第 52 卷 第 3 期：997-1012 高电压技术 Vol.52, No.3: 997-1012
2026 年 3 月 31 日 High Voltage Engineering March 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20251213

大规模深远海风电柔性直流输电技术综述

钟建英[1]，李万杰[1]，王之军[2,3]，王春艳[1]，张　博[1]
（1. 中国电气装备集团科学技术研究院有限公司，上海 200040；2. 沈阳工业大学电气工程学院，沈阳 110870；3. 平高集团有限公司，平顶山 467001）

摘　要：海上风电是未来全球新能源开发的主战场，且朝着大规模、集群化、深远海的趋势发展。柔性直流输电仍将是大规模深远海风电并网的主流输电方式和热点研究方向。为此，首先介绍了国内外海上风电柔直输电已投运、在建及规划重点工程的概况；其次，介绍了海风柔直输电系统直流典型拓扑、风场交流侧汇集、换流站关键电气设备及控制保护技术等，并对其研究现状及工程应用进行分析与总结；最后，指出了大规模深远海风电在柔直紧凑轻型化核心装备及海上平台研发、海陆一体直流输电系统组网及拓扑研究、宽频阻抗实时测量及振荡在线评估技术提升及其他新型输电技术探索等方面的发展方向和面临的挑战。

关键词：深远海；风电；柔性直流；拓扑结构；宽频振荡；海陆一体

Review of VSC-HVDC Transmission Technology for Large Capacity Deep Offshore Wind Power

ZHONG Jianying[1], LI Wanjie[1], WANG Zhijun[2,3], WANG Chunyan[1], ZHANG Bo[1]
(1. China Electric Equipment Group Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200040, China;
2. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;
3. Pinggao Group Co., Ltd., Pingdingshan 467001, China)

Abstract: From the viewpoint of global new energy development, offshore wind power (OWP) is the main battlefield and is developing towards large-capacity, clustered, long-distance. Voltage source converter based high voltage direct current transmission (VSC-HVDC) is still the mainstream transmission method and hot research direction for large-capacity and long-distance wind power integrating. In this paper, firstly, overview of key projects in operation, construction in process, and planning of VSC-HVDC for OWP are introduced. Then, the typical DC topology, AC collection for offshore wind farms, key electrical equipment of converter stations, and the control and protection technology are introduced, and the research status and engineering applications are summarized. Finally, the development directions and challenges are pointed out, including the research and development in compact and lightweight key equipment and offshore platform of VSC-HVDC for large-capacity and long-distance OWP, the research on topology structure and networking technology of VSC-HVDC for OWP under offshore-onshore integration, real-time measurement of broadband impedance, improvement of oscillation online evaluation technology, exploration of other new transmission technologies, etc.

Key words: deep offshore; wind power; VSC-HVDC; topology structure; broadband oscillation; offshore-onshore integration

0　引言

随着化石能源储备的日益减少及其消耗所带来的气候变暖和环境污染问题日益加剧，能源结构由传统能源向新能源发电转型变得极为迫切。风力发电作为最成熟和最具规模开发条件的新能源发电技术之一，开发潜力巨大。海上风电因其风能资源丰富、稳定性强、年利用小时数高、靠近负荷中心等优势，成为当前技术研究及产业开发的热点[1-3]。根据世界海上风电论坛(world forum offshore wind)相关数据，截至 2024 年底，全球海上风电新增装机 11.7 GW，其中中国新增 5.6 GW；截至 2024 年底，全球海上风电累计装机 80.9 GW，其中中国装机约 43.3 GW，欧洲装机 35.7 GW(英国/德国分别占据

基金资助项目：上海市关键技术研发计划“新能源”项目(深远海风电新型直流汇集送出系统关键技术研究)(25DZ3002300)。
Project supported by Key Technology Research and Development Program of Shanghai-New Energy Project (Research on Key Technologies of New DC Collection and Transmission System for Long Distance Offshore Wind Power) (25DZ3002300).

43%/24%)，2024 年中国与欧洲地区的新增和累计海上装机容量均超过全球 90%的市场。欧洲以北海和波罗的海周边国家如德国、英国、荷兰等为主，我国主要集中于东南沿海一带。《“十四五”可再生能源发展规划》中明确提出，将重点打造山东半岛、长三角、闽南、粤东、北部湾五大海上风电基地集群。中国未来将成为全球海上风电开发的主力军[4-5]。

由于近海风电总体开发潜力有限，且易受军事、航道、渔业、生态保护等因素限制，因此随着海上风电产业的快速发展，近海资源已趋于饱和。为获取更多的风能资源，海上风电规划逐渐呈现远海化、规模化、集群化的特点[6]。对于长距离、大容量的远海风电，采用交流输电海缆将产生大量无功功率，从而极大地降低有效负荷的输送能力[7]，并由此产生无功补偿及过电压等关键问题，因此无法满足输电要求。基于电压源换流器的柔性直流输电技术(voltage source converter based high voltage direct current，VSC-HVDC)具有输送距离远、运行调控灵活等优点，并且可为风场提供稳定的同步交流电源，可独立调节有功无功，具有较强的故障穿越能力，成为中远海风电并网的主流技术，在世界很多在建或已投运的海上风电工程中得到了广泛应用[8-9]。

随着海上风电开发规模与容量的进一步提升，长三角、粤东等千万千瓦级深远海风电基地的开发已成为国家能源战略的重点。相比当前已开发的海上风电，未来海上风电基地的离岸距离普遍超过 100 km，装机容量从百万千瓦级跃升至千万千瓦级。输送距离与输送容量的大幅增长给现有柔性直流输电技术带来了更大的挑战，主要体现在 3 个方面：其一，受限于现有高压直流海缆的载流能力，当前单套海上风电场-柔直送出工程的电压与容量等级最高达±500 kV/2 GW，已逐渐触及现有技术路线的瓶颈；其二，目前柔直换流站大多采用模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)，子模块数量多且电容体积大，使得海上换流平台体积、重量接近极限；同时，深远海环境对平台提出了更高的抗腐蚀、抗震及轻量化要求。上述因素使得海上换流站建设成本占到整体工程的近 1/3，成为工程投资的关键制约因素；此外，超大规模风电集群经直流输电并网后，海量波动功率引发受端电网消纳困难，风电无惯量的特点导致电网频率稳定性恶化，加之海风-直流系统的宽频振荡问题频发，系统及受端电网安全稳定运行面临严峻挑战。

因此，在深远海风电面向更大规模、更远距离集中连片开发以及平价上网目标的迫切需求下，探索新型海风-柔直输电拓扑结构，并着力实现海上换流平台的紧凑化、轻型化和经济性设计，已成为支撑未来海上风电可持续发展的关键研究方向与亟待解决的核心工程技术难题。本文对大规模海上风电柔性直流输电技术展开评述，结合国内外海风柔直输电典型工程，对柔性直流输电系统典型拓扑结构、多种并网方案、风场交流侧汇集、换流站关键电气设备及控制保护策略等进行分析和总结。最后对实现海上风电柔直输电紧凑化、轻型化的新型拓扑、新型输电技术发展趋势进行了展望。

1 海上风电柔性直流输电工程

1.1 国外海上风电柔直输电工程

欧洲国家海上风电起步较早，德国、英国及荷兰等国家走在海风柔直工程实践的前列，主要的海上风电柔性直流工程见表 1。目前，北海和波罗的海周边国家的海上风电场正处于大规模开发时期，尤以德国北海区域较为集中，总的风电并网容量约 6.8 GW。北海海域规划有 BorWin、DolWin、HelWin、SylWin 4 个海上风电场集群，目前已投运多个海上风电柔直输电工程。早期的海上风电输电工程如 BorWin 1 等采用两电平或三电平拓扑，存在谐波含量高、开关损耗大、中性点电压平衡问题等缺陷；后期的海风柔直输电工程均基于 MMC 换流器拓扑，直流电压等级以±320 kV 为主[9-11]。

DolWin 1 是世界上第一个电压等级达到 320 kV 的海风柔直输电工程，DolWin 2 是目前国外已投运的输送功率最大(916 MW)的海风柔直工程，而 DolWin 5 则是世界上第一个风场交流侧采用 66 kV 汇集无海上升压站的海风柔直输电工程。英国在建的 Sofia 海上风电柔直送出工程，海缆长度约为 220 km，是当前在建的离岸距离最远的海风柔直工程。Ijmuiden Ver 是目前国外规划的电压等级最高、输送容量最大(±525 kV/2 000 MW)的海风柔直工程之一[12]。

1.2 国内海上风电柔直输电工程

我国海上风电柔直输电工程处于起步阶段，目前已启动多个工程项目，包括：已投运的亚洲首个柔性直流输电示范工程-上海南汇风电场柔性直流输电工程，江苏如东海上风电工程及在建的广东阳江青洲五/七海上风电工程[13-14]。

表 1 国外海上风电柔直工程概览

Table 1 Overview of VSC-HVDC for offshore wind power projects abroad

工程	直流电压/kV	输送容量/MW	海缆及陆缆长度/km	投运时间
BorWin1	±150	400	125，75	2010 年
BorWin2	±300	800	125，75	2015 年
HelWin1	±250	576	85，45	2015 年
HelWin2	±320	690	85，45	2015 年
SylWin1	±320	864	160，45	2015 年
DolWin1	±320	800	75，90	2015 年
DolWin2	±320	916	45，90	2016 年
DolWin3	±320	900	80，80	2018 年
BorWin3	±320	900	130，30	2019 年
DolWin6	±320	900	45，45	2023 年
Sofia	±320	1 400	220，7	在建
BorWin5	±320	900	120，110	在建
DolWin5	±320	900	100，30	在建
BorWin6	±320	980	190，45	在建
Ijmuiden Ver	±525	2000	180	规划

江苏如东海上风电柔性直流输电示范工程是目前世界上电压等级最高、输送容量最大的海上风电送出工程，于 2021 年底建成投运，电压等级为±400 kV，额定容量为 1 100 MW。该工程采用 MMC 换流阀，对称单极接线，由如东 H6 风场 400 MW、H10 风场 400 MW、H8 风场 300 MW 这 3 个海上风电场共同构成风场侧电源。3 个风电场内分别建设一座 220 kV 海上升压站，风场通过 35 kV 海缆接入 220 kV 海上升压站后再接入送端海上换流站。经过 1 回±400 kV 长度为 99 km 的直流电缆送往陆上换流站，最后并入 500 kV 陆上电网。

阳江青洲五/七海上风电柔直送出工程额定容量为 2 000 MW，电压等级为±500 kV，风场中心离岸距离约 70 km。该工程采用 MMC 换流阀，对称单极接线。青洲五、七风电场装机容量均为 1 000 MW，风场通过 36 回 66 kV 海缆汇集接入海上柔直换流站，经 1 回±500 kV 直流电缆送往陆上集控中心，最后接入 500 kV 陆上电网，预计 2026 年底并网。

