

300 MW 海上风电场电气主接线设计

郑明

(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: 结合我国海上风电场项目的典型条件, 对一个装机容量为 300 MW, 通过交流 220 kV 线路接入电网的海上风电场的电气主接线方案进行了探讨, 提出了海上升压站和高压海底电缆的电压选择方案, 集电线路的拓扑布局和集电开关配置方案, 主变压器的台数、容量和型式选择方案以及无功补偿的配置方案。对海上风电场电气设计的主要问题提出了建议, 为海上风电场电气设计提供了参考。

关键词: 海上风电场; 电气主接线; 集电系统; 无功补偿

中图分类号: TM645

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)03-0062-05

Electrical Single-line Diagram Design of a 300 MW Offshore Wind Farm

ZHENG Ming

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

Abstract: The paper consider a typical condition of the offshore wind farm project in China, which has a capacity of 300 MW, through a 220 kV line connected to the grid. The electrical single line diagram is discussed, then the paper presents the voltage of the offshore substation and the HV-submarine cable, the array cable topology and collector system switch configuration, the main transformer number, capacity and type selection scheme and the reactive power compensation scheme. The views on main problems of electrical design of offshore wind farm are proposed, which provide a reference for the electric design of offshore wind farm.

Key words: offshore wind farm; electrical single-line diagram; array cable system; reactive power compensation

目前, 我国上海、江苏、山东、河北、广东、辽宁、大连的海上风电规划已获国家批准, 浙江、福建、海南正在审批, 广西也正在编制, 沿海各省海上风电场址规划已全面启动, 并取得丰硕成果, 未来我国海上风电场开发格局已经形成。按照目前的场址规划方案和项目开展情况, 装机容量 300 MW 是一个海上风电场项目较常见的容量, 本文拟在此容量的基础上, 考虑典型的外部条件, 提出海上风电场电气主接线设计方案, 为海上风电场电气设计提供参考。

1 电气设计范围

风电场电气设计的范围涉及到电厂与电网的产权分界点。海上风电场与电网的产权分界点, 一般有海上升压站高压侧, 陆上集控中心出线构架、海缆登陆点三种方案, 与各国的政策有关。如德国在 2006 年底颁布了《加快基础设施规划法案》, 规定电网公司负责从海上升压站到大陆的接入线路。而我国的现行规定: 对于升压变电站布置在海上的海上风电场工程, 风电场与电网的产权分界点为海上升压变电站高压侧连接线路上岸后第一杆(架)。几种产权分界的点示意图见图 1。

根据我国的规定^[1-5], 产权分界点如图中“分界点三”所示, 实际项目中, 一般在风电场陆上集控中心配置相关配电设备及无功补偿设备, 产权分界点为陆上集控中心出线构架, 本文中暂按此处

收稿日期: 2015-05-23

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(2014A030310194)

作者简介: 郑明(1982), 男, 湖北仙桃人, 高级工程师, 硕士, 主要从事火电厂、核电厂和新能源的电气一次设计工作(e-mail) zhengming@gedi.com.cn。

