

多端柔性直流输电技术的现状及应用前景分析

钟杰峰¹, 陈丽萍¹, 袁康龙¹, 王晓茹², 胡益²

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663; 2. 西南交通大学, 成都 610031)

摘要: 随着柔性直流输电技术逐步走向成熟, 多端柔性直流(VSC-MTDC)输电系统多电源供电、多落点受电的特点, 使其作为一种更为灵活、快捷的输电方式得到了极大发展。本文首先通过 VSC-MTDC 输电的拓扑结构和基本控制原则对其进行了概述。然后从国内外现有的 VSC-MTDC 输电系统工程实例和研究现状两个方面来分析 VSC-MTDC 的发展现状。最后对 VSC-MTDC 输电技术在分布式新能源并网、弱系统或孤岛系统供电、大电网的非同步联网以及大城市的电网扩容与直流供电等领域的应用前景进行了展望。

关键词: VSC-MTDC 输电; 新能源并网; 弱系统或孤岛系统供电;

中图分类号: TM721

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)S1-0038-08

Analysis on Present Situation and Application Prospect of VSC-MTDC Technology

ZHONG Jiefeng¹, CHEN Liping¹, YUAN Kanglong¹, WANG Xiaoru², HU Yi²

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;
2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: With flexible HVDC technology gradually matured, VSC-MTDC transmission system has the features of multiple power supplies and multidrop powered. This makes it as a way of more flexible and efficient transmission got great development. Firstly, this paper make the overview of VSC-MTDC transmission through its topological structure and basic control principle. Then two aspects about the VSC-MTDC transmission system engineering examples and the research status quo at home and abroad are introduced to analyze the VSC-MTDC development present situation. Finally, the application prospects of VSC-MTDC transmission system, such as renewable power integration, power supply of weak power system and island, nonsynchronous connecting of bulk grid, DC power supply and distribution of large city and other areas, are provided.

Key words: VSC-MTDC transmission; renewable power integration; power supply of weak system and island

随着电力电子器件和控制技术的进步, 采用 IGBT 等全控型电力电子器件的电压源变流器(Voltage Source Converter, VSC)的得到快速发展, 并且已经从之前的两电平或三电平换流器发展到模块化多电平换流器(MMC), 基于电压源变流器的柔性直流输电(VSC-HVDC)系统已经成为直流输电系统发展的主流趋势。相对于传统基于晶闸管的 HVDC 输电系统, VSC-HVDC 输电系统能够对有功和无功功率进行独立控制, 可以实现换流器的 4 象限运

行。这使得它的运行方式更灵活、系统的可控性更好, 可以向弱交流系统甚至无源系统送电, 适合于弱系统或孤岛供电、可再生能源等分布式电源并网、异步交流电网互联以及城市电网供电等领域。另外, VSC 产生的谐波含量小, 不必专门配置滤波装置, 大大节省占地面积, 在城市、海岛、海上平台中使用具有很大的优势^[1]。

在 VSC-HVDC 系统潮流反转时, 直流电流方向反转而直流电压极性保持不变, 所以 VSC-HVDC 容易构成多端柔性直流(VSC-MTDC)输电系统。因此, 由两端 VSC-HVDC 发展而来的 VSC-MTDC 输电系统受到广泛的关注和应用, 其最显著的特点在于能够实现多电源供电、多落点受电^[2]。这使得它

收稿日期: 2015-11-03

作者简介: 钟杰峰(1973), 男, 广东梅县人, 高级工程师, 硕士, 主要从事大型复杂系统电力规划、电力系统分析、投资规划等研究(e-mail)zhongjiefeng@gedi.com.cn。

可以广泛用于风电光伏等分布式新能源的接入、多个交流电网同步和非同步互联、向多个孤立无源负荷供电(如海岛以及海上平台)、电力交易、构建大城市直流配电网以及改善电能质量等场合,具有广阔的应用前景。作为新一代直流输电技术的发展趋势,VSC-MTDC 输电将为电网提供更多的新型互联模式,为构建更强壮的未来电网提供了有效的解决方案^[3]。

1 VSC-MTDC 输电技术概述

多端直流(MTDC)输电工程是由多个换流站及其直流输电线路组成。它与交流系统有 3 个或 3 个以上的连接端口,能够实现多个电源区域向多个负荷中心供电。MTDC 系统按照其使用换流器技术来分,它可以分为以下 3 大类型:

1) 传统的基于晶闸管相控换流技术的传统多端直流输电(LCC-MTDC)。目前大多数早期投运的 MTDC 都属于 LCC-MTDC 输电系统,如意大利-科西嘉-撒丁岛为 3 端的 LCC-MTDC 系统、加拿大魁北克-新英格兰为 5 端的 LCC-MTDC 系统(实际按 3 端运行)及日本的新信浓背靠背 3 端的 LCC-MTDC 系统^[4]。