另外，根据福建省海上风电发展规划(2021—2035 年)等资料，在宁德、福州等外海域规划了中心离岸距离 100~200 km，最大单场区装机规模超过 7 000 MW 的多座大容量海上风电集群。广州汕头规划了海上风电潮阳登陆点集中送出工程，建设规模初期达 6 000 MW，远期可拓展至 8 000 MW，是全国首个海上风电集中送出工程，以每 2 000 MW 为 1 个建设单元，每个建设单元包含 1 座±500 kV 陆上换流站、1 座±500 kV 海上换流站及 1 回±500 kV 直流海缆，也是目前全世界建设规模最大、单体容量最大、国内电压等级最高的深远海柔性直流输电工程[15-17]。

2 海上风电柔性直流输电系统拓扑

海上风电经柔性直流输电系统按拓扑结构可以分为汇集与送出两部分，本章就海上风电柔直输电系统风场交流侧汇集、直流典型拓扑结构及其衍生的大规模海风-直流并网技术路线进行介绍与总结。

2.1 海上风电汇集拓扑

目前已投运的海上风电柔直送出工程风场侧大多通过 35 kV 交流海缆汇集至海上升压站，升至 220 kV 后再接入海上换流站交流侧(图 1(a)所示)，如 DolWin1—DolWin3、如东工程等[12,18]。随着海上风电场规模不断扩大，汇集系统间隔数和海缆总长度显著增加，导致交流汇集海缆总成本和损耗问题日益突出，目前交流汇集海缆成本约占整个输电工程总成本的 13%，且海上升压平台也会带来额外的建设成本。为降低汇集成本，一种可行的方式是取消海上升压平台，风机出口通过风机塔筒变升压至 66 kV，再经过 66 kV 交流海缆直接汇集至海上换流平台(图 1(b)所示)。文献[19]对比了 35 kV 与 66 kV 汇集方案的经济性，计算结果表明取消 35 kV/220 kV 海上升压站后总成本可减小 15%。但同时也带来了气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear，GIS)、变压器等主设备选型、交流侧主接线选择及谐振风险提升等问题。德国 Tennet 公司在建的 Dolwin 5 项目在全球首次采用 66 kV 交流汇集无海上升压站方案。目前国内外在建或规划的海风柔直输电工程如 Dogger Bank、Borwin 6、阳江青洲等也均采用该汇集方案[19]。

随着海上风电逐步走向深远海，海上 18 MW 及以上大型化风机研发成功，汇集距离进一步提升，采用更高电压等级如 110 kV 的汇集方式将更加高效、紧凑，更具发展前景[20]。文献[21]指出，当采用 110 kV 电压等级交流汇集时，交流风机内部需要采用耐压等级更高的换流器和塔筒变压器，导致风机的单位容量成本和机舱体积小幅提升，风机初始投资成本比 66 kV 方案增加 2%。有学者经过研究

测算，采用 110 kV 汇集集电线路数量较 66 kV 减少 30%，交流 GIS 间隔数减少 40%，虽然海缆造价增加 5%，但汇集海缆总投资降低 25%。国外推荐 132 kV 电压等级，国内采用 110 kV 更符合标准电压等级序列及成熟运行经验[22]。该方案目前仍处于理论研究阶段，无实际工程应用。此外，随着风电机组单机容量的提高，汇集距离与范围进一步增大，交流汇集海缆的电容效应凸显，采用直流汇集也是一种可行的方案，如图 1(c)所示。但在当前风电场的开发规模下，采用 66 kV 或 110 kV 交流汇集仍然是主流方案。

2.2 点对点海风-柔直系统拓扑

目前海风-柔直送出工程大多采用点对点送出模式，其典型拓扑有对称单极(伪双极)与对称双极(真双极)两种。对称单极系统如图 2(a)所示，换流站只设置 1 组换流阀，设备少，结构简单，海上平台尺寸、体积相对小，建造成本及吊装难度小，目前国内外已投运的海风柔直工程均采用对称单极拓扑。受限于海缆载流量与绝缘等问题，目前该拓扑最大传输容量为 2 000 MW 左右，且任意极发生故障整个系统都会停运，可靠性较低。考虑到系统运行方式的灵活性、系统整体可用率及更高电压等级更大容量场景适用性，真双极拓扑(见图 2(b))具备一定的应用前景。相比对称单极拓扑，真双极拓扑在单极接地故障时仍然能够保留一半的功率输送能力，可靠性更高。文献[23]对比了对称单极和真双极拓扑下主设备数量、容量配置、制造要求、接地方式、主设备故障对传输容量的影响。文献[24]从能量可利用率角度对比分析了对称单极和真双极两种拓扑在系统故障及停运检修情况下的全生命周期经济性损失，得出真双极系统具有更高的经济性。文献[25]从系统设计方案和建设成本收益等综合评价指标展开论述，重点对两种拓扑结构下的主要电气设备数量、参数差异、海上平台尺寸及重量、工程总体造价及盈利进行比较，得出对称单极仍具有略微优势，但随着直流 GIS 等新型设备的应用，海上平台建设成本有望进一步降低，真双极拓扑会更具经济性。欧洲 TenNet 公司正在规划 2 000 MW 海上风电真双极柔直送出系统的标准化设计方案，文献[26]提出的超大规模海上风电直流送出方案也采用真双极拓扑。

2.3 大规模海风-柔直送出拓扑

对于未来大规模远海风电基地(往往可达千万千瓦级)的送出，单条柔直通道的容量显然无法满足需求，采用点对点送出方案需要建设多条柔直工程，并在沿岸设置多个换流站。这一模式不仅造成海岸线和海陆输电走廊等国土资源的严重浪费，还整体推高了建设成本。欧洲 TenNet 公司计划采用直流集中送出、登陆后再通过直流陆缆送入负荷中心的模式，可以避免海陆输电走廊和岸线换流站大量占用海陆国土资源的问题，但是直流陆缆的建设成本较高。为此，国内南方电网公司针对 6 000 MW 及以

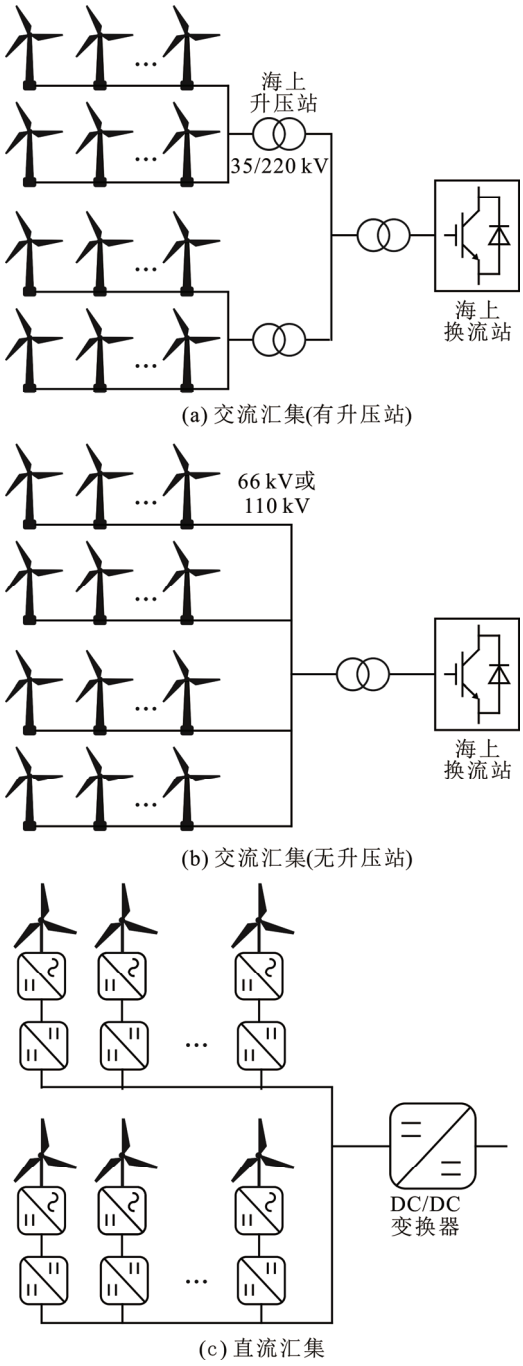


图 1 海上风电汇集拓扑

Fig.1 Collection topologies of offshore wind farm

上容量的海上风电送出需求，计划采用陆上直流汇集，再通过架空线直送负荷中心，接入分区电网进行消纳的方案[27]，如图 3 所示，但由于架空线的故障率较电缆更高，因此这一方案对直流系统故障穿越、故障清除与重合闸等的要求也更高。

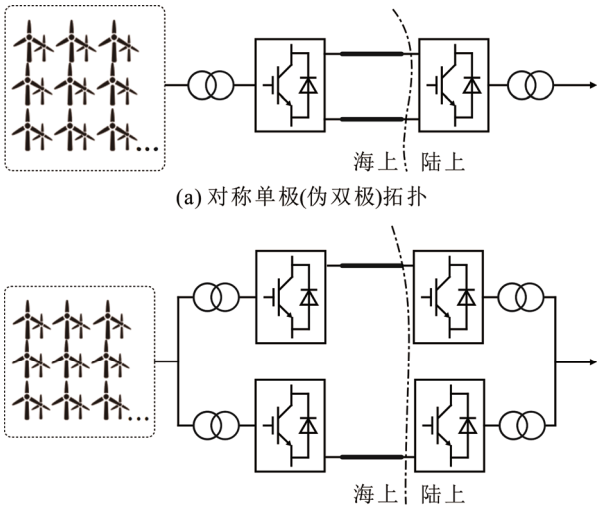
进一步地，还可以通过海上与陆上柔直换流站组成多端直流电网，直流组网能够有效优化功率潮流，并且其运行方式灵活，系统可用率更高，是未来深远海风电组网的趋势。例如荷兰 Ijmuiden Ver 海风柔直工程在开展四端拓扑的方案设计和系统研究，TenNet 已提出多端枢纽的概念，并计划在 2030 年前后实施 3 个工程。国内尚未有海上风电工程应用，但这一技术在陆上如张北四端柔性直流电网工程已有示范，能够提供有效参考。

