



中关村智能电力产业技术联盟  
ELECTRIC POWER TECHNOLOGY COLLABORATION

# “海上风电柔性直流输电技术” 主题调研报告

刘 栋

中国电力科学研究院 直流技术研究所总工



## 01. 调研背景

---

## 02. 海风柔直技术与装备发展现状

---

## 03. 海风柔直技术与装备未来发展趋势

---

## 04. 实地调研案例分享

---

## 05. 总结与展望





EPTC

中关村智能电力产业技术联盟  
ELECTRIC POWER TECHNOLOGY COLLABORATION

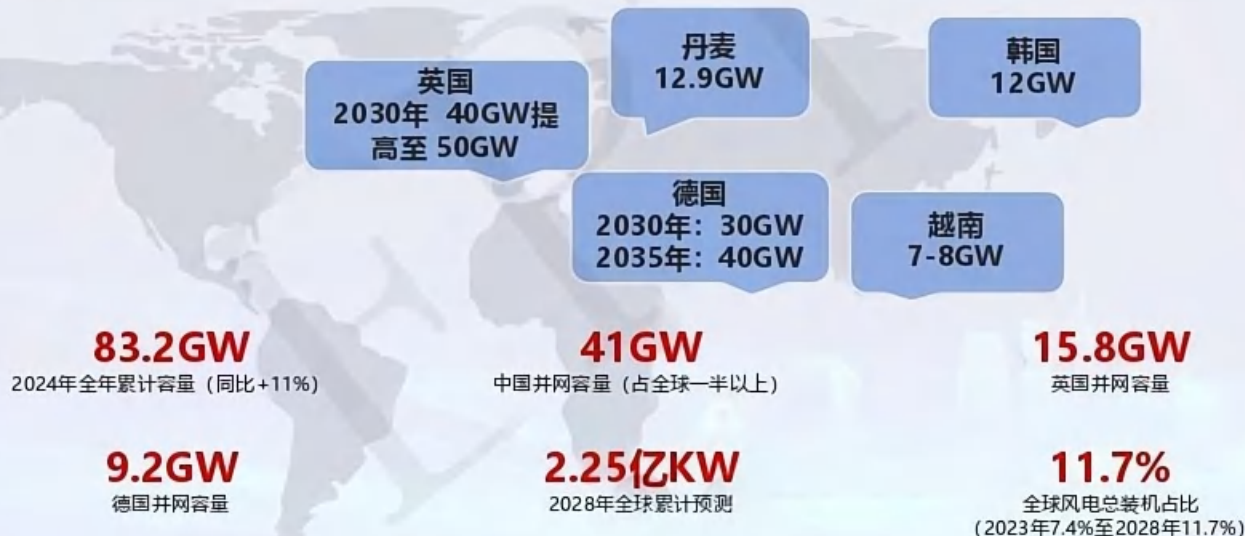


# Part. 01

## 调研背景



在全球能源转型与应对气候变化的大背景下，世界主要沿海国家均将**海上风电等海洋能源开发**作为本国提高**能源自给率**和**保障能源安全**的重要发展方向。





□ 从海上风电发展看，世界主要国家海上风电主要经历三个阶段：

01

## 示范开发阶段（2000年前）

海上风电均位于欧洲，建设规模及单台风电机组装机容量小，丹麦、荷兰、英国等建设了9个海上风电项目，其中5个低于10MW，1991年世界上第一个真正意义上的海风-丹麦Vineby海上风电场正式投运；

02

## 商业化开发阶段（2001-2022年）

全球海上风电基本集中在欧洲，英国、丹麦、比利时、德国等国家海上风电占比较高，单个项目装机可达到400MW，累积装机超过5000MW，单台风机容量平均达到4MW。

03

## 规模化及深远海开发阶段（2022年至今）

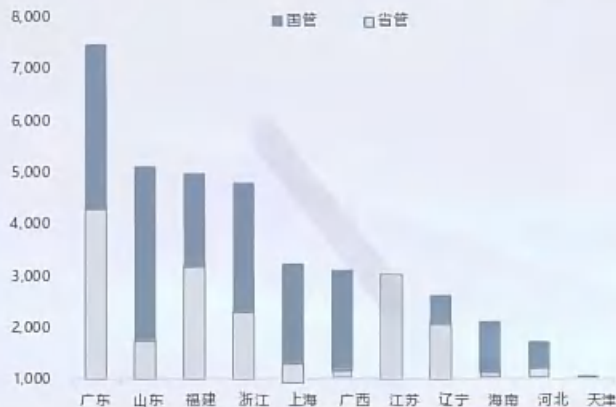
欧洲开始深远海规模化开发，全球首个漂浮式风电场在2022年于挪威实现供电。

# 中国海上风电发展的机遇 - 海上风电规划总量已达 315GW

- **规划现状**: 截止2024年底, 国家能源局已批复的海上风电规划规模超315GW, 省管占比约42%, 广东、福建、山东、浙江四省已批复海上风电规模超过总量的65%
- **指标下发**: 海上风电已下发指标超119GW, 其中省管85GW, 国管34GW, 仍有约190GW的指标未下发, 国管占比超过80%。整体待配置指标占批复总量的60%, 广东、山东、浙江、福建均有较广阔的增量空间。预计2024-2025年福建、江苏、广西将以竞争性配置或直配的方式释放约18GW海上风电资源。

