

# 柔性直流输电技术在电力线路中的应用

陈 思

乌鲁木齐鸿电智联电力设计有限公司 新疆乌鲁木齐 830000

**摘 要：**柔性直流输电技术（Flexible DC Transmission, HVDC）是现代电力传输领域中的重要技术之一。随着人们对电力需求越来越大，电力系统结构也越来越复杂，常规交流输电方式面临着长距离，大容量输电的许多挑战。柔性直流输电技术具有传输距离远，损耗小和控制灵活的特点，是解决上述问题的一个重要途径。在我国，柔性直流输电技术已经在多个关键工程项目中得到了实际应用，例如±800千伏特高压直流输电工程和海上风电并网项目，对电力系统稳定运行，能源高效利用等方面提供强有力的支持，基于此，文章展开了探讨。

**关键词：**柔性直流；输电技术；电力线路；技术应用

电力系统是否稳定、可靠，是确保社会能否正常运转的一个重要前提条件。传统交流输电技术尽管在近距离，小容量等方面表现优异，但是在长距离，大容量等方面电力损耗及系统稳定性尤为严重。柔性直流输电技术将电能转换成高压直流电输送，在显著降低电力损耗的同时也显著提升了系统稳定性与可靠性。柔性直流输电系统主要包括换流站、直流线路、控制保护系统，换流站由整流器与逆变器两部分组成，核心器件是IGBT（绝缘栅双极型晶体管等），它可以实现电能的高效转换。通常，直流线路会选择使用高压电缆或架空线路，这样不仅传输效率更高，而且对环境的影响也相对较小。控制保护系统负责对整个输电系统进行全面的监视和防护，以确保系统运行的安全性和可靠性。

## 一、柔性直流输电技术概述

### （一）技术定义与基本原理

柔性直流输电技术是利用电力电子技术实现高效、灵活传输电能的先进输电方式。它的核心原理就是利用可控的电力电子器件把交流电变成直流电，经过直流线路长距离输送，然后在输电终端把直流电变成交流电。与传统高压直流输电技术相比较，柔性直流输电技术电力转换时更加灵活可控，可以实现更加精准的电压，电流调节，进而提升电能传输稳定性与可靠性。柔性直流输电系统通常采用模块化多电平换流器（Modular Multilevel Converter, MMC），这种换流器结构能够显著降低换流损耗，提高系统的整体效率。另外，柔性直流输电系统具有较好的故障自愈能力及快速响应能力，能够在出现故障时快速将故障部位隔离开来，确保系统连

续稳定地运行。柔性直流输电技术在远距离大容量输电，城市电网升级以及可再生能源并网方面具有广泛的应用前景，它的应用可显著提高电力系统输电能力与效率，促进能源结构优化与可持续发展。通过不断地技术创新与突破，电力系统柔性直流输电技术将会有更大的发展前景，从而为全球能源互联网的实现提供了坚实的技术保障。

### （二）发展历史与现状

柔性直流输电技术的历史可以追溯到20世纪90年代，那时电力电子技术的飞速发展为其奠定了坚实的基础。最初的柔性直流输电系统主要使用晶闸管作为换流器，但由于其控制能力受限，很难达到高效和灵活输电的标准。自21世纪初，随着绝缘栅双极型晶体管（IGBT）和模块化多电平换流器（MMC）技术逐渐成熟，柔性直流输电技术也实现了显著的进步和发展。MMC结构具有模块化设计、高效能等特点，是现代柔性直流输电系统中的核心技术。在2010年，德国成功地启动了全球首个大规模采用MMC技术的柔性直流输电项目，即Trans Bay Cable项目，这标志着柔性直流输电技术进入了一个全新的应用阶段。

我国柔性直流输电技术发展成效显著，尤其是国家电网公司牵头建设的张北柔性直流电网实验示范项目已于2020年竣工投运，成为世界上第一个实现四端柔性直流联网的工程，系统电压级别±500kV，输送容量达到4500MW。另外，由于世界范围内可再生能源的需求越来越大，柔性直流输电技术也被越来越多地应用于风电和光伏。如欧洲北海海上风电工程采用柔性直流输

电技术向内陆电网输送海上风电，大大提高电力传输效率与稳定性。至今，全球已有众多国家和地区实施了柔性直流输电项目，这些项目具有巨大的应用潜力。预测在未来几年里，柔性直流输电市场的增长速度将超过每年15%，成为促进电力系统革新，能源结构转变的主要动力。

