



“十二五”国家重点图书出版规划项目
智能电网研究与应用丛书

混合直流输电

Hybrid High Voltage Direct Current Transmission System

赵成勇 郭春义 刘文静 著



科学出版社

C14055628

TM721.1
06

“十二五”国家重点图书出版规划项目
智能电网研究与应用丛书

混合直流输电

Hybrid High Voltage Direct Current
Transmission System

赵成勇 郭春义 刘文静 著



北航

C1741349

科学出版社

北京

TK 721.1
06

853220110

内 容 简 介

随着电力电子器件的不断发展和直流输电技术的广泛应用,结合电流源 LCC 换流器与电压源 VSC 换流器的混合直流输电系统已成为研究热点。本书针对三种典型的混合直流输电系统进行介绍,即并联混合多馈入直流输电系统、一端 LCC 一端 VSC 的混合直流输电系统、含 STATCOM 的 LCC-HVDC 系统。主要内容包括混合直流输电系统的基本运行原理、各系统间相互作用机理、协调控制策略、建模与仿真技术等。

本书适合从事传统直流输电与电压源换流器直流输电系统相关工作的工程师使用,也可以作为高等学校电力系统相关专业教师和学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

混合直流输电 = Hybrid High Voltage Direct Current Transmission System / 赵成勇, 郭春义, 刘文静著. —北京: 科学出版社, 2014. 6

(“十二五”国家重点图书出版规划项目: 智能电网研究与应用丛书)

ISBN 978-7-03-040667-5

I. ①混… II. ①赵…②郭…③刘… III. ①混合输电-直流输电-研究 IV. ①TM721.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 102156 号

责任编辑: 范运年/责任校对: 赵桂芳

责任印制: 阎磊/封面设计: 陈敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 6 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2014 年 6 月第一次印刷 印张: 12 3/4

字数: 224 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《智能电网研究与应用丛书》编委会

主编:周孝信

编委:(按姓名拼音排序)

- | | |
|--------------------------|--------------------------|
| 白晓民(中国电力科学研究院) | 卢 强(清华大学) |
| 蔡 旭(上海交通大学) | 梅生伟(清华大学) |
| 曹一家(湖南大学) | 穆 钢(东北电力大学) |
| 陈 希(中国电力科学研究院) | 饶 宏(南方电网科学研究院有限
责任公司) |
| 程浩忠(上海交通大学) | 荣命哲(西安交通大学) |
| 程时杰(华中科技大学) | 宋永华(浙江大学) |
| 丁立健(国家自然科学基金委
员会) | 孙元章(武汉大学) |
| 董新洲(清华大学) | 王成山(天津大学) |
| 董旭柱(南方电网科学研究院
有限责任公司) | 王锡凡(西安交通大学) |
| 段献忠(华中科技大学) | 王益民(国家电网公司) |
| 郭剑波(中国电力科学研究院) | 肖立业(中国科学院电工研究所) |
| 韩英铎(清华大学) | 薛禹胜(国家电网公司) |
| 何湘宁(浙江大学) | 杨奇逊(华北电力大学) |
| 胡学浩(中国电力科学研究院) | 杨勇平(华北电力大学) |
| 鞠 平(河海大学) | 余贻鑫(天津大学) |
| 李立涅(华南理工大学) | 张保会(西安交通大学) |
| 廖瑞金(重庆大学) | 张伯明(清华大学) |
| 刘建明(国家电网公司) | 赵争鸣(清华大学) |



《智能电网研究与应用丛书》序

迄今为止,世界电网经历了“三代”的演变。第一代电网是第二次世界大战前以小机组、低电压、孤立电网为特征的电网兴起阶段;第二代电网是第二次世界大战后以大机组、超高压、互联大电网为特征的电网规模化阶段;第三代电网是第一、二代电网在新能源革命下的传承和发展,支持大规模新能源电力,大幅度降低互联大电网的安全风险,并广泛融合信息通信技术,是未来可持续发展的能源体系的重要组成部分,是电网发展的可持续化、智能化阶段。