3 海上换流平台设计

相比常规柔性直流输电工程，海风-柔直工程的最大难点之一在于海上换流平台建设。国内如东、青洲五/七等大型海风柔直工程中，海上换流平台的造价占据整体工程成本的 1/3 左右，显著推高了海上风电的度电成本。考虑到施工难度等因素，海上换流平台成本对设备的体积和质量敏感，对功率密度及紧凑轻型化设计要求高。目前海上换流平台轻型化的思路之一是通过合理的工程设计排布来减小平台体积，但优化幅度有限。另一种思路则是通过优化柔直换流阀的拓扑与参数来减小平台体积，例如减小换流阀子模块电容，或是采用二极管整流器等新型换流拓扑。

3.1 柔直换流阀紧凑化设计

基于模块化多电平结构的柔直换流阀具有模块化设计、易扩展、开关频率低、谐波小等优点，在柔性直流输电系统中得到广泛应用。换流阀由 6 个桥臂组成，每个桥臂包含若干个级联功率模块，由功率模块构成阀段，阀段构成阀塔，阀塔串联构成桥臂。换流阀可基于不同拓扑的功率模块设计实现，如半桥、全桥、混合型、双箝位等[23]。半桥型 MMC 控制简单，器件数量少，经济性好，但不具备故障自清除能力。全桥型 MMC 可在发生直流故障时限制短路电流，具备故障自清除、快速重启、降压运行的能力，但绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistors, IGBT)数量是半桥型的 2 倍，成本较高，运行损耗大。混合型 MMC 由部分半桥型功率模块和部分全桥型功率模块级联而成，通过



(a) 对称单极(伪双极)拓扑

(b) 对称双极(真双极)拓扑

图 2 点对点海风-柔直系统拓扑

Fig.2 Topologies of offshore wind power grid-connected via point-to-point VSC-HVDC link

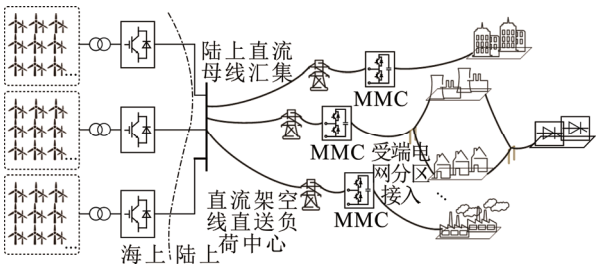


图 3 超大规模海上风电海陆一体输电拓扑

Fig.3 VSC-HVDC transmission system for super-large scale offshore wind power

配置适当参数及控制策略可实现故障自清除，较全桥型更具成本优势[28]。目前在建或已投运的海风柔直工程大都采用海缆线路，直流故障概率较低，换流阀采用半桥型拓扑。后期规划的海陆一体海风柔直工程可不配置直流断路器[29]，采用混合型 MMC 实现直流故障穿越，从而可有效降低系统成本。

换流阀紧凑轻型化设计对海上平台的尺寸质量及整个工程建设成本至关重要，相关厂家及科研机构主要从功率模块参数、阀体结构优化以及控制优化设计等方面开展工作。

1）功率模块参数方面，目前对于±500 kV/2 GW 的海风-柔直工程，一般采用参数为 4.5 kV/3 kA 的 IGBT 器件[25]。随着功率器件的发展，目前已经有参数为 6.5 kV/4 kA 的集成门极换流晶闸管(intergrated gate commutated thyristors，IGCT)以及参数为 6.5 kV/3 kA 的 IGBT 器件。采用 6.5 kV 电压

等级器件，子模块数量可降低 33%以上，预期单桥臂可减少 1 个阀塔，单个换流站减少 6 个阀塔，阀厅占地更小。

2）阀体结构优化方面，文献[30]分别从功率模块布局优化、减少零部件数量、优化阀段光路水路布局等入手，换流阀质量减少了 22.8%，并且开展了适海抗震、海上运输及平台装卸等过程的应力形变仿真验证。许继电气采用如图 4 所示的基于 IGBT 功率单元的串联压接结构设计技术，在同等使用条件下，单位容量子模块体积降低 14.43%，质量降低 29.03%；在此基础上，通过降低换流阀绝缘空气净距，进一步实现紧凑化设计，最终实现了如东工程首家适海性换流阀应用；之后依托国家重点研发计划课题开展海上柔性直流高功率密度换流阀关键技术及装置研制，如图 5 所示，实现了阀塔长度方向优化 18.8%，质量优化 5%的效果。

3）控制优化设计方面，目前的研究主要集中在减小子模块电容容值上，有学者提出通过减小功率模块电容电压波动来减小电容值的附加控制方案，如环流抑制控制、换流注入控制、3 次谐波电压注入等，这些控制方案可有效降低电容值约 30%，但减小电容值对换流阀控制的暂态稳定性影响还有待进一步研究[11]。

3.2 海上风电不控整流送出技术

基于海上换流站长期处于整流运行模式的特点，以二极管整流单元(diode rectifier unit, DRU)取代 MMC 用于海上换流站中，构建低成本、高可靠性的海上风电-二极管整流送出系统成为当前研究的热点[31-32]。DRU 结构简单、可靠性高，能够大幅降低海上换流站的建设与运维成本。但 DRU 不能建立风电场集电系统电压，无法为风电机组提供黑启动功率，因此无法直接用于传统海上风电直流送出系统中。

为弥补上述缺陷，目前国内外研究主要从 2 种技术路线展开探索。第 1 种是加入辅助构网设备来建立集电系统电压，如小容量 MMC，从而实现风机的黑启动与锁相同步运行。按照辅助构网设备与 DRU 的连接方式又可以分为串联混合送出与并联混合送出 2 种[33-37]，如图 6(a)、(b)所示，但辅助设备的使用会使得经济性大打折扣。第 2 种则是采用构网型风电机组来协同建立集电系统电压，如图 6(c)所示，并在部分机组上配置储能系统或柴油发电机以实现黑启动功能[38-42]。但构网电压源型风电机组



图 4 串联压接式阀组件

Fig.4 Valve assemblies of series crimping type

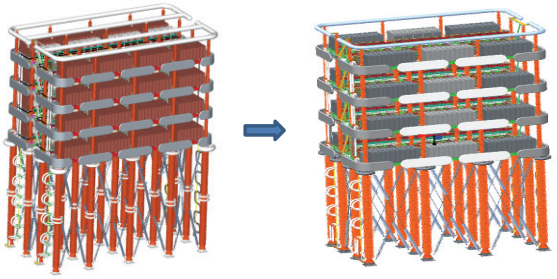


图 5 阀塔结构优化设计

Fig.5 Optimal design for valve tower structure

的控制策略尚未完全成熟，与现有跟网电流源型风电机组相比，其控制结构需要进行较大调整，涉及机组机械载荷、运行稳定性、控制与保护等多个方面。此外，由于风电机组间电气距离较近，构网型控制还面临着多机并联稳定运行以及暂态故障限流等挑战。上述技术难题使得 DRU 在海上风电直流送出系统中的应用受到较大限制，因此目前仍处于小范围验证阶段，尚未有广泛的工程实践。

3.3 海上平台抗极端工况设计

由于海上平台处于盐雾潮湿环境，且经常遭受台风等极端天气冲击，因此对抗震、防腐要求高。文献[43]提出优化基础结构阻尼比(0.02)和采用一阶自然频率(0.28 Hz)，以避免与风浪频率共振，并通过离散元模拟优化基础刚度。文献[44]提出主变压器散热片采用不锈钢或重防腐涂层，GIS 设备壳体采用铝合金并施加 C5-M 级防腐涂层，密封面特殊处理防泄漏。文献[45]通过海缆弯曲限制器及中心夹具使用 316L 不锈钢抵抗盐雾，确保雷击等极端条件下平台的稳定性。

此外，海上平台技术正朝着深水化、智能化、绿色化方向快速发展。在固定式平台领域，导管架平台最大作业水深突破 400 m(如中国“深海一号”

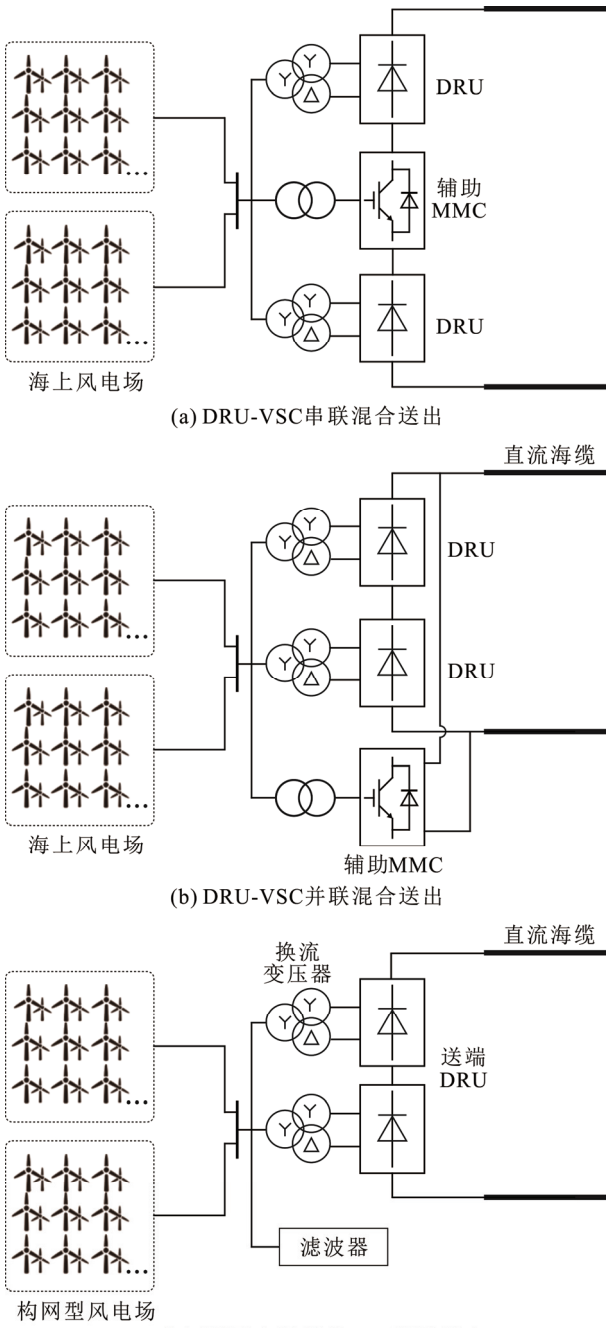


图 6 海上风电不控整流送出技术

Fig.6 DRU-HVDC transmission technology for the grid-integration of offshore wind power