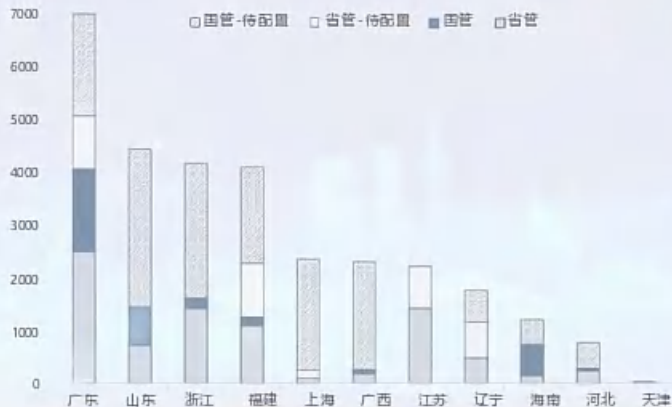
海上风电规划现状 (万千瓦)

<b>已批复</b>	<b>31538</b> 万kW	省管 12788	<b>已配置</b>	<b>11940</b> 万kW	省管 8550
		国管 18750			国管 3400



海上风电指标下发 (万千瓦)

<b>待配置</b>	<b>19044</b> 万kW	省管 3734	<b>待招标</b>	<b>4545</b> 万kW	省管 1755
		国管 15310			国管 2790





- **离岸距离**: 从当前已并网和在建项目离岸距离统计发现, 海上风电场址的离岸距离呈明显增大趋势, 在建项目离岸距离大部分 **已超过50km**, 未来新建项目的离岸距离将**达到100km及以上**。
- **平均水深**: 从近14年的项目数据统计发现, 海上风电场平均水深已突破26m, 局部区域已突破50m。未来预计新建风电场水深将**突破60m**。
- **机组重量**: 以16MW级机组为例, 水深每增加10米, 基础 (导管架+导管架桩) 增重约400t, 塔架增重约100t。

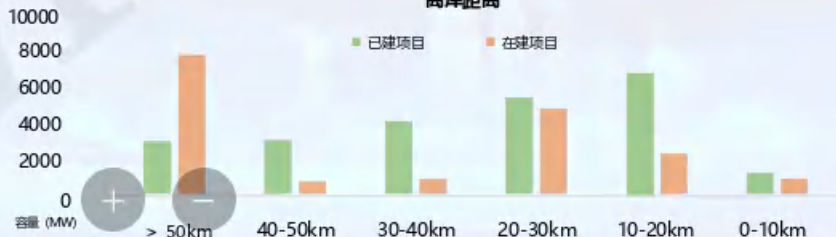
不同区域地质多样性



平均水深(m)

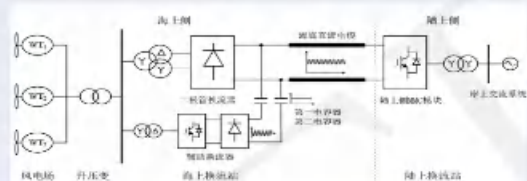


离岸距离



## 柔性直流输电尤其适合海上风电送出场景

- 柔性直流输电技术是指基于绝缘栅双极性晶体管(IGBT)等全控型器件的直流输电技术，柔性直流输电尤其适合海上风电送出场景。在海上风电送出工程中得到了大量应用。



一种海上风电直流送出的拓扑电路及控制方法

- 柔性直流技术能够实现陆上和海上之间的故障隔离，无需无功补偿，通过有功无功解耦控制为岸上电网提供支撑，并具备组网可扩展性。



## 柔性直流输电应用于海风场景也存在一些缺点

- 尽管柔性直流输电尤其适合海上风电送出场景，海上风电行业仍需持续研究并解决上述种种挑战。

01  
一次投资  
建设成本高  
04  
运维及控保  
较为困难



02  
安装施工难度  
较大  
03  
设备运行工况  
更为恶劣



## 全球海上风电柔性直流工程建设日渐增多

- 全球已有10条海上风电柔直并网工程建成投运，其中欧洲9条（德国），亚洲1条（中国）。
- 在建或规划的工程有十余条，主要分布在欧洲（德国、英国、荷兰）、亚洲（中国）和北美洲（美国）。



欧洲柔直工程规划示意图



典型海上柔直换流平台 (BorWin3)

- 2022年2月，由中国电科院、普瑞工程、美国McDermott公司组成的联合体成功中标BorWin6海上风电柔直并网工程换流站EPC，标志着**我国高端输电技术首次进入欧美国家**；  
BorWin6工程是当前德国在建容量最大、输送距离最远的海上风电柔直并网工程。

## 国内海风柔直仅如东一个示范工程投运

- 截至2025年9月，我国仅有江苏如东1个海上风电柔性直流输电示范工程投运，海上换流站离岸直线距离约70km，直流电压等级+400kV，输送容量为110万kW，采用对称单极接线。
- 目前在建的海上风电柔性直流输电工程有青洲工程和三山岛工程



