

[变电站]

# 海上风电场升压变电站电气布置探讨

文/刘必臻  
德京集团有限公司

海上风电场升压变电站的电气布置需综合考虑风电场规模、风机布局、电缆敷设、变压器选型及防雷、防腐蚀和防火等诸多因素。此外海上风电场面临高湿、盐雾、强风浪等恶劣海洋环境，对装备的耐久性与稳定性提出了更高的要求。因此对海上风电场升压站电气布置的基本原则进行系统研究，并提出相应的电气布置优化策略。

近年来，世界各国对新能源的需求日益增长，海上风电场作为一种清洁高效的新能源，受到广泛关注并得到迅速发展。建设海上风电场既能有效降低温室气体排放，又能缓解能源短缺。然而由于海上风电场所处的特殊环境与复杂的工况，使得其升压站的电气布置要求更加严格。升压变电站是连接风电机组与电网的重要枢纽，其电气布置是否合理、可靠，将直接影响风电机组的安全稳定运行。因此，对海上风电场升压站的电气布置进行研究优化是十分必要的。

## 海上风电场升压变电站电气布置的基本原则

### 1. 安全性

在海上风电场升压站电气布置中，安全性是第一位的。海洋环境多变，环境恶劣，对风电装备的安全保护提出了更高的要求。其中最关键的是要保证设备的抗腐蚀性能，海水中的盐、湿等因素对电子设备的腐蚀是一大挑战。采用耐腐蚀材料及特殊涂料，可有效地延长设备寿命<sup>[1]</sup>。而且防雷措施也不可忽略，海上雷电活动频繁，避雷针、接地网的合理布设以及采用抗雷性能优良的设备可有效降低雷电对设备的破坏。此外还应采取防火措施，利用防火材料和设置自动灭火系统，使火灾早期得到控

制，避免更大的损失。

### 2. 可靠性

海上风电场升压站的可靠性是保证其长期稳定运行的关键。海上风电场一般远离陆地，一旦发生故障维修困难且费用高昂，因此其可靠性非常重要。选择高品质的设备及元器件是保证设备长时间稳定运行的基础。而且采用冗余设计可以有效地提高系统的可靠性，如双路供电的关键设备设计，可以保证一组设备发生故障后，其他设备继续运行，避免全局停电。另外监测系统的可靠性也是非常重要的，对设备的运行状态进行实时监测，并对潜在的故障进行预警，可以极大地减少故障的发生。

### 3. 经济性

在海上风电升压站建设与运行中，经济性是一个不容忽视的问题。海上风电场造价昂贵，如何在保证安全性、可靠性的同时，降低投资成本，是风电场设计中需要考虑的问题。对升压变电站的电气布置进行合理的规划，优化设备选型，减少不必要的设备重复建设，可有效地减少初期投资。而且运用先进技术手段，如采用高效率变压器、低损耗导线等，可降低能耗，提高经济效益。另外运行维护费用也是经济性的一个重要方面，选用易维修、长寿命的设备，降低故障率和维修频率，可以大大降

低运营费用。

## 海上风电场升压变电站的组成

### 1. 主变压器

主变压器是海上风电场升压站的核心设备，将风机输出的中低压电能转换成高压电，以实现长距离输电，如图1所示。在选择主变压器时，要充分考虑海洋环境的特殊性，如耐腐蚀性、耐盐雾、耐潮湿等。另外，为了提高系统的发电效率，主变压器还必须具有较高的效率和较低的损耗<sup>[2]</sup>。海上风电场主变压器多为油浸变压器，油箱设计要求密封良好，防止海水、水分进入。为保证变压器稳定运行，必须配置强制油循环风冷式、水冷式等冷却系统，确保变压器在高负荷工况下能正常工作。

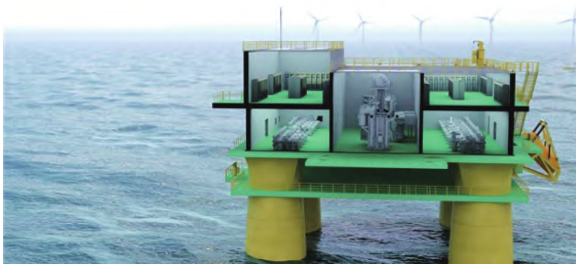


图1 海上风电场升压站

### 2. 高压开关设备

高压开关设备是连接主变压器与电网之间的重要装置，起着开、合的作用，以此来保障电网的安全运行，如图2所示。高压开关装置主要有断路器、隔离开关、负载开关和接地开关等。海上风电场升压站对高压开关设备的要求很高，要求其可靠性高，耐腐蚀，抗风浪。断路器作为高压开关装置