2) 基于电压源型换流技术的多端柔性直流输电系统(VSC-MTDC)。近些年逐渐有越来越多的实际工程投建(后文详细介绍)。

3) 混合型多端柔性直流(Hybrid-MTDC),即为既有电压源型换流器又有晶闸管相控换流器的多端直流输电系统。目前在实际工程中还比较少,如美国的 GBX 多端直流工程,其两端为 LCC 换流站,而中间落点为 VSC 换流站。

1.1 VSC-MTDC 系统拓扑结构

VSC-MTDC 输电系统是指在同一直流网架下,含有 3 个及 3 个以上 VSC 换流站,通过串联、并联或混联方式连接起来的多端直流输电系统。VSC-MTDC 系统中的 VSC 换流站既可作为整流站运行,也可作为逆变站运行,运行方式非常灵活。根据 VSC-MTDC 运行条件和设计要求的不同,VSC-MTDC 系统主要有 3 种拓扑结构^[5]。

1.1.1 并联型 VSC-MTDC 输电系统

并联型 VSC-MTDC 输电系统是指各 VSC 换流站并联连接,并且整个直流网络运行在同一电压下的 MTDC 输电系统。并联型 VSC-MTDC 主要分为

放射式和环网式 2 种接线方式,其各 VSC 之间的功率分配主要靠改变换流站的直流电流实现^[3]。通常由 1 个主导 VSC 控制整个直流网络直流电压,其他 VSC 的电流变化由该站来平衡。如下图 1(a)、(b)分别为放射式和环网式并联 VSC-MTDC 输电系统的拓扑结构示意图。

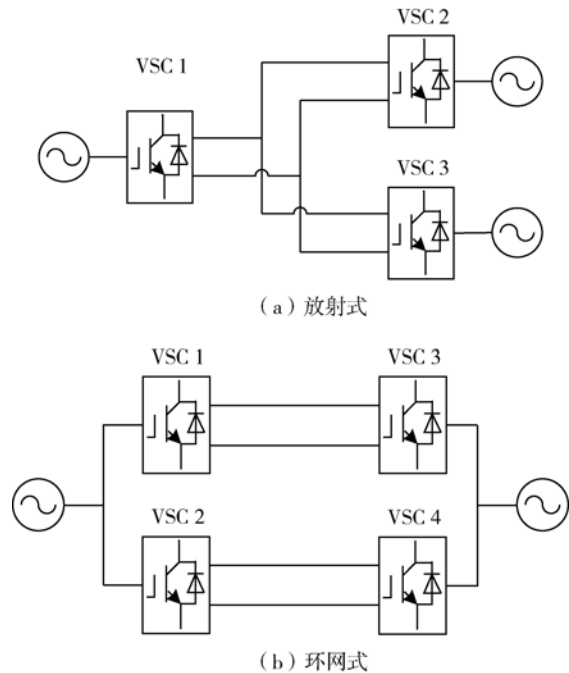


图 1 并联 VSC-MTDC 输电系统

Fig. 1 The Parallel VSC-MTDC Transmission System

1.1.2 串联型 VSC-MTDC 输电系统

串联型 VSC-MTDC 输电系统是指各 VSC 换流站串联连接,并且直流网络流过同一电流的 MTDC 输电系统。VSC-MTDC 输电系统中所有 VSC 换流站都要参与直流电压控制,直流网络存在多个电压等级。如下图 2 为串联 VSC-MTDC 输电系统的拓扑结构示意图。

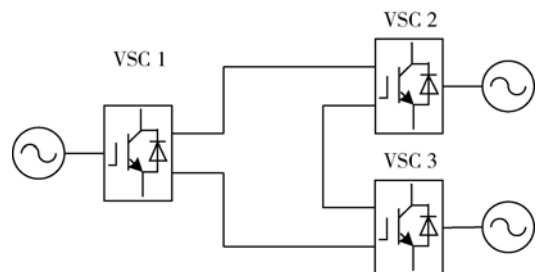


图 2 串联 VSC-MTDC 输电系统

Fig. 2 The Series VSC-MTDC Transmission System

1.1.3 混合型 VSC-MTDC 输电系统

由于拓扑结构的不同,并联型 VSC-MTDC 输

电系统和串联型 VSC-MTDC 输电系统各自都有自己的优缺点,如表 1 所示:

表 1 2 种多端柔性直流输电方式的比较

Table 1 Comparison of Two Kinds of VSC-MTDC

| 比较项目 | 并联型 VSC-MTDC | 串联型 VSC-MTDC |
|--------|--------------|--------------|
| 调节范围 | 较大 | 较小 |
| 有功功率损耗 | 较小 | 较大 |
| 故障恢复能力 | 较快 | 较慢 |
| 系统绝缘配合 | 较容易 | 较复杂 |
| 扩建灵活性 | 较容易 | 较复杂 |
| 经济性 | 较高 | 较低 |

