Norske Veritas. Offshore substations for wind farms: DNV-OS-J201 [S]. Norway: Det Norske Veritas, 2009.
- [7] 国家能源局. 220 kV~750 kV变电站设计技术规程: DL/T 5218—2012 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.  
National Energy Administration. Technical code for the design of 220 kV~750 kV substation: DL/T 5218—2012 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [8] 郑明. 300 MW海上风电场电气主接线设计 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(3): 62-66.  
ZHENG M. Electrical single-line diagram design of a 300 MW offshore wind farm [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(3): 62-66.
- [9] 国家能源局. 风电场工程110 kV~220 kV海上升压变电站设计规范: NB/T 31115—2017 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.  
National Energy Administration. Code for 110 kV~220 kV offshore substation design of wind power projects: NB/T 31115—2017 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2018.
- [10] 和庆冬, 朱瑞军, 梅春. 400 MW海上升压站电气主接线方案探讨 [J]. 南方能源建设, 2019, 6(4): 80-85.  
HE Q D, ZHU R J, MEI C. Discussions on the main electrical wiring scheme for a 400 MW offshore substation station [J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(4): 80-85.
- [11] 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 X, et al. Research on basic requirements of offshore substation design [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3781-3788.
- [12] 戚永乐, 史政. 海上升压站平台不同标准对比研究 [J]. 南方能源建设, 2019, 6(1): 55-65.  
QI Y L, SHI Z. Comparative research on different standards of offshore steel structure platform [J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(1): 55-65.
- [13] 张宝峰. 国内外风电场海上升压站布置型式标准概述 [J]. 中国标准化, 2017(24): 222-223.  
ZHANG B F. Overview of layout standards for offshore booster stations of wind farms both here and abroad [J]. China Standardization, 2017(24): 222-223.
- [14] 范少涛, 张力, 王立鹤, 等. 海上升压站的抗震性能分析 [J]. 南方能源建设, 2019, 6(4): 101-105.  
FAN S T, ZHANG L, WANG L H, et al. Seismic performance analysis of offshore substation [J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(4): 101-105.
- [15] 赵云, 郑明, 郑建伟. 海上升压站主变压器冷却方式选择 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(3): 91-94+100.  
ZHAO Y, ZHENG M, ZHENG J W. Selection of main transformer cooling system in offshore substation [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(3): 91-94+100.

#### 作者简介:



刘生

刘生 (通信作者)

1985-, 男, 广东广州人, 高级工程师, 硕士, 长期从事高压输电工程设计工作 (e-mail) liusheng@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)