

内容目录

第一章 柔性直流输电+AI 应用概述	3
第一节 AI 是什么?	3
第二节 AI 和柔性直流输电行业有什么关系?	3
一、AI 给柔性直流输电行业带来的变化分析	3
二、AI 给柔性直流输电行业带来的冲击分析	4
三、AI 给柔性直流输电行业带来的变革分析	4
第二章 2023-2028 年柔性直流输电市场前景及趋势预测	5
第一节 新一代直流输电技术, 提升电网输送能力和安全水平	5
第二节 柔性直流是解决新能源消纳、长距离输送及电网安全的重要途径	7
一、长距离输送带来新挑战, 柔性直流优势凸显	7
二、核心零部件成本高, 国产替代降本空间大	8
第三节 柔直应用场景多样, 海内外已有多项目投运	9
一、应用场景多样, 发展前景广阔	9
二、场景一: 陆上柔直	10
三、场景二: 海风外送柔直	10
四、场景三: 背靠背电网柔直互联	12
第四节 柔直渗透率提升为换流阀厂商带来高业绩弹性	12
第五节 重点企业分析	13
一、国电南瑞: 电力设备龙头, 聚焦 IGBT 核心技术	13
二、许继电气: 二次设备龙头, 直流输电系统受益特高压建设加速	14
三、平高电气: 电气开关龙头企业, 直流输电系统受益特高压建设加速	15
第三章 柔性直流输电+AI 的应用现状及前景预测	16
第一节 为什么众多企业纷纷入局 AI	16
第二节 AI 的意义和作用	19
一、AI 对企业发展的实际意义	19
二、智能化改造需求	20
三、AI 为企业创造价值的模式	20
第三节 柔性直流输电+AI 市场应用情况分析	21
一、人工智能开始发挥实际作用	21
二、人工智能渗透到整个企业中	21
三、借助人工智能快速推进自动化	22
四、利用人工智能获得更大收益	22
五、人工智能战略需要集体的转变	22
六、人工智能触发业务流程转变	22
七、机器学习操作 (MLOps) 成为现实	23
八、企业铺设人工智能通道	23
九、新的业务模式可能出现	23
第四节 2023-2028 年柔性直流输电+AI 市场发展前景	24
一、AI 给柔性直流输电行业带来的机遇分析	24

二、AI 给柔性直流输电行业带来的挑战分析.....	24
三、2023-2028 年柔性直流输电+AI 市场发展潜力.....	24
四、2023-2028 年柔性直流输电+AI 市场发展前景.....	25
五、2023-2028 年柔性直流输电+AI 应用前景预测分析.....	26
第四章 柔性直流输电制定和布局+AI 的策略建议.....	27
第一节 企业如何建立人工智能战略.....	27
一、专注于战略业务目标.....	27
二、通过新的、支持人工智能的业务模型产生颠覆性影响.....	27
三、通过合适的人来执行人工智能战略.....	27
第二节 人工智能时代下的企业战略分析.....	28
一、现阶段企业战略管理存在的问题.....	29
二、人工智能时代下企业战略管理的策略.....	30
第三节 柔性直流输电布局 AI 的发展思路及对策.....	32
一、构建全方位人工智能管理体系.....	33
二、健全治理制度:建立合规机制与规范行为.....	33
三、完善治理组织:明确责任归属与岗位分工.....	34
四、丰富治理能力:结合风险防范与前沿探索.....	36
第四节 柔性直流输电+AI 切入模式及发展路径分析.....	38
一、企业快速部署 AI 的动力非常强大.....	40
二、AI 成熟度:如何衡量?.....	41
三、不同行业应用 AI 的差距正在缩小.....	43
四、以传统绩效指标评价, AI 领军者表现非凡.....	44
五、三一集团:从“聪明工厂”到智造生态.....	46
六、如何成为 AI 领军者? 五大成功因素.....	48
七、京东集团:探索 AI 前沿, 沉淀 AI 实力.....	50
八、从实践到实效, 驱动非凡价值.....	53
第五章 柔性直流输电《+AI 应用前景及布局策略》制定手册.....	54
第一节 动员与组织.....	54
一、动员.....	55
二、组织.....	55
第二节 学习与研究.....	56
一、学习方案.....	56
二、研究方案.....	56
第三节 制定前准备.....	57
一、制定原则.....	57
二、注意事项.....	58
三、有效战略的关键点.....	59
第四节 战略组成与制定流程.....	62
一、战略结构组成.....	62
二、战略制定流程.....	62
第五节 具体方案制定.....	63
一、具体方案制定.....	63
二、配套方案制定.....	66
第六章 柔性直流输电《+AI 应用前景及布局策略》实施手册.....	66