因此,对于一些特殊的运行场合,需要结合并联型 VSC-MTDC 输电和串联型 VSC-MTDC 输电构成较复杂的混合型 VSC-MTDC 系统。它综合了前两类输电方式的优点,增加了 MTDC 输电系统的接线灵活性和系统可靠性。混合型 VSC-MTDC 系统的拓扑结构示意图如下图 3 所示。

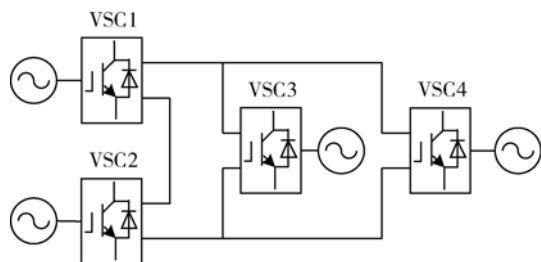


图 3 混合型 VSC-MTDC 输电系统

Fig. 3 The Hybrid VSC-MTDC Transmission System

1.2 VSC-MTDC 输电系统控制原则

VSC-MTDC 输电系统的各 VSC 均可独立控制有功功率和无功功率,因此各 VSC 的控制模式可以分为有功功率类控制和无功功率类控制两大类。而 VSC-MTDC 输电系统中的每一个 VSC 必须同时在有功功率类控制和无功功率类控制中各选一种物理量进行控制,并且必须要保证系统内有一端控制直流侧电压。

有功功率类控制的主要是 VSC 接受直接的有功功率控制指令或者通过间接调节与有功功率相关的物理量来控制注入或吸收的交流侧有功功率。有功功率类控制包括定交流侧或直流侧有功功率控制、定直流侧电压控制、定频率控制等。有功功率类控制模式选取原则为:

1) 定交流侧或直流侧有功功率控制:正常运行情况下,对于交流侧为有源系统,非定直流电压控

制的 VSC 一般会采用定交流侧或直流侧有功功率控制模式。

2) 定直流侧电压控制:直流侧电压的有效控制是 VSC-MTDC 输电系统安全稳定运行的基础。正常运行时,VSC-MTDC 输电系统各 VSC 中必须保证有一个 VSC 作为主导换流站,采用定直流侧电压控制,从而保证直流网络电压始终稳定。

3) 定频率控制:在 VSC-MTDC 输电系统中,当有单个 VSC(或多个 VSC)处于直流孤岛供电区域或者承担局部电网调频任务的 VSC 就应该采用定交流侧频率控制模式,并且与风电场相连接的 VSC 通常也会选定交流侧频率控制模式。

无功功率类控制主要是 VSC 接受直接的无功功率控制指令或者通过间接调节与无功功率相关的物理量来控制注入或吸收的交流侧有功功率。无功功率类控制包括定交流侧无功功率控制、定交流侧电压控制等。无功功率类控制模式选取原则:

1) 定交流侧无功功率控制:正常运行情况下,各 VSC 的无功功率类控制均可以选择定交流侧无功功率控制。

2) 定交流侧电压控制:在 VSC-MTDC 输电系统中,当有单个 VSC(或多个 VSC)处于直流孤岛供电区域或者承担局部电网调频任务的 VSC 就应该采用定交流侧频率控制模式,并且与风电场相连接的 VSC 通常也会选定交流侧电压控制模式。

2 VSC-MTDC 发展现状

2.1 VSC-MTDC 工程实例

目前世界范围内已投运的柔性直流输电工程均为点对点两端柔性直流输电系统,尚无多端柔性直流输电工程投入商业运行。两端柔性直流输电系统无法实现对多个电源点的接入或者多个负荷点的同时供电,多端柔性直流输电系统可以将多个分布式新能源电源、孤立海岛或海上平台、多个电网等连接起来,构成柔性直流网络^[6]。因此,全世界已经很多国家开始建设 VSC-MTDC 输电工程。

2.1.1 国内 VSC-MTDC 输电工程实例

我国虽然在柔性直流输电工程技术研究与应用方面起步较晚。但从 2006 年开始,国内许多研究单位及时把握住了柔性直流输电技术发展的趋势,在基础理论研究、关键技术攻关、核心设备研制、试验能力建设、工程系统集成等方面取得了许多自

主创新成果, 通过近几年的快速发展, 我国在柔性直流输电技术研究和工程应用等方面已达到世界先进水平。

在多端柔性直流方面, 我国更是取得了巨大的成就, 已有两项多端柔性直流输电工程: 南澳多端柔性直流输电工程和舟山多端柔性直流输电工程。

南澳多端柔性直流输电工程是由南方电网公司建设的世界上第一个多端柔性直流输电示范工程^[7], 它由三个换流站并联构成, 采用的是模块化多电平(MMC)技术, 直流电压等级为 ± 160 kV, 传输容量 200 MW。该工程主要用于海上风电并网, 分别在广东汕头南澳岛上的青澳、金牛各建设一座风电送端换流站, 在大陆澄海区建设一座风电受端换流站, 三个站容量分别为 5 万 kW、10 万 kW 和 20 万 kW, 建设直流电缆混合输电线路 40.7 km, 如图 4 所示。