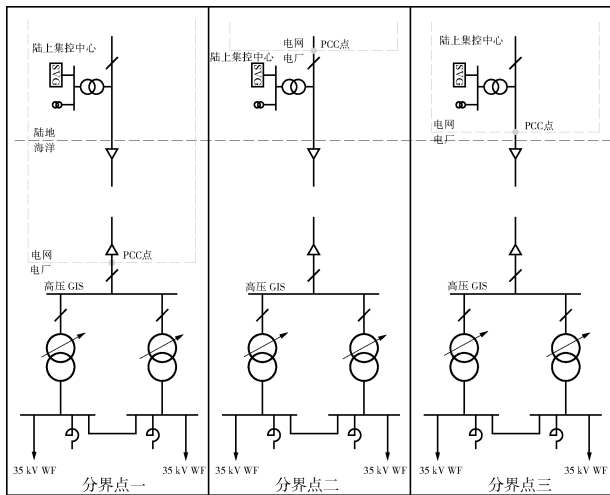


图1 海上风电场与电网产权的几种划分方式

Fig. 1 Options TSO Investment Interface with OWF Owner

理。电气设计范围为风电场产权范围。

2 海上升压站方案

按照国内典型条件, 本文假定 300 MW 海上风电场通过 1 回 220 kV 线路接入电力系统, 离岸距离约 15 km, 考虑设置海上升压站。

参考国外项目经验和国内工程造价, 对海上升压站采用 110 kV 还是 220 kV 比选见表 1。

综合考虑, 在国产 220 kV 海底电缆技术成熟可靠的基础上, 采用一级升压的方式, 对多数项目, 具有更好的经济性。

国产 220 kV 海底电缆虽然缺乏使用业绩, 但最近招标的福建莆田南日 400 MW 海上风电项目采用了 220 kV, $1 \times 1\ 600\ \text{mm}^2$ 截面的海底电缆, 江苏响水 200 MW 海上风电项目采用了 220 kV, $3 \times 500\ \text{mm}^2$ 截面的海底电缆。随着海上风电等海上能源的开发, 220 kV 海底电缆的应用将越来越多。

推荐采用设 1 个 220 kV 海上升压站, 加上 1 回 220 kV 送出海底电缆的方案。

3 集电线路方案

风电场风机之间的连接线路称为集电线路, 海上风电场的集电线路采用海底电缆。

3.1 集电线路电压

集电线路电压可采用 10 kV 或 35 kV。

与采用 10 kV 相比, 35 kV 海底电缆每回路输送容量大, 线路回路少, 占海面积小, 路由好解决。

表 1 海上升压站方案比较表

Table 1 Comparison OSS Solutions

方案	方案一 220 kV 海上升压站 +1 回 220 kV 海缆	方案二 110 kV 海上升压站 +2 回 110 kV 海缆
接线图		
技术比较	1) 采用一回 220 kV 电压等级海缆输送至陆地, 功率损耗小, 电压损失小; 2) 单回线路送出, 可靠性低; 3) 220 kV 海缆生产厂家较少, 国产厂家暂无运行经验。施工难度大, 事故抢修周期长; 4) 需配置的无功补偿容量较大。	1) 采用两回 110 kV 电压等级海缆输送至陆地, 功率损耗大, 电压损失大。2) 两回线路送出, 可靠性高。3) 110 kV 海缆技术成熟, 国内外运行经验较多。施工工艺成熟, 事故抢修周期短。4) 需配置的无功补偿容量较小。
经济比较	1) 一回国产 220 kV 单芯海缆(含敷设)费用低于两回国产 110 kV 三芯海缆; 2) 2 台 220 kV 主变, 低于方案二中三台变压器; 3) 220 kV GIS 间隔较多, 费用高于方案二; 4) 土建及安装费用几乎相等; 5) 电缆损耗费用较低, 海域使用费较低。	1) 两回国产 110 kV 三芯海缆(含敷设)费用高于一回国产 220 kV 单芯海缆; 2) 变压器费用较高; 3) 110 kV GIS 间隔较多, 费用低于方案一; 4) 土建及安装费用几乎相等; 5) 电缆损耗费用较高, 海域使用费较高。

在同等截面下, 35 kV 导线的电压损失小, 功率损耗也小。35 kV 海底电缆已全部实现国产化, 市场供货充足。根据风机及升压站的布置距离, 推荐集电线路的电压采用 35 kV。