图2 高压开关设备

的核心部件，在电网出现故障时，能够快速切断故障电流，保护设备及线路安全。海上风电场断路器要求开断能力强，响应速度快，能适应海上恶劣环境。隔离开关的作用是在检修和维修过程中，把电气设备从电网中隔离出来，保护人身安全。负荷开关是用来切断合闸负载电流的。接地开关的作用是在检修过程中使设备接地，防止感应电压对人身造成伤害。

### 3. 配电装置

在海上风电场升压站中，配电设备负责向各风机或其他负荷分配高压电能，并对其进行计量、监控。配电设备由高压汇流排、断路器、隔离开关和变压器等组成。高压汇流排是连接各装置的重要通路，因此在设计时必须兼顾过电流能力及耐腐蚀性，为提高系统可靠性，可采用双母线或多母线结构，以实现灵活的供电调度与故障隔离。电流互感器与电压互感器是配电设备中的重要组成部分，它们的主要功能是对电流、电压进行测量与监测。利用互感器，可对电网运行状态进行实时监控，为调度、保护等提供可靠的数据支撑。

### 4. 保护和控制系统

为了保证海上风电场升压站的安全运行，保护系统由继电保护装置、自动控制装置、报警系统等组成。继电保护装置是继电保护系统的核心装置，它的主要功能是在电网出现故障时，快速切断故障电流，避免故障扩大<sup>[3]</sup>。为确保电网安全运行，对继电保护设备的要求越来越高。自动控制装置是用来实现电力系统自动控制与调度的。报警系统是指当设备出现异常或故障时，及时发出警报，提醒工作人员及时处理。在海上风电场升压变电站中，对电力系统的实时监测也是非常关键的，该系统可实现对设备运行状态的远程监控，提高运行效率，提高安全生产效率。电力调度系统是指对电力系统实施统一调度与管理，以保证电力资源的合理配置与有效使用。

## 海上风电场升压变电站电气布置的策略

### 1. 合理规划升压变电站的位置

在海上风电场建设中，对升压站选址进行合理规划，不仅可以使线路损耗降到最低，而且可以保证供电安全可靠<sup>[4]</sup>。以三峡能源公司在阳江的青洲

6期海上风电场为例，三峡能源公司阳江青洲6期海上风电项目位于阳江市阳西县沙扒镇，距青洲六中心点离岸52 km，北阳江沙扒海上风电场场址最近距离35 km，青洲六海域水深范围在36~46 m之间。该项目规划装机容量为1 000 MW，规划占地173 km<sup>2</sup>。

对于如此大规模的海上风电场，升压站的选择要充分考虑到变电站在风机群中的分布。青洲六风电场占地面积大，风机群分布较为分散，为降低电能传输过程中可能造成的损失，合理选址应尽可能接近风机群中心点。而且海底地质条件对场址选择也有一定的影响，青洲六海区水深从36~46 m不等，给变电站地基施工带来了一定的挑战。为了保证变电站基础的稳定性和长期可靠度，应选择地质条件相对稳定，施工难度小的地区。

另外还需要考虑海洋气象条件和潮汐的影响，青洲6期海拥有丰富的风能资源，但同时也会受到台风暴雨等极端天气的影响。升压变电站选址应尽量避免受极端气候影响的地区，保证其在恶劣天气条件下的安全运行。

就电力传输而言，变电站和地面电网的连接是一个重要环节。青洲6期远离大陆，和大陆电网相连的线路也比较长，为了降低电缆敷设成本及维护难度，在提高输电效率的前提下，应尽可能选择能缩短电缆长度的地点。

除此之外在规划设计阶段，环境保护与生态效应不能忽略，海上升压变电站的建设与运行不应影响海洋生态环境。所以在进行项目选址的过程中，需要避开海洋生态敏感区域，注重保护海洋生物栖息地，以此来确保项目的可持续发展。结合三峡能源公司阳江青洲6期海上风电场工程实例，可以发现合理规划升压站选址需综合考虑风机群布局、海床地质条件、气象潮汐效应、输电路径及环境影响等多种因素，提出合理的选址方案。通过综合考虑各种因素，能有效保证海上风电场的高效率、安全和可持续运行。

## 2. 选择适当的电压等级

在海上风电场的设计与施工中，电气布置与电压等级的选取关系到风电场的正常运行，对整个电网的稳定可靠运行具有重要的意义<sup>[5]</sup>。以三峡阳江青洲6期海上风电工程为例，该项目的总装机容量