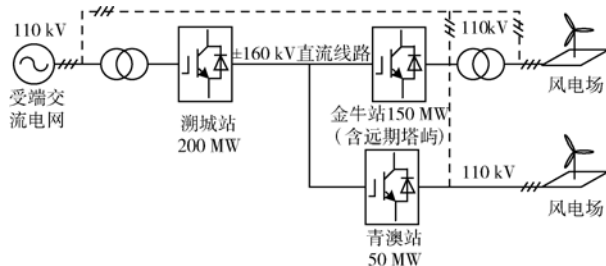


图 4 南澳多端柔性直流输电工程示意图

Fig. 4 The Project Schematic of Nan Ao VSC-MTDC

舟山多端柔性直流输电工程是世界首个五端柔性直流输电工程^[8], 同时也是目前世界上已投运的端数最多、同级电压中容量最大、运行最复杂的海岛供电网络。同样采用的是模块化多电平(MMC)技术, 直流电压等级为 ± 200 kV, 系统总容量为 1 000 MW。该工程主要用于海岛供电, 包括五站五线四缆一基地, 工程在定海、岱山、衢山、洋山、泗礁各建设一座换流站, 容量分别为 40 万 kW、30 万 kW、20 万 kW、10 万 kW, 建设直流电缆输电线路 141 km、交流 220 kV 输电线路 22.5 km、交流 110 kV 输电线路 15.2 km。该工程主要采用并联放射型网络拓扑结构, 如图 5 所示。

2.1.2 国外 VSC-MTDC 输电工程实例

目前在国外也有在建的多端柔性直流输电工程, 北美 TresAmigas 超导体输电项目计划在新墨西哥州的 Clovis 地区建设一座超级电力中转站^[9], 是目前在建最大的三端柔性直流输电工程, 该超级电

力中转站的设计输电容量预计达 5GW, 直流电压等级为 345 kV, 共占地约 58 km²。3 个 AC/DC 换流站分别用于连接西部互联电网、东部互联电网和 ERCOT 电网。各换流站均采用 VSC, 在每个换流站内还安装有大型电能存储设备, 除作备用外, 还可以用来平衡相连交流系统中的间歇性能源发电及向系统提供辅助服务。该项目预计 2016 年投运, 建成后将进一步促进北美的电网互联及现有 3 个互联电网内的交流高压网络建设。

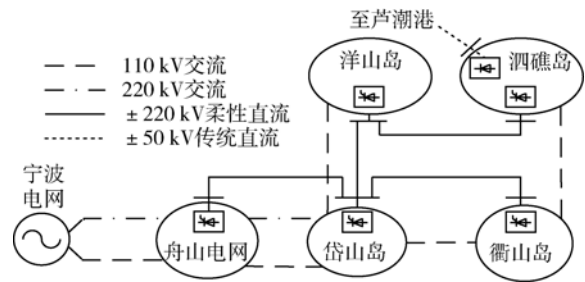


图 5 舟山多端柔性直流输电工程示意图

Fig. 5 The Project Schematic of Zhou Shan VSC-MTDC

另外还有就是瑞典-挪威的 South-West Scheme 三端柔性直流输电工程^[10]。瑞典国家电网公司在瑞典南部启动了“南西柔性直流工程”, 该工程主要用于大容量输电。在 Oslo、Barkeryd、Hurva 这 3 地各建 2 个换流站, 为保证运行可靠, 该工程采用两条独立的线路, 每条直流线路传输容量为 720 MW, 直流电压等级为 ± 300 kV, 该柔性直流工程计划的输电总量为 1 440 MW, 预计在 2016 年投入运行。

2.2 VSC-MTDC 研究现状

由于 VSC-MTDC 输电的实际工程较少, 并且 VSC-MTDC 输电技术较复杂, 所以有关 VSC-MTDC 输电的研究相对于两端的 VSC-HVDC 直流输电较少。但是随着柔性直流向着多落点、网络化的发展, 近几年来国内外学者针对 VSC-MTDC 输电关键技术的研究越来越多。本文总结出了近几年所研究的 VSC-MTDC 关键技术主要包括: VSC-MTDC 的拓扑结构分析、VSC-MTDC 的控制保护策略研究、VSC-MTDC 的建模仿真研究以及 VSC-MTDC 的运行特性分析。

