

柔性直流输电系统拓扑结构研究综述

蒋冠前^{1,3}, 李志勇¹, 杨慧霞^{1,2}, 杨静¹

(1. 许昌开普电气研究院, 河南 许昌 461000; 2. 合肥工业大学, 安徽 合肥 230001;
3. 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

摘要: 柔性直流输电系统的拓扑结构是其关键技术之一, 对整个工程的性能和成本影响巨大。首先介绍了国内外柔性直流输电工程的发展情况, 并分析了各种电压源换流器、模块化多电平换流器的技术原理。然后着重阐述了柔性直流输电系统主接线拓扑结构的最新研究情况, 并对其应用范围、优缺点等做了归纳和分析。在此基础上提出将柔性直流输电仿真技术等作为下一步研究工作的重点, 为今后的柔性直流输电工程拓扑方案的研究提供了一定的理论借鉴。

关键词: 电压源换流器; 模块化多电平换流器; 柔性直流输电; 拓扑结构; 分布式发电并网

Research review on topological structure of flexible HVDC system

JIANG Guanqian^{1,3}, LI Zhiyong¹, YANG Huixia^{1,2}, YANG Jing¹

(1. Xuchang Ketop Electric Research Institute Research Institute, Xuchang 461000, China; 2. Hefei University of Technology, Hefei 230001, China; 3. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Topological structure is one of the key techniques of flexible HVDC, which has great influence on the performance and cost of a project. The development status of flexible HVDC projects at home and abroad are introduced and the technological principle of VSC and MMC are analyzed. Then the current research on main electrical connection topological structure of flexible HVDC system are introduced, and their application range, advantages and disadvantages, etc. are concluded and analyzed. On the basis, the suggestion about taking flexible HVDC simulation technology as the interesting direction of next research is presented. This paper provides a theoretical reference for the topological structure research of flexible HVDC system in future.

Key words: VSC; MMC; flexible HVDC; topology; distributed generation

中图分类号: TM721 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)15-0145-09

0 引言

随着国民经济的快速发展, 能源的需求不断攀升, 电力能源无论在发电、输电、配电等方面都有着很大的技术发展, 但随着电力能源的发展, 也出现了很多新的技术难题, 其中就输电方面有以下方面:

- 1) 分散、小型、远离负荷中心的可再生能源发电经济并网技术;
- 2) 海上钻探平台、孤立小岛等无源负荷经济供电技术;
- 3) 城市电负荷扩容及城市电网改造技术;
- 4) 边远地区供电;
- 5) 微电网并网;

6) 非同步电网的并网。

传统的交流输电和直流输电技术目前还无法在技术效益和经济效益上有效地解决以上难题。而随着电力电子器件和控制技术的发展, 采用 IGBT、IGCT 等新型全控电力电子器件构成电压源型换流站(Voltage Source Converter, VSC) 进行直流输电成为可能。柔性直流输电技术不需要交流系统提供换相容量、可以向无源负荷供电^[1], 在促进大规模风力发电场并网^[2-4]、城市供电和孤岛供电等新技术的发展, 满足持续快速增长的能源需求和能源的清洁高效利用, 有着非常显著的作用。同时 VSC-HVDC 技术还兼具良好的可控性、输电容量大、输出电压谐波量小、具有动态无功补偿功能、成本低、损耗小等优点, 因此柔性直流输电技术越来越成为输电

领域研究的热点^[5-20]。

本文通过当前国内外 VSC-HVDC 研究状况的差异对比, 结合 VSC-HVDC 的技术发展, 综合不同种类型的柔性直流输电拓扑结构原理, 分析了各种柔性直流输电系统拓扑结构特点及优缺点。

1 国内重大柔性直流输电工程

我国柔性直流输电技术发展起步较晚, 目前建成的仅有上海南汇风电场柔性直流输电示范工程和南澳±160 kV 多端柔性直流输电示范工程工程。

1.1 上海南汇风电场柔性直流输电示范工程

2011 年 8 月投运的上海南汇风电场柔性直流输电示范工程, 是我国也是全亚洲第一个柔性直流输电工程, 额定直流电压±30 kV, 额定直流电流 300 A, 电缆长度 8.60 km, 输送功率 18 MVA。虽然上海南汇风电场柔性直流输电示范工程电压等级不高、容量不大、输送距离较短, 但却是我国电网建设史上一个新的里程碑。