为1 000 MW，并配以330 kV海上升压站一座，风电场采用66 kV的集电线路，经18回海缆收集线与330 kV海上升压站的66 kV侧母线相连。这种电压等级的选择与布局，充分体现了高效率、高稳定传输的思想。一般情况下海上风电场的发电机组会产生低电压的电力，所以风电场采用66 kV的集电线有利于降低输电损耗。而且这些集电线由18回海底电缆汇集风机送出的电能，汇集到330 kV海上升压站的66kV侧母线，这种设计有效减少了受流线路的长度，降低了损耗，提高了输电效率。

在升压站设计中，合理选择电压等级是保证电力系统稳定运行的重要环节。三峡阳江青洲6期工程采用330 kV电压等级，既能满足大型风电场建设的需要，又能兼顾电网容量与接入条件。330 kV海上交流升压站可对风电场输出的电能进行有效升压，以降低长距离输电网的损耗。这一方案既能满足大容量输电的要求，又能保证风电场与电网的无缝连接。

同时为进一步保证电力传输的可靠性，三峡阳江青洲6期项目还采用3回330 kV海底电缆进行升压供电。这种多回线设计，不仅可以增加系统冗余，还可以减小单条线路故障对电网整体的冲击，有利于提高输电系统的稳定性与安全性。通过对三峡阳江青洲6期海上风电场电气布置及电压等级选取的实际经验进行总结，发现选择合适的电压等级，既能有效提高输电效率，降低损耗，又能保证电网稳定可靠运行，见表1。

表1 三峡阳江青洲6期海上风电工程电压等级情况

| 项目名称           | 电压等级           | 设计特点                                           |
|----------------|----------------|------------------------------------------------|
| 三峡阳江青洲6期海上风电工程 | 总装机容量：1 000 MW | 配有330 kV海上升压站，采用66 kV集电线路，经18回海缆收集线连接到66 kV侧母线 |
| 风电场集电线路        | 66 kV          | 有利于降低输电损耗                                      |
| 海上升压站          | 330 kV         | 满足大容量输电需求，采用3回330 kV海底电缆进行升压供电，增加系统冗余，提高稳定性    |

## 3. 配置高效的设备和技术

在全球能源转型背景下，海上风力发电因其巨大的发电潜力及环境友好性，已成为未来能源结构中不可缺少的一部分。作为海上风电场重要组成部分的升压变电站，其电气布置与设备配置直接关系到整个系统的可靠性与效率。

以阳江青洲6期风电场三峡能源公司330 kV海上升压站为例,三峡能源公司阳江青洲6期海上风电场330 kV海上升压站建设工程主要内容为3台330 kV/340 MV·A主变压器,工程规模较大。这些主变压器不仅承担着将风力发电送往330 kV线路的任务,而且对其性能、可靠性都有较高的要求。330 kV/340 MV·A主变压器采用了先进的散热技术,采用了高效的铁心材料,保证了主变压器在重载工况下的低损耗、高稳定性。同时主变压器配有智能监控系统,对主变压器运行状态进行实时监测,防止出现故障。

对于高电压并联电抗器而言,风电场配有3台高压并联电抗器,该电抗器主要用于风电场无功补偿、电压稳定和无功损失的控制。这一过程中采用先进的真空浇注技术及高性能磁性材料,高压并联电抗器具有优良的温升及热稳定性,可保证其在极端环境中的稳定运行。而且还在风电场内设置3套363 kV GIS设备,30套72.5 kV GIS设备。气体绝缘开关(GIS)具有结构紧凑、可靠性高等优点,已成为海上风电升压站首选。基于SF<sub>6</sub>绝缘技术的363 kV GIS装置,其绝缘性能优良、灭弧能力强,可有效提高系统运行的稳定性与安全性。而72.5 kV GIS设备间隔数目多达30组,灵活配置可满足多种电气连接要求,增强了系统的灵活性与扩展性。

在接地方面,风电场配设3套66 kV/6 000 kV·A油浸接地变压器和接地电阻成套设备。这些接地变压器及电阻装置主要是为了在系统发生单相接地故障时,提供合理的接地电流通路,从而保护设备及人员的安全。而且它的油浸式设计,不但能改善散热及绝缘水平,而且还能延长使用寿命,降低维修费用。

为保证在极端工况下的可靠运行,风电场另设2套66 kV/1 250 kV·A油浸式变电站用变压器,2台柴油发电机组。站用变压器主要是为变电站自身用电设备提供稳定供电,而柴油发电机组作为备用电源,在外部电网断网的情况下,也能保证变电站的正常运转。该装置采用先进的控制系统及高效的能量转化技术,可在复杂环境中正常工作。由此可见三峡阳江青洲6期海上风电场330 kV海上升压站采用高效率的主变压器、高压并联电抗器、GIS设备、接地变压器、阻抗装置和备用电源,构成一套高效、稳

