

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.013

400 MW 海上升压站电气主接线方案探讨

和庆冬, 朱瑞军, 梅春

(国家电投集团江苏海上风力发电有限公司, 盐城 224000)

摘要: [目的]海上风电场面临着离岸距离远、检修组织船舶机械成本高、检修周期长, 日常维护受气候海况影响大等特点, 合理选择电气主接线方案对风电场长周期安全稳定运行、合理安排检修时间、保证经济效益具有重要意义。[方法]主要对海上升压站送出海缆、主变、高中压侧电气主接线、重要电气设备联接的设计方案进行比较选择, 通过短路电流计算、振动建模分析、运行工况分析等方法进行了不同方案的比较和探讨。[结果]根据分析比对, 提出了海上升压站选用双分裂主变、线变组布置、主变低压侧电缆连接的电气主接线方案。[结论]希望对今后海上升压站的电气主接线设计提供借鉴。

关键词: 海上风电; 电气主接线; 振动; 方案

中图分类号: TK89; TM614

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)04-0080-06

Discussions on the Main Electrical Wiring Scheme for a 400 MW Offshore Substation Station

HE Qingdong, ZHU Ruijun, MEI Chun

(State Power Investment Group Jiangsu Offshore Wind Power Co., Ltd., Yancheng 224000)

Abstract: [Introduction] Offshore wind farms are characterized by long distance from shore, high costs of repair due to vessels involved and weather, long maintenance cycles and the fact that daily operations and maintenance is highly dependent on weather and sea state. It is then of vital importance to select a reliable main electrical wiring for reliable operations of offshore wind farms, optimal planning of maintenance and secure finance returns. [Method] Various design schemes for subsea cables, main transformers, electrical wiring on the high/medium voltage side and major electrical components on the offshore substation have been compared and assessed in this paper through calculating short-circuit currents, modeling and analyzing vibration and various operating scenarios. [Result] Based on the comparisons and assessments, the main electrical wiring scheme is recommended to use three-winding main transformers, circuit-transformer unit arrangement and cable connection on the low voltage side of transformer for main electrical wiring scheme. [Conclusion] The design for main electrical wiring scheme for a 400 MW offshore substation is proposed in this paper.

Key words: offshore wind; electrical main; wiring; scheme

风能是清洁的绿色可再生能源, 近年来风力资源的开发利用得到了迅猛发展^[1-2], 风电机组装机容量年平均增长率超过 20%, 2018 年底, 全国风电累计并网容量达到 184 GW。

随着技术的日趋成熟, 风力发电已从陆上风电向滩涂、近海, 乃至深海风电发展^[3-6]。

我国海上风能资源丰富, 近海规划开发潜力约 200 GW。截至 2019 年 3 月, 已核准海上风电容量超过 53 GW, 并网容量 4.11 GW, 位列全球第三位。按照国家可再生能源发展“十三五规划”, 到 2020 年, 全国预计开工海上风电 12 GW, 将超过德国, 位居全球第二位。

我国海上风力发电经过前期的探索、试验, 目前正处于近海风电场大规模开发利用, 远海风电场引进、试验, 示范探索阶段。对海上风电场布置、漂浮式桩基础设计施工、大功率风机应用、海上电

收稿日期: 2018-11-07 修回日期: 2019-03-30

基金项目: 国家电投集团江苏海上风力发电有限公司科技项目“海上风电专项技术研究”(SPICJS015HF)

气设备制造等各方面技术还需继续开展成熟、深入的研究^[7]。

海上升压站是海上风电的核心^[8-9], 合理选择主接线方案对海上风电场意义重大, 有助于降低海上风电建设风险、有利于建设单位利润保证。本文以近期国内投产容量最大的 400 MW 海上风电场海上升压站为基础进行主接线方案研究。

海上升压站由于离岸远、气候条件差的因素, 存在检修困难、检修周期长、检修成本高等特点, 同时作为海上风电场的“心脏”, 是风电场电能输送的核心, 但其造价占风电场总造价比例较低(约 3%), 因此在电气主接线选择上首先要考虑可靠性和易维护性, 其次考虑运行方式的灵活性, 最后考虑经济性。

1 海上升压站出线

根据国内典型条件, 400 MW 以下规模海上风电场一般建设 1 座 220 kV 海上升压站, 通过 220 kV 海底光电复合电缆登陆, 最终以一回 220 kV 送出线路接入电网。