如东工程地理位置示意



如东工程海上平台

基本信息	参数
额定功率	1100MW
额定电压	±520kV
传输容量	190km (直流) 43km (输电)
投运时间	2027年
业主	Jennei



BorWin6工程地理位置示意



## Part. 02

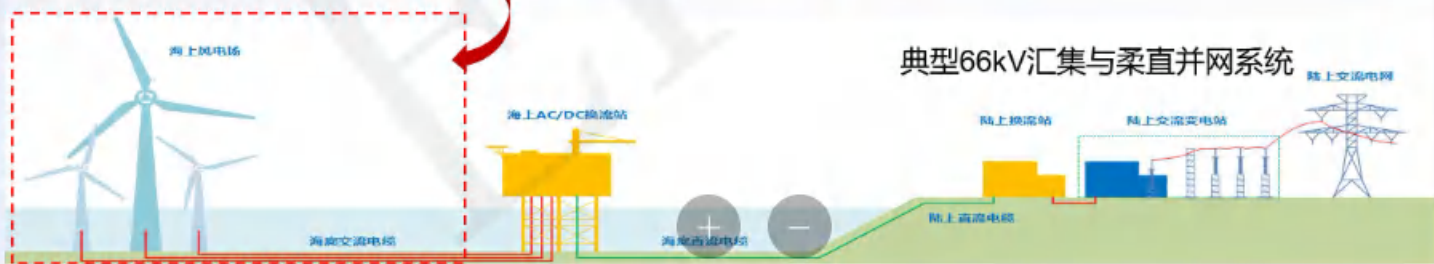
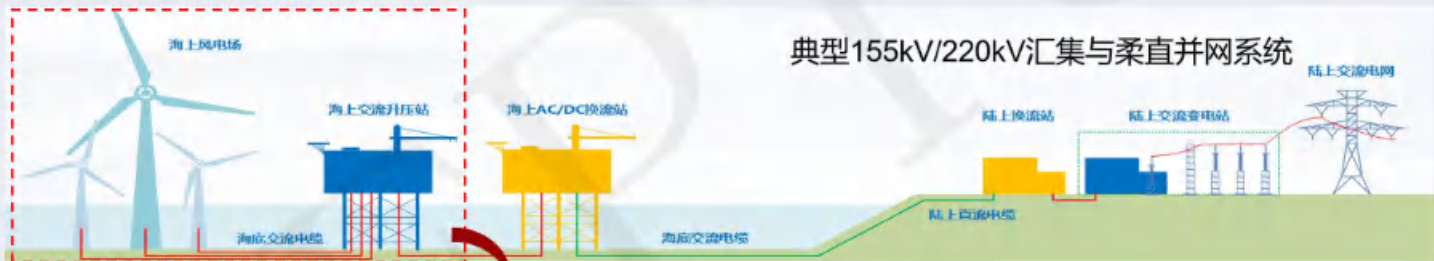
# 海风柔直技术与装备 发展现状





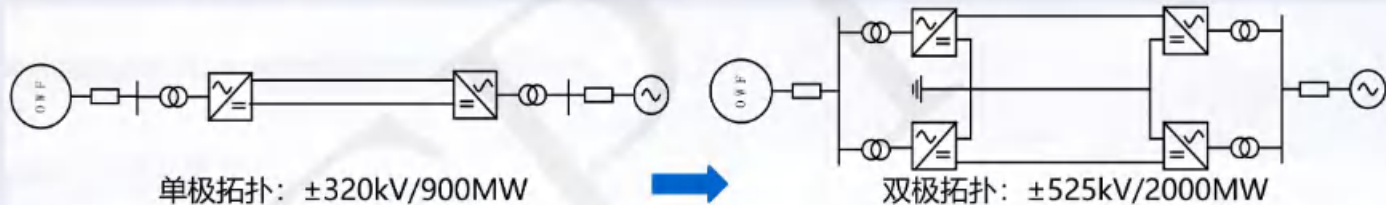
□ 现投运工程海上风电通常采用**33kV交流汇集**，经升压平台升压后接入海上柔直换流站（平台）；

随着风电场规模与单机容量的扩大，**66kV汇集方式成为新的趋势**，可省去交流升压平台，降低汇集损耗与工程建设成本，DoIWin5工程之后的欧洲新建海上风电柔直并网工程均采用该技术。



□ 已投运及在建的柔直工程均采用**对称单极接线方式**，其系统结构、控制方式简单；

未来随着海上风电柔直并网系统从 $\pm 320\text{kV}/1000\text{MW}$ 等级提升至 $\pm 525\text{kV}/2000\text{MW}$ ，对称单极拓扑将升级为**双极拓扑**，其扩展性强，可实现独立运行，可靠性进一步提升。



序号	项目名称	计划投运时间	容量	直流电压	国家
1	Ijmuiden Ver alpha	2030	2000MW	$\pm 525\text{kV}$	荷兰
2	Ijmuiden Ver beta	2030	2000MW	$\pm 525\text{kV}$	荷兰
3	BalWin1	2029	2000MW	$\pm 525\text{kV}$	德国
4	BalWin2	2030	2000MW	$\pm 525\text{kV}$	德国
5	BalWin3	2030	2000MW	$\pm 525\text{kV}$	德国
6	Norfolk Vanguard	规划中	1800MW	$\pm 525\text{kV}$	英国
7	Norfolk Boreas	规划中	1800MW	$\pm 525\text{kV}$	英国

## (1) 柔直与交流系统的同步控制技术

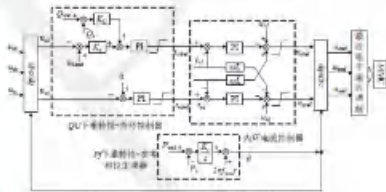
同步控制方法可归纳为五类，其核心对比如下。

控制方法	核心测量值	抗扰能力 (电压/频率)	适用范围	工程价值
锁相环 (PLL) (SRF/DDSRF)	并网点瞬时电压	电压: 不对称跌落仍稳定 频率: $RoCoF=2\pi \text{ Hz/s}$	混合电网 (多电源类型)	通用最优
功率同步环 (PSL)	并网点有功功率	电压: 强 (依赖短路比) 频率: 弱 ( $RoCoF=2\pi/400 \text{ Hz/s}$ )	混合电网 + 直流侧恒压 (需储能)	有限适用
直流电压同步环 (VSL)	变流器直流侧电压	电压: 仅抗 < 20ms 短路故障: 极差 (20 $\pi \mu\text{Hz/s}$ )	理论通用, 实际受限	基本无
无功功率同步环 (QSL)	无功功率	电压: 优频率: 无影响	二极整流直流侧送出的海上风电场	特定场景优
电流同步环 (CSL)	电流	电压: 优频率: 无影响	100% 变流器电源电网	应用存疑 (无法解锁功率)

