

柔性直流输电技术现状及前瞻趋势探究

郭玥 杨洋 雷丝雨

南充职业技术学院，四川南充，637131；

摘要：通过探讨柔性直流输电技术（HVDC Light）的当前状态和未来趋势，关注其在全球能源转型中的关键作用。首先，通过与传统高压直流输电技术（LCC-HVDC）进行对比，总结出其在电力传输效率及灵活性上的优势；随后分析了国内外在 HVDC Light 技术上的最新进展，包括技术创新和市场应用；最后，讨论了 HVDC Light 技术面临的挑战，以及未来几年内可能的发展方向，包括技术成熟度、成本效益和全球能源互联的可能性。

关键词：柔性直流输电；HVDC Light；可再生能源；能源互联；孤岛系统供电

DOI: 10.69979/3041-0673.25.07.027

柔性直流输电技术即 HVDC Light（High Voltage Direct Current Light）技术，采用电压源换流器（Voltage Source Converters, VSCs）和脉宽调制（Pulse Width Modulation, PWM）技术传输直流电能。与传统基于线性换流器的高压直流输电技术（Line Commutated Converter HVDC, LCC-HVDC）相比较而言，其具备更高的系统灵活性和控制精确度^[1]。HVDC Light 技术可以通过促进可再生能源集成、增强电网稳定性、提高传输效率、支持跨国电力交易、服务微电网与孤岛系统以及推动智能电网建设，已经成为全球电力系统中不可或缺的创新力量，并且在全球能源转型中日益凸显出其战略价值。

1 HVDC Light 技术与传统 HVDC 技术对比

HVDC Light 使用电压源型换流器，其主要特点是内

含可关断型电力电子器件，比如门极可关断晶闸管（Gate Turn-off Thyristor, GTO）、绝缘栅双极晶体管（Insulate-Gate Bipolar Transistor, IGBT）或集成门极换流晶闸管（Integrated Gate-Commutated Thyristor, IGCT）。

VSC 既能单独调节有功功率，又可以单独调节无功功率，也就是说 VSC 在调整电力系统电压时做到不更改有功功率流，或在不改变电压的情况下控制有功功率流。这种功用可以极好地提高电力系统稳定性和灵活度。

HVDC Light 与 LCC-HVDC 的主要区别见表 1。HVDC Light 技术以其更高的灵活性、更好的控制性能和对可再生能源的适应性，在许多现代电力系统应用中展现出优势。然而，传统 HVDC 技术在特定条件下，如超长距离传输，仍保持其经济性和技术上的优势。两者的选择取决于具体的项目需求和经济考量。

表 1 HVDC Light 与 LCC-HVDC 的区别

比较维度	LCC-HVDC	HVDC Light
技术基础	基于线性换流器，用不可关断晶闸管，靠电网电压过零点自然换相	使用可关断半导体电力电子器件，利用 PWM 技术进行控制
功率控制	仅能控制有功功率 P，但无功功率 Q 控制受到限制	可独立控制有功和无功功率，可使功率因数达到 1 ^[2]
运行特性	因依赖两端交流系统提供换相电压，无源电力网络中不可用	可在无源网络运行，不需大交流系统支撑，适于偏远地区或岛屿供电
谐波处理	会产生较多谐波，需大型滤波器和无功补偿装置	由于 PWM 技术产生谐波较少，所需滤波器容量较小
故障处理	故障期间可能会经历换相失败，导致功率中断，恢复过程较长	VSC 可快速响应故障，提供短路电流和无功支撑，利于系统恢复
操作性	操作灵活性较低，改变功率方向需复杂的操作步骤	更灵活，快速改变功率，适合可再生能源接入
经济性	在超长距离和极高容量传输中，因其较高传输效率和较低线损，可能更具成本效益	初期投资更高，但维护成本较低，尤其在短距离和中等容量的传输中更具经济性

从表 1 可以看出，HVDC Light 相较于传统的交流输电和基于线性换流器的传统高压直流输电，在电力传输效率和灵活性上展现出了显著的优势。

在电力传输效率方面：因直流电无感抗和容抗损耗，

且直流电缆更细，降低材料成本，适合低损耗长距离传输；不受交流充电电流的干扰，更适于海底电能输送；电力电子器件可以减少谐波失真，优化电能质量。

在灵活性方面：VSC 可以实现有功和无功功率独立

调整,加强电力系统稳定性以及响应速度;电力电子器件确保瞬时功率支持,平衡可再生能源波动,实现快速响应;无外电源即可启动,实现加速电网恢复,具有黑启动能力^[2]:可连接异步电网,隔绝故障,增强独立性和安全性,实现非同步电网互联;适合微电网与分布式能源系统,并且灵活应对局部需求变化^[3]。