3.2 集电线路接线

集电线路接线包括集电拓扑布局 and 集电开关配置。

在拓扑布局方面, 主要有放射形、环形、星形三种主要的拓扑布局结构, 其中环形又可以分为单边环形, 双边环形和复合环形。

集电系统的拓扑布局方案中, 放射形布局投资少, 结构简单, 能够满足可靠性要求, 在国内外工程中应用最多。

放射形布局的开关配置方面,主要有传统开关配置,完全开关配置,部分开关配置三种开关配置方案^[5-6]。

传统开关配置方案中风机与风机之间只有电缆进行连接,开关设备仅安装在集电电缆接入汇流母线入口处,示意图见图2。

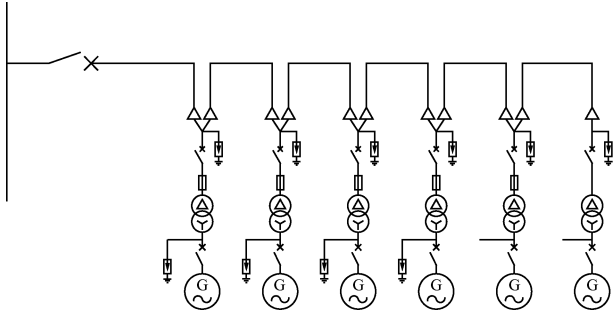


图2 传统开关配置示意图

Fig. 2 Traditional Switchgear Configuration

完全开关配置风机与风机之间都有电缆和开关连接,示意图见图3。

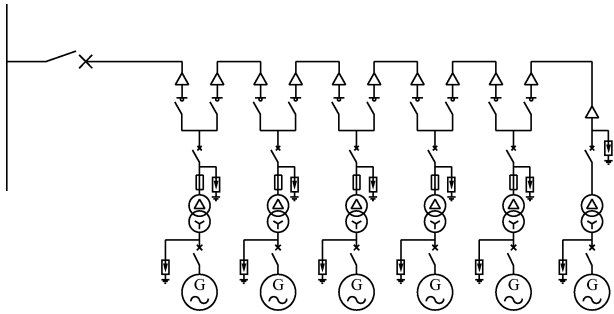


图3 完全开关配置示意图

Fig. 3 Complete Switchgear Configuration

部分开关配置介于以上两者之间,仅在风机馈线分叉处和集电电缆接入汇流母线处装设开关。

集电系统的开关配置方案中,传统开关配置的投资最少,目前在项目中有应用。

综合考虑经济性和可靠性,在近海项目中可采用放射形布局 and 传统开关配置。但是随着海上风电场的容量越来越大,离岸越来越远,应逐步采用可靠性更高的拓扑布局和开关配置方式^[7]。这也意味着投资的增加。

为优化集电系统设计,提高系统可靠性、经济性。广东省电力设计研究院开发了“海上风电场集电系统设计软件”,通过软件分析,可得出可靠性、经济性兼优的集电系统拓扑方案。

4 升压站电气主接线

升压站电气主接线方案将影响风电场安全可靠运行,对设备选择及布置起着决定性作用,应满足可靠性、灵活性、经济性三项要求,经技术经济分析和比较确定。

4.1 主变压器选择

4.1.1 主变压器台数选择

风电场总装机容量 300 MW,主变压器设置可考虑以下三种方案:

方案一:设 1 台 300 MVA 主变压器。

方案二:设 2 台 150 MVA 主变压器。

方案三:设 3 台 100 MVA 主变压器。

三种主变设置方案图详见图4:

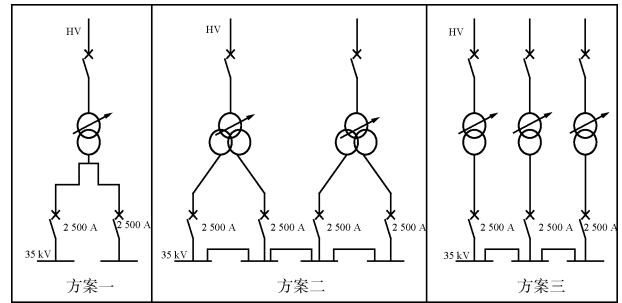


图4 主变设置方案图

Fig. 4 Configuration Main Transformers

方案一仅设 1 台主变压器,投资少,但变压器及高压开关设备故障将引起全场停电,检修维护困难,停电损失较大;方案二变压器数量少,220 kV 间隔数量较少,海上升压站平台面积较小,可靠性较高。方案三变压器数量多,220 kV 间隔数量多,占用较多海上升压站平台面积,可靠性高。

综合考虑接线的经济性的可靠性,选择主变数量为 2 台。

4.1.2 主变压器容量选择

根据《风力发电场设计技术规范》(DL/T 5383—2007)^[1],主变压器容量可选择等于风电场的装机容量。但是考虑到海上风电场主变压器放置于远离大陆的海上平台,故障率相比陆地较高,而且一旦故障,维修时间长,这都加大了停电损失,根据西门子在欧洲海上风电项目中的经验,主变压器容量选择时,建议考虑一定的冗余。

本项目设 2 台主变压器,根据西门子的经验,单台主变可选择等于 50%~80% 的风电场容量。以

80% 为例, 在冷却方式为 ONAN (油浸自冷) 时, $S_{\text{主变}} = 0.8 \times S_{\text{风电场}}$, 当一台主变故障退出运行时, 另一台主变通过开启配套的风机, 将冷却方式转换为 ONAF (油浸风冷) 方式时, 根据 IEC 60076 - 7 - 2005^[3] 中的规定, 主变可在 1.3 倍的自冷额定容量下长期运行 (主变压器选择时, 除主变本体外, 高低压套管、调压开关等附件需能满足此工况的要求)。此时单台主变的容量: $S_{\text{主变}} = 0.8 \times S_{\text{风电场}} \times 1.3 = 1.04 S_{\text{风电场}}$, 可以将整个风电场的容量送出。