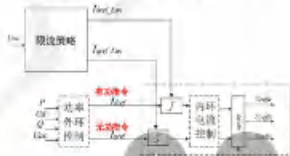
## (2) 送端与受端柔直换流器的控制技术

目前，陆上站控制直流电压，并通过恒定无功功率或交流电压控制实现与电网的无功功率交换；

海上站通过基于交流电压-频率的孤岛控制模式，为风电场提供稳定的并网电压。



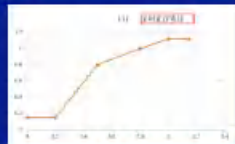
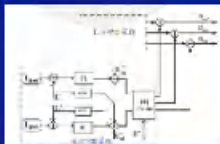
海上换流器的控制策略框图



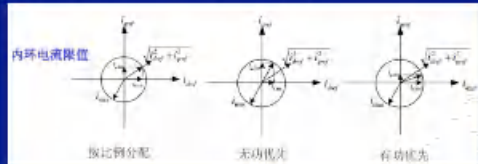
陆上换流器的控制策略框图

## (3) 海风柔直系统故障穿越控制技术

- 正负序独立控制 (故障穿越核心手段)
- 交流低压限流策略 (设备防护关键)



- 换流器电流限幅策略 (稳态 + 暂态通用)



- 海风系统特殊故障应对

## 1 直流双极短路:

- 采用混合子模块 MMC, 闭锁全桥子模块阻断故障电流
- 协同控制: 陆上站调直流电压 (信号), 海上站降风场交流电压 (功率平衡)
- 海上交流侧故障 (汇集线路短路):
  - 整流侧 MMC: 降低交流电压 d 轴分量参考值 + 电流限幅
  - 故障恢复: 快速矫正相位, 将 q 轴电压恢复至 0 (加速并网恢复)



- 现有海上风电柔性直流工程投运时间较短，缺乏长期的运行数据积累和经验总结，因此目前对于海上风电柔性直流装备仍然采用**传统的定期检测维护手段**。



01

### 核心柔性直流装备运维

涵盖换流阀子模块程序升级（单模块加电/远程批量升级）、功能测试（专用设备单/批量检测）、电极结垢检测（传统人工抽检效率低，许继电气研发X射线成像非拆卸检测）、子模块快速更换（行吊/抽拉装置防翻转方案）。

02

### 海上风机运维技术

包括周期性巡检+定期维护，配套故障诊断专家系统（历史数据+专家经验快速定位故障）、远程故障诊断（实时数据传输至陆地中心修复简单故障）、现场维修（专业人员处理复杂硬件故障如功率器件损坏）。





## □ 国际海风柔直项目换流器应用情况

目前，海上风电柔性直流输电工程主要集中在德国，相关柔性直流换流器应用情况如下表所示。其中除世界上第一个海上风电柔性直流输电工程——BorWin1工程采用两电平柔性直流换流器外，其余各工程柔性直流换流器均采用MMC拓扑。

德国海上柔性直流输电换流器工程应用情况

序号	工程名称	投运年份	直流电压/kV	容量/MW	子模块类型
1	BorWin1	2010	±150	400	——
2	BorWin2	2015	±300	800	半桥
3	DolWin1	2015	±320	800	半桥
4	HelWin1	2015	±250	576	半桥
5	HelWin2	2015	±320	690	半桥
6	SylWin1	2015	±320	864	半桥
7	DolWin2	2016	±320	916	半桥
8	DolWin3	2017	±320	916	半桥
9	DolWin3	2018	±320	900	半桥
10	BorWin3	2019	±320	900	半桥
11	DolWin6	2023	±320	900	半桥
12	DolWin5	2024	±320	900	半桥
13	BorWin5	2025	±320	900	半桥

## □ 国内海风柔直项目换流器应用情况

中国海上风电柔性直流输电技术起步较晚，我国已经投运和规划建设的海上风电柔性直流输电工程所采用的柔性直流换流器情况如下表所示。

中国海上柔性直流输电换流器工程应用情况

序号	工程名称	投运年份	直流电压/kV	容量/MW	子模块类型
1	如东工程	2021	±400	1100	半桥
2	青洲工程	建设中	±500	2000	半桥
3	三山岛工程	建设中	±500	2000	半桥+全桥混合型



## 换流器件方面

应用于海上风电柔直送出工程的IGBT器件整体朝着**更高电压等级、更大通流能力**的趋势发展，由早期的4500V/1.5kA逐步发展至DolWin6的6500V/1.5kA。



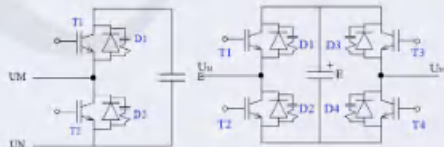
## 换流器拓扑方面

在已投运的海上柔性输电工程中，主要包含**半桥型MMC（模块化多电平换流器）**和**全半桥混合型MMC**这2种拓扑型式。

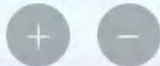
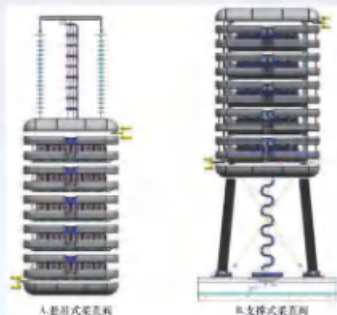