### （三）技术特点

柔性直流输电技术拥有众多引人注目的技术属性，这使得它在当代电力系统中展现出卓越的表现。该系统最显著的优势在于其高效的工作性能。通过采用模块化多电平换流器（MMC）的设计，柔性直流输电系统能有效地减少换流损失，从而提升系统整体的工作效率，并在长距离电力传输过程中实现电能损失的最小化。柔性直流输电技术的另一个显著优点是其灵活性，这种技术可以在电网中迅速调整电压和功率，适应各种负荷的变动，并确保电网的频率和电压保持稳定。另外，柔性直流输电系统控制性能突出，借助先进电力电子器件与控制算法可以实现电流与电压精确控制，显著增强电网运行的稳定性与安全性。

柔性直流输电技术也具有很好的扩展性、模块化设计等特点，使之可以便于系统的扩展与维护，以减少工程建设与运行的复杂程度。这种技术故障自愈能力也十分突出，当出现故障后，系统能快速地对故障部位进行识别与隔离，保证电网其他部位的正常工作，大大提高电力系统的可靠性与抗扰能力。柔性直流输电技术也显示了较强的环境适应能力，能适应各类复杂地理及气候条件的变化，适合海上风电，远距离输电等众多应用场景。另外，该项技术静、动态性能优越，能在短期内实现负荷调整及动态响应，保证电网多种运行工况稳定。总之，柔性直流输电技术具有高效性，灵活性，可靠性以及环境适应性等特点，是现代电力系统必不可少的一项重要技术。

## 二、柔性直流输电技术的关键技术

### （一）电力电子技术

电力电子技术是柔性直流输电系统的关键组成部分，它的核心是高压直流转换与逆变技术。高压直流转换技术涵盖了高压直流输电（HVDC）系统中的换流器部分，这些换流器通常是基于电压源换流器（VSC）的设计结构。VSC具备双向功率传输的能力，并利用脉宽调制（PWM）来精确控制输出电压的振幅和相位变化。PWM技术是利用调制载波频率来控制IGBT（绝缘栅双

极型晶体管等）或者GTO（门极关断晶闸管）开关的状态。IGBT广泛应用于VSC，主要是因为它高频运行时开关损耗小、效率高。

在控制策略里，空间矢量脉宽调制（SVPWM）被视为一种前沿技术，它通过将三相静态坐标系中的电流转化为两相旋转坐标系中的电流，从而达到对有功和无功功率进行独立调控的目的。具体而言，有功功率P与无功功率Q可由下列表达式推算：

$$P = V_d \cdot I_d$$

$$Q = V_q \cdot I_q$$

式中， $V_d$ 和 $V_q$ 分别是直轴和交轴电压分量， $I_d$ 和 $I_q$ 是对应的电流分量。

在逆变技术的应用中，模块化多电平换流器（MMC）因其较低的谐波成分和出色的扩展能力而得到了广泛的使用。MMC输出电压波形近似为正弦波以减小滤波器设计难度。系统保护机制、直流故障检测及隔离技术、基于差动保护与纵联保护相结合的快速故障定位技术保证系统可靠稳定运行。

### （二）控制与保护技术

在柔性直流输电系统中，控制和保护技术起着至关重要的作用，通过采用先进的控制策略和可靠的保护机制，可以确保系统的稳定性和安全性。控制策略有电流控制，功率控制，电压控制等。在电流控制方面，采用空间矢量脉宽调制（SVPWM）技术。通过将三相静止坐标系中的电流转化为两相旋转坐标系中的电流，能够精确地控制直轴电流（ $I_d$ ）和交轴电流（ $I_q$ ），进而有效地调整系统的有功和无功功率。该控制方式是通过对比变换器输出电压矢量进行调整来达到电力系统稳定运行的目的。

在保护技术上，在柔性直流输电系统中应用直流故障检测及隔离技术并使用快速故障检测设备对直流线路电流、电压波动情况进行实时监控，采用差动保护与纵联保护技术实现了快速故障定位与隔离。差动保护利用对比线路两端电流差值来判断故障发生与否，纵联保护利用通信技术向邻近换流站传输故障信息以达到迅速隔离故障目的。