能源站)，通过高强度钢与模块化施工技术实现超深水油气开发；自升式平台则依托数字化桩腿控制技术，在 50 m 以浅海域实现 72 h 快速安装，作业效率提升 40%。在漂浮式平台领域，张力腿平台和半潜式平台主导深水油气开发，新型浮式生产储卸油装置(floating production storage and offloading，FPSO)集成碳捕集系统，单平台储油量突破 200 万桶(如巴西 Búzios 油田 FPSO)。2023 年全球首个浮式液化天然气装置在澳大利亚投产，年处理能力达 330 万 t。技术创新亮点包括：1）智能化运维，应用数字孪生技术构建平台全生命周期模型，结合 5G+AI 实现腐蚀监测精度达 0.1 mm；2）新材料突破，碳纤维复合材料应用于平台上部模块，质量较传统钢结构减少 30%以上；3）绿色转型，海上平台与风电、制氢设施融合设计(如欧洲 HyDeploy 项目)，退役平台改造为人工礁体的生态修复率达 95%。随着超深水开发装备国产化(中国首艘自主设计 3 000 m 深水钻井平台“蓝鲸 2 号”)与碳中和目标的驱动，海上平台技术正从单一资源开采向多能互补、零碳循环的海洋综合开发系统演进。

4 其他关键装备

随着海风-柔直送出并网工程的不断投运，桥臂电抗器、联结变压器、接地设备以及直流耗能装置等关键设备也得到了长足的发展。

4.1 桥臂电抗器

桥臂电抗器是柔直系统中必不可少的重要元件，主要功能包括抑制换流阀三相间环流，限制谐波分量，限制换流阀内外部故障时短路电流峰值及电流上升率，与桥臂电抗器共同提供联接电抗等[46-47]。文献[46]分析了桥臂电抗器在换流阀交直流侧不同位置时的故障限流作用，并综合考虑经济性和轻型化因素，推荐设置在换流阀直流极线和级联功率模块之间。文献[47]指出为减小电抗器杂散参数造成的换流阀电气应力，建议使用干式空心电抗器。同时，通过优化支撑结构、降低涡流损耗与增大散热面积，能够有效降低桥臂电抗器的体积与质量。目前中国电气装备已研制出新一代轻型桥臂电抗器产品，将线圈质量由 20 t 大幅降低至 10 t，助力于海上平台的轻型化设计。

4.2 联结变压器

联结变压器设置在海上交流侧与换流阀之间，通过变换交流阀侧电压与直流电压相匹配，保证换流阀运行在最佳工作区间，同时起到抑制谐波，隔离零序电流的作用。联结变压器的型式、容量、考虑备用的数量随系统拓扑结构、海上陆上位置的不同而有所变化。

当采用对称单极接线时，联结变压器阀侧不承受直流偏置电压，可采用普通变压器，设备制造相对容易，且考虑到直流故障时系统的可用率，海上站可配置 2 组容量约为 70%~80%的额定直流功率

变压器并联，当 1 台变压器故障时，可利用正常变压器的过负荷能力短时输送 90%以上功率。采用真双极接线时需采用换流变压器，海上站每极可设置 2 台容量为 25%额定直流功率的变压器，当发生单极故障时可继续输送一半功率运行。海上站联结变压器采用“1+1”热备用以提高可靠性，另外考虑到海上平台占地、重量、造价等严苛的设计要求，推荐采用三相三绕组 YN，y，d11 接线型式，网侧中性点直接接地，阀侧为阻断零序电流采用Δ绕组。陆上换流站采用 3 台单相双绕组变压器，并设置 1 台作为备用，即“3+1”配置方案。由于海上换流站运行环境的特殊性，对变压器提出环保轻型化、高可靠、易维护等要求，有厂家结合工程要求做了设计更改，如将变压器散热片放置于室外减小占地，采用结构简单损耗更小的自冷系统，选用高燃点的合成酯类作为油冷却介质以提高变压器可靠性等[47]。此外，柔直系统的接地方式不同，也会使得系统故障下变压器的直流电压、暂态过电流耐受能力有所差异，影响变压器的设计[38]。

4.3 直流耗能装置

直流耗能装置(DC energy dissipation device, DC-EDD)是海上风电柔性直流输电系统的核心保护设备[48]，主要用于故障期间快速吸收直流侧过剩能量，抑制过电压并保护换流阀、海底电缆等关键设备。由于海上风电系统运行环境严苛(高盐雾、空间受限、维护困难)，其设计需兼顾快速性、可靠性及紧凑化，技术挑战显著高于陆地直流系统[49]。典型直流耗能装置拓扑方案有以下 3 种，典型工程案例如表 2 所示。

1）模块化多级耗能(modular multi-level energy dissipation，MMED)：将耗能电阻分割为多个子模块，通过 IGBT 分级投切，实现能量柔性分配(如中国张北工程，容量利用率提升 25%)。

2）混合型拓扑(IGBT+晶闸管)：利用 IGBT 快速关断能力处理高频暂态能量，晶闸管承担大电流稳态耗能，降低设备成本(如荷兰 TenneT 方案)。

3）耦合超导限流器(superconducting fault current limiter，SFCL)：在耗能回路中串联超导限流单元，降低故障电流峰值，减少耗能装置容量需求(试验阶段已实现限流效率≥80%)。

4.4 接地装置

接地装置是海上风电柔性直流输电系统的关键安全组件，其核心功能包括：抑制系统过电压、为故障电流提供泄放路径、维持直流侧电压对称性，并降低海底电缆绝缘应力[50-54]。由于海上换流站空间受限、高盐雾腐蚀环境及多端电网复杂故障场景的叠加，其设计与传统陆地直流系统存在显著差异。典型接地方案有以下 3 种，典型工程案例见表 3。

1）单极金属回线接地：通过海上换流站中性点直接接地，结构简单但易引发电缆电解腐蚀。改进方案如电阻-二极管并联接地(如荷兰 Borssele Alpha 项目)，利用二极管阻断反向电流，降低腐蚀风险。

2）双极对称接地：在陆地和海上换流站分别设置接地极，通过阻抗匹配抑制环流。关键技术包括动态阻抗调节器(如 ABB 研发的 adaptive grounding system)，实时优化接地阻抗以平衡电压偏移。

3）混合接地拓扑：结合固态开关(如 IGBT)与限流电阻，实现故障态低阻接地/正常态高阻接地的自适应切换。典型案例为中国如东±400 kV 海上风电工程，接地装置动作时间≤3 ms，故障电流抑制效率达 92%。

5 海上风电柔性直流输电系统控制保护

针对海风柔直系统的稳态控制，目前的研究已

表 2 典型工程案例直流耗能装置技术方案

Table 2 Technical scheme of DC energy consuming device for typical engineering cases

项目	技术方案	核心指标	创新点
中国如东	IGBT 分级投切+液冷散热	容量：1.5 GJ；动作时间：2.8 ms	冗余模块热插拔设计，可用性≥99.9%
德国 BorWin3	SF_6 密封柜+晶闸管耗能	耐盐雾等级：IEC 60068-2-52 C5-M	全封闭无维护设计，寿命周期成本降低 35%
英国 Dogger Bank	多端协同控制+超导限流	限流效率：85%；协同响应误差<100 μs	主从式光纤同步通信架构

表 3 典型工程案例接地方案及关键技术性能

Table 3 Typical engineering case grounding scheme and key technical performance

项目名称	接地方案	关键技术	性能指标
中国如东	混合固态接地	IGBT+限流电阻自适应切换	动作时间 3ms，故障电流抑制 92%
德国 BorWin3	全密封惰性气体接地模块	钛合金外壳+SF_6 气体填充	耐盐雾等级 C5-M，寿命≥30 a
英国 Dogger Bank	双极动态阻抗接地	基于 MPC 的阻抗实时优化算法	环流降低 75%，损耗减少 18%

较为成熟，而在实际工程运行中，通常更加关注系统故障穿越以及宽频振荡抑制等暂态工况。

5.1 故障穿越策略

目前，海上风电柔直送出电能并入陆上交流主网后通常采用架空线传输，接地故障多为常见的瞬时性故障。近年来，随着海上风电装机规模逐年增大，直流输电电压等级不断提升，系统应对交流故障的能力面临严峻挑战。主要有以下几种故障穿越方案。

方案一：通过送端换流器及风电场的协调控制[55]。在电网发生故障后，通过主动通信、降低风场交流电压、提高风场交流频率等策略来对风场降载，以匹配受端换流器的送出功率极限。优点为无须增加成本，但由于通信、检测、控制及响应存在延时，风场出力调节滞后，盈余功率会在毫秒级的极短时间内造成系统过电压，严重者甚至引发风场脱网。若忽略风机降载裕度，则容易造成风机变流器过流，且风电场降压过低或长时间低压运行易导致风场脱网。

方案二：投入动态耗能装置[48,56-57]。利用风机的撬棒电阻可以实现其低电压穿越，但该电阻功率小且分布于各机组内，协同控制复杂难度大。在系统直流侧安装耗能装置，使用全控型功率器件数量多，需按照额定直流功率配置其容量，会导致造价高、占地面积大，以如东工程为例，直流耗能阀造价高达 5 180 万元。交流耗能装置也能发挥故障穿越作用，且拓扑简单，控制易实现，但由于其通常布置在风场汇集处，因此在海上风电柔直送出系统中较少应用。文献[58]提出在陆上站交流侧设置交流耗能装置，并结合柔直换流阀主动电容能量控制策略，利用电容能量裕度吸收部分盈余功率以减小耗能装置容量配置，并通过仿真验证了实现故障穿越的可行性，但未给出容量配置减小的指标。

方案三：将风场降压减载与耗能装置配合控制[59-63]。文献[60]提出风场快速降压减载与受端换流站缓冲耗能电阻协同控制的方式，故障初期由耗能电阻吸收盈余功率，待送端风场降载响应后缓冲电阻退出，有效解决了风场延时及耗能电阻容量过大的问题。文献[61]提出海风柔直系统自同步电压源控制与电网故障穿越策略，将直流电压与子模块电容电压解耦，当交流电网故障时，可提升直流电压向风场传递电网信息的精度与抗扰动能力，同时切换受端换流站控制环为限功率模式，与耗能装置配合实现故障穿越，从而减小直流电压波动及恢复冲击。文献[63]研究了送端交流电网与风场电流、直流电压的关系，考虑风场稳定运行域与减载裕度，联合耗能装置开展优化控制设计，直流耗能较全额配置容量降低 84%。

方案四：利用储能吸收盈余功率解决故障穿越[64-67]。文献[68]提出风电机组与储能装置协同控制的方法，可减小储能配置容量。文献[69]提议在直流侧并联超级电容储能方案，但其作为独立系统，易增加控制难度及成本。文献[70]提出将换流阀 MMC 模块电容作为能量缓冲器，与耗能装置、风场协调控制以实现故障穿越。文献[71]在陆上站换流阀内部配置储能，并引入构网/跟网控制功能，提升了子模块能量调节的灵活度；同时，结合风机转速、子模块能量、储能相互协调控制，实现储能小容量配置下的故障穿越，但未分析成本因素的影响及风场延时。