同时,在新能源革命的条件下,电网的重要性日益突出,电网将成为全社会重要的能源配备和输送网络,与传统电网相比,未来电网应具备如下四个明显特征:一是具有接纳大规模可再生能源电力的能力;二是实现电力需求侧响应、分布式电源、储能与电网的有机融合,大幅度提高终端能源利用的效率;三是具有极高的供电可靠性,基本排除大面积停电的风险,包括自然灾害的冲击;四是与通信信息系统广泛结合,实现覆盖城乡的能源、电力、信息综合服务体系。

发展智能电网是国家能源发展战略的重要组成部分。目前,国内已有不少科研单位和相关企业做了大量的研究工作,并且取得了非常显著的研究成果。在智能电网研究与应用的一些方面,我国已经走在了世界的前列。为促进智能电网研究和应用的健康持续发展,宣传智能电网领域的政策和规范,推广智能电网相关具体领域的优秀科研成果与技术,在科学出版社“中国科技文库”重大图书出版工程中隆重推出《智能电网研究与应用丛书》这一大型图书项目,本丛书同时入选“十二五”国家重点出版规划项目。

《智能电网研究与应用丛书》将围绕智能电网的相关科学问题与关键技术,以国家重大科研成就为基础,以奋斗在科研一线的专家、学者为依托,以科学出版社“三高三严”的优质出版为媒介,全面、深入地反映我国智能电网领域最新的研究和应用成果,突出国内科研的自主创新性,扩大我国电力科学的国内外影响力,并为智能电网的相关学科发展和人才培养提供必要的资源支撑。

我们相信,有广大智能电网领域的专家、学者的积极参与和大力支持,以



混合直流输电

及编委的共同努力,本丛书将为发展智能电网,推广相关技术,增强我国科研创新能力做出应有的贡献。

最后,我们衷心地感谢所有关心丛书并为丛书出版尽力的专家,感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和赞助,感谢广大读者对丛书的厚爱;希望通过大家的共同努力,早日建成我国第三代电网,尽早让我国的电网更清洁、更高效、更安全、更智能!

周孝信



前 言

传统直流输电又称为电网换相高压直流输电(line commutated converter based high voltage direct current, LCC-HVDC)或电流源换流器高压直流输电(current source converter based high voltage direct current, CSC-HVDC)。随着我国东部地区经济的快速发展,其用电量还将显著增加,同时东部地区雾霾频发,大气环境容量已趋于饱和,远距离大功率输电已成为必然选择。LCC-HVDC 凭借其在远距离大容量输电和电网互联方面的优势,已成为我国西电东送和北电南输的主要输电方式,在电网中发挥着不可替代的作用。目前我国有 21 条 LCC-HVDC 线路运行,已成为世界上直流输电工程最多的国家。预计到 2020 年,我国跨区电网输送容量将达到 4 亿 kW,为此将建成 15 个特高压直流输电工程,届时我国 LCC-HVDC 工程总计将达 38 项以上。

LCC-HVDC 由于使用半控型电力电子器件晶闸管作为换流元件,存在明显的缺点,主要表现为:完全依赖交流电网运行,存在换相失败问题,缺少运行独立性;两端换流设备需消耗所传输有功功率 50%左右的无功功率,需要大量无功补偿设备;不能在极弱受端交流系统条件下运行,且无法作为电网大停电后的恢复电源;多馈入直流系统中,容易导致多个换流器发生级联换相失败等。随着 LCC-HVDC 工程数量和容量的快速增加,解决上述问题刻不容缓。

伴随着电力电子技术的发展,以全控型器件为基础的电压源换流器高压直流输电(voltage source converter based high voltage direct current, VSC-HVDC)得到快速发展。国内将该技术命名为柔性直流输电(high voltage direct current flexible, HVDC Flexible),以区别于采用晶闸管的传统直流输电技术,ABB 公司将这一技术称为 HVDC Light,西门子公司则称之为 HVDC PLUS。国际上,在建的单个 VSC-HVDC 工程容量达到 $2 \times 1000 \text{ MW}$,电压等级达到单极 500kV,并且 VSC-HVDC 工程容量和电压等级仍在快速增长之中。

VSC-HVDC 由于采用全控型器件作为开关元件,恰好能弥补 LCC-HVDC 的主要缺点。与上述 LCC-HVDC 不足相对应,VSC-HVDC 的主要优点包括:不依赖交流电网运行,没有换相失败问题;不需要或仅需少量无功补偿设