根据海上风电场总容量 400 MW, 可以得出海缆 100% 负荷条件下工作电流约为 1 057 A(功率因数 0.95)。根据目前海缆制造水平以及海缆无法采用分割导体的限制, 三芯海缆共需 2 500 mm² 以上截面, 超大容量的单根 3 相 220 kV 海缆目前还缺乏相关制造经验; 同时考虑三根 1 × 800 单芯海缆征用海域面积较大、敷设周期长(4 ~ 5 月), 运行可靠性低。目前选用两回 3 × 500 mm² 127/220 kV 的海底光电复合缆, 既考虑到目前国内制造水平, 又提高了可利用率, 有利于海上风电场的运行。同时完成首根 220 kV 海缆敷设后, 风场即可并网投运, 送出约 60% 负荷。

2 变压器选择

2.1 变压器容量

海上风电主变容量是否需要冗余, 目前设计规范无明确要求^[10]。考虑到海上风电设备重量限制、检修困难等原因, 一般在前期测风数据及实际维修成本的基础上考虑冗余情况^[11]。

本文以实际风资源测风数据、风电机组功率曲线为计算依据, 复核一年内的发电量变化。根据国外海上风电场检修经验, 海上变压器一次大修

时间至少约 3 个月。

如图 1 所示, 该风场平均风速出现的概率以类正态分布方式, 其密集区 4 ~ 9 m/s, 往两边依次递减。

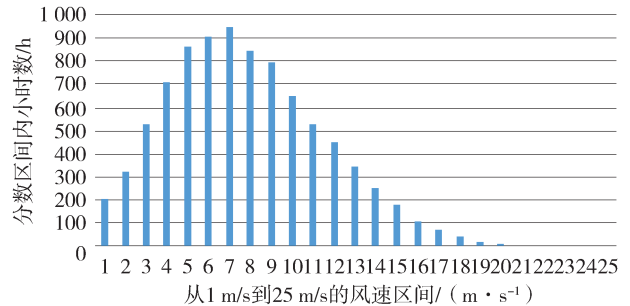


图 1 不同风速区间中的小时数

Fig. 1 Hours between different wind speed

因此如果一台海上升压站变压器故障或维修时, 另一台变压器建议考虑整个风场处于密集区 9 m/s 风速以内的发电量, 尽可能多输出电量。如图 2 中风功率曲线所示, 9 m/s 时发电量约为 63% 的额定容量。图 2 中各点详细参数如表 1 所示。

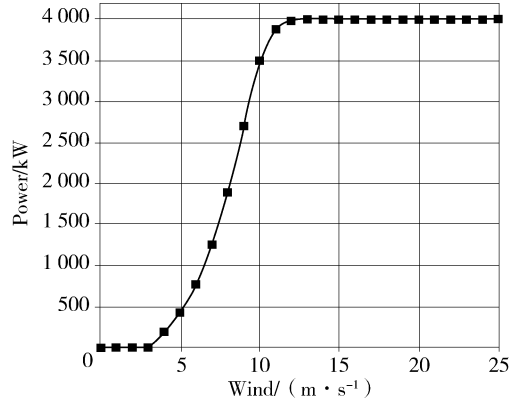


图 2 某型号 4 MW 风机功率曲线图

Fig. 2 Power curve of a certain type of 4 MW fan

考虑到变压器过载能力、场用电量、系统损耗、风电机组可用率, 同时考虑变压器容量过大会导致海缆截面增大, 费用较高, 因此变压器容量选择在 60% 左右相对较合理, 400 MW 海上升压站一般选择 2 台 240 MVA 变压器为宜。

2.2 变压器型式

变压器型式目前有低压双分裂变压器和低压双绕组变压器两种型式, 其短路电流计算模型分别如图 3、图 4 所示。

表1 图2各点风速功率值

Tab. 1 Value of wind and power at each point in Figure 2

Wind/(m · s ⁻¹)	Power/kW
0	0
1	0
2	0
3	0
4	189
5	427
6	773
7	1 255
8	1 890
9	2 701
10	3 496
11	3 893
12	3 989
13	3 999
14	4 000
15	4 000
16	4 000
17	4 000
18	4 000
19	4 000
20	4 000
21	4 000
22	4 000
23	4 000
24	4 000
25	4 000