考虑到故障穿越的可靠性，目前工程仍主要依赖直流耗能装置，即方案二。但在一些新建的海上风电柔性直流输电工程中，也在逐渐尝试其他利用风机耗能、储能的协同故障穿越方案，以减小直流耗能装置的容量与成本，这些方案也成为未来的重要发展趋势。

5.2 宽频振荡抑制

海上风电柔直送出系统包含大量异构电力电子装置，构成多变流器控制的复杂耦合系统，在运行中容易引发宽频振荡，是亟须解决的热点问题[72-74]。2013 年德国北海 Borwin1 工程发生振荡频率为 250~350 Hz 的中频振荡，造成海上平台滤波电容烧毁。2014 年广东南澳风场三端柔直工程发生 20~30 Hz 的次同步振荡。张北新能源四端柔直工程自 2020 年投运以来，相继出现了数十至数千赫兹的宽频振荡现象。如东海风柔直工程自 2021 年底投运也相继出现了 2 kHz 和 320 Hz 的中高频振荡现象。海风柔直输电系统宽频振荡已成为制约风电高效消纳的关键技术难题。

近年来，国内外学者开展了海风柔直输电系统宽频振荡稳定性的相关研究，在机理分析、主导因素和振荡源定位方法、宽频振荡抑制措施等方面取得了一定进展[75-78]。目前，振荡稳定性分析方法主要有特征值分析法和频域阻抗分析法，其中阻抗分析法适用于复杂网络及黑箱系统，且其物理意义清晰，被广泛用于电力电子设备并网稳定性评估与机

理分析。文献[77]采用谐波状态空间法建立了计及内部动态特性的 MMC 宽频阻抗模型，首次揭示了由 MMC 内部动态特性引发的风电柔直送出系统次同步振荡机理，并提出采用一种虚拟桥臂电阻控制实现振荡抑制。文献[78]分析了风电场经 MMC-HVDC 输电系统的稳定性，并提出振荡抑制策略，但是未讨论不同类型风电机组阻抗对系统稳定性的影响。文献[79]和文献[80]对振荡主导影响因素进行了研究，结果表明风场的感性负电阻特性与柔直送端 MMC 的容性特性会相互作用产生次同步振荡，风电场的容性负电阻特性与柔直送端 MMC 的感性特性相互作用产生超同步振荡，柔直海上 MMC 的感性负电阻特性与风电场的容性特性相互作用产生中/高频振荡。宽频振荡抑制措施主要有优化风机/MMC 换流器控制参数、优化控制器结构、附加阻尼控制等[81-82]。

6 新技术展望及挑战

6.1 宽频振荡在线评估技术

虽然针对宽频振荡问题的研究已开展多年，但在实际系统中仍会时常发生各类振荡问题。目前导致振荡问题难以彻底解决的原因主要有：一方面，新能源机组出力随机不确定，大规模新能源发电基地工况组合海量，难以在规划阶段遍历；另一方面，实际新能源机组控制模型往往存在“黑/灰箱”问题，难以准确建立其仿真和数学模型。上述原因导致在规划设计阶段基于机理化的建模与分析方法很难准确评估所有工况下系统的稳定性。为解决该问题，基于数据驱动的宽频振荡稳定性在线评估技术成为预防系统振荡的有效手段[83-84]。该技术首先构建新能源机组和柔直换流站等关键电力电子设备的数据驱动阻抗在线辨识模型，然后利用频域稳定判据实现系统宽频振荡稳定性的在线评估。基于数据模型的在线分析方法能够有效应对“黑箱化”设备难以建模、海量工况难以遍历等难题，同时支持在线评估和系统振荡风险预警，有利于提前采取稳定措施，避免系统发生振荡。近年来，一些学者已开展相关研究工作并取得了一定进展。文献[85-87]提出了一种基于数据-知识融合驱动的新能源场站宽频阻抗在线识别与宽频振荡稳定性在线分析方法，并分别应用于风电场交流并网、风电柔直并网和复杂新能源电力系统的宽频振荡稳定性在线评估中。文献[88]提出了一种基于稳态信息和条件分布自适应的风电场阻抗智能辨识和稳定性评估方法。目前，针对大规模新能源并网系统宽频振荡稳定性在线评估技术的研究尚处于起步阶段，在可靠数据样本的获取、数据模型的泛化能力、宽频振荡风险在线评估系统开发等方面还有许多工作需要进一步研究。

6.2 海风-柔直构网型控制

目前海风-柔直送出并网系统中，岸上受端换流器均采用跟网型控制策略，即利用锁相环检测并网点电压相位，通过控制电流的分量实现对直流电压和并网无功功率的解耦控制。此时受端换流器对于电网体现为受控电流源性质，不会主动响应电网频率变化，而直流系统的隔离作用也使得风电场及送端换流器难以感知并响应电网频率变化。从并网点来看，风电-柔直系统对电网体现为无惯量的电流源。无惯量的风电-柔直并网系统对同步发电机的取代降低了电网的整体惯性，在海上风电-柔直系统单套容量已经达到吉瓦级的背景下，将会严重影响电网运行的频率稳定性。另一方面，随着电网中可再生能源占比的提高，电网越来越弱，当风电-柔直系统并网点的短路比较低时，受端换流器的锁相环动态性能变差，极易出现振荡失稳现象。

为解决上述问题，海风-柔直系统需要在一定程度上如同步发电机一般，承担起建立电力系统电压和维持系统实时能量平衡的义务，构网型控制是实现这一目标的有力手段。构网型控制下，海风-柔直系统通过主动构建电网电压/频率骨架，而非被动跟随电网信号[89-91]，可实现与同步发电机类似的“功率式同步”而非采用基于锁相环的“电压式同步”，即使在短路比极低的电网(SCR<2.5)下依旧能够稳定运行。同时，有学者提出利用直流电容与同步发电机转子动力学特性的相似性，建立起直流电压与电网频率间的自发映射关系，将电网频率无通信地镜像到风电场频率中，使风电场能够实时感知电网频率变化，从而提供惯量支撑。目前，德国北海 Borwin6 工程明确提出了海风-柔直系统的构网型控制需求，其工程应用已提上日程。

6.3 人工智能与数字技术融合

在深远海风电快速发展背景下，深度融合人工智能与数字技术已成为提升装备可靠性的核心路径[92-94]。基于数字孪生技术构建的全生命周期虚拟镜像系统，通过高精度传感器网络实现对叶片轴承微裂纹(0.01 mm 级)、齿轮箱油温异常等亚健康状态的智能感知与特征提取。融合联邦学习框架与海量

运维数据开发的智能诊断模型，利用时频域耦合特征解析技术，将齿轮箱早期故障识别准确率提升至98.6%；创新构建的变流器热失效预警模型，可在温度梯度达 3 ℃/cm² 时提前 3 d 预测风险。江苏如东 2 000 MW 海上风电场应用该技术体系，结合设备数字孪生体与实时监控数据，使主轴承故障漏报率从 12%降至 0.7%，运维效率提升 5 倍。当前技术深度集成边缘计算能力，如广东阳江示范工程实现 14 类核心部件毫秒级状态同步，计划外停机时长缩减 82%。通过数字孪生、智能诊断算法与边缘端实时响应技术的协同创新，构建覆盖装备缺陷监测-预警-决策的全链条智能运维体系，为深远海风电无人化运维提供关键技术支撑，推动行业数字化水平跨越式发展。

6.4 关键挑战与技术展望

我国2030年海风并网规模预计将达1.5亿kW，为了实现规模化深远海风电的低成本、高可靠直流送出，还面临以下关键挑战：

首先，规模化与经济性之间的矛盾是深远海风电开发最永恒的话题。当前，开发商激烈的压价竞争埋下了设备质量隐患，单纯的成本压缩模式难以维系深远海开发的可持续性，需要以“技术降本”替代“压价降本”。当前海上风电-柔性直流输电工程的整体造价过高且送出容量受限，难以满足超大规模远海风电集群的平价上网需求。为解决这一问题，一方面需要突破±800 kV 及以上高压直流海缆及其国产化技术、6.5 kV 及以上功率器件的制造与应用技术，以及二极管不控整流等新型换流技术，实现单套海风-柔直系统的降本与扩容；另一方面，也需要积极探索规模化海风的多点直流送出-多馈入并网，乃至多电压等级全直流组网等新型拓扑结构。

其次，海上极端环境导致运维压力与运维难度大幅提高，加之宽频振荡问题频发，对海上风电场与换流平台的运行可靠性提出了更大的挑战。为解决这一挑战，未来可以从 3 个角度出发：一是开发更高效的自适应阻尼控制算法并建立标准化验证平台，通过强化全生命周期的可靠性验证体系来规避深远海场景下的系统性风险；二是探索二极管整流等新型无源换流技术，简化海上换流站结构，减少设备数量，从而提高换流站的运行可靠性；三是通过深化人工智能与数字孪生技术的融合，构建覆盖“缺陷监测-预警-决策”的全链条智能体系，以智能化手段对冲规模化带来的运维成本压力。

最后，超大规模海上风电的波动性功率并网还会引发电网消纳难题，海风-直流系统的无惯量特征也会严重影响电网频率稳定性，近年来如英国 8.9 大停电、伊比利亚半岛 4.28 大停电等事故频发，为解决这一问题，可一方面以多端柔直系统为桥梁，联络大规模海风基地与各区域交流电网，构成互联互通、柔性可控的交直流混合电网，从而有利于整合广域多类型电源，实现大范围内电能的高效传输与优化分配，以适应当下规模化开发的海上风电场、多落点受电和广域互联的应用需求，进而有效缓解风电功率波动引发的电压稳定和大型互联交流网的频率稳定问题；另一方面，也应当积极挖掘海上风电场与直流系统的电网频率响应潜力，推动海风-直流系统构网型技术的发展与应用，实现海风-直流并网系统由跟随型电源向主力型电源转变，为构建高比例可再生能源电网奠定基础。

7 结论

大规模深远海风电是新能源开发的主要趋势，柔性直流输电是主流输电方式。本文结合国内外已投运工程的运行情况，在建及规划的重点工程系统容量及参数，未来超大规模海上风电集群开发对系统拓扑、核心装备、海上平台等的开发需求，介绍了海风柔直系统典型拓扑、主接线、设备、造价等差异，分析了由典型拓扑衍生的多种组网拓扑及其适用场景；探讨了海上风电场交流侧 66 kV 汇集工程应用情况及 110 kV 汇集的可行性及经济性；总结了换流阀、桥臂电抗器、联结变压器、接地等核心电气装备的工程应用及研发现状；对直流系统受端交流电网故障穿越、宽频振荡(次/超同步振荡)抑制等控制保护策略进行了综述，并指出了现存问题。最后，从更高电压等级、更大容量及紧凑轻型化装备、海上平台、输电技术及系统稳定运行等方面提出技术展望，明确了攻关方向与挑战，为海上风电输电技术的发展提供参考。

参考文献 References

[1] FU Y, REN Z X, WEI S R, et al. Dynamic optimal power flow method based on reinforcement learning for offshore wind farms considering multiple points of common coupling[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2024, 12(6): 1749-1759.