混合直流输电

备,有功功率和无功功率可在四象限运行;可以向无源网络系统供电,且可作为电网黑启动电源;多馈入直流输电系统中,可作为独立电源向电网提供稳态和暂态支撑等。相比于 LCC-HVDC,目前 VSC-HVDC 的弱点主要是容量和电压等级仍相对较小、运行损耗较大等。

将 LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 通过不同的接线方式和拓扑进行结合,形成混合直流输电系统,可以克服两者各自存在的问题,发挥两者各自的长处。目前,混合直流输电已成为输电方式的研究热点。

近几年,混合直流输电技术已经在实际工程中得到了应用。在欧洲,ABB 公司在挪威和丹麦之间原有三极 LCC-HVDC 系统的基础上,2014 年将投入运行单极 500kV、700MW 的 Skagerrak HVDC Interconnections Pole 4 工程,从而构成混合四极直流输电系统,以充分发挥 LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 各自的特点。在加拿大,曼尼托巴省正在计划建设一条直流输电线路,该工程的两端拟采用送端 LCC 受端 VSC 的混合直流输电方式,同时该工程建成之后将与已有的两条 LCC-HVDC 一起,构成包含电流源馈入和电压源馈入的并联混合多馈入直流输电系统。

我国上海已有多条 LCC-HVDC 线路馈入,而南汇风电场通过 VSC-HVDC 并入上海电网,形成了并联混合多馈入直流输电系统,不过由于南汇 VSC-HVDC 的容量很小,暂无对该系统的相关研究工作。在浙江省舟山嵊泗岛和上海芦潮港之间有一条 LCC-HVDC 线路,容量为 60MW,而即将建成的舟山五端 VSC-HVDC 工程,其中一端落点也在嵊泗,容量为 100MW,这样在嵊泗岛将形成混合双馈入直流输电系统,将首次面临两类不同直流系统的协调配合问题。南方电网为改善交流系统的电压动态特性,减少 LCC-HVDC 换相失败的次数,已在广州北郊投运了静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM),其本质也可视为电压源型换流器和电流源型换流器组成的混合直流输电的一种形式。

在 VSC-HVDC 发展初期,由于其容量较小,有关混合直流输电的研究显得有些超前。2006 年开始,在国家自然科学基金的资助下,本书作者提出将 VSC-HVDC 和 LCC-HVDC 构成混合双馈入直流输电系统,以减少传统直流输电工程发生换相失败的概率,提高传统直流输电的运行可靠性,并在受端电网发生大停电时,提高传统直流输电的独立性,使其具备参与电网黑启动过程的能力。由于当时 VSC-HVDC 容量较小,与 LCC-HVDC 在容量上不具备匹配性,该混合直流输电拓扑曾引起争议,也得到了关注。此混合直流系统于 2007 年申请了发明专利“一种双馈入直流输电系统”(ZL200710185454.0),并



于2010年获得授权。自此开始,混合直流输电一直是本课题组研究的重点之一,该研究方向得到了加拿大工程院院士、IEEE Fellow、曼尼托巴大学Ani Gole教授的大力支持,同时得到了中国电力科学研究院和中国南方电网科学研究院等单位相关专家的大力支持。

本书由赵成勇、郭春义和刘文静共同撰写,第1章由赵成勇完成,第2~4章由郭春义完成,第5、6章由刘文静完成,第7、8章部分内容来源于课题组硕士研究生张岩坡、倪俊强、李丹的论文工作,由赵成勇、郭春义改写,全书由赵成勇统稿。感谢课题组参与本书部分章节材料整理和编辑工作的博士研究生许建中、倪晓军、苑宾,硕士研究生彭茂兰、徐洁、郭裕群、袁艺嘉等。

特别感谢加拿大工程院院士Ani Gole教授多年来对本书相关研究工作的支持,感谢RTDS Technologies公司的张益博士给予的帮助,感谢新能源电力系统国家重点实验室对本书出版工作的支持。

本书的研究工作得到了国家863课题(2013AA050105)和国家自然科学基金项目(50577018,51177042)的资助,在此表示感谢!