## 三、柔性直流输电技术在电力线路中的应用

### （一）远距离大容量输电

柔性直流输电技术（VSC-HVDC）在进行长距离、大容量的电力传输时表现出了明显的优越性，能够达到更高的效率、稳定性和成本效益。传统的交流输电在长

距离传输中面临着电压跌落、相位偏移和较高的能量损耗等问题，然而，VSC-HVDC系统通过采用电压源换流器，能稳定传输时电压、电流、明显降低传输损耗。以 $\pm 800$ 千伏的直流输电线路为研究对象，它的传输范围可以扩展到数千公里，传输能力可以达到数千兆瓦，并且传输效率高达95%以上，这远远超过了传统的交流输电系统。柔性直流输电技术不仅拥有出色的控制灵活性，还能独立地调整无功功率，进而改善电力系统的运行状况，并增强电网的稳定性与可靠性。另外，VSC-HVDC技术对于长距离输电抗干扰能力极强，且不受线路电感、电容等因素影响，非常适合复杂地形、跨海输电等场合。在最近的几年中，中国在柔性直流输电技术上实现了显著的进展，如在西电东送项目中所采纳的多端柔性直流输电方案，确保了在不同的电压级别和多个换流站间实现了高效的电力传递，显著提高远距离输电技术水平，扩大应用范围。

## （二）城市电网和局部电网的互联

柔性直流输电技术（VSC-HVDC）在连接城市电网与部分电网时，展现出了极大的潜在价值和优越性，它能够有力地弥补传统电网在灵活性和稳定性上的短板。城市电网中负荷密集、变化快，常规交流输电方式很难对负荷变化做出迅速反应、保持电网平稳运行，VSC-HVDC技术控制灵活、反应迅速。以 $\pm 320$ 千伏的VSC-HVDC电力系统为研究对象，该系统能够高效地传输和调整数百兆瓦级的电力，以适应城市电网中不断变化和复杂的负荷需求。采用柔性直流输电方式，电网运营商能够准确地控制电流大小及流向，快速调节电网运行状况，降低电力损失并提高电网可靠性。另外，VSC-HVDC技术还可以实现不同频率、电压等级电网间的无缝连接以及各种电力资源的有效集成与调度。北京市南郊的柔性直流输电项目是一个标志性的实例，该项目成功地实现了市区电网与其周围区域电网的高效连接，从而提高了整个城市电网的供电可靠性和灵活性。利用VSC-HVDC技术不但可以实现电网灵活调度而且可以显著减小短路电流、降低设备负荷及损耗、提高电网整体运行效率。

## （三）可再生能源的并网

柔性直流输电技术（VSC-HVDC）在将可再生能源并入电网的过程中表现出了显著的优越性，已经成为现代电力系统中不可或缺的技术工具。像风能和太阳能这

样的可再生能源，它们的发电特性是不稳定和高度波动的，这使得传统的交流输电方式难以应对这些不稳定因素，从而影响了电网的稳定性。VSC-HVDC技术具有控制灵活性高、响应迅速等特点，可以有效地平滑可再生能源发电波动并保证电力输出平稳。以风电场并入电网为例子，使用 $\pm 320$ 千伏的VSC-HVDC系统，能够实现数百兆瓦的电力高效传输，将偏远地区的风电场与主电网连接起来，本实用新型有效降低了能量损失，为风力波动提供了可靠电压支撑。由于VSC-HVDC系统双向电力传输能力强，电网能够在必要时快速对风电场进行电力调度，而当电力富余时则存储或者输送给其他地区。另外VSC-HVDC技术可以自主调节无功功率、优化电力质量、降低谐波与电压波动、提高电网稳定性与可靠性。江苏如东海上风电工程是一成功范例，它通过柔性直流输电技术实现了海上风电场用电与江苏电网的有效融合，既满足地区电力需求又推进绿色能源。

## 结束语

伴随着科学技术的持续进步，柔性直流输电技术已经成为电力线路的一个重要环节，它在提升电力系统的稳定性和优化能源分布等方面都发挥着重要作用、减少能源损耗，推动可再生能源高效利用，显示了明显优势。这一技术不断地成熟和革新，在促进电力行业不断发展的同时，还为人民群众更好地生活提供了稳固的能源保障。

## 参考文献

- [1] 张和阳. 模块化多电平换流器在柔性直流输电技术中的应用[J]. 中阿科技论坛(中英文), 2021(9): 104-107.
- [2] 王斌. 柔性直流输电技术对大电网弱交流断面输电能力的影响[J]. 无线互联科技, 2021, 18(11): 110-111.
- [3] 蔡晖, 彭竹弈, 祁万春, 等. 背靠背柔性直流输电技术在中心城区电网中的应用研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(2): 79-84.
- [4] 刘耀, 吴佳玮, 肖晋宇, 等. 有源型柔性直流输电技术在全球能源互联网背景下的应用研究[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(2): 107-116.
- [5] 孔冠荀. 柔性直流输电系统显式模型预测低复杂度控制技术研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2019.