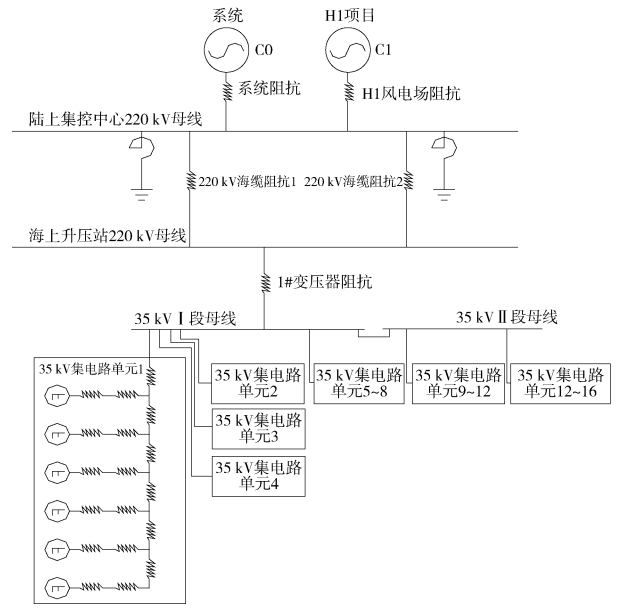


图4 双绕组变压器短路电流计算模型图

Fig. 4 double winding transformer computing model graph

由于风电机组数量较多，其提供至海上升压站侧 35 kV 母线短路电流可能达到 15 kA 以上，如再考虑系统提供的短路电流，则将会接近或超过 20 kA 等级。

根据目前国内市场情况，风机环网柜侧断路器短路水平仅能达到 20 kA，采用 25 kA 将需要国外进口，其供货周期及采购费用均会大幅提高。通过 ETAP 软件进行稳态仿真模拟，双分裂变压器半穿越电抗为 21%，分裂系数 3.5；双绕组变压器电抗为 14%。两种接线方案的 35 kV 短路计算如表 2 所示：

表2 短路电流计算结果表

Tab. 2 Short circuit current calculation table kA

短路点位置	双分裂变压器 短路电流值	双绕组变压器 短路电流值
陆上 220 kV 母线	15.97	16.1
海上 220 kV 母线	13.45	13.8
海上 35 kV 母线	16.37	27.12
风机侧 35 kV 母线	14.8	23.3
风机侧 690 V 母线	59.6	61.4

根据计算结果可知，采用低压双分裂变压器可以有效的减少 35 kV 侧母线短路电流，因此 400 MW 容量风电场宜采用双分裂变压器型式。

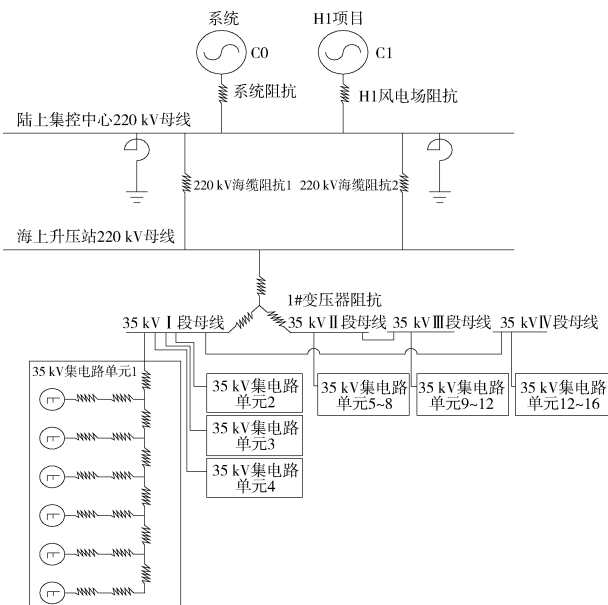


图3 双分裂变压器短路电流计算模型图

Fig. 3 Double split transformer computing model graph

3 高压侧接线方式

依据海上升压站的特点,高压侧接线型式要考虑保护配置简单可靠、易维护,其次考虑灵活性,最后考虑经济性。本文主要考虑桥形接线,单母线接线,两组变压器线变组接线三种方式,其典型接线图如图5所示。本文不考虑双母线、角型、3/2接线等复杂的接线型式。

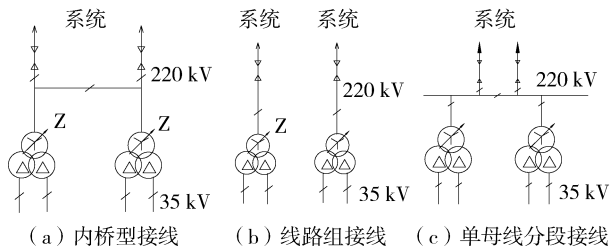


图5 高压侧接线方式

Fig. 5 High-voltage side connection mode

方案一:内桥接线方案接线型式简单,经济性较好,可靠性较合适,但是保护系统复杂。其运行方式为:(1)正常运行时内桥断开,两组变压器线路组运行;(2)当1回海缆故障时,可以考虑另一回路海缆带两台变压器(限负荷)的运行方式,该方式可以限制35 kV侧的短路电流水平;(3)当一台变压器故障时候,可以考虑两回海缆带一台变压器的运行方式,该方式可以最大限度的利用海缆的输送容量;(4)当一台变压器检修时,另外一侧海缆故障时,可以通过倒闸操作,使不同侧的变压器和海缆组成送电单元进行送电。