## 换流阀安装型式方面

现阶段柔直换流阀主要有**支撑式**和**悬吊式**两种安装型式，国内外海上和陆上柔直换流站多采用支撑式阀塔结构。

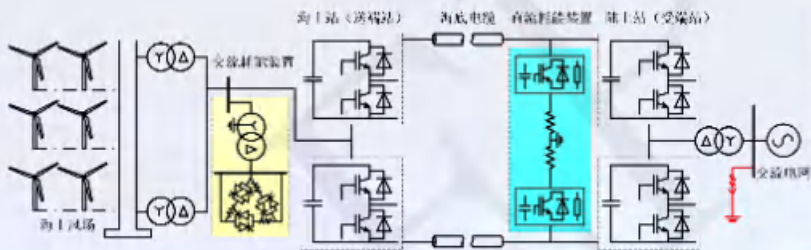


半桥结构（左）与全桥结构（右）



- 引入耗能装置将系统盈余功率以热量形式耗散，其凭借响应速度快和可靠性高等优势成为海风工程中普遍采用的解决方案。
- 根据耗能装置在系统中布设位置的不同，可分为**交流耗能装置**和**直流耗能装置**。直流耗能装置是现阶段海风工程中的主流技术方案，直流耗能装置存在诸多拓扑结构，按照电阻布置方式的不同可分为**集中式**、**分布式**和**混合式**三种技术路线

耗能装置在海风柔直系统中潜在的配置位置



部分工程中直流耗能装置应用情况

序号	工程名称	系统参数	供货商	技术路线
1	BorWin 1	300kV/400MW	ABB	集中式
2	BorWin 2	640kV/800MW	西门子	分布式
3	DorWin 1	640kV/800MW	ABB	集中式
4	DorWin 2	640kV/916MW	ABB	集中式
5	HelWin 1	640kV/576MW	西门子	分布式
6	HelWin 2	640kV/690MW	西门子	分布式
7	江苏如东	800kV/1100MW	许继电气	集中式
8	BorWin6	640kV/1030MW	中国电科院	混合式

□ 随着海上风电场的规模化和大型化发展，我国大型海上风电机组的研制不断取得突破性进展，风电机组单机容量和叶轮直径逐渐增大。

### 1. 机组容量与叶轮直径跃升

- **容量突破**：从15MW (Vestas 2022) 跃升至26MW (东方电气 2024)，2025年国产25MW机型研发中，功率覆盖20-25MW，发电量提升38%。
- **叶轮进化**：直径从236m (Vestas 2022) 扩展至313m (东方电气 2024)，305m风轮研发中，适配深远海高风速海域。

### 3. 关键部件技术进展

- **叶片材料**：碳纤维全面应用，金风GW147叶片通过静力测试，实现高强度轻量化。
- **变流器拓扑**：
  - 两电平：适用于1-8MW机组，模块化并联提升功率，但10MW以上容量受限。
  - 三电平：耐压要求降低，系统效率提升，成为10MW+机组首选拓扑，市场份额持续扩大。
- **环境适应**：IP54防护等级，C3H防腐能力，全水冷+加热除湿系统应对高盐雾潮湿环境。

### 2. 技术路线分化

- **半直驱主导**：金风、远景、明阳等国产机组多采用半直驱，实现20-26MW容量突破。
- **直驱并行**：GE重启18MW直驱机组，Siemens Gamesa完成276-21.5MW直驱样机吊装。
- **双馈技术**：在大型化趋势下应用减少，主要见于早期中小型机组。

### 4. 并网技术挑战

- **弱电网稳定性**：短路比下降引发并网问题，需通过频域阻抗分析、控制参数优化等手段解决。
- **柔直接入风险**：电力电子化电网导致宽频振荡，需电磁暂态建模扫描工况，优化风机/柔直侧阻尼控制。





## 控制保护系统分层结构

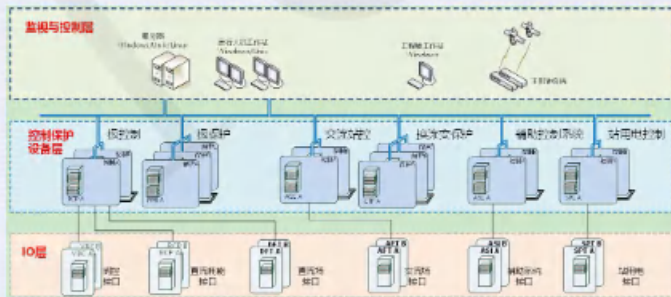
当前海风柔直工程的控制保护系统，其分层结构与陆上柔直工程一致，包括系统监视与控制层、控制保护层与现场IO层。



## 控制保护装置

鉴于海风柔直工程海上站无人运维以及控保屏柜紧凑化的特殊需求，控保主机需具备高可靠性、模块化设计、高性能和小型化等特点，以提升主机功能的集成度，并有效减少屏柜的重量及占地面积。

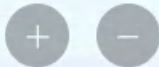
控制保护系统架构





## Part. 03

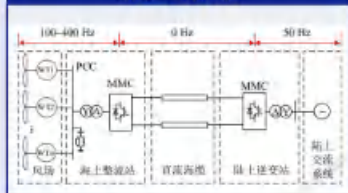
# 海风柔直技术与装备 未来发展趋势



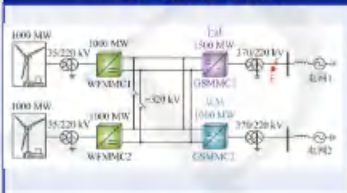


□在未来，海上风电的开发势必朝着深远海和大规模方向发展，且商业化程度不断提高，对海上风电的**可靠性、经济性**等方面要求也随之提高，在**系统设计方案**方面的创新尤为关键。