故,HVDC Light 技术凭借高效传输与灵活控制特性,对现代电力系统至关重要,尤其在可再生能源整合、电网稳定及资源优化中发挥关键作用。

2 HVDC Light 技术国内外发展现状

2.1 国内 HVDC Light 技术研究、开发和应用现状

国内在 HVDC Light 技术上投入了大量的研发资源,专注于提高系统的效率、可靠性和经济性。包括开发新型的电力电子器件材料,如碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN);中国通信标准化协会(CCSA)等组织参与制定了多项与 HVDC Light 技术相关的行业标准,例如《通信用 240 V 直流供电系统》(YD/T 2378-2011),表明中国在推动技术标准化和规范化方面走在了前列;另外,国内学者在 HVDC Light 技术的多个领域发表了大量研究论文,涉及系统建模、控制策略、降阶模型等,为该技术提供了坚实的理论和实践支持。

应用实例方面,2006 年国家电网公司启动了柔性直流输电技术的相关研究,并于 2011 年 7 月在上海建成了亚洲首条柔性直流输电示范工程^[4]。2014 投运的舟山项目是中国首个多端柔性直流输电工程,具有完全自主知识产权,连接了舟山群岛的多个岛屿,总容量超过 2000 MW。为全世界第一个五端柔性直流输电工程^[5]。2020 年投产的昆柳龙直流工程世界上第一次提出特高压多端柔性直流技术,电压达到 ± 800 千伏^[6]。

HVDC Light 技术被用于城市配电系统,以提高供电的可靠性和效率,尤其是在人口密集和负荷需求高的城市中心;利用 HVDC Light 技术将分布式能源,如太阳能光伏和小型风力发电机,接入到电网中,提高可再生能源的渗透率和电网的灵活性。2022 年,日立能源的 HVDC Light 技术成功应用于张-北工程,为 2022 年的北京冬季奥运会提供了可靠、稳定、清洁的电力能源。除此之外,Stak Pak IGBT 器件也被应用于南方电网和国家电网参与且接入海上风电的吉瓦级 HVDC Light 工程^[7]。

国内还利用 HVDC Light 技术助于“智能电网”性

能的完善^[9],加强与周边国家的电力互连,促进跨国电力交易,提高能源的安全性和经济性。体现了国家在推动电力系统创新和能源转型方面的决心,同时也为全球电力行业树立了典范。

2.2 国外 HVDC Light 技术研究、开发和应用现状

赫尔辛基至塔林的 Estlink 2 项目全长 144 公里,容量为 680 MW,于 2010 年投入使用,它提高了北欧和波罗的海国家之间的电力交换能力^[10]。

分别于 2010 年、2013 年、2019 年正式运营的 BorWin1、BorWin2 和 BorWin32 海上风电场项目连接了北海的海上风电场与德国大陆电网^[11]。另外,DolWin1 工程、DolWin2 工程、HelWin1 工程、HelWin2 工程、SylWin1 工程亦陆续投入运营。通过使用 HVDC Light 技术,这些项目能够将远离海岸的海上风电高效地输送到陆地上的负载中心^[12]。

英国至丹麦的 Viking Link 项目是一条海底电缆,连接英国和丹麦,全长 767 公里,容量为 1400 MW。该项目将使用 HVDC Light 技术,成为世界上最长的海底直流电缆之一,于 2023 年完工^[13]。

2022 年开工的美国 New York Power Authority's Champlain Hudson Power Express 项目将使用 HVDC Light 技术利用一条长达 330 英里的海底和地下电缆从加拿大进口清洁电力,穿越纽约州,容量为 1000 MW。预计 2025 年全面投入运营^[10]。

以上案例展示了 HVDC Light 技术在全球电力系统中的广泛应用,无论是海上风电场的连接、跨国电力交易、微电网的供电,还是长距离、大容量的电力传输,HVDC Light 都展现出了其卓越的技术优势和应用潜力。