[2] 杨光亚. 欧洲海上风电工程实践回顾及未来技术展望[J]. 电力系统自动化，2021，45(21)：23-32.
YANG Guangya. Review on engineering practices and future technology prospects of European offshore wind power[J]. Automation of

Electric Power Systems, 2021, 45(21): 23-32.

[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)：3758-3770.
CHI Yongning, LIANG Wei, ZHANG Zhankui, 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): 3758-3770.

[4] 时智勇，王彩霞，李琼慧. “十四五”中国海上风电发展关键问题[J]. 中国电力，2020，53(7)：8-17.
SHI Zhiyong, WANG Caixia, LI Qionghui. Key issues of China’s offshore wind power development in the “14th Five-Year Plan”[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 8-17.

[5] 樊肖杰，迟永宁，马士聪，等. 大规模海上风电接入电网关键技术与技术标准的研究及应用[J]. 电网技术，2022，46(8)：2859-2870.
FAN Xiaojie, CHI Yongning, MA Shicong, et al. Research and application of key technologies and technical standards for large-scale offshore wind farms connecting to power grid[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 2859-2870.

[6] 刘景晖，万振东，李飞科. 大规模海上风电场集群交直流输电方式的等价距离研究[J]. 电力勘测设计，2020(4)：1-5.
LIU Jinghui, WAN Zhendong, LI Feike. Study on equivalent distance of transmission mode for large scale offshore wind farm cluster[J]. Electric Power Survey & Design, 2020(4): 1-5.

[7] 王锡凡，卫晓辉，宁联辉，等. 海上风电并网与输送方案比较[J]. 中国电机工程学报，2014，34(31)：5459-5466.
WANG Xifan, WEI Xiaohui, NING Lianhui, et al. Integration techniques and transmission schemes for off-shore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5459-5466.

[8] 范心明，管 霖，夏成军，等. 多电平柔性直流输电在风电接入中的应用[J]. 高电压技术，2013，39(2)：497-504.
FAN Xinming, GUAN Lin, XIA Chengjun, et al. Multilevel VSC-HVDC applied in wind power integration[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 497-504.

[9] 邹常跃，韦嵘晖，冯俊杰，等. 柔性直流输电发展现状及应用前景[J]. 南方电网技术，2022，16(3)：1-7.
ZOU Changyue, WEI Ronghui, FENG Junjie, et al. Development status and application prospect of VSC-HVDC[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(3): 1-7.

[10] 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 Weidong, LI Qinan, WANG Xuan, et al. Application status and prospect of VSC-HVDC technology for large-scale offshore wind farms[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 55-71.

[11] 蔡 旭，杨仁炘，周剑桥，等. 海上风电直流送出与并网技术综述[J]. 电力系统自动化，2021，45(21)：2-22.
CAI Xu, YANG Renxin, ZHOU Jianqiao, et al. Review on offshore wind power integration via DC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 2-22.

[12] 李 岩，冯俊杰，卢毓欣，等. 大容量远海风电柔性直流送出关键技术与展望[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3384-3393.
LI Yan, FENG Junjie, LU Yuxin, et al. Key technologies and prospects of VSC-HVDC for large-capacity and long-distance offshore wind power transmission[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3384-3393.

[13] 文卫兵，赵 峥，李 明，等. 海上风电柔性直流系统设计及工程应用[J]. 全球能源互联网，2023，6(1)：1-9.
WEN Weibing, ZHAO Zheng, LI Ming, et al. Design and engineering application of offshore wind power VSC-HVDC system[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(1): 1-9.

[14] 徐 进，韦古强，金 逸，等. 江苏如东海上风电场并网方式及经济性分析[J]. 高电压技术，2017，43(1)：74-81.
XU Jin, WEI Guqiang, JIN Yi, et al. Economic analysis on integration topology of Rudong offshore wind farm in Jiangsu Province[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 74-81.

[15] 张天龙，陈海焱，姜海博，等. 海上风电柔性直流技术研究进展与展望[J]. 电力勘测设计，2024，45(5)：25-31.
ZHANG Tianlong, CHEN Haiyan, JIANG Haibo, et al. Development and prospect of VSC-HVDC offshore wind power transmission technology[J]. Electric Power Survey & Design, 2024, 45(5): 25-31.

[16] 苏 龙，陈 恺，张家杭，等. 福建省大容量海上风电海域组网方案研究[J]. 能源与环境，2024(2)：7-11，61.
SU Long, CHEN Kai, ZHANG Jiahang, et al. Research on the networking scheme for large capacity offshore wind power in Fujian province[J]. Energy and Environment, 2024(2): 7-11, 61.

[17] 程改红，李文津，徐一星，等. 我国远海风电送出输电技术及典型方案[J]. 电力科学与工程，2024，40(4)：44-54.
CHENG Gaihong, LI Wenjin, XU Yixing, et al. Transmission technology and typical schemes for long-distance offshore wind power transmission in China[J]. Electric Power Science and Engineering, 2024, 40(4): 44-54.

[18] LIU H Z, CHEN Z. Contribution of VSC-HVDC to frequency regulation of power systems with offshore wind generation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(3): 918-926.

[19] 谭振龙，张伶俐，陈 希，等. 远海大容量机组海上风电集电系统技术经济研究[J]. 电气应用，2021，40(6)：64-71.
TAN Zhenlong, ZHANG Lingli, CHEN Xi, et al. Techno-economic study on collection systems of large capacity turbines for offshore wind power[J]. Electrotechnical Application, 2021, 40(6): 64-71.

[20] 孟沛彧，向 往，迟永宁，等. 一种适用于大规模新能源远距离外送的分层混联输电系统[J]. 中国电机工程学报，2021，41(10)：3349-3363.
MENG Peiyu, XIANG Wang, CHI Yongning, et al. A hierarchical LCC-MMC hybrid transmission system for transmitting large-scale renewable power over long-distance[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(10): 3349-3363.

[21] 涂 睿，向 往，张港华，等. 海上风电中频交流-直流混合汇集DR/MMC直流送出系统[J]. 电网技术，2025，49(11)：4526-4535.
TU Rui, XIANG Wang, ZHANG Ganghua, et al. Medium frequency AC/DC hybrid collection and DR/MMC HVDC transmission system for offshore wind farms[J]. Power System Technology, 2025, 49(11): 4526-4535.

[22] WHITE B L, KEAST R, GÜTSCHOW D. 132 kV identified as next array operating voltage for offshore wind[C]//Proceedings of the 11th International Conference on Renewable Power Generation - Meeting Net Zero Carbon. London, United Kingdom: IEEE, 2022: 75-79.

[23] 卢毓欣，赵晓斌，李 岩，等. 海上风电送出用柔性直流换流站电气主接线[J]. 南方电网技术，2020，14(12)：25-31.
LU Yuxin, ZHAO Xiaobin, LI Yan, et al. Main electrical connection of VSC-HVDC converter stations for offshore wind farm integration[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(12): 25-31.

[24] 仝 涵，王 卓，王彤辉. 柔性直流海风送出系统拓扑结构的适用性分析[J]. 中国科技成果，2023，24(16)：32-34.
TONG Han, WANG Zhuo, WANG Tonghui. Applicability analysis of topology structure of flexible DC sea breeze transmission system[J]. China Science and Technology Achievements, 2023, 24(16): 32-34.

[25] 马向辉，张梓铭，吴 冇，等. 2 GW海上风电对称单极与对称双极柔直送出方案技术经济性对比[J]. 南方电网技术，2024，18(2)：30-38.

MA Xianghui, ZHANG Ziming, WU Mao, et al. Technical and economical comparisons of 2 GW offshore wind power transmission schemes by symmetrical monopole and symmetrical bipolar VSC-HVDC[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(2): 30-38.

[26] 章浅诺，张哲任，金砚秋，等. 适用于超大规模海上风电并网的直流送出系统[J]. 电力自动化设备，2025，45(1)：106-114.
ZHANG Qiannuo, ZHANG Zheren, JIN Yanqiu, et al. DC transmission system suitable for ultra-large-scale offshore wind power grid-connected system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(1): 106-114.

[27] 蔡希鹏，邹常跃，彭发喜，等. 超大规模海上风电海陆一体直流输电技术探讨[J]. 电网技术，2024，48(7)：2895-2901.
CAI Xipeng, ZOU Changyue, PENG Faxi, et al. Discussion on HVDC transmission technology for super-large scale offshore wind power under offshore-onshore integration[J]. Power System Technology, 2024, 48(7): 2895-2901.

[28] 王晓雪. 基于混合型 MMC 的直流电网故障穿越协同控制策略[D]. 吉林：东北电力大学，2023.
WANG Xiaoxue. Coordinated control strategy of fault ride-through for DC grid based on hybrid MMC[D]. Jilin, China: Northeast Electric Power University, 2023.

[29] 魏　争，文卫兵，杨　勇，等. 500 kV 直流断路器快速机械开关典型故障特性及可靠性提升方法研究[J]. 全球能源互联网，2023，6(1)：54-63.
WEI Zheng, WEN Weibing, YANG Yong, et al. Research on typical fault characteristics and reliability improvement methods of high-speed mechanical switch used in 500 kV DC circuit breaker[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(1): 54-63.

[30] 郑全旭，孙小平，娄彦涛，等. ±500 kV 海上柔直换流阀轻型化设计及仿真分析[J]. 高压电器，2023，59(6)：188-201.
ZHENG Quanxu, SUN Xiaoping, LOU Yantao, et al. Lightweight design and simulation analysis of ±500 kV offshore VSC converter valve[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(6): 188-201.

[31] 肖晃庆，甘慧辰，黄　莹，等. 远海风电轻型化直流送出技术综述[J]. 高电压技术，2025，51(6)：2702-2719.
XIAO Huangqing, GAN Huichen, HUANG Ying, et al. Review of lightweight DC transmission technology for offshore wind power[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(6): 2702-2719.