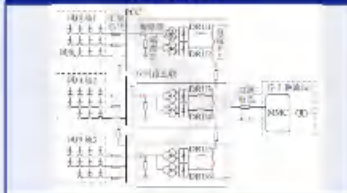
### 1.中频风机海上风电MMC直流送出方案



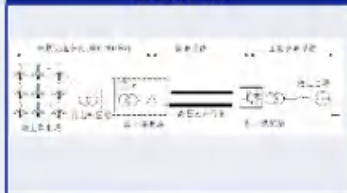
### 2.工频风机海上风电多端MMC直流送出方案



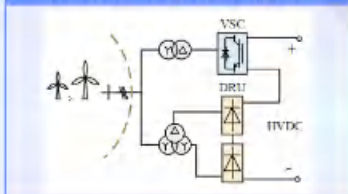
### 3.工频风机海上风电DRU直流送出方案



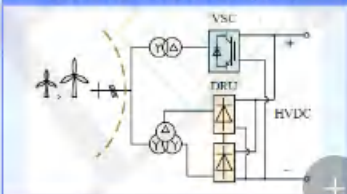
### 4.中频风机海上风电DRU直流送出方案



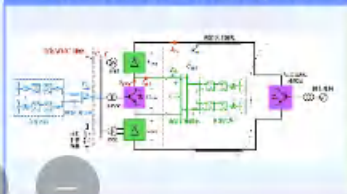
### 5.工频风机海上风电DRU-MMC串联直流送出方案



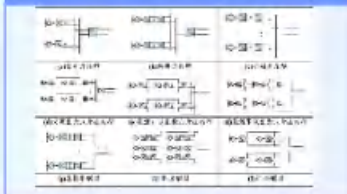
### 6.工频风机海上风电DRU-MMC并联直流送出方案



### 7.中频交流-直流混合汇集DRU-MMC直流送出方案



### 8.海上风电全直流送出方案



- 从技术发展趋势看，同步控制方法的研究重点正在从**单一性能优化**转向**多模式自适应控制**。

## 01

## 面向多端海风柔直系统的控制技术

随着海上风电场的集群化开发，多端直流电网将成为未来海上风电并网的主流架构。在这一发展趋势下，系统控制技术面临着更复杂的运行环境和更高的稳定性要求。因此，未来的研究方向将更加注重**分布式协同控制策略的开发与应用**。

## 02

## 海风柔直系统的构网型控制技术

随着电力系统中同步发电机比例的下降，直流电网的惯量支撑问题日益凸显。**虚拟惯性控制技术**的应用，可以有效提升系统抗扰动能力，改善频率和电压的动态稳定性。

## 03

## 系统宽频振荡抑制技术

随着大规模海风的接入，电力电子化不断提高并且伴随着不同时间尺度的控制作用叠加，系统易发宽频域振荡，未来需要重点考虑**对宽频振荡的抑制**。海上风电场抑制振荡主要通过**在风机级、场站级和系统级部署多层次协调控制策略**来实现。



- 海上风电柔性直流技术与装备的运行维护技术未来将朝着**智能化、高效化、可靠性和可持续性**方向发展，以应对远海风电大规模开发带来的挑战，总体来说表现为**远程运维、无人值守、智能监测**等。



海上风电柔性直流一体化监控系统示意图



柔性直流输电换流阀设备智能监测示意图

全面的海上风电柔性直流送出一体化监控系统，整合了柔性直流控制保护系统、升压站监控、风功率预测等多个子系统，对各主要电气设备提供了完备的监控功能，实现**实时监视与控制、辅助监控及预警、生产运行管理**等三大方面应用。

## 1.核心柔性直流装备的运行维护

- (1) **远程运维技术**，构建起“风机-云端-运维中心”的数据传输链路。
- (2) **无人值守技术**，融合智能感知、自动控制与安防体系。
- (3) **预测性维护**，运用机器学习算法，预测剩余寿命。
- (4) **智能调度**，对运维资源（如无人机巡检、运维船出海）进行智能调度。

## 2.海上风机的运行维护



- 在海上风电送出应用场景下，如何在输送容量提升的同时降低海上平台的尺寸和重量，是国内外研究的热点，这就要求**柔性直流换流器的体积小，质量轻，功率密度高**，从而提高经济性。目前有以下趋势：

- 采用更高电压等级的IGBT器件，可提升单个功率模块的工作电压，减少换流阀功率模块数量，进而减小换流阀占地面积、成本和损耗。柔直换流阀所用IGBT器件电流将进一步提升，从目前最高的4.5kV/5kA提升到4.5kV/6kA及以上；为了降低海上换流平台体积及造价，将提升IGBT的电压等级，由4.5kV提升至6.5V及更高IGCT具备结构简单、电压电流提升容易、导通压降低等优点，与柔性直流输电的主要技术需求吻合，因此成为近年来研究的热点。

01

功率器件的电压等级与  
电流水平提升

- 换流阀直流电容在子模块的体积和重量占比超过50%，低容值设计是轻型化关键
- 通过采用二、三次谐波综合注入的电压纹波抑制策略，可降低电容电压波动率，提高直流电压利用率，降低损耗，增强系统的暂态运行能力。

02

子模块电容容值降低

- 海上风机变流器提供短路电流能力弱，海上站换流阀耐受的最大系统故障电流较低，不超过IGBT的耐受能力，可考虑取消保护晶闸管的使用，降低设备重量和成本；
- 通过换流阀子模块紧凑化结构设计，并对紧凑空间的电磁热力多物理场特性进行综合调控，可实现紧凑化设计

03

紧凑化与轻型化



- 当前我国已成功应用于如东海上风电柔性直流工程的基于半桥子模块MMC拓扑的集中式耗能电阻，仍然存在体积较大、成本较高的问题。因此，**高经济性与高性能的直流耗能装置方案**依然是当前的重点发展方向，此外**探索耗能与柔直阀的融合**也是未来重要发展方向之一。