第一节 培训与实施准备	66
第二节 试运行与正式实施	67
一、试运行与正式实施	67
二、实施方案	67
第三节 构建执行与推进体系	68
第四节 增强实施保障能力	69
第五节 动态管理与完善	69
第六节 战略评估、考核与审计	70
第七章 总结：商业自是有胜算	70

第一章 柔性直流输电+AI 应用概述

第一节 AI 是什么？

人工智能（Artificial Intelligence），英文缩写为AI。它是研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的一门新的技术科学。

人工智能是计算机科学的一个分支，它企图了解智能的实质，并生产出一种新的能以人类智能相似的方式做出反应的智能机器，该领域的研究包括机器人、语言识别、图像识别、自然语言处理和专家系统等。人工智能从诞生以来，理论和技术日益成熟，应用领域也不断扩大，可以设想，未来人工智能带来的科技产品，将会是人类智慧的“容器”。人工智能可以对人的意识、思维的信息过程的模拟。

第二节 AI 和柔性直流输电行业有什么关系？

一、AI 给柔性直流输电行业带来的变化分析

人工智能是制造业迈向工业 4.0 和工业互联网时代的重要新兴技术能力。制造业对于人工智能技术的使用正在稳步上升。

在制造业中人工智能不断丰富和迭代自身的分析和决策能力，以适应不断变化的工业环境，帮助企业产生大量结构化和非结构化数据的复杂生产环境中更为快速、准确地梳理参数之间的相关性，提高生产效率，优化设备产品性能，具有自感知、自学习、自执行、自决策、自适应等特征。制造业中的人工智能的本质是实现复杂工业技术、经验、知识的模型化和在线化，从而实现各类创

新的工业智能应用。

人工智能还能为用户提供做出贡献，诸如智能客服、智能推荐、精准营销等场景深入落地到各行各业；企业有意在数字人、虚拟 NFT 等数字化营销内容创作领域布局，以创造差异化的营销体验，升级品牌形象。

二、AI 给柔性直流输电行业带来的冲击分析

从技术的行业应用而言，创新应用场景逐步增多。过去一年，中国人工智能应用保持快速发展的势头，行业应用场景较去年也更加深入和细化。除了相对成熟的应用场景之外，物流、制造、能源、公共事业和农业等在人工智能的应用方面得到快速发展，创新应用场景逐步增多。

未来五年，随着人机交互、机器学习、计算机视觉、语音识别技术达到更为成熟阶段，人工智能应用将呈现出如下发展趋势：从单点技术应用迈向多种人工智能能力融合、从事后分析迈向事前预判和主动执行、从计算智能和感知智能迈向认知智能和决策智能，以知识为主要生产工具的创作型工作（如文字、视频、图像和音频创作，软件开发，IP 孵化等）将实现更大程度的智能化；行业企业也将持续创新，拓展数字孪生与人工智能技术的融合应用，推进在能源电力、制造、建筑等行业发展，构建虚拟工厂、数字孪生电网、数字孪生城市，加强数字与现实世界的连接，优化流程，实现全域管理，决策智能。

人工智能正在加深对实体经济的支持，产生一批成熟应用的场景，包括但不限于人员设备管理、行为预测、供需销售预测等。另外，科学家们越来越多地利用人工智能技术和方法，从数据中建立模型，重点围绕新材料研发等领域加速对前沿科学问题的探究。例如，在材料领域，科学家基于人工智能网络模型和大规模分子数据集，提升分子动力学模拟的极限，以快速、准确的方式预测新材料的特征