VSC-HVDC及混合直流输电技术正处于快速发展之中,本书仅反映了课题组目前在混合直流输电方面的研究成果,难免以偏概全,课题组的部分最新研究成果还可参见稍早出版的《柔性直流输电建模和仿真技术》一书。

赵成勇

2014年1月



目 录

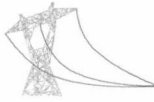
《智能电网研究与应用丛书》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 LCC-HVDC 的优势和不足	1
1.2 VSC-HVDC 的优势和不足	3
1.3 并联混合多馈入直流输电系统结构	5
1.3.1 拓扑结构	5
1.3.2 作用和应用前景	7
1.4 一端 LCC 一端 VSC 的混合直流输电系统结构	8
1.4.1 拓扑结构	8
1.4.2 作用和应用前景	9
1.5 含 STATCOM 的 LCC-HVDC 系统结构	10
1.5.1 拓扑结构	10
1.5.2 作用和应用前景	11
参考文献	11

第一篇 并联混合多馈入直流输电系统

第 2 章 并联混合多馈入直流输电系统的运行特性	15
2.1 LCC-HVDC 的运行特性	15
2.1.1 数学模型	15
2.1.2 CIGRE 标准测试模型	17
2.1.3 稳态和暂态特性	18
2.2 VSC-HVDC 的运行原理与控制策略	23
2.2.1 基本运行原理	23
2.2.2 控制策略	26
2.3 并联混合双馈入系统的控制策略和稳态特性	35



2.3.1	系统结构	35
2.3.2	控制策略	36
2.3.3	稳态特性分析	36
2.4	传统双馈入和并联混合双馈入系统的对比分析	40
2.4.1	传统双馈入和并联混合双馈入系统	40
2.4.2	稳态特性的对比分析	42
2.4.3	暂态过电压的对比分析	45
2.4.4	换相失败免疫特性的对比分析	47
2.4.5	故障恢复特性的对比分析	48
2.5	混合双极系统的控制策略和系统特性	50
2.5.1	混合双极系统的结构	50
2.5.2	混合双极系统的模型	51
2.5.3	混合双极系统的协调控制策略	52
2.5.4	混合双极系统的运行特性	53
2.6	本章小结	57
	参考文献	58
第3章	并联混合双馈入系统中 VSC-HVDC 对 LCC-HVDC 的影响	60
3.1	视在短路比增加量	60
3.1.1	视在短路比增加量的提出	60
3.1.2	视在短路比增加量的计算步骤	61
3.1.3	视在短路比增加量的求解算例	61
3.2	视在短路比增加量的验证	64
3.3	本章小结	67
	参考文献	68
第4章	受端为无源网络的并联混合双馈入系统特性分析	69
4.1	LCC-HVDC 参与电网恢复的意义	69
4.2	受端是无源网络时并联混合双馈入系统的结构和控制策略	70
4.3	LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 的相互影响	71
4.3.1	正常运行状态时的相互影响	71
4.3.2	公共交流母线电压变化时的运行特性	72
4.3.3	公共交流母线发生故障时的动态运行特性	73
4.3.4	无功补偿装置容量对 VSC-HVDC 调节范围的影响	74
4.4	受端是无源网络时并联混合双馈入系统的仿真分析	74



4.4.1 系统参数	74
4.4.2 启动和稳态特性分析	75
4.4.3 故障特性分析	80
4.5 本章小结	84
参考文献	84

第二篇 一端 LCC 一端 VSC 的混合直流输电系统

第 5 章 LCC-VSC 混合直流输电系统	87
5.1 接线方式和参数设计优化	87
5.1.1 接线方式	87
5.1.2 参数设计优化	89
5.2 启动控制方法	93
5.2.1 LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 的启动方式	93
5.2.2 LCC-VSC 混合直流输电系统的启动方法	94
5.3 仿真验证及分析	95
5.3.1 仿真算例说明	95
5.3.2 参数优化前后的特性对比	96
5.3.3 无源网络供电特性分析	99
5.4 本章小结	101
参考文献	101
第 6 章 VSC-LCC 混合直流输电系统	103
6.1 运行原理与控制方法	103
6.1.1 运行原理	103
6.1.2 控制方法	104
6.2 抑制 LCC 侧换相失败的控制方法	113
6.2.1 LCC 侧定关断角备用控制	113
6.2.2 VSC 侧低压限压控制器	114
6.3 仿真验证及分析	117
6.4 本章小结	124
参考文献	125