2.2.1 VSC-MTDC 的拓扑结构分析

VSC-MTDC 系统的拓扑结构直接关系到其控制策略的可靠性和实用性。目前关于 VSC-MTDC 输电系统的拓扑结构研究主要集中在拓扑结构的对

比分析方面,而对 VSC-MTDC 输电网络可靠性和经济性方面的研究却很少。文献[11]针对大型风电场并网的多端柔性直流输电系统拓扑结构问题进行了详细的讨论,综合经济性和技术性两方面的分析,对比了点式拓扑、环形拓扑、星形拓扑以及星形-中心环形拓扑等拓扑结构的优缺点,认为大型风电基地应该选择星型-中心环型拓扑结构。文献[12]指出在评价拓扑结构时必须考虑稳态损耗和故障电流两个方面的影响。文献[13]综合分析了并联型、串联型以及混合型 VSC-MTDC 输电系统结构的相关特点,并利用 MATLAB/Simulink 建立仿真模型对各类拓扑结构进行了仿真分析,最终认为并联型多端直流输电结构更具有优势。文献[14]针对海上风电并网的需求,提出了采用 VSC 换流器连接海上风场和弱受端交流系统, LCC 换流器连接较强交流系统的混合多端直流输电系统拓扑结构,并对一个混合 5 端直流输电系统进行了详细研究。

2.2.2 VSC-MTDC 的控制保护策略研究

与两端柔性直流输电控制不同, VSC-MTDC 输电系统需要协调控制多个换流站,要考虑多个换流站控制系统间的配合问题,因此它的系统级控制比两端 VSC-HVDC 要更加灵活、复杂。

VSC-MTDC 输电系统协调控制的关键是对直流侧电压的控制。在 VSC-MTDC 输电系统中,直流电压的稳定会直接影响到直流潮流的稳定,从而影响到 VSC-MTDC 输电系统的运行稳定性。从目前国内外 VSC-MTDC 输电系统电压稳定控制策略的相关文献中,可以将 VSC-MTDC 系统级直流电压控制策略分为两个主要大类,分别为单点直流电压控制策略和多点直流电压控制策略^[15]。

单点直流电压控制策略将一个换流站作为 VSC-MTDC 系统直流电压控制主导站,其余换流站用来控制其他的物理量,例如有功功率、无功功率、交流频率、交流电压等。此时当主导换流站因故障失去了直流电压的控制能力,则会导致整个 VSC-MTDC 输电系统的电压及潮流失稳。单点直流电压控制策略存在很多缺点,因此它的适用性较差。

多点直流电压控制策略是指 VSC-MTDC 输电系统中的有多个换流站均具备直流电压控制能力,各换流站之间相互协调来进行直流电压控制。对于

多点直流电压控制策略,若按照是否需要换流站间相互通信,可将其分为有通信系统控制策略和无通信系统控制策略两类。其中,有通信系统控制策略就是主从控制策略,这种控制策略主要是利用换流站间的通信系统实现了直流电压的稳定,当控制直流电压稳定的主换流站因故障退出时,主换流站的控制系统会向邻近的从换流站发出控制模式切换的指令,从换流站接收到指令后,迅速将其控制模式调整为定直流电压控制模式,保证 VSC-MTDC 系统直流电压稳定。无通信系统控制策略主要包括直流电压偏差控制策略和直流电压斜率控制策略两种。直流电压偏差控制策略是指在定直流电压控制换流站因故障退出运行后,后备定直流电压控制换流站能够检测到直流网络电压的偏移,并产生控制模式切换的指令,转入定直流电压运行模式,从而重新保证了整个直流网络电压的稳定性。这种控制策略设计相对简单、可靠性强^[16]。直流电压斜率控制策略的实质是在具有直流电压斜率控制器的 VSC-MTDC 输电系统中,各个换流站都有独立的功率与直流电压的 P_{dc} - U_{dc} 关系曲线。当有换流站因故障退出后,直流电压会沿 P_{dc} - U_{dc} 关系曲线找到使直流网络功率平衡的新稳定点。这种控制策略将稳定直流电压的任务按个换流站容量分配给多个换流站,以实现在不同运行情况下直流功率的快速平衡分配。因此, VSC-MTDC 输电系统最基本的协调控制策略类型如图 6 所示。

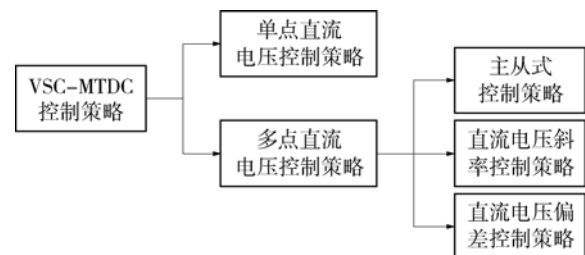


图6 VSC-MTDC 的基本控制策略分类

Fig. 6 The Categories of Control Strategy Basic on VSC-MTDC

当然,随着 VSC-MTDC 输电系统级直流电压控制策略研究的深入,近年来也有很多基于基本控制策略的新控制策略。例如,文献[17]主要是考虑到了直流电压偏差控制策略和直流电压斜率控制策略各自的优点,将两种控制策略结合在一起,在定有功功率控制换流站的直流电压-有功功率控制特性中引入了斜率控制和定直流电压控制,有效解决