01

### 更具经济性的新型耗能拓扑结构

在高经济性集中式直流耗能装置方面，例如中清华大学提出的**基于IGCT复合式子模块直串的拓扑方案**，将在**青洲海上风电柔性直流工程**中进行应用。

02

### 耗能与柔直换流器的融合

业界提出了**将分布式耗能电阻集成到柔性直流换流器子模块中的新型方案**，此时该类型换流器又被称为**能量自平衡型或分布式耗能型柔性直流换流器**，融合耗能电阻的柔直换流器将在**我国三山岛海上风电柔性直流输电工程**中获得首次应用。

03

### 风机-柔性直流协同耗能方案

我国探索了通过创新通讯架构，令**海上风机主动快速配合柔性直流输电系统进行盈余功率分散式就地消纳的风机-柔性直流协同耗能方案**。目前，南网科研院研究团队已联合设备厂家开展了快速调用风机耗能装置模拟试验，初步验证了风机协同方案的可行性，接下来预计也将在**三山岛工程**中得到进一步推广。



- 在多种柔直拓扑方案并存的背景下，风电机组作为**电源端的核心单元**，其**变流器的性能、功能定位以及系统配合方式**正经历深刻变革。

### 1) 机组容量提升

随着海上风电规模化推进，为进一步降低成本、提升发电收益，机组大型化不会止步，单机容量会逐步向**25MW以上**发展。

### 3) 机组可靠性升级

通过引入“**多绕组电机+多套变流器**”解耦运行结构，在系统故障时可自动降额冗余运行，提升风场可利用率。通过在**控制系统设计中融入自诊断、自恢复**等功能，增强系统自愈能力。

## 整机发展趋势

### 2) 轻量化、集成化、高电压、电气上置

随着风电机组容量的增加，为了持续降低成本，提高海上施工效率，降低海上机组的重量。海上风电机组趋向于**采用全集成传动链路线**，并通过新材料，新技术应用，持续减低单位兆瓦重量。

### 4) 漂浮式风电机组

根据全球风能理事会（GWEC）的最新数据，预计到2025年，将有**4个**规模为**150至200兆瓦**的海上漂浮式风电项目实现并网。



### □ 电力接入发展趋势——**构网型风机**

1. **技术特点**: 基于电力系统功率传输规律实现与电网的同步, 其电气表达为具有内阻抗和内电势的受控电压源形式; 具备类似同步机摇摆方程的物理特性, 可以自发响应电压和频率扰动。
2. **应用场景**: 沙戈荒大基地场景、深远海场景、源网荷储场景、分散式场景; 可自主建立并维持电压; 增加系统惯量与阻尼, 提供高倍率短路电流。

### □ 电力接入发展趋势——**耗能型风机**

**方案概述**: 柔直直流侧功率盈余时, 柔直快速控制风机, 使其制动系统实现分散式耗能, 以此取代柔直集中式耗能。

**方案特点**:

1. **节约成本**: 利用风机分散式耗能, 可降低柔直系统的建设成本;
2. **协调控制**: 直流侧出现故障时, 柔直换流阀与风机变流器协调控制实现盈余功率动态平衡;
3. **快速响应**: 柔直控保与风机变流器直接通信, 通信延时降低至1ms内

## 01

## 基于自主可控平台的国产直流控保系统

实现柔性直流控制保护系统的自主可控研制，打破国外技术垄断，对于预防电网系统性风险、确保直流输电系统安全稳定运行具有深远意义。

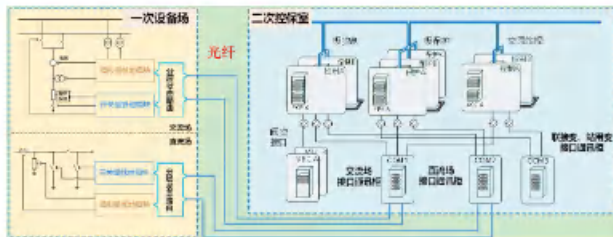


国产柔直控保主机

## 02

## 基于直流控保IO就地化配置的紧凑型控保系统

为实现海上换流站轻型化和紧凑化设计需求，采用直流控制保护IO就地化布置是一种可行的、效率较高的实现



柔直控制保护系统就地化直流控保IO方案





构建含风电场、升压站、海上换流站、陆上换流站的一体化监控系统，精简监控系统的同时大幅提升运维效率。

全系统页面

换流站页面

风电场页面

风机页面



- 信息完整采集
- 设备全面监控
- 操作安全自动
- 系统无缝融合

- 减少人员数量与工作量
- 提升运维效率
- 监控设备数量



## Part. 04

# 实地调研案例分享





## 项目简介：

- 三峡如东海上风电柔性直流输电工程是**国内电压等级最高、容量最大、海上输送距离最长的柔性直流输电项目**，位于三峡如东H6海上风电场与H10海上风电场之间海域的北侧位置，离岸距离约70公里，额定输送容量1100兆瓦，由三峡集团与中广核集团共同投资建设。
- 如东柔直工程是国内首个商业化运行的海上风电柔性直流送出项目，承担**“验证技术路线、建立标准体系、培育产业链”三大使命**，为后续 $\pm 525\text{kV}/2000\text{MW}$ 乃至 $\pm 800\text{kV}/5000\text{MW}$ 级项目奠定技术与产业基础。