第三篇 含 STATCOM 的 LCC-HVDC 系统

第 7 章 STATCOM 与 LCC-HVDC 的协调控制	129
--------------------------------	-----



7.1 含 STATCOM 的 LCC-HVDC 系统的结构和控制方法	129
7.1.1 系统结构	129
7.1.2 控制方法	129
7.1.3 运行特性分析	130
7.2 含 STATCOM 的 LCC-HVDC 系统的改进控制策略	135
7.2.1 STATCOM 交流电压参考值调节控制	136
7.2.2 LCC-HVDC 附加直流电流和附加关断角控制	137
7.2.3 控制方法的验证	138
7.3 STATCOM 与电容器组的协调控制	143
7.3.1 电容器组的容量设计	143
7.3.2 协调控制策略	145
7.4 利用 STATCOM 启动极弱受端 LCC-HVDC 系统	147
7.4.1 极弱受端 LCC-HVDC 系统参数	148
7.4.2 利用 STATCOM 启动 LCC-HVDC 的控制方法	148
7.4.3 启动方法的验证	149
7.5 本章小结	152
参考文献	152
第 8 章 STATCOM 对 LCC-HVDC 的影响	153
8.1 STATCOM 对单馈入 LCC-HVDC 的影响	153
8.1.1 功率传输特性	154
8.1.2 系统运行极限	158
8.1.3 换相失败免疫特性	161
8.1.4 暂态过电压特性	162
8.1.5 故障恢复特性	163
8.2 STATCOM 对双馈入 LCC-HVDC 的影响	165
8.2.1 稳态运行特性	166
8.2.2 数学模型	169
8.2.3 功率传输特性	170
8.2.4 系统运行极限	175
8.2.5 换相失败免疫特性	181
8.2.6 暂态过电压特性	185
8.2.7 故障恢复特性	186
8.3 本章小结	188
参考文献	189



第 1 章 绪 论

传统高压直流输电又称为电网换相高压直流输电(LCC-HVDC)或电流源换流器高压直流输电(CSC-HVDC),采用普通晶闸管作为换流元件。与此相对应,电压源换流器高压直流输电(VSC-HVDC)采用全控型器件作为开关元件。混合直流输电系统结合了二者的优势,将在未来电网的发展中发挥重要的作用。本章将介绍 LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 的优势和不足,详细描述三种典型混合直流输电系统的拓扑结构,即并联混合多馈入直流输电系统、一端 LCC 一端 VSC 的混合直流输电系统和含静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)的 LCC-HVDC 系统,并分析这三种混合直流输电系统各自的特点、作用和应用前景。

1.1 LCC-HVDC 的优势和不足

20 世纪 50 年代以来,LCC-HVDC 以其远距离大容量输电、有功功率快速可控等特点在世界范围内得到了快速发展。与高压交流输电相比,它具备很多优点^[1,2]:①不存在交流输电的稳定性问题,有利于远距离大容量输电;②线路造价低,且没有交流线路的对地电容电流问题;③可实现两个电网的非同步联网;④有功功率快速可控,有利于改善交流系统的运行特性;⑤可单极运行,提高了 LCC-HVDC 的运行可靠性,也有利于分期建设。

但是因为 LCC-HVDC 采用无自关断能力的普通晶闸管作为换流元件,所以 LCC-HVDC 系统需要借助一定强度的交流系统来实现换相,这使得 LCC-HVDC 客观上存在一些局限,主要包括如下几方面^[1,2]。

(1) LCC-HVDC 的运行容易受交流电网的影响。当交流电网发生故障或三相严重不对称造成交流母线电压下降时,LCC-HVDC 容易发生换相失败。为避免发生连续换相失败,LCC-HVDC 通常采用简单的闭锁措施,使 LCC-HVDC 自身安全地退出运行,其结果会使交流系统突然失去一个很大的有功电源,可能导致事故的扩大。