1.2 南澳±160 kV 多端柔性直流输电示范工程

2012 年 12 月, 南澳岛上青澳、金牛两个换流站与汕头澄海区的塑城换流站完成了三端投产启动, 南澳多端柔性直流输电工程正式投运, 它是世界上首个多端柔性直流输电示范工程。额定直流电压±160 kV, 混合电缆长度 40.7 km, 设计容量为 200 MW。

1.3 舟山±200 kV 五端柔性直流工程

2014 年 07 月, 世界首个五端柔性直流输电工程——浙江舟山±200 kV 五端柔性直流工程正式投运, 工程包括在定海、岱山、衢山、洋山、泗礁各建一个变电站, 容量分别为 400 MW、300 MW、100 MW、100 MW、100 MW, 输电电缆厂 140.1 km。

2 国际上其他重大柔性直流输电工程

国际上 ABB 公司柔性直流输电走在世界前列, 占据了绝大部分市场份额。在世界范围内已有十几个商业化工程投入运行, 其最高直流电压为±150 kV, 最大传送功率为 400 MW。西门子公司仅在美国建立了 Trans bay cable 直流输电工程, 而阿尔斯通电网公司目前也在加紧柔性直流输电方面的研究, 目前仅建立了小功率模块化多电平拓扑柔性直流输电试验系统, 估计在不久的将来也会推广到工程应用。

2.1 美国-墨西哥背靠背直流输电工程

位于 Eagle Pass 的背靠背柔性直流输电工程投运于 2000 年, 位于美国德州和墨西哥边境附近, 采用三电平 VSC-HVDC 技术, 两侧交流电压 132/132

kV, 直流电压±15.9 kV, 直流电流 1 100 A, 是一个换流站工程, 设备由 ABB 公司提供, 主要用于电力交易、系统互联及电压控制。

2.2 波罗的海联网直流输电工程

2006 年建成于爱沙尼亚和芬兰的波罗的海直流输电工程, 两侧交流电压 330/400 kV, 直流电压±150 kV, 传输功率 350 MW, 设备由 ABB 公司提供, 主要用于解决芬兰和爱沙尼亚的电网非同步相连, 采用了陆上电缆+海底电缆的传输方式。

2.3 Valhall offshore 直流输变电工程

挪威 Valhall offshore 直流输电工程建成于 2009 年, 工程采用 ABB 公司的设备。直流电压±150 kV, 传输功率 78 MW, 输电距离 292 km。主要目的是为海上钻井平台供电, 其提高了油气田的生产效率, 减少了温室气体排放。

2.4 Trans bay cable 直流输变电工程

美国 Trans bay cable 直流输电工程建成于 2010 年, 工程采用西门子的设备。直流电压±200 kV, 传输功率 400 MW, 输电距离 88 km。通过海底电缆向旧金山市中心区域传输电能, 主要目的是减少该区域的供电阻塞, 提高电网整体的安全性和可靠性, 降低网损。