了主导站过载时系统功率不平衡和直流电压失稳的问题。文献[18]提出的新型直流电压控制策略是在直流电压斜率控制策略的基础上引入一个公共直流参考电压,使得多端系统中各个换流站都基于同一参考电压进行协调控制,提高了系统暂态情况下的功率快速调整和系统的稳定性。

2.2.3 VSC-MTDC 的建模仿真研究

对 VSC-MTDC 输电系统进行建模仿真研究,是深入研究和分析多端柔性直流输电系统的工作机理、特性、以及提高系统控制性能的基础和必要手段。在柔性直流输电建模仿真方面,国内外学者已经做了很多相关研究,主要集中在换流器自身的详细建模、两端 VSC-HVDC 的建模仿真分析等方面。而对于 VSC-MTDC 输电系统的建模仿真相对较少。

文献[19]提出了 VSC-MTDC 的一般通用稳态模型,推导了相应的潮流方程。该模型可以用于模拟多端直流与交流混连情形,可以适合不同换流器拓扑结构的 VSC-MTDC 输电系统。文献[20]提出了适用于大规模 MMC-MTDC 仿真的 MMC 机电暂态模型。同时还分别建立了 MMC 交流侧、d-q 双轴控制系统和 MMC 直流侧的详细机电暂态模型等。文献[21]提出了一种通用型的 VSC-MTDC 输电系统动态模型,该模型中包含了详细的换流器及其控制器数学方程、直流线路方程以及交直流耦合方程。该模型允许增加或减少换流器及直流线路,因此可以适用于各种拓扑结构的 VSC-MTDC 输电系统。

2.2.4 VSC-MTDC 的运行特性分析

VSC-MTDC 输电系统的运行特性会直接影响到与之相连交流系统的稳定性,因此 VSC-MTDC 输电系统的运行特性研究也极为重要。多端柔性直流不同于常规直流,受多站间的相互影响,其动态特性具有其独特性。VSC-MTDC 输电系统的运行特性主要包括:VSC-MTDC 输电系统动态特性、VSC-MTDC 输电系统与交流系统的交互影响、VSC-MTDC 输电系统运行可靠性评估等。

文献[22]搭建了 MMC-MTDC 输电系统的仿真平台,其中包括了详细的 MTDC 系统模型和交流电网模型。在此仿真平台下分析了 MMC-MTDC 接入交流电网后的潮流分布情况,并模拟电网故障、冲击负荷、受端电网孤岛运行等多种苛刻运行条件,在此条件下分析了含有 MMC-MTDC 系统的交

直流耦合电网的动态响应特性。文献[23]主要分析主导换流站、辅助换流站、定有功功率控制换流站和风电场换流站的直流电压-电流运行特性,推导各换流站在不同控制模式下的特性方程,给出各换流站不同控制模式下的电气量范围。并提出了 VSC-MTDC 输电系统稳态工作点的计算方法,完善换流站的控制模式修正方法。文献[24]充分考虑到在海岛建设 VSC-MTDC 输电工程时,会形成风电场经交直流混合输电系统向陆上电网供电的格局,改变了电网结构和运行特性。为提高海岛负荷供电和风电传输的可靠性、增强受端电网电压的动态支撑能力。该文建立了风电场经 VSC-MTDC 输电系统并网的仿真模型,研究了岛上的风电场经交直流混合线路输电的稳定性,分析了送受端交流电网故障对系统的冲击影响。为多端柔性直流输电工程的顺利实施提供了理论支撑。

3 VSC-MTDC 输电技术的应用前景

VSC-MTDC 输电继承了两端柔性直流输电相应的优点,即占地面积小、无功消耗少、谐波含量低、无换相失败问题以及可独立控制无功和有功等,同时具有多电源供电、多落点受电、灵活可控的特点,使得其具有广阔的应用前景。具体表现在以下几个方面:

3.1 风电、光伏等新能源并网

随着能源的大量使用及环境的恶化,全世界都在不断推进新能源改革,风能、光伏能等可再生能源开发和利用的重要性日趋体现。我国具有丰富的风力资源和太阳能资源,内陆和沿海都具有较好的开发价值,但是由于地理条件的限制、发电规模的制约以及电能质量较差,采取交流输电技术将这些“孤岛”电源与电网相连,技术难度和运行成本都较高,而传统高压直流输电技术限于容量和距离满足不了经济性要求^[25]。然而,VSC-MTDC 输电系统针对于地理条件较偏远的新能源地区,不仅在保证地区供电稳定的同时,还可以充分利用这些资源,无需借助外部电源或者同步调相机即可实现电能传输。同时对于新能源存在的发电容量小、出力不稳定性问题,VSC-MTDC 输电还可以起到分布式电源汇集、改善电能质量的作用。当主网发生短路时,可以有效隔离故障,保障风电场稳定运行,并提供“黑启动”能力,帮助系统快速恢复,提高风电