如按风电场容量的 80% 配置, 单台主变的容量为 240 MVA, 按风电场容量的 60% 配置时, 单台主变的容量为 180 MVA。这都是我国变电工程中的标准容量, 有利于采购和生产。

综合考虑容量冗余和变压器造价, 结合国内外已有工程的案例, 选择主变的容量为 180 MVA。

4.1.3 主变压器型式选择

选择 2 台 180 MVA 的主变压器时, 单台主变低压侧的电流大于 2 500 A, 而目前市场上成熟的 SF6 充气柜最大额定电流为 2 500 A, 主变低压侧接线可采用以下两种方式:

1) 主变低压侧采用分裂接线, 主变采用双分裂变压器。

2) 主变低压侧采用扩大单元接线, 主变选择双绕组变压器。

方案对比详见表 2。

表 2 主变压器型式方案对比表

Table 2 Comparison main transformer types

方案	方案一 主变采用低压双分裂变压器	方案二 主变采用双绕组变压器
接线图		
方案对比	1) 限制短路电流; 2) 分裂绕组一个支路发生短路故障时, 另一个支路仍可维持运行; 3) 低压出线可选择母线或电缆, 较灵活; 4) 主变投资较高。	1) 主变故障的影响范围较大; 2) 低压出线如选择母线, 往往只能 T 接, 可靠性较低; 3) 主变投资较低。

尽管分裂绕组变压器投资较高, 但具有限制短路电流, 短路故障时维持非故障分支运行的优点, 在欧洲已投产的海上风电项目中应用较多, 积累了一定的运行经验。我国目前仍处于学习和引进阶段, 可推荐采用分裂绕组。

4.2 220 kV 配电装置接线

220 kV 配电装置共 2 回进线, 1 回出线, 主要可以考虑单母线接线, 不完全单母线接线等。从灵活简洁的角度考虑, 推荐采用“2 进 1 出”单母线接线。

4.3 35 kV 配电装置接线

300 MW 海上风电场 35 kV 风机集电线路一般为 12 回, 考虑其出线数量, 35 kV 配电装置推荐采用单母线分段接线, 具有较高的供电可靠性和运行灵活性。

5 无功补偿设计

海上风电场需要考虑两方面的无功补偿措施: (1) 补偿 35 kV 集电系统的无功功率; (2) 补偿高压出线海底电缆的无功功率。

我国《风电场接入电力系统技术规定》(GB/T 19963 - 2011)^[2] 中规定了风电场无功补偿配置原则和容量要求。国家能源局 2014 年 4 月颁布的《防止电力生产事故的二十五项重点要求及编制释义》^[4] 明确要求风电场配置动态无功补偿装置, 且动态调节的响应时间不大于 30 ms。

从响应时间来看, 无功补偿只能采用 TCR 型和 SVG 型式。从占地和技术的角度, 海上风电工程多采用 SVG。

与陆上风电不同的是, 海上风电场可以考虑 2 个无功补偿点或其组合, 见图 5:

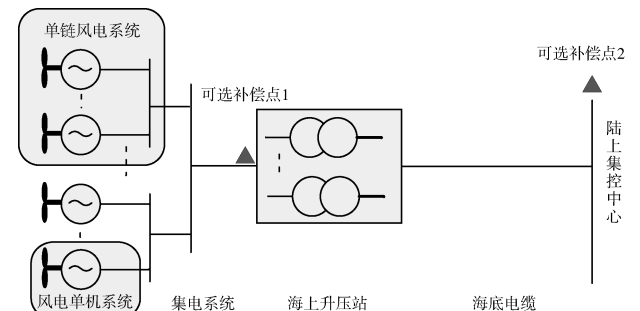


图 5 海上风电场的无功补偿点

Fig. 5 Reactive Power Compensation Installation Point

从上图可以看出, 海上风电场可以考虑在海上

升压站或陆上集控中心配置无功补偿装置，或者两处都配置。

按照分区补偿的原则，推荐在海上升压站和陆上集控中心都配置无功补偿装置。

5.1 海上升压站侧

推荐在海上升压站主变低压侧配置并联电抗器，并联电抗器带 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 无载分接档位。电抗器容量补偿 35 kV 集电系统的无功功率。