三、AI 给柔性直流输电行业带来的变革分析

制造业在人工智能的主要应用场景包括：交互界面智能化、质量管理及推荐系统、维修及生产检测自动化、供应链管理自动化、产品分拣等。IDC 预计，到 2023 年年底，中国 50% 的制造业供应链环节将采用人工智能，从而可以提高 15% 的效率。这将使企业能够更好地预测市场变化、消费趋势和习惯的变化，甚至是气候变化，进而将预测结果与库存管理相联系，帮助企业努力使库存水平贴近市场需求，促进销售，同时降低成本，把控风险。此外，诸如媒体和娱乐、游戏、建筑等行业也在加速元宇宙技术的落地和应用，基于人工智能、物联网、智能边缘等技术，满足市场对于多元化、定制化、共情化的体验，改善运营流程，加速学习、分享、创造，产生更大的经济和社会价值。实现元宇宙构想以及物理与数字世界间的互联，需要创建更多的数字资产/数字人，这对计算

性能与计算资源提出新的要求。目前元宇宙基础设施的搭建已经开始起步，通过构建能够支持应用落地的人工智能算力基础设施，提升基础平台的支撑力度，为将来满足企业和用户在虚拟环境中的应用需求夯实基础。

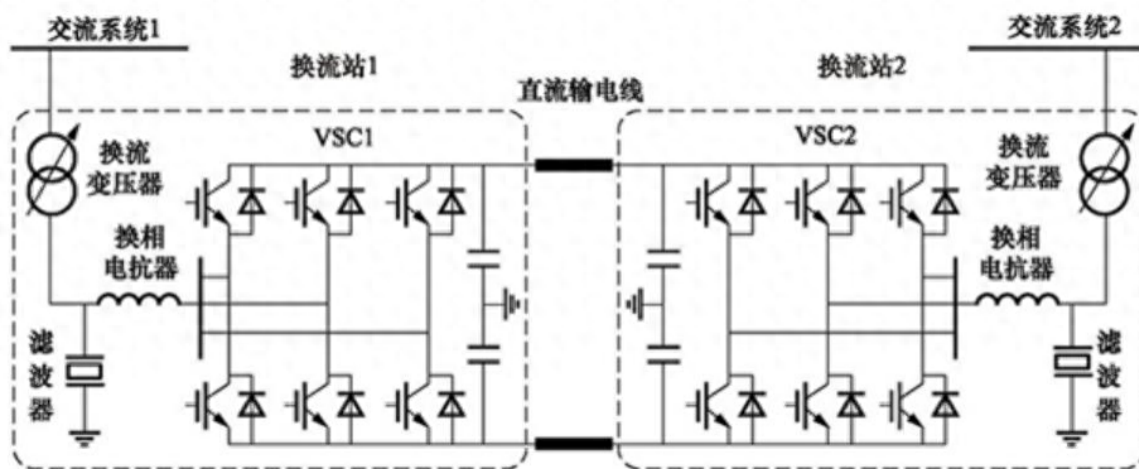
第二章 2023-2028 年柔性直流输电市场前景及趋势预测

第一节 新一代直流输电技术，提升电网输送能力和安全水平

柔性直流输电（VSC-HVDC）是一种继交流输电、常规直流输电后的新型直流输电方式。柔直系统通过两端的换流站实现两个交流网络之间的相互传送，具有控制灵活方便、扩展性好等优点，是提升可再生能源接纳能力、增强电网稳定性和灵活性、支撑电网变革的重要手段。柔性直流输电采用电压源换流器（VSC），是柔性直流输电区别于常规直流输电的关键部分。电压源换流器在桥臂中用可控电力电子管（IGBT、IGCT）取代传统直流的晶闸管，通过可关断器件和脉宽调制技术，精确控制换流站输出的电压幅值和相位，有效提升电网输送能力和安全稳定水平。