场的风能利用率。所以,利用 VSC-MTDC 输电系统实现系能源的并网可以充分利用新能源的优势,克服其在出力特性上的缺陷,有很高的经济性和可靠性。例如,南澳多端柔性直流输电提高了海上风电利用率 5%~10%。

3.2 弱系统或孤岛系统供电

通常情况受地理环境的限制,很多偏远地区供电会存在困难,由于这些地区本身系统弱,距离大电网较远,也无法提供足够的无功支撑。如果采用常规的交流输电,电压跌落将非常严重。而传统的直流输电要求受端系统必须提供足够的稳定换相电压,否则会出现换相失败的问题,可靠性较低。针对这种区域,柔性直流输电为该问题提供了新的解决方案。柔性直流输电能实现有功、无功四象限运行,能作为静止无功补偿器使用,能保证受端系统正常可靠的供电。同时它不需外部电源提供的换相电压进行换相,甚至可以工作在交流侧为无源网络中。这使得它非常适合应用于弱系统区域供电的情况。

除此之外,我国大陆沿海拥有约 6 500 余个海岛,其中有大量拥有常驻人口,同时还有很多的海上钻井平台。这些特殊的地区电负荷偏小、电压波动大,也是典型的弱系统和孤岛。目前绝大部分海岛及海上钻井平台都采用独立的燃油供电体系,这种供电系统不仅燃料利用率偏低、环境污染严重^[26],而且供电系统也很不稳定,供电电压忽高忽低。通常对于海岛或海上平台送电来说,采用交流架空线路不太现实,因此采用 VSC-MTDC 输电通过直流海缆进行海岛或海上平台供电是最佳的选择。同时由于 VSC-MTDC 输电系统换流站内无需大量无功补偿及滤波装置,其占地面积小,在面积不足的海岛或海上平台上建设更有优势。

3.3 大电网的非同步联网

随着电网的建设和 VSC-MTDC 输电技术的发展,在各地区间和各区域间的异步电网互联会有利于相互的功率交换和电力交易,并且能提高经济效益,增强电网运行的经济性。因此异步电网互联会越来越普遍,多回直流输电线路落在同一个交流受端是不可避免的。VSC-MTDC 输电具有传输功率可控性强、无需大量无功补偿和滤波设备、无换向失败问题、谐波水平低等特点,会使它成为未来电网的多区域异步互联的主要手段。

3.4 大城市的电网增容与直流供电

随着社会发展,大城市对环境和土地资源极为关注,电厂从市中心开始向外转移趋势不可逆转,而城市电网的负荷却在持续增长。这使得大城市成为一个对电能质量的要求不断提高的无源负荷中心。因此,以交流输电为主的城市电网面临越来越大的困难和挑战。然而,VSC-MTDC 输电技术应用大型城市供电的优越性在于:可以独立的控制有功功率和无功功率,适用于无源网络,占地面积小,可以解决电能谐波含量高、电压闪变等电能质量问题^[6]。VSC-MTDC 输电系统一般采用地埋式直流电缆,不需要设置输电走廊,减少了城市电网电能输送通道资源,不会影响市容。同时由于 VSC-MTDC 输电系统一般采用双极电缆布置,将电缆磁场几乎降到零,对电磁环境的影响较小,可满足环保的要求。VSC-MTDC 输电系统的这些优势决定了其在大城市电网增容扩建中大有用武之地。

4 结论

柔性直流输电技术作为新一代的直流输电方式正呈现蓬勃发展的态势,大力推动我国柔性直流输电事业的前进具有深远的意义。

目前,VSC-MTDC 输电系统的实际工程还较少,主要是受限于理论研究还不够深入全面和缺乏工程实践经验。理论认识还不够深入全面,主要表现在:VSC-MTDC 输电系统的控制系统较复杂,对于其控制保护策略的研究、与交流系统之间的最佳协调控制、多端直流系统无功功率与有功功率的联合控制等研究还不够成熟;VSC-MTDC 输电系统的建模仿真研究还不够全面,目前的研究大多是以简化系统为研究对象,使用电磁暂态仿真工具研究较小网络规模的电力系统的运行方式和控制策略。但对 VSC-MTDC 输电并网后交直流一体化混联电网的运行方式、大电网背景下的 VSC-MTDC 运行特性和交直流电网相互影响等问题还缺乏有深入、系统地研究。缺乏工程实践经验主要表现在 VSC-MTDC 输电工程的设计规范以及关键安装技术还有待完善,这其中包括主设备选型、总平面布置、控制保护系统、噪声控制、电磁环境等设计关键技术和柔性直流阀厅等安装关键技术。