[32] 俞露杰，付子玉，朱介北，等. 远海风电 DRU-HVDC 送出系统构网控制与启动方法综述[J]. 电力系统自动化，2023，47(24)：63-79.
YU Lujie, FU Ziyu, ZHU Jiebei, et al. Review on grid-forming control and start-up method of diode-rectifier-unit based HVDC transmission system for remote offshore wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(24): 63-79.

[33] NGUYEN T H, LEE D C, KIM C K. A series-connected topology of a diode rectifier and a voltage-source converter for an HVDC transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 1579-1584.

[34] CHEN L, WANG J Y, LI Z X, et al. Steady-state analysis of the DR-MMC based hybrid topology for offshore wind power transmission[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(2): 3177-3188.

[35] 王成东，邵冰冰，解　宝，等. 大规模海上风力发电直流输电新型混合整流阀拓扑及其控制策略[J]. 高电压技术，2023，49(11)：4642-4653.
WANG Chengdong, SHAO Bingbing, XIE Bao, et al. A new topology and its control strategy of hybrid rectifier valve for large-scale offshore wind power DC transmission[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4642-4653.

[36] 方梓熙，蔡　旭，史先强，等. 混合型海上风电直流换流器的拓扑优化与控制[J]. 中国电机工程学报，2021，41(24)：8546-8559.
FANG Zixi, CAI Xu, SHI Xianqiang, et al. Topology optimization and control of the hybrid DC converter for offshore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8546-8559.

[37] YU L J, LI R, XU L. Distributed PLL-based control of offshore wind turbines connected with diode-rectifier-based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1328-1336.

[38] XIAO H Q, HUANG X W, HUANG Y, et al. Self-synchronizing control and frequency response of offshore wind farms connected to diode rectifier based HVDC system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(3): 1681-1692.

[39] ZHANG Z R, JIN Y Q, XU Z. Grid-forming control of wind turbines for diode rectifier unit based offshore wind farm integration[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(2): 1341-1352.

[40] SUN Y X, KONG D H, ZHANG Z B, et al. Consensus-based distributed control of offshore wind farms connected via DR-HVDC[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2025, 72(6): 5936-5947.

[41] WANG K L, SONG Q, ZHAO B, et al. Grid-forming control of offshore wind farms connected with diode-based HVDC links based on remote active power regulation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2024, 15(2): 1315-1327.

[42] 于浩天，蔡　旭，杨仁炘，等. 经 DRU-HVDC 送出的海上风电场汇集网电气调节特性分析及集群构网控制策略[J]. 中国电机工程学报，2025，45(6)：2318-2334.
YU Haotian, CAI Xu, YANG Renxin, et al. Analysis of electrical regulation characteristics and group grid-forming control strategy of DRU-HVDC integrated offshore wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(6): 2318-2334.

[43] 王帅飞，张大勇，王国军，等. 冰致海上风电基础结构稳态振动分析[J]. 船海工程，2019，48(6)：91-95.
WANG Shuaifei, ZHANG Dayong, WANG Guojun, et al. Analysis of ice-induced steady-state vibration for offshore wind turbine foundation[J]. Ship & Ocean Engineering, 2019, 48(6): 91-95.

[44] 徐世宏. 海上风电设备防腐蚀研究现状与前景[J]. 电力系统装备，2024(4)：67-69.
XU Shihong. Research status and prospect of corrosion prevention for offshore wind power equipment[J]. Electric Power System Equipment, 2024(4): 67-69.

[45] 李志川，孙兆恒，朱魁星，等. 海缆故障类型、定位及防护关键技术综述[J]. 机电工程技术，2025，54(12)：76-82，113.
LI Zhichuan, SUN Zhaoheng, ZHU Kuixing, et al. Review of submarine cable fault types, location and protection key technologies[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2025, 54(12): 76-82, 113.

[46] 孙　栩，王华伟，雷　霄，等. 架空线柔性直流电网的直流短路电流限制研究[J]. 电力自动化设备，2017，37(2)：219-223.
SUN Xu, WANG Huawei, LEI Xiao, et al. Restriction of DC short circuit current for overhead lines of flexible DC grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 219-223.

[47] 王　帅，任军辉，娄彦涛，等. ±525 kV/2 GW 海上风电柔性直流送出系统海上换流站设备选型探讨[J]. 高压电器，2022，58(7)：11-17.
WANG Shuai, REN Junhui, LOU Yantao, et al. Discussion on equipment selection of offshore converter station of ± 525 kV/2 GW offshore wind power flexible DC transmission system[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 11-17.

[48] YIN L C, CHEN Q C, LI B K, et al. A novel DC energy dissipation

topology with concentrated dissipation resistor and control method for offshore wind VSC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(2): 2880-2890.

[49] WU S H, QI L, JIN M C, et al. An MMC with integrated energy dissipation function using thyristor-based chopper modules for the offshore wind VSC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(1): 1609-1623.

[50] 毛航银，刘 黎，邹国平，等. 舟山多端柔性直流输电系统接地方式研究[J]. 浙江电力，2014(4)：10-13.
MAO Hangyin, LIU Li, ZOU Guoping, et al. Research on grounding mode of Zhoushan multi-terminal flexible DC transmission system[J]. Zhejiang Electric Power, 2014(4): 10-13.

[51] 傅春翔，汪天呈，郦洪柯，等. 用于海上风电并网的柔性直流系统接地方式研究[J]. 电力系统保护与控制，2019，47(20)：119-126.
FU Chunxiang, WANG Tiancheng, LI Hongke, et al. Study on grounding methods of VSC-HVDC for off-shore wind farm integration[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 119-126.

[52] 陈 晴，薛 源，王 克，等. 用于海上风电并网的柔性直流系统过电压和绝缘配合研究[J]. 高压电器，2019，55(4)：178-184.
CHEN Qing, XUE Yuan, WANG Ke, et al. Research on overvoltage and insulation coordination of flexible DC system for offshore wind farm integration[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4): 178-184.

[53] WU S H, QI L, ZHANG X Y, et al. A novel low-cost DC chopper for offshore wind VSC-HVDC system by using thyristors instead of full-control devices[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(4): 3639-3649.

[54] LI Y F, XU J F, XU B, et al. A power losses and thermal energy optimization method for hybrid DC chopper based on hysteresis control strategy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(1): 486-499.

[55] 邓银秋，汪 震，韩俊飞，等. 适用于海上风电接入的多端柔直网内不平衡功率优化分配控制策略[J]. 中国电机工程学报，2020，40(8)：2406-2415.
DENG Yinqiu, WANG Zhen, HAN Junfei, et al. Control strategy on optimal redistribution of unbalanced power for offshore wind farms integrated VSC-MTDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2406-2415.

[56] 姚宏洋，谢晔源，方太勋，等. 子模块可控放电集中式直流耗能装置及其控制[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2896-2904.
YAO Hongyang, XIE Yeyuan, FANG Taixun, et al. Concentrated DC energy braking device with discharge controllable sub-module topology and its control[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2896-2904.

[57] 张 静，高 冲，许 彬，等. 海上风电直流并网工程用新型柔性直流耗能装置电气设计研究[J]. 中国电机工程学报，2021，41(12)：4081-4090.
ZHANG Jing, GAO Chong, XU Bin, et al. Research on electrical design of novel flexible DC energy consuming device for offshore wind power DC grid connection project[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4081-4090.

[58] 张浩博，向 往，周 猛，等. 海上风电柔直并网系统主动能量控制与交流耗能装置协同策略[J]. 中国电机工程学报，2022，42(12)：4319-4330.
ZHANG Haobo, XIANG Wang, ZHOU Meng, et al. Cooperative strategy of active energy control and AC energy dissipation device in offshore wind power MMC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4319-4330.

[59] 蔡婷婷，穆 钢，严干贵，等. 提高海上风电场经 MMC 联网系统故障穿越能力的柔性泄能电阻控制策略[J]. 电网技术，2020，44(1)：166-173.
CAI Tingting, MU Gang, YAN Gangui, et al. A flexible control strategy of breaking resistor to enhance fault-ride-through ability for offshore wind farms integrated to grid via MMC[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 166-173.

[60] 杨仁炘，王霄鹤，陈 晴，等. 机组协同-分布卸荷的风电场-柔直并网系统故障穿越方法[J]. 电力系统自动化，2021，45(21)：103-111.
YANG Renxin, WANG Xiaohe, CHEN Qing, et al. Fault ride-through method of flexible HVDC transmission system for wind farm integration based on coordination of wind turbines and distributed braking resistors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 103-111.

[61] 杨仁炘，张 琛，蔡 旭，等. 海上风电－柔直并网系统自同步电压源控制与电网故障穿越[J]. 中国电机工程学报，2022，42(13)：4823-4834.
YANG Renxin, ZHANG Chen, CAI Xu, et al. Voltage source control and fault ride-through of VSC-HVDC systems with offshore wind farm integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(13): 4823-4834.

[62] 戴金水，朱 淼. VSC-MTDC 联网风电场的交流故障穿越控制[J]. 电气自动化，2016，38(1)：26-30.
DAI Jinshui, ZHU Miao. A control strategy for AC fault ride-through of wind farm integration through VSC-MTDC[J]. Electrical Automation, 2016, 38(1): 26-30.

[63] 薄 鑫，杨志超，宋 杉，等. 海上风电经柔直送出系统受端交流故障联合穿越控制策略[J]. 可再生能源，2022，40(10)：1396-1406.
BO Xin, YANG Zhichao, SONG Shan, et al. Coordinated fault ride through strategy for offshore wind farm via VSC-HVDC under receiving-end AC fault[J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(10): 1396-1406.

[64] 张福轩，郭贤珊，汪楠楠，等. 接入新能源孤岛系统的双极柔性直流系统盈余功率耗散策略[J]. 电力系统自动化，2020，44(5)：154-160.
ZHANG Fuxuan, GUO Xianshan, WANG Nannan, et al. Surplus power dissipation strategy for bipolar VSC-HVDC system with integration of islanded renewable energy generation System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 154-160.

[65] 曹 帅，向 往，林卫星，等. 含风电的真双极混合型 MMC-MTDC 系统故障穿越及能量耗散控制[J]. 电力系统保护与控制，2019，47(7)：39-48.
CAO Shuai, XIANG Wang, LIN Weixing, et al. Fault ride-through and energy dissipation control of bipolar hybrid MMC-MTDC integrating wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 39-48.

[66] 李国庆，徐亚男，江守其，等. 海上风电经柔性直流联网系统受端交流故障穿越协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制，2022，50(7)：111-119.
LI Guoqing, XU Yanan, JIANG Shouqi, et al. Coordinated control strategy for receiving-end AC fault ride-through of an MMC-HVDC connecting offshore wind power[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 111-119.