换流站是柔性直流输电系统最主要的部分。根据运行状态可以分为整流站和逆变站，运行原理是将交流电转换成直流电从整流站送出，在受电端将直流电再转为交流电，最终形成电网的“接入阀门”和“电源”，可以有效地控制其上通过的电能，隔离电网故障的扩散，而且还能根据电网需求快速、灵活、可调地发出或者吸收一部分能量，从而优化电网的潮流分布、增强电网稳定性、提升电网的智能化和可控性。

图2：柔性直流输电系统原理示意图



资料来源：银河电气，民生证券研究院

柔性直流系统构成的核心设备包括柔性直流换流阀、电抗器、换流变压器、高压直流断路器、以及输电控制保护系统等。目前我国绝大部分柔性直流输电工程均采用半桥式子模块的模块化多电平换流器拓扑结构，单个换流器一般由三个相单元即六个桥臂组成，每个桥臂由阀组件及桥臂电抗器组成，每个相单元由两个桥臂构成，两个桥臂的连接点通过柔直变压器与交流系统联接。

柔性直流换流阀：根据观研天下的统计，IGBT 为最核心零部件，在换流阀总价值量中占比 40%-50%，其次为电容器，占比 25%-30%，其他为旁路开关、阀控系统、阀冷却系统、结构件、绝缘件等。与传统直流输电工程所用的半控晶闸管不同，柔性直流工程中的换流阀通常采用全控型的 IGBT，通过极控、阀控以及子模块级控制实现各种功能。其中，极控系统根据直流系统控制目标生产调制波指令；阀控系统接收指令后进行解析与下达，每个子模块的投切指令；子模块级控制系统控制 IGBT 器件的开通和关断，实现直流电容的投入或切除，拟合形成不同幅度和相角的交流电压。

电抗器：电抗器主要用于换流阀的直流侧，将叠加在直流电流上的交流分量限定在某一规定值，从而保持整流电流的连续性，减小电流脉动值，改善输入功率因数，并抑制变流装置产生的谐波。柔直输电中使用的桥臂电抗器主要起到抑制桥臂间环流和抑制短路时上升过快的桥臂故障电流的作用，其在运行中需承受电流幅值相当的交直流复合大电流，因此既要考虑基于电感分布的交流电流分配特性，也要考虑基于电阻分布的直流电流分配特性。

换流变压器：换流变压器能够将交流系统的电能送到换流阀，也可以从换流阀接收电能送到交流系统的变压器设备。应用于柔直输电的变压器可采用单极/双极等多种接线方式，在电压等级较高、传输功率较大的情况下为了避免受变压器容量的限制，可以采用柔直变压器并联或者柔直换流器串联的方式将传输功率分配给两组或多组变压器，实现在交流系统连接点与一个或多个电压源换流器单元之间传输电能。

高压直流断路器：高压直流断路器作为直流换电站的核心电气保护组件，对保障直流系统安全、经济、灵活运行意义重大，可以在发生故障时迅速断开电路，能够有效隔离故障区域和故障点，实现线路的安全并离网。这一功能也是直流输电单条线路向多端的直流电网，乃至更为庞杂的直流系统的升级发展的关键。

柔性直流输电控制保护系统：直流控保系统为直流输电工程换流站提供起控与保护作用。换流阀接收直流控保系统的指令，通过 IGBT 驱动并转换为开关信号控制 IGBT 的导通关断，实现了两个换流站之间的直流电能的可控传输，独立保护每一重的测量回路、电源回路、出口跳闸回路及通信接口回路；同时，还可以根据需求提供电网的补偿支撑，通过网络安全监测装置采集换流站监控层的服务器、工作站、网络设备和安防设备自身感知的安全数据及网络安全事件，实现对网络安全事件的本地监视和管理。