方案二:两组变压器线路组接线最简单,经济性最好,保护也最简单,但可靠性相对较低。其运行方式为:(1)正常运行时为两组变压器线路组运行;(2)海缆故障或变压器故障时,故障侧设备停运,未故障设备运行,35 kV侧倒闸接入未故障回路。

方案三:单母线分段接线较复杂,可靠性较好,保护相对复杂,经济性最差。运行方式同方案一。

以上三种方案在海上风电场均可行,且都有应用。

目前国外海上风场多选择内桥接线方式,运行方式灵活;我国国家电网规模大,接线方式和保护配置复杂,根据电网对保护配置的要求以及运维人员操作简便性,多采用线变组接线方案,该方案设

置时需注意电缆与变压器的容量匹配。

4 中压侧接线方式

海上升压站中压侧接线与高压侧接线一样,也需要考虑可靠性、灵活性、保护简单性以及经济性。

变压器采用双分裂变压器时,可以考虑两组单母线分段接线(如图6所示)和四段独立母线两种方案(如图7所示)。

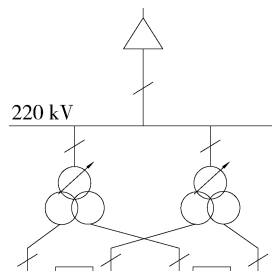


图6 双分裂变压器下的两组单母线分段接线

Fig. 6 Two groups of single bus wiring under double split transformer

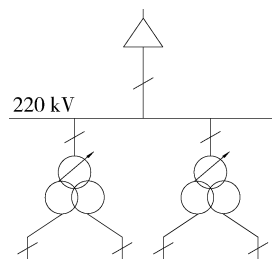


图7 双分裂变压器下的四组单母线接线

Fig. 7 Four groups of single bus wiring under double split transformer

高压侧如采用变压器线路组接线时,35 kV中压侧推荐采用两组单母线分段接线,其中一个回路出现故障时,可以通过中压侧切换保证大部分风电场的容量送出。

400 MW容量风电场一般集电线路数量为16回,因此可以将回路数平均分配到各段母线,对接地变小电阻容量选择也可以进行统一设置。

5 电气设备连接

海上升压站内设备连接应考虑设备运行中的振动、海上升压站的振动、钢结构的变形、孔洞的封堵等^[12]。

海上升压站内主设备之间连接有电缆型式(如

图8所示)和母线型式(如图9所示)。国内外均有不同工程使用这两种方式。



图8 主变低压侧电缆连接方式

Fig. 8 Main transformer low-voltage side cable connection mode



图9 主变低压侧管型母线连接方式

Fig. 9 Main transformer low-voltage side tubular bus connection mode

根据已运行的某风电场基础监测数据,海上升压站受到海浪、船舶等撞击造成平台振动的情况比较普遍,特别是船舶撞击,其力量及振幅均较大,某风电场投运后海上升压站各月振动强度统计如表3所示。

根据实测的振动数据(如图9所示),通过建立钢结构模型分析,如出现高强度碰撞时,海上升压站变压器部分水平位移20~30 mm。

同时,通过钢结构计算,变压器在钢结构平台上安装完成后,钢结构形变20~30 mm。

综上所述,如海上升压站设备采用电缆连接,海上升压站产生相对位移可以通过电缆弯曲将应力抵消;如海上升压站设备连接采用母线连接时,需要通过母线伸缩节变形来消减所产生的应力,需定期检测连接螺栓是否紧固,以防平台振动导致螺栓松脱,带来较大的运行隐患。因此建议采用电缆连接方式较好。

表3 振动强度统计表

Tab. 3 Vibration intensity chart

日期	最大加速度 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	加速度60 s 最大均方根 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	日期	最大加速度 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	加速度60 s 最大均方根 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
2016 09	0.366	0.020 0	2017 06	0.632	0.043 6
2016 10	0.513	0.023 0	2017 07	0.458	0.025 0
2016 11	3.515	0.355 0	2017 08	4.457	0.307 0
2016 12	0.326	0.018 4	2017 09	0.673	0.034 2
2017 01	0.405	0.025 0	2017 10	0.543	0.036 4
2017 02	0.537	0.036 0	2017 11	0.596	0.034 0
2017 03	10.034	0.792 0	2017 12	0.653	0.038 0
2017 04	14.897	0.635 0	2018 01	0.558	0.032 0
2017 05	0.5490	0.033 1	2018 02	0.428	0.024 0