相比 35 kV 并联电抗器，在海上升压站平台装设 35 kV SVG 存在如下缺点：

- 1) 安装 SVG 所需的空间非常大。
- 2) 散热量非常大，一般需安装水冷装置。
- 3) SVG 维护工作量大，通常其中半导体元件的寿命为 10 年。
- 4) SVG 的可靠性比电抗器低，下图 6 所示为实际海上平台项目中 SVG 热交换器发生乙二醇（冷却剂）泄露的图片。
- 5) SVG 的安装调试比电抗器更费时。
- 6) SVG 在海上升压站的系统集成复杂，许多报警和状态信号需要监控，也需要对 SVG 采取更主动的控制策略。

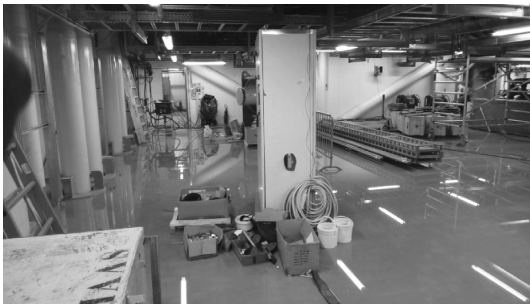


图 6 损坏的 SVG 热交换器导致的乙二醇泄露
Fig. 6 Broken STATCOM Glycol Heat Exchanger
Result of OSS Flooded Witch Glycol

35 kV 并联电抗器分为干式和油浸式，干式电抗器又可分为空心式和铁心式，铁心式无电磁污染，尺寸小，适合海上升压站户内安装。推荐在海上升压站平台采用铁心式并联电抗器。

在海上升压站主变高压侧设高压并联电抗器会增加平台的重量和空间尺寸，并增加了与 GIS 的连接、漏油收集、冷却系统等方面的投入，一般情况下应尽量避免。当然高压海底电缆在海陆两端补偿与仅在陆地一端补偿的运行损耗是不一样的，从海

上升压站设计的角度来看，推荐高抗设在陆上。从整个海上风电场的角度来看，可结合运行工况，做进一步的经济比较。

5.2 陆上集控中心侧

从满足电网要求及响应时间的角度出发，在陆上集控中心配置 SVG 进行无功补偿，通过降压变压器引接 SVG 装置，同时可从降压变引接集控中心站用电源。

6 结论

本文通过对一个容量为 300 MW，采用一回 220 kV 交流线路接入电网的海上风电场的电气主接线进行分析，得出了如下结论：

- 1) 在国产 220 kV 海底电缆成熟可靠的基础上，采用一级升压的方式，具有更好的经济性。
- 2) 综合考虑经济性和可靠性，在近海项目中集电系统可采用放射形布局 and 传统开关配置。但是随着海上风电场的容量越来越大，离岸越来越远，应逐步采用可靠性更高的拓扑布局和开关配置方式。
- 3) 主变压器容量选择时，建议考虑一定的冗余，按西门子在欧洲海上风电项目中的经验，设置两台主变时，单台主变容量可选择等于 50% ~ 80% 的风电场容量。
- 4) 推荐采用海上升压站中压侧连接并联铁心式电抗器，陆上集控中心配置高压电抗器 + SVG 的无功补偿方案。

参考文献：

- [1] DL/T 5383—2007. 风力发电场设计技术规范 [S].
- [2] GB/T 19963—2011. 风电场接入电力系统技术规定 [S].
- [3] IEC 60076-7—2005. Power Transformers-Part7: Loading Guide for Oil-immersed Power Transformers [S]. Switzerland.
- [4] 国家能源局. 防止电力生产事故的二十五项重点要求及编制释义 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [5] 谭任深. 海上风电场集电系统的优化设计 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [6] 王东建, 李国杰. 考虑电缆故障时海上风电场电气系统开关配置方案的经济性比较与分析 [J]. 电网技术, 2010(2): 125-128.
- [7] 谭任深, 杨苹, 贺鹏. 考虑电气故障和开关配置方案的海上风电场集电系统可靠性及灵敏度研究 [J]. 电网技术, 2013(8): 2264-2270.