3 技术原理

目前存在的柔性直流输电工程采用的电压源换流器主要有以下三种: 两电平 VSC(电压源换流器)、三电平 VSC、模块化多电平换流器(MMC)。

3.1 两电平 VSC

两电平 VSC 的结构图如图 1 所示, 每相两个桥臂, 共六个桥臂。每个桥臂由绝缘栅双极性晶体管

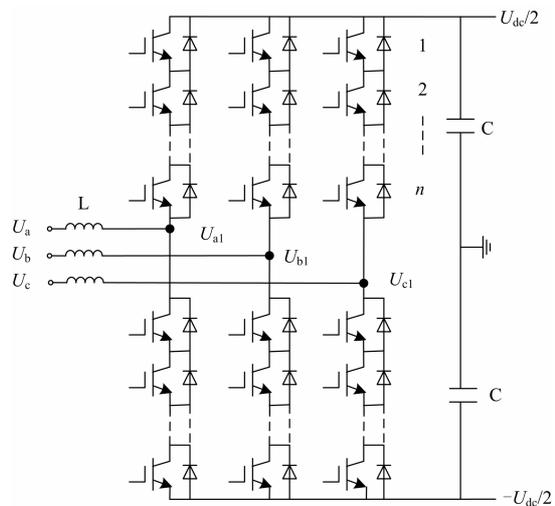


图 1 两电平 VSC 结构图

Fig. 1 Curve configuration of two-level VSC

(IGBT)和二极管并联构成; 为了提高电压和容量, 可以用多个绝缘栅双极性晶体管和二极管并联后再串联; 串联的个数(图 1 中“ n ”)则决定于换流器的电压等级、额定功率, 以及电力电子开关器件的通流能力和耐压强度。

如图 1 所示, 每相的上下两个桥臂 IGBT 轮流导通, 当上桥臂导通时, 输出直流电压为 $+U_{dc}/2$, 当下桥臂导通时, 输出直流电压为 $-U_{dc}/2$, 所以两电平换流器各相仅能输出两个电平: $+U_{dc}/2$ 和 $-U_{dc}/2$, 其通过 PWM 来逼近正弦波, 以 A 相为例, 输出波形如图 2 所示。

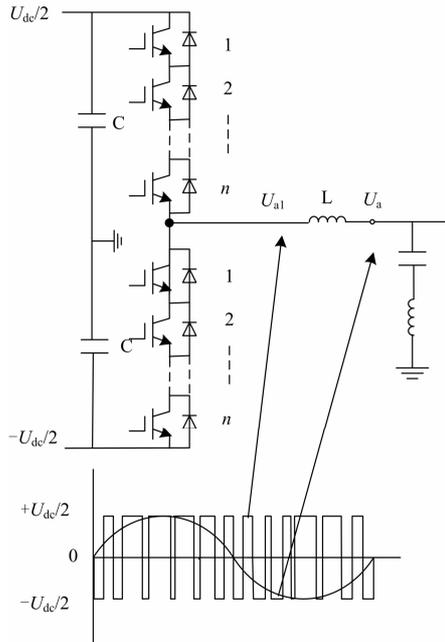


图 2 两电平 VSC 单相波形

Fig. 2 Single-phase voltage of two-level VSC

两电平 VSC 在实现大容量高电压输电方面存在着一定的缺陷, 原因主要为开关器件可承受的电压和电流有限, 只能通过增加开关器件的串联来提高电压, 过多的串联会导致其动态电压的不稳定和谐波含量较大。

3.2 三电平 VSC

三电平 VSC 如图 3 的结构图所示, 它和两电平 VSC 的区别是其共用了直流电容器, 借此可以多输出一个电平 0 V 。

图 4 中, 当 S1 和 S2 对应的晶闸管全部导通, 且 S3 和 S4 对应的晶闸管全部中断时, 直流输出电压为 $+U_{dc}/2$; 当 S1 和 S2 对应的晶闸管全部中断, 且 S3 和 S4 对应的晶闸管全部导通时, 直流输出电压为 $-U_{dc}/2$; 当 S1 和 S3 对应的晶闸管全部中断, 且 S2 和 S4 对应的晶闸管全部导通时, 直流输出电