(2) LCC-HVDC 不能在极弱受端交流系统下运行。LCC-HVDC 要求受端交流系统必须是有源网络而且有足够的短路容量,如果受端交流系统短路



容量太小,LCC-HVDC 将失去运行的基本条件。

(3) LCC-HVDC 不能作为电网大停电的恢复电源。由于 LCC-HVDC 依赖交流系统运行,当交流系统发生大停电时,电网恢复初期交流系统很弱,LCC-HVDC 不具备运行条件,不能作为启动电源参与电网的恢复过程,LCC-HVDC 有功功率快速可控的特点也不能在电网恢复的过程中得到发挥。

(4) LCC-HVDC 需要消耗大量的无功功率,其数值为输送有功功率的 40%~60%,因此需要大量的无功补偿和滤波装置。首先,这些设备增加了换流站的投资和运行维护费用;其次,大量的无功补偿和滤波设备在特定的情况下可能引起过电压问题。例如,LCC-HVDC 系统在逆变侧甩负荷、紧急停运、换流器丢失触发脉冲、交直流线路故障等情况下,换流器消耗的无功功率迅速减小,换流站过剩的无功功率将会注入所联的交流系统,引起换流站交流母线电压升高,导致过电压问题,从而造成绝缘配合困难,并增加整个系统的造价。

虽然 LCC-HVDC 系统存在上述缺陷,但是它在技术和经济上的独特优势,使其对我国电力工业的发展起到十分重要的作用。自 1987 年舟山直流输电工程投运以来,计及目前已投运的云南—广东、向家坝—上海、铝屏—苏南、糯扎渡—广东、哈密—郑州 5 条 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程,我国已建成投运的 LCC-HVDC 工程共有 21 项。到 2020 年,我国将建成 15 个特高压直流输电工程。届时我国建设的 LCC-HVDC 工程总计可达 38 项,将占世界新建 LCC-HVDC 工程的一半以上。在未来一定时期内,LCC-HVDC 在远距离大容量输电和电网互联两个方面在我国电网中将占有不可替代的地位。

目前,随着 LCC-HVDC 容量的增加,受端交流系统的强度相对减弱。例如,在华东电网和南方电网,由于多条 LCC-HVDC 的馈入,受端交流系统的强度相对减弱。同时,在我国某些区域,由于受端系统本身就是弱系统,LCC-HVDC 的运行存在潜在的威胁。例如,为给西藏经济社会发展提供可靠的电力供应,青海—西藏直流联网工程已经投入运行,但是西藏受端系统是一个弱系统,其运行可靠性面临挑战,同时,交直流混联的复杂电网由于故障等原因,很有可能发生连续换相失败,甚至造成大范围停电事故。在华东和广东电网,均形成包含多条 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电系统、 $\pm 500\text{kV}$ 直流输电系统的直流多落点电网,且各个直流逆变站间的电气距离都较小,交流与直流、直流与直流之间有很强的相互作用,因而在某些情况下,有多个直流系统同时发生换相失败且难以恢复的可能,该情况将对系统的安全稳定性造成不可估量的危害。可见,换相失败是 LCC-HVDC 急需解决的关键问题之一。因此,无论是目前还是将来,如何克服 LCC-HVDC 的不足,提高其运行独立性,使其更好



地发挥对电网的支撑作用,对我国电网的安全稳定运行具有重要意义。

1.2 VSC-HVDC 的优势和不足

20世纪90年代后,以全控型器件为基础的电压源换流器高压直流输电(VSC-HVDC)得到了快速发展。由于这种换流器功能强、体积小、可减少换流站的设备、简化换流站的结构,ABB公司将这一技术称为HVDC Light,西门子公司称其为HVDC PLUS,我国称其为柔性直流输电。本书为了强调柔性直流输电与传统直流输电的不同换流方式,采用国际上通用的学术名称,即将柔性直流输电称为VSC-HVDC。