本文在现有文献的基础上对 VSC-MTDC 输电

进行了基本的介绍,认真总结并深刻分析了 VSC-MTDC 输电的发展现状和应用前景。虽然目前的 VSC-MTDC 输电技术还存在一些问题亟待解决,但也已经提出很多相应的解决方案,相信随着理论研究和各方面技术的成熟,这些问题都会得到很好的解决, VSC-MTDC 输电技术也将会在更多方面得到更好的运用。

参考文献:

- [1] 马为民,吴方劫,杨一鸣,等. 柔性直流输电技术的现状及应用前景分析 [J]. 高电压技术, 2014(8): 2429-2439.
- [2] REN J, LI K, ZHAO J, et al. A Multi-point DC Voltage Control Strategy of VSC-MTDC Transmission System for Integrating Large Scale Offshore Wind Power [C]. Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), 2012 IEEE. IEEE, 2012: 1-4.
- [3] 吴浩,徐重力,张杰峰,等. 舟山多端柔性直流输电技术及应用 [J]. 智能电网, 2013(2): 22-26.
- [4] 赵婉君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [5] 汤广福,贺之渊,庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展 [J]. 电力系统自动化, 2013(15): 3-14.
- [6] 吴博,李慧敏,别睿,等. 多端柔性直流输电的发展现状及研究展望 [J]. 现代电力, 2015(2): 9-15.
- [7] 杨柳,黎小林,许树楷,等. 南澳多端柔性直流输电示范工程系统集成设计方案 [J]. 南方电网技术, 2015(1): 63-67.
- [8] 高强,林焯,黄立超,等. 舟山多端柔性直流输电工程综述 [J]. 电网与清洁能源, 2015(2): 33-38.
- [9] ALAYWAN Z. The Tres Amigas Superstation: Linking Renewable Energy and the Nation's Grid(July 2010) [C]. Power and Energy Society General Meeting, 2010, IEEE. 2010: 1-5.
- [10] INGEMANSSON D, WHEELER J D, et al. The Sout-West Scheme: a New HVAC and HVDC Transmission System in Sweden [C]. AC and DC Power Transmission(ACDC2012), 10th IET International Conference on. 2012.
- [11] 吴瀚俊,刘海涛. 大型风电基地多端 VSC-HVDC 系统综述 [J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2014(4): 16-21.
- [12] BUCHER M K, WIGET R, ANDERSSON G, et al. Multi-terminal HVDC Networks-what is the Preferred Topology? [J]. IEEE Transactions on Power Delivery. 2014, 29(1): 406-413.
- [13] 梁海峰. 柔性直流输电系统控制策略研究及其实验系统的实现 [D]. 华北电力大学(河北), 2009.
- [14] 文劲宇,陈霞,姚美齐,等. 适用于海上风电并网的混合多端直流输电技术研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 55-61.
- [15] 唐庚,徐政,刘昇,等. 适用于多端柔性直流输电系统的新型直流电压控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2013(15): 125-132.
- [16] LIVERMOREL, LIANG Jun, EKANAYAKE J B. MTDC VSC Technology and its Applications for Wind Power [C]. The 45th International Universities Power Engineering Conference, 2010, Cardiff, UK: 6.
- [17] 任敬国,李可军,张春辉,等. 基于直流电压—有功功率特性的 VSC-MTDC 协调控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2015(11): 8-15.
- [18] 阎发友,马巍巍,朱琳,等. 多端柔性直流输电系统新型直流电压控制策略 [J]. 智能电网, 2013(2): 17-21.
- [19] Jef Beerten, Stijn Cole, Ronnie Belmans. Generalized Steady-state VSC MTDC Model for Sequential AC/DC Power Flow Algorithms [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 821-829.
- [20] LIU S, XU Z, HUA W, et al. Electromechanical Transient Modeling of Modular Multilevel Converter Based Multi-terminal HVDC systems [J]. Power Systems, IEEE Transactions on, 2014, 29(1): 72-83.
- [21] COLE S, BCCRTCEN J, BCLMANS R. Generalized Dynamic VSC MTDC Model for Power System Stability Studies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3): 1655-1662.
- [22] 顾益磊,唐庚,黄晓明,等. 含多端柔性直流输电系统的交直流电网动态特性分析 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 27-34.
- [23] 任敬国,李可军,赵建国,等. VSC-MTDC 输电系统的直流侧运行特性分析与稳态工作点计算 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 786-795.
- [24] 杨小磊. 多端柔性直流输电系统接入某海岛电网的研究 [J]. 电气技术, 2015, 16(5): 12-16.
- [25] 朱劲松. 柔性直流输电技术研究分析 [J]. 电工电气, 2014(1): 1-6.
- [26] 杨晓东,黄伟琼,吴威,等. 柔性直流输电技术在福建沿海孤岛供电中的应用研究 [J]. 电力与电工, 2012(1): 10-12, 22.

(责任编辑 林希平)