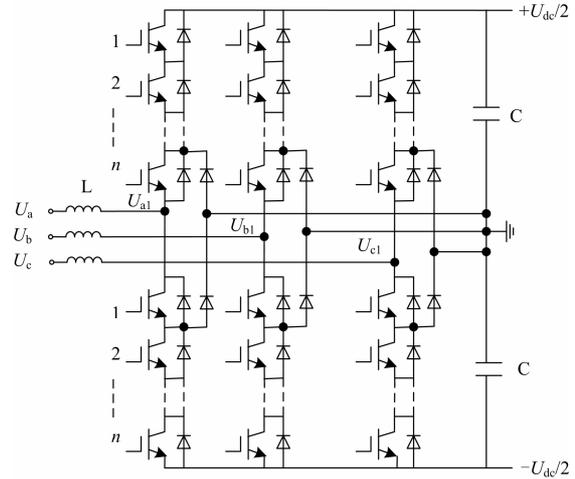


图 3 三电平 VSC 结构图

Fig. 3 Curve configuration of three-level VSC

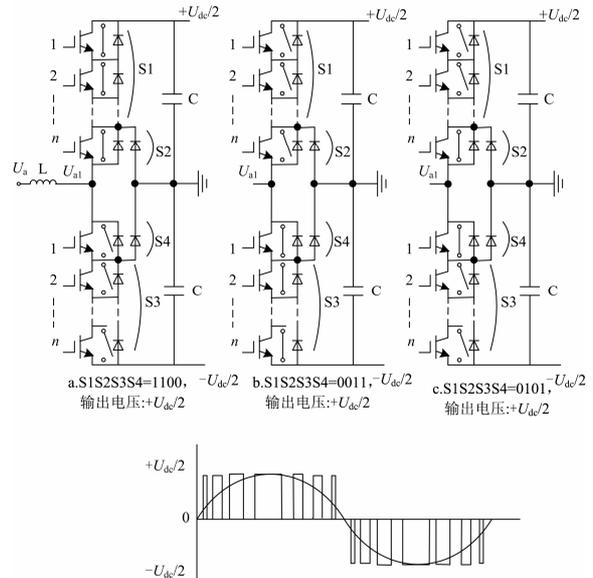


图 4 三电平 VSC 单相波形

Fig. 4 Single-phase voltage of three-level VSC

压为 0 。三电平换流器其实只是多电平换流器中的一种, 也可以利用多接几组共用二极管的方式, 控制输出不同的直流输出电压; 对应输出三个及以上电压等级的换流器, 一般称为多电平换流器, 为了方便, 本文仅以三电平为例介绍。

用同样的开关器件, 三电平 VSC 换流器的输出电压比两电平 VSC 可以提高一倍, 提高了电压等级, 但由于提高电压依然需要直接串联开关器件, 电容均压问题和谐波含量大的问题依然无法得到有效的解决。

3.3 模块化多电平换流器

模块化多电平换流器(MMC)的结构图如图 5 所

示, 其桥臂不再由开关器件串联而成, 而由多个子模块和一个串联电抗器组成。

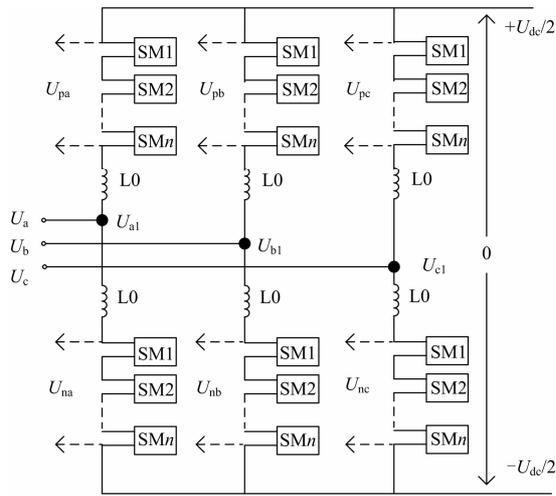


图 5 MMC 结构图

Fig. 5 Curve configuration of MMC

图 6 为 MMC 的一个子模块结构图, 子模块有三种工作状态, 分别为: 1) 对 T1 和 T2 同时施加开通信号; 2) 对 T1 施加开通信号, 对 T2 施加中断信号; 3) 对 T1 施加中断信号, 对 T2 施加开通信号。

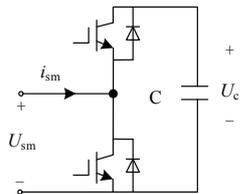


图 6 MMC 子模块结构图

Fig. 6 Curve configuration of sub modular of MMC

当控制模块处于状态 1 时, T1 和 T2 中断, 当电流流向由 A 流向 B 时, D1 导通, 电流向电容器 C 充电, 此时为 MMC 启动时的子模块电容充电阶段; 当电流流向由 B 流向 A 时, D2 导通, 此时电容器 C 被旁路, 当 MMC 故障时可用此状态隔离子模块电容器; 正常运行时, 不能出现工作状态 1 的两种情况。