第二节 柔性直流是解决新能源消纳、长距离输送及电网安全的重要途径

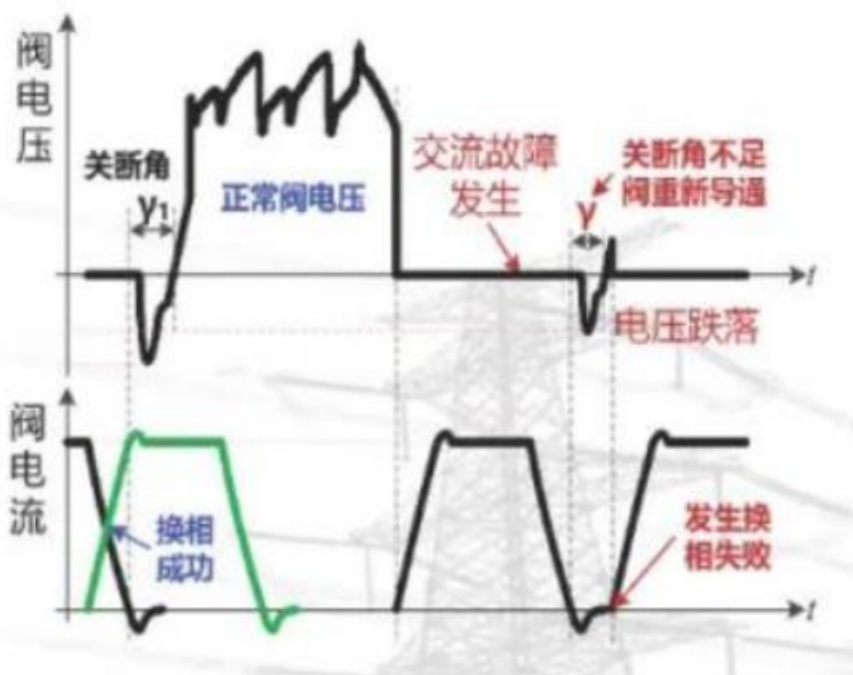
一、长距离输送带来新挑战，柔性直流优势凸显

风电、光伏发电占比呈现上升趋势，新能源发电已成新型电力系统的主动脉。根据 IEA 在《WorldEnergyOutlook2022》中假设 2035 年 OECD 国家实现电力净零，2040 年全球实现电力净零的情景。为了达到这一目标，到 2030 年，风能和太阳能占全球发电量的比例需要从 2021 年的 10% 增加到 41%。煤炭发电量需要下降 54%，天然气发电量需要下降 24%。而到 2040 年，电力行业需要实现净零排放的目标，全球必须逐步淘汰煤电，仅存少量的天然气发电。

集中式光伏和海上风电的长距离输送带来新挑战。由于集中式光伏需要建设在人烟稀少地貌广阔且阳光资源充足的位置，国内大部分光伏基地集中于西北地区（新疆、甘肃、宁夏等），然而我国的经济重心在东南沿海地区，其用电需求远高于人烟稀少的西北地区，供需不匹配导致“弃光”现象严重。为了解决消纳问题，需要通过特高压长距离输送将电力送往东部的符合地区。海上风电由于远海的风能资源丰富和风电场规模大型化对作业空间的刚性要求，深远海化将是未来趋势，更长的输电距离对于传输过程中的安全稳定要求将会更严格。随着双碳战略的实施，西部大规模新能源仍需通过更多高压直流输送到东部负荷中心，直流落点将更加密集，多回直流换相失败引发的功率冲击将进一步增大。同时，东部新能源占比也日益增大，交流系统惯性和抗扰动能力进一步下降，多直流换相失败影响范围将更大，电网或面临更大的系统风险。

换相失败是长距离常规直流输电最常见的故障之一。换相失败的主要原因是交流系统故障使得逆变侧换流母线电压下降，常规直流输电采用电网换相换流器 (Line-Commutated converter, LCC)，由晶闸管串联构成，只能控制开通，须借助电网提供反向电压才能关断，当交流故障引起电压跌落时，致反向电压不足又重新导通，发生换相失败。换相失败发生后，换流器中同一相的另一个桥臂触发开通后则会导致上下两个桥臂同时导通形成直流短路，导致直流功率跌落至零。单条直流发生换相失败后，随着交流故障的清除，一般在 200ms 内恢复功率输送并稳定运行不会对电网造成危害。多馈入直流系统中单一交流故障就能引发多回直流同时换相失败，故障期间多个换流站同时吸收大量无功，拉低受端电网交流电压，可引发区域性电压凹陷甚至失稳，进而影响跨区域电网间的联络。