自1997年世界首个VSC-HVDC试验工程(赫尔斯扬工程,额定功率3MW,直流电压 $\pm 10\text{kV}$)投入运行以后,后续建设的VSC-HVDC工程电压等级和传输容量均大幅提升,但大都基于两电平、三电平电压源换流器。由于早期工程普遍采用脉宽调制(pulse width modulation, PWM)技术,换流器损耗较大。例如,美国2002年投运的CrossSound工程,额定传输容量330MW,工程实测满负荷损耗为4%^[3]。同时,由于单个全控器件的耐压能力有限,无法满足高电压大容量的需求,需要使用大量IGBT组成串联阀体。由于各个器件的开通关断特性不尽相同,多个IGBT串联会带来静态、动态均压困难以及电磁干扰等问题^[4],从而制约了VSC-HVDC技术的发展。为解决上述两电平、三电平VSC-HVDC技术存在的缺陷,2003年,德国联邦国防军大学的Lesnicar和Marquardt提出了模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)拓扑^[5],并研制了2MW、17电平的试验样机^[6]。之后ABB公司提出了类似于MMC的级联两电平换流器(caseaded two level converter, CTL)结构^[7]。MMC采用子模块(sub-module, SM)串联的方式构造换流阀,避免了IGBT的直接串联,降低了对器件一致性的要求。同时,特殊的调制方法决定了其可以在较低的开关频率(150~300Hz)下获得很高的等效开关频率。随着电平数的升高,输出波形接近正弦,可以省去交流滤波器。MMC子模块的拓扑结构主要有半桥型子模块(half-bridge sub-module, HB-SM)、全桥型子模块(full-bridge sub-module, FBSM)和双箝位型子模块(clamp-double sub-module, CDSM)^[8]。这些新型拓扑结构为VSC-HVDC在未来高电压大容量场合的应用提供了技术支持。

目前,全世界已投运的VSC-HVDC输电工程有18项,VSC-HVDC系统在我国也已成为研究和工程应用的热点,国家电网公司在上海建立的“上海南



汇柔性直流输电示范工程”，额定输送功率 18MW，直流电压 $\pm 30\text{kV}$ ，已于 2011 年投入运行。广东南澳三端柔性直流输电示范工程已于 2013 年 12 月 25 日投运。此外，浙江舟山五端柔性直流输电重大科技示范工程也即将投运。

与 LCC-HVDC 相比，VSC-HVDC 具有以下主要技术特点^[9,10]。

(1) 正常运行时 VSC-HVDC 可以同时且相互独立地控制有功功率和无功功率，而 LCC-HVDC 可控制有功功率，对无功功率的调节能力很弱，因此，VSC-HVDC 控制更加灵活方便。

(2) VSC-HVDC 可以更加方便地进行潮流反转。VSC-HVDC 只需要改变直流电流的方向即可实现潮流反转，不需要改变直流电压的极性。这一特性使得 VSC-HVDC 的控制系统配置和电路结构都保持不变，既不用改变 VSC-HVDC 的控制模式，也不需要闭锁换流器，整个反转过程可以在很短时间内完成。

(3) VSC-HVDC 能够起到 STATCOM 的作用，动态补偿交流母线的无功功率，稳定交流母线电压。

(4) VSC-HVDC 的器件可以实现自关断，可以工作在无源逆变方式，可以向无源网络供电。

(5) VSC-HVDC 可以作为电网故障后的恢复电源，帮助电网快速恢复。2003 年美国东北部 8·14 大停电时，美国长岛 VSC-HVDC 工程的表现充分验证了 VSC-HVDC 系统的黑启动能力。

VSC-HVDC 系统的技术特点使其可以在如下很多场合中得到应用^[10]。

(1) VSC-HVDC 技术上的优势，使可再生能源（风能、太阳能等）通过 VSC-HVDC 系统联网成为一种发展趋势。

(2) 目前，城市的输电走廊已经非常紧张，原有配电网已经不能满足用电量的需求，而采用 VSC-HVDC 系统通过直流电缆向城市供电是解决该问题的一种很好的途径。

(3) 由于 VSC-HVDC 可以工作在无源逆变方式，可以向孤岛供电。

(4) 由于 VSC-HVDC 系统具有直流电压极性不变的特点，可以非常方便地构成多端 VSC-HVDC 系统。

(5) VSC-HVDC 系统可以用来进行非同步电网的互联，还可以改善系统运行特性，提高电能质量。

总之，VSC-HVDC 在技术上有若干优势，如果采用混合直流输电技术，可弥补 LCC-HVDC 的不足，合理地发挥 LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 的长处。LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 构成的混合直流系统是通过 VSC-HVDC 的