定的电力系统,不仅可以提高风电机组的发电效率与可靠性,而且对今后海上风电场的电气布置也具有一定的借鉴意义。

#### 4. 考虑防护措施

海上风电场升压站电气布置需充分考虑复杂多变的海洋环境,采取相应的保护措施,确保其长期稳定运行。为适应海洋高盐、高湿、高风速等恶劣环境,采取防腐、防潮、防风和防火等综合防护措施是非常重要的。

对于海上风电场升压站来说,防腐蚀是首要的工作。金属设备在高盐环境下容易发生腐蚀,因此对电气设备的表面进行防腐处理是必要的,可采用喷涂防腐涂料或使用防腐蚀材料等方法进行防腐<sup>[6]</sup>。如变压器外壳可由不锈钢或高强铝合金制成,表面喷有较厚的防腐蚀涂层,同时为了延长设备使用寿命,所有裸露的金属部位均需进行防腐处理。而且由于海洋环境湿度高,容易使电气设备受潮,从而降低其绝缘性能。为防止这种情况发生,应对电缆接头进行防水设计,采用防水胶带及防水接头,以保证接头的密封性。另外变电站内还应设有除湿装置,以保持室内空气的干燥,避免潮气进入设备内。变电站的外壳也要防水,门窗要有良好的密封性,不能被海水、雨水侵入。

为了保证海上升压站的安全运行,消防措施是十分重要的。在海上环境下,一旦发生火灾,救援困难,损失惨重。在消防系统中,可以使用先进的自动灭火设备,如气体灭火系统、自动喷水灭火系统等。这些设备能在发生火灾时快速启动,并能自动灭火,将火灾对设备造成的损失降到最低。

另外,在变电站内还应设置消防报警系统,对火灾隐患进行实时监控,以保证火灾发生时能及时报警、及时处置。以三峡阳江青洲6期海上风电场工程为例,为了实现升压站的实时监控与远程操作,该项目采用了计算机监测与在线监测系统相结合的方法。计算机监测系统能对变电站运行状态进行实时监控,及时发现故障并及时处理,保证了变电站的安全稳定运行。在线状态监控系统可以实时监控变压器的温度、湿度、油位等关键设备的运行状态,并对设备的运行状态进行实时监控,防止出现故障。这些措施的实施,保证了海上风电场升压站的安全稳定运行,保证了风电场的供电可靠性。

如图3所示。

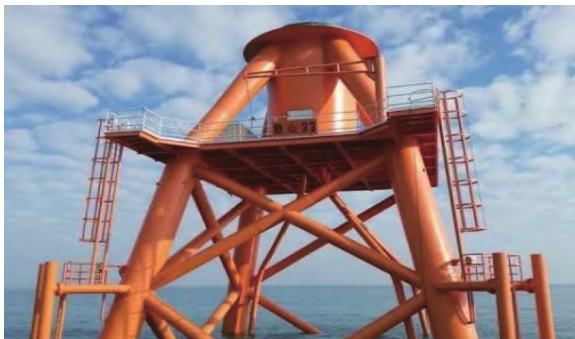


图3 海上变电站

## 结束语

在海上风电场升压变电站的建设中，合理的电气布置不仅可以提高风电场的运行效率，而且可以保证电网的安全稳定运行。合理的电气设备配置，合理的线路规划和有效的监测系统，可以使电力损耗降到最低，提高应急响应能力。另外由于海洋环境的特殊性，变电站设备的选择及防护措施在防腐蚀、防潮、抗风浪等方面都有很高的要求。随着科技进步与新能源产业的蓬勃发展，海上风电场升压

站的电气布置将向智能化、高效率方向发展。相信通过不断地优化电气布置，可以为我国海上风电产业的可持续发展提供技术支持，并对世界清洁能源的推广和应用做出积极贡献。EA

(收稿日期：2024-07-09)

## 参考文献

- [1] 周焱. 海上升压变电站电缆层的钢结构防火研究[J]. 四川水泥, 2022(3): 42-43, 47.
- [2] 林春霖, 林延填. 长乐外海海上风电场A区海上升压站设计[J]. 福建水力发电, 2021(2): 61-64, 86.
- [3] 戴琦伟, 於刚节, 殷贵, 等. 海上交流升压变电站轻量化研究[J]. 电工技术, 2021(23): 1-3.
- [4] 孙瑞娟, 梁军, 王克文, 等. 海上风电集电系统研究综述[J]. 电力建设, 2021, 42(6): 105-115.
- [5] 吴喜. 海上风电场火灾风险防控技术措施研究[J]. 科技创新与应用, 2020(3): 112-114.
- [6] 施泰. 风电场海上升压变电站电气主接线探讨[J]. 水利科技, 2019(4): 31-33.