图12：换相失败前后电压电流波形



资料来源：国网智能电网研究院，民生证券研究院

柔性直流输电相较于常规直流输电有多项优势，不存在换相失败问题。（1）无需无功补偿，占地面积小：柔性直流输电采用可关断器件，控制系统可以随时关断换流阀，无需交流侧提供换相电流和反向电压。得益于完整控制，柔性直流输电在交流侧无需大量无功支撑，无需常规直流输电交流滤波器场的用地，大大减少了征地范围。（2）无换相失败：常规直流输电并网时难以避免换相失败现象，会对受端电网系统安全稳定带来一定冲击。柔性直流输电技术采用可关断器件，开通关断时间可控，与电流的方向无关，从原理上避免了换相失败问题，提升电网稳定性。（3）适用于多端系统：柔性直流输电系统的电流可双向流动，便于构建多端直流输电系统。（4）无源网络供电：常规直流系统依靠电网完成换相，需要较强的有源交流系统支撑。柔性直流输电技术能实现自换相，无需外加换相电压，因此受端系统可以是无源网络，为偏远地区供电提供技术支持。

二、核心零部件成本高，国产替代降本空间大

相比交流输电，柔直最大的问题为经济性不强，核心零部件成本高。核心零部件 IGBT 在换流阀总价值量中占比 40%-50%，90%以上的 IGBT 器件依赖进口且价格较高，导致建设成本高昂。在蔡晖所著的《柔性直流输电技术在江苏电网的应用研究》中以扩建南京西环网系的 500kV 秋藤变江南侧主变，新建秋藤—绿博园 3 回 220kV 线路为例，调研了柔性直流输电技术在国内电网中现有工程

的运行现状，最终结果显示，柔性直流相比常规交流更具有显著的技术优势，可以满足南京西环网饱和负荷的需求，同时通过控制策略的调整，不仅不会产生充电功率等无功需求，还可以根据需求向系统提供无功支撑，但从投资上比交流方案高出约 8.85 亿元的成本，在经济性上具有一定的劣势。

国产替代是降本关键。由于 IGBT 器件依赖进口且价格高昂，降本需求迫在眉睫，推动 IGBT 自供能力在不断提升，未来柔直技术有望进一步经济化进而实现规模化应用，带动柔直其他核心装置需求提升。目前来看，国内相关企业国电南瑞和时代电气大力投入研发国产 IGBT 并取得优秀的结果，国电南瑞自主研发的 4500V/3000AIGBT 在张北延庆换流站一次性挂网成功，实现 650V-4500V 全电压等级 IGBT 器件自主研发；时代电气在新能源发电领域的风电变流器产品交付进度加快，在央企发电集团年度集采/框采中大部分实现入围，推动国产替代进程。

第三节 柔直应用场景多样，海内外已有多项目投运

一、应用场景多样，发展前景广阔

海内外需求共振，发展前景广阔。海外方面，根据饶宏所著论文《柔性直流输电技术的工程应用和发展展望》中的预测，到 2033 年国外新增柔直输电工程项目将超过 50 个，新增容量超 60GW，欧洲已提出“超级电网”计划旨在提高欧洲电网对于可再生能源的消纳与利用；国内方面，风光装机在双碳目标的催化下增长迅速，预计到 2030 年总装机将达到 12TW。目前，柔性直流输电技术已在风电送出、电网互联、无源网络供电和远距离大容量输电等场景取得了充分发展和工程应用，其输电能力已经达到特高压等级，南方电网已明确提出“新建直流受端以柔性直流为主，存量直流逐步实施柔性直流改造”，由此可见，柔性直流输电作为新能源并网消纳、电网互联和远距离输电的重要方式，发展前景十分广阔。