3 HVDC Light 技术所面临的挑战及发展趋势

作为一种先进的 HVDC 技术,其在电力系统中优势明显,但亦面临着经济和技术上的挑战。比如:尽管长期运营成本较低,由于 VSC 和电力电子组件昂贵,初期投资高;另外,直流短路故障复杂,需先进清除技术、虽谐波少,仍需滤波与抑制措施;由于造成了系统控制复杂性,需精密控制策略确保稳定运行,增加了设计与操作难度;相较于传统 HVDC,长期可靠性及维护经验尚待积累。

HVDC Light 技术未来趋势与展望紧密关联着全球电力系统的发展方向,包括电力网络智能化建设与改造、

可再生能源集成、电力电子器件研发、能源互联等。关于 HVDC Light 技术未来展望如下:

技术革新方面:碳化硅和氮化镓器件能够提升能量转换效率以及容量;模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 可增强电力系统的灵活性^[4];人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 技术与大数据技术也将促进电力系统智能化运营、维护。

可再生能源整合方面:需继续促进大规模风电、太阳能并网,实现微电网与分布式能源高效互联^[15]。

电网建设方面:推动智能电网升级,优化能源分配,增强电网弹性,最终构建跨国能源互联网。

经济与环境方面:降低成本提升竞争力,助力可持续发展目标,减少碳排放,提高能源效率。

政策与规范方面:国家与国际组织需更好的政策支持,制定规范化的行业标准确保其兼容性与安全性。

4 结论

随着全世界对高效、清洁能源需求日益突出, HVDC Light 技术正逐渐成为连接可再生能源发电基地与消费中心的关键纽带,尤其是在欧洲、亚洲和北美的大型项目中得到了广泛应用。HVDC Light 技术未来将深化技术革新,加速可再生能源整合,推进电网现代化,强化经济与环境价值,并在政策与规范支持下拓展全球应用,预期在清洁、高效能源传输领域发挥核心作用。

参考文献

- [1] 李广凯,江政昕,赵昕,等.电压源换流器高压直流输电的特点与前景[J].南方电网技术,2011,5(05):13-17.
- [2] 侯钦民,周劲松.轻型直流输电及其应用前景研究[J].中国电力教育,2012,(36):156-157.
- [3] 唐书欣.轻型高压直流输电技术的发展与展望[J].电力设备管理,2021,(07):26-27.
- [4] 郭月峰.轻型直流输电技术及其应用前景[J].通讯世界,2016,(19):128-129.

[5] 赵祖熠,蔡清亮,迟小翔.基于多端柔性直流配电网主动型负荷建模分析[J].山东电力技术,2024,51(06):52-59.

[6] 叶青.用“中国技术”点亮万家灯火[N].科技日报,2024-02-21(002).

[7] 梁双,王涉,徐辉.中国西电东送四十年发展成效与政策建议[J/OL].中国电力,1-7[2024-07-17].

[8] 韩建新.日立能源领先技术闪亮进博会助力中国高质量、可持续发展[J].今日制造与升级,2022,(11):28-29.

[9] 李永坚,周有庆,宋强.轻型直流输电(HVDC Light)技术的发展与应用[J].高电压技术,2003,(10):26-28.

[10] 国务院发展研究中心国际技术经济研究所.世界前沿技术发展报告[M].电子工业出版社:201907.323.

[11] 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/OL].电网技术,1-7[2024-07-17].

[12] 耿大洲,查浩,黄洁亭,等.迈向深水远岸的海上风电关键技术展望与思考[J/OL].水力发电,1-8[2024-07-17].

[13] 王征.对于2024年的英国海上风电,我们可以期待什么?[J].风能,2024,(02):65-67+64.

[14] 周国梁,高丽萍,梁言桥,等.柔性直流输电系统多端异构通用化阻抗建模与分析[J/OL].中国电力,1-15[2024-07-17].

[15] 刘乃皓,高厚磊,徐彬,等.经柔性高压直流输电并网的海上风电送出线路拟功率和差波形比较式纵联保护[J/OL].电力自动化设备,1-13[2024-07-17].

课题项目资助信息:南充市社会科学研究“十四五”规划2023年度项目(项目编号:NC23C215)

作者简介:郭玥(1992—),女,助教,硕士研究生,专任教师,研究方向为电力系统分析及高压绝缘设备研究。