[67] LI W X, ZHU M, CHAO P P, et al. Enhanced FRT and postfault recovery control for MMC-HVDC connected offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 1606-1617.

[68] 陈浔俊，耿光超，江全元. 基于储能的风电机组故障电压穿越自适应协调控制[J]. 电力系统自动化，2023，47(7)：158-165.
CHEN Xunjun, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan. Adaptive coordinated control of fault voltage ride-through for wind turbine based on energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(7):

158-165.

[69] 朱介北，史美琦，张　利，等. 基于超级电容的海上风电柔直送出系统协调惯量支撑策略[J]. 电网技术，2022，46(8)：2938-2947.
ZHU Jiebei, SHI Meiqi, ZHANG Li, et al. Supercapacitor-based coordinated inertia support strategy for offshore wind farms integration via VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 2938-2947.

[70] ZHOU H Y, YAO W, SUN K Y, et al. Enhancing fault ride-through and voltage support capability for MMC-HVDC integrated offshore wind farms based on multi-mode matching[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2024, 15(2): 1256-1268.

[71] 孙　伟，王玉生，张文艳，等. 基于构网型储能的海上风电柔直并网系统电网侧故障穿越协调控制策略[J]. 电网技术，2025，49(12)：5049-5058.
SUN Wei, WANG Yusheng, ZHANG Wenyan, et al. Coordinated grid side fault ride-through control strategy for offshore wind farms connected MMC-HVDC based on grid-forming energy storage[J]. Power System Technology, 2025, 49(12): 5049-5058.

[72] 宾子君，袁宇波，许　璟，等. 基于故障录波的海上风电经柔直并网系统阻抗分析方法[J]. 电网技术，2022，46(8)：2920-2927.
BIN Zijun, YUAN Yubo, XU Jin, et al. Impedance analysis of offshore wind farms with VSC-HVDC systems based on fault record data[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 2920-2927.

[73] 李光辉，王伟胜，郭剑波，等. 风电场经 MMC-HVDC 送出系统宽频带振荡机理与分析方法[J]. 中国电机工程学报，2019，39(18)：5281-5297.
LI Guanghui, WANG Weisheng, GUO Jianbo, et al. Broadband oscillation mechanism and analysis for wind farm integration through MMC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5281-5297.

[74] RAO Y M, LYU J, WANG Y F, et al. Adaptive mitigation control for wideband oscillations of offshore wind farms with MMC-HVDC system[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2025, 11(1): 208-216.

[75] 程　静，苏　乐，岳　雷. 双馈风电并网系统的宽频振荡机理分析与抑制[J]. 电力系统保护与控制，2023，51(12)：1-13.
CHENG Jing, SU Le, YUE Lei. Mechanism analysis and suppression of broadband oscillation in a DFIG wind power grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 1-13.

[76] 王玉芝，王　亮，姜齐荣. 基于 STATCOM 的风电场 SSCI 附加阻尼抑制策略[J]. 电力系统自动化，2019，43(15)：49-55.
WANG Yuzhi, WANG Liang, JIANG Qirong. STATCOM based supplementary damping mitigation strategy for subsynchronous control interaction in wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 49-55.

[77] 张志强，李秋彤，余　浩，等. 海上直驱风电经柔直并网系统的次/超同步振荡特性分析[J]. 上海交通大学学报，2022，56(12)：1572-1583.
ZHANG Zhiqiang, LI Qiutong, YU Hao, et al. Analysis of sub/super-synchronous oscillation of direct-drive offshore wind power grid-connected system via VSC-HVDC[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2022, 56(12): 1572-1583.

[78] 李　辉，李青和，姚　然，等. 计及海缆分布特性的海上风电柔直并网系统中高频谐振分析及抑制[J]. 太阳能学报，2023，44(4)：74-84.
LI Hui, LI Qinghe, YAO Ran, et al. Mid-and high-frequency resonance analysis and suppression of offshore wind power generation MMC-HVDC grid-connected system considering distributed characteristics of submarine cable[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(4): 74-84.

[79] 杨　煜，吕　敬，韩兴宇，等. 基于自适应虚拟阻抗的海上风电柔直送出系统宽频振荡抑制方法[J/OL]. 高电压技术，2025：1-15 [2025-10-15]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520. hve. 20250235.
YANG Yu, LYU Jing, HAN Xingyu, et al. Adaptive virtual impedance-based wideband oscillation suppression for MMC-HVDC grid-connected offshore wind farms[J/OL]. High Voltage Engineering, 2025: 1-15[2025-10-15]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520. hve. 20250235.

[80] 吕　敬，蔡　旭，张占奎，等. 海上风电场经 MMC-HVDC 并网的阻抗建模及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报，2016，36(14)：3771-3780.
LÜ Jing, CAI Xu, ZHANG Zhankui, et al. Impedance modeling and stability analysis of MMC-based HVDC for offshore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3771-3780.

[81] 聂永辉，张瑞东，周勤勇，等. 海上风电场经柔直送出系统的虚拟导纳中频振荡抑制策略[J]. 电力系统保护与控制，2024，52(9)：36-45.
NIE Yonghui, ZHANG Ruidong, ZHOU Qinyong, et al. Virtual admittance control strategy for medium-frequency oscillation in an offshore wind farm when connected to a VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 36-45.

[82] 黄阮明，王晓晖，李　强，等. 海上风电经柔性直流送出系统高频振荡分析及抑制策略[J]. 电工电能新技术，2024，43(1)：43-52.
HUANG Ruanming, WANG Xiaohui, LI Qiang, et al. High frequency oscillation analysis and suppression strategy of offshore wind power through MMC-HVDC system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2024, 43(1): 43-52.

[83] 王渝红，王宏宇，于光远，等. 基于同步相量数据的次同步振荡检测与模态参数辨识方法[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2557-2568.
WANG Yuhong, WANG Hongyu, YU Guangyuan, et al. Sub-synchronous oscillation detection and modal parameter identification method based on synchrophasor[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2557-2568.

[84] 王新宇，任　正，陈财福，等. 基于 RT-LAB 硬件在环的风电机组宽频振荡风险评估[J]. 东北电力技术，2023，44(11)：27-31，35.
WANG Xinyu, REN Zheng, CHEN Caifu, et al. Risk assessment of wind turbine broadband oscillation based on RT-LAB hardware in loop[J]. Northeast Electric Power Technology, 2023, 44(11): 27-31, 35.

[85] 饶仪明，吕　敬，王　众，等. 基于数据-模型融合驱动的新能源场站宽频阻抗在线辨识及稳定性评估[J]. 中国电机工程学报，2024，44(7)：2670-2684.
RAO Yiming, LYU Jing, WANG Zhong, et al. Wideband impedance online identification and stability assessment of renewable power plants based on physics-informed data-driven method[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2670-2684.

[86] LÜ J, RAO Y M, WANG Z, et al. Data-driven impedance identification and stability online assessment of wind farm connected with MMC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(2): 2567-2576.

[87] 高　磊，吕　敬，宗　鑫，等. 数据-知识联合驱动的新能源电力系统宽频振荡稳定性在线评估[J/OL]. 中国电机工程学报，2025：1-16[2025-10-15]. https://link.cnki.net/urlid/11.2107.tm.20250613.1704.005.
GAO Lei, LYU Jing, ZONG Xin, et al. Online assessment of wideband oscillation stability of renewable energy power systems based on combined data- and knowledge-driven method[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2025: 1-16[2025-10-15]. https://link.cnki.net/urlid/11.2107.tm.20250613.1704.005.

[88] 林思齐，韦善阳，周泓宇，等. 基于稳态信息和条件分布自适应的

风电场阻抗智能辨识和稳定性评估[J]. 电网技术，2025，49(4)：1379-1392.
LIN Siqi, WEI Shanyang, ZHOU Hongyu, et al. Intelligent impedance identification and stability assessment of wind farm based on steady-state information and conditional distributed adaptive method[J]. Power System Technology, 2025, 49(4): 1379-1392.

[89] 林 毅，唐雨晨，欧鉴贤，等. 考虑送端影响的海上风电经柔直并网系统电压支撑强度量化分析[J]. 电网技术，2024，48(11)：4524-4533.
LIN Yi, TANG Yuchen, OU Jianxian, et al. Quantitative analysis on voltage support strength of offshore wind power grid-connected system via VSC-HVDC considering the influence of sending-side grid[J]. Power System Technology, 2024, 48(11): 4524-4533.

[90] 张 龙，孙 丹，马志豪，等. 海上风电柔直送出系统改进频率协同控制策略[J]. 太阳能学报，2024，45(10)：478-486.
ZHANG Long, SUN Dan, MA Zhihao, et al. Improved frequency coordinated control strategy for HVDC-integrated offshore wind farm[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(10): 478-486.

[91] 阳岳希，贺之渊，彭 程，等. 海上风电柔性直流外送系统主动支撑技术综述[J]. 高电压技术，2025，51(6)：2720-2733.
YANG Yuexi, HE Zhiyuan, PENG Cheng, et al. Review on grid support control for VSC-HVDC connecting offshore wind farm[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(6): 2720-2733.

[92] 彭 程，孙 栩，贺子琪，等. 基于混合算法的海上换流平台设备布局优化设计[J]. 力学与实践，2025，47(1)：68-78.
PENG Cheng, SUN Xu, HE Ziqi, et al. Optimized design of offshore converter platform equipment layout based on hybrid algorithms[J]. Mechanics in Engineering, 2025, 47(1): 68-78.

[93] 肖 异，刘 超，马怡晴，等. 海上风电柔性直流送出一体化监控系统方案设计[J]. 南方电网技术，2022，16(12)：126-133.
XIAO Yi, LIU Chao, MA Yiqing, et al. Design of Integrated monitoring system for VSC-HVDC transmission for offshore wind power[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(12): 126-133.

[94] 高兴国，常增亮，李乐乐，等. 海上风电安全智慧化监测系统设计与实现[J]. 水电与新能源，2024，38(5)：1-4.
GAO Xingguo, CHANG Zengliang, LI Lele, et al. Design and realization of an offshore wind Power intelligent safety monitoring system[J]. Hydropower and New Energy, 2024, 38(5): 1-4.



钟建英
1975—，女，博士，教授级高工
主要从事输变电装备研发及智能化、环保化等研究工作
E-mail: 447114672@qq.com

ZHONG Jianying
Ph.D., Professor



李万杰(通信作者)
1985—，男，博士，高工
主要从事新能源发电系统、高压直流输电运行与控制等研究工作
E-mail: tingyuanwutong@126.com

LI Wanjie
Ph.D.
Senior engineer
Corresponding author

收稿日期 2025-08-08 在线出版日期 2025-12-17 编辑 何秋萍