## 总体架构:

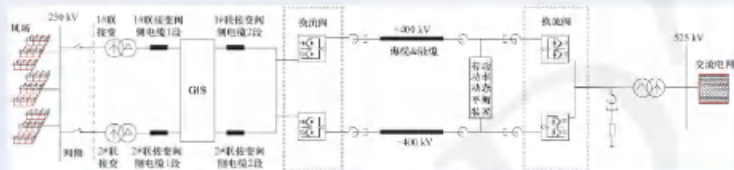
- **电源侧:** 三峡如东H6 (400MW)、H10 (400MW), 中广核如东H8 (300MW), 共1100MW。
- **海上换流站:**  $\pm 400\text{kV}$ 对称单极, 额定1100MW (持续1200MW), 直流电流1375A。
- **直流线路:** 99km $500\text{mm}^2$ XLPE直流海缆+9km陆缆, 双极同轴结构, 最高运行温度 $70^\circ\text{C}$ 。
- **陆上换流站:** 江苏省如东县长沙镇, 500kV交流侧接入江苏主网, 预留二期500kV GIS间隔。
- **控制策略:** 海上V/f控制, 陆上Vdc/Q控制, 黑启动时间 $<30\text{min}$ 。

## 关键技术参数:

项目	参数	制造单位	备注
换流阀	$\pm 400\text{kV}/1100\text{MW}$ , 额定子模数400个, 冗余8%	许继电气	功率密度 $1.7\text{MW}/\text{m}^3$
换流变	$2 \times 850\text{MVA}$ , $525/400\text{kV}$ , 双绕组	特变电工	阻抗18%, 带全工况有载调压
直流海缆	$\pm 400\text{kV}1 \times 2500\text{mm}^2$ XLPE	中天科技	世界首根百米级连续挤包
桥臂电抗	133 mH, 干式空心	西电集团	线性度1%
耗能装置	MMC半桥子模块+集中式电阻	许继电气	响应时间5ms
平台导管架	$47\text{m} \times 47\text{m}$ , 桩腿入土55m	上海振华	抗百年一遇台风, $H_s=9.5\text{m}$



## 相关图示:



系统设计--采用对称单极柔性直流接线方案



备用单相换流变



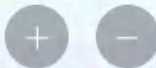
交流场



海上换流站与换流阀



直流耗能装置——耗能阀网塔、电阻塔





## 调研核心发现:

### 01 技术与运维成效

- **设备可靠性:** 换流阀、变压器等主设备运行 4 年无重大故障，子模块故障集中于电源 / 驱动单元（可在线插拔更换），SPC（功率器件）故障率极低，验证国产装备成熟度；
- **运维效率:** 采用“视频巡检 + 红外测温 + 定期抽检”模式，换流阀子模块三年滚动全覆盖抽检（每次抽检约 30%），检修效率较陆上工程提升 20%；
- **低碳特性:** 项目年输送绿电超 30 亿千瓦时（按 4 兆瓦风机年利用小时数 2800 小时测算），替代火电可减少二氧化碳排放约 220 万吨 / 年，契合新型电力系统低碳要求。

### 02 待解问题与行业挑战

- **辅助系统短板:** 海上站淡水制备产量不足，依赖船运补给；海缆放电时间长于换流阀，需优化专项放电策略；
- **标准体系不完善:** 海上柔直工程检修、海性设计等领域缺乏统一行业标准，当前主要参考陆上国标（如 GB/T 37514），需针对性制定海上专用标准；
- **技术协同不足:** 风机与柔直系统的功率协同控制（如故障穿越时风机降功率响应慢）、电磁辐射对电子设备的干扰，需跨企业（风机厂、装备厂、电网）联合攻关。



#### 专委会组织前往金风科技调研：

- 聚焦**能源开发、能源装备、能源服务、能源应用**四大领域，以强大科研创新和最佳业务实践，将可再生能源的效率提升至新高度。
- 国内新增风电装机连续14年排名第一，全球新增装机连续三年居首。截至2025年，**全球累计装机超138GW**，金风海上风电累计装机量**超6GW**。



## □ 相关图示:



风机机组测试



国家地方联合实验室



大兆瓦四自由度变桨偏航轴承试验台



风机机组车间



实验室



□ 调研核心发现:

- **宽频震荡隐患:** 风机与柔直均为电力电子装置, 易出现 250-350Hz 宽频震荡, 需通过联合仿真优化阻尼策略才能规避;
- **故障恢复适配难:** 柔直系统故障恢复时过电压现象较交流送出更显著, 但当前国标暂未明确风机过电压耐受标准, 缺乏统一技术依据;
- **直流风机经济性短板:** 高压直流 ( $\pm 10\text{kV}$ ) 风机需额外建设海上平台, 其变压器体积、重量较 66kV 方案分别增加 40%、28.6%, 绝缘升级与空间布局成本高, 暂不具备规模化应用条件。



# Part. 05

## 总结与展望



未来，海上风电单机容量逐步增大，风场容量超百万千瓦，离岸距离不断增加。为适应海上风电发展，柔性直流输电技术将有以下发展趋势：

- 系统拓扑将从单极向双极大容量发展，从端对端、多端到直流电网演变；
- 从传统控制技术向电网友好性更高的新型控制技术转变；
- 换流阀紧凑化和适海性将提升，换流阀智能化检测及运行状态评估技术将被推广应用；
- 直流耗能装置将探索新型拓扑，并且尝试与换流器进行融合以及与风机协同耗能；
- 换流平台的轻型化和智能化技术会进一步发展，平台无人值守将会被普及。

通过柔直专委会平台，建立海上风电柔性直流输电“产学研用”合作链，推广如东工程“柔直-风机联动”、三山岛项目“分散式耗能”等案例，形成“技术研发-工程试点-标准输出”闭环。



中关村智能电力产业技术联盟  
ELECTRIC POWER TECHNOLOGY COLLABORATION

谢谢聆听!