柔性直流输电技术主要在陆上输电、海上送出和直流背靠背电网柔直互联等方面发挥重要作用。（1）陆上：柔性直流输电技术能够实现长距离输电，实现偏远地区的供电。（2）远海风电：高压交流输电技术受海缆电容效应限制，长距离交流电缆充电功率过大会引起电压升高等问题，不能满足大容量、远距离海上风电输送的需求。柔性直流输电无充电功率限制，可有效降低风电间歇性对电网稳定性的影响，可为海上风电场提供稳定的并网电压，系统运行方式调控灵活，是解决远海风电并网消纳的理想方案。（3）电网互联：我国能源与负荷分布不均衡，城市电网常面临本地电源支撑不足、建设难度大成本高等问题，柔性直流技术的灵活性和快速的控制能力适用于城市电网的柔性分区互联，可改变原有分区间交流弱互联的局面，增强分区间的互济，提高区域供电的可靠性及灵活性。

我国历史已有多个柔性直流项目。2022年3月22日，国家发改委国家能源局印发《“十四五”现代能源体系规划》，提出“完善区域电网主网架结构，推动电网之间柔性可控互联，构建规模合理、分层分区、安全可靠的电力系统，提升电网适应新能源的动态稳定水平。科学推进新能源电力跨省跨区输送，稳步推广柔性直流输电”。至今我国已有多个柔性直流工程建成投产，送电能力及电压等级均逐步提升。

二、场景一：陆上柔直

昆柳龙直流工程：全球电压等级最高、输送容量最大的多端混合直流工程。乌东德昆柳龙特高压多端柔直示范工程于2020年底投产，由南方电网投资建设，是全球首个特高压柔性直流工程，电压等级达到 ± 800 千伏（此前全球最高柔直电压等级为 ± 550 千伏），总投资额242.49亿元。该项目将乌东德水电站发出的电送至广东和广西的用电负荷中心，首创多端混合直流输电技术，送电端采用常规直流，广东和广西2个受电端采用柔性直流，每年约送电330亿度，在有效解决云南水电消纳问题的同时，为粤港澳大湾区经济发展用电需求奠定坚实基础。此外，该工程带动国内相关装备制造业的高端化和设备的国产化，工程包括大容量柔性直流换流阀、柔性直流变压器、桥臂电抗器在内的主要设备自主化率100%，且将南方电网与中车共同研发的柔性直流IGBT成功应用到工程中，打破了国外少数厂家的垄断。白鹤滩—江苏工程投产，保障江浙地区电力供应。2022年7月，白鹤滩—江苏工程竣工投产，该项目额定电压 ± 800 千伏，额定输送容量800万千瓦，总投资307亿元，线路全长2080公里，起于四川省凉山州布拖县，止于江苏省苏州常熟市，途经四川、重庆、湖北、安徽、江苏5省和直辖市，该工程是全球首个混合级联特高压直流工程，在建设首次研发应用常规直流+柔性直流的混合级联特高压直流输电技术，作为白鹤滩—江苏工程的终点站，虞城换流站低端部分采用了柔性直流技术，高端部分则使用常规直流技术，解决了LCC直流存在的换相失败、不能接入弱交流系统等问题，可有效提升电网的安全稳定运行能力。

三、场景二：海风外送柔直

近海资源日趋紧张，柔直技术为远海风电保驾护航。根据李钢，田杰等所著《远海风电送出技术应用现状及发展趋势》，中国海上风电以离岸距离小于50km、装机容量20万~40万kW的近海项目为主，受到生态环境保护、交通航道占用、已有资源开发等因素影响，近海风电项目的站址资源日趋紧张，而离岸距离大于70km的远海风电资源更加丰富稳定。海风于较早发展于欧洲，项目大多数集中在德国、荷兰和瑞典，柔直输电方案技术较为成熟，目前欧洲已有10条在运远海风电柔直输电工程，国内远海风送出近年来开始发展，目前也已经开展了部分柔性直流输电技术应用于海上风电的项目建设，“十四五”规划中指出推进一批百万千瓦级的重点项目集中连片开发，重点建设山东半岛、长三角、闽南、粤东和北部湾等千万千瓦级海上风电基地开发建设。目前远海风电直流送出主要采用柔直送出技术，基于模块化多电平换流器（modularmultilevelconverter, MMC）的柔直输电技术具有损耗低，谐波含量小、可靠性高等优势，适合远海风电送出。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/448023057067006071>