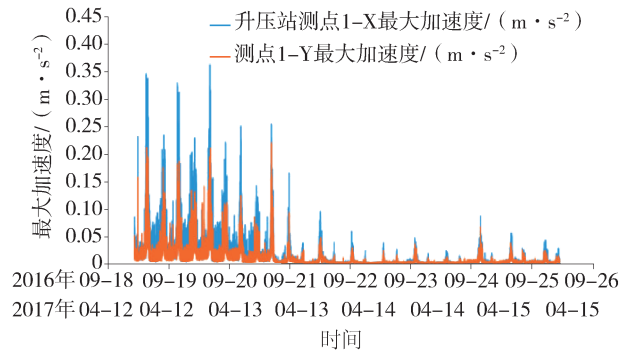


图10 升压站某时段的振动加速度峰值变化时程图

Fig. 10 Vibration acceleration peak change diagram of booster station during some periods of time

6 结论

国内海上风电建设正在快速发展,2018 年仅广东省核准的海上风电负荷总量已达到 30 TW 以上。国内目前核准的项目容量一般为 200 MW、300 MW、400 MW。本文是基于 400 MW 海上风电场的电气主接线典型设计,对于 300 MW 海上风电场,主变宜选择两台 180 kVA 的双分裂变压器;200 MW 海上风电场,主变宜选择两台 120 kVA 的双分裂变压器;海缆送出、高中压电气主接线、重要电气设备的连接形式都可以参考本文的设计原则进行设计。

随着国内海上风电建设逐步从近海走向远海,从浅海走向深海,海上升压站的建安、运行、维护难度将日益增大。合理的选择海上升压站电气主接线方案,对提高风电场效率、安全稳定运行有重大

意义,因此建议每个风电场在可行性研究阶段、接入系统设计阶段,根据接入电网的特点、电网要求、安全可靠、运行便利性、经济合理性等方面进行主接线方案选择,确保海上风电场能长周期安全稳定运行。

参考文献:

- [1] 张丹,王杰.国内微电网项目建设及发展趋势研究[J].电网技术,2016,40(2):451-458.
ZHANG D, WANG J. Research on construction and development trend of micro-grid in China [J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 451-458.
- [2] 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.
- [3] 元国凯,汤东升,刘晋超,等.海上风电机组基础灌浆技术应用与发展[J].南方能源建设,2017,4(1):10-17.
YUAN G K, TANG D S, LIU J C, et al. Grouting technology application and development in offshore wind farm [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(1): 10-17.
- [4] 苗文静,黄伟,葛良军,等.基于VSC-HVDC并网的海上风电场无功补偿控制策略[J].华北电力大学学报(自然科学版),2019,46(1):74-81.
MIAO W J, HUANG W, GE L J, et al. Reactive power compensation control strategy of offshore wind farm on basis of VSC-HVDC grid-connection [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2019, 46(1): 74-81.
- [5] KOCEWIAK Ł H, KRAMER B L Ø, HOLMSTRØM O, et al. Resonance damping in array cable systems by wind turbine active filtering in large offshore wind power plants [J]. IET Renewable Power Generation, 2017(7): 1069-1077.
- [6] LIN J. Integrating the first HVDC-Based offshore wind power into PJM system—a real project case study [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(3): 1970-1978.
- [7] 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.
- [8] 郭伟,程莲莲.海上升压站上部组块施工期监测与分析[J].水力发电,2017,43(10):103-106.
GUO W, CHENG L L. Upper block construction monitoring and analysis of offshore booster station [J]. Water Power, 2017, 43(10): 103-106.
- [9] 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.
LIU F L, ZHANG L Q, WU J. Seismic design of offshore substation for offshore wind power farms [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2013, 46(Supp. 1): 144-147.
- [10] 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): 3781-3789.
- [11] 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 M, SHE S X, LIU X S, 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.
- [12] 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.

作者简介:

和庆冬(通信作者)

1973-,男,河南焦作人,国家电投集团江苏海上风力发电有限公司工程部主任,高级工程师,国家一级建造师,国家注册安全工程师,主要从事火电、海上风力发电工程技术管理工作(e-mail) he2006126@126.com。



HE Q D

朱瑞军

1968-,男,江苏南通人,国家电投集团江苏海上风力发电有限公司副总经理,学士,主要从事新能源发电项目工程建设、发电运营管理工作(e-mail)572486754@qq.com。

(责任编辑 李辉)