状态 2 时, 施加导通信号于 T1, 中断信号于 T2, 此时 T2 因施加中断信号而中断, D2 因电压反向也中断。当电流流向由 A 到 B 时, 虽然 T1 被施加了导通信号, 但由于电压反向, T1 依然中断, 而 D1 则导通, 输出电压等于电容器电压加上 D1 二极管压降, 忽略掉二极管压降, 则等于电容器电压 U_c ; 当电流流向由 B 到 A 时, 此时 T1 导通, 电容器放电; 忽略掉 T1 晶闸管压降, 输出电压依然为电容

器电压 U_c ; 因此, 状态 2 对应于子模块“投入状态”, 输出电压 U_c 。

状态 3 时, 施加中断信号于 T1, 导通信号于 T2, 此时 T1 因施加中断信号而中断, D1 因电压反向也中断。当电流流向由 A 到 B 时, T2 导通, 而 D2 则因电压反向中断, 输出电压等于 T2 晶闸管压降, 忽略掉晶闸管压降, 则输出电压为 0 V; 当电流流向由 B 到 A 时, 此时 T2 虽被施加导通信号, 但因电压反向中断, D2 则导通; 忽略掉 D2 压降, 输出电压依然为 0 V; 因此, 状态 3 对应于子模块“切除状态”, 输出电压 0 V。

MMC 运行时为满足直流侧电压恒定, 必须要求三相中投入状态的子模块数目相同且不变。另外为了防止 MMC 三相直流电压不相等, 产品环流和直流母线故障时产生冲击电压, 需要在上下臂各接入一个小电抗器 L_0 。图 7 中以 A 相为例, 忽略掉小电抗器 L_0 上的压降, 此时满足式(1)。

$$U_{pa} + U_{na} = U_{pb} + U_{nb} = U_{pc} + U_{nc} = U_{dc} \quad (1)$$

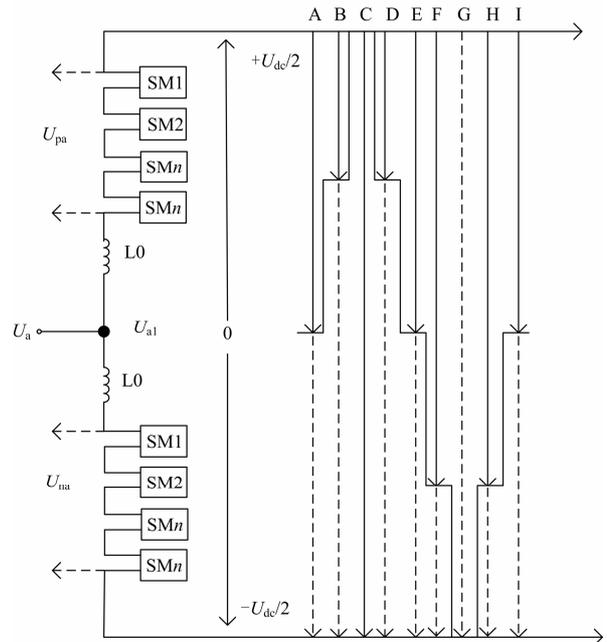


图 7 五电平 MMC 工作原理图

Fig. 7 Schematic diagram of five-level MMC

为了满足式(1)要求, 不考虑冗余的情况下, 通常要求上下桥臂的子模块对称互补投入, 假设上桥臂投入个数为 n_p 和下桥臂投入个数 n_n 即各时刻都满足

$$n_{pa} + n_{na} = n_{pb} + n_{nb} = n_{pc} + n_{nc} = N \quad (2)$$

由于子模块投入电压为 U_c , 可知

$$U_c = \frac{U_{dc}}{N} \quad (3)$$

图 7 中 $N=4$, 根据上文要求可以得出不同时段

的子模块投入模式, 见表 1。

表 1 五电平 MMC 输出电压及模块投入数

Table 1 Five-level MMC output voltage and input number of modules

时间段	A	B	C	D	E	F	G	H
U_a	0	$U_{dc}/4$	$U_{dc}/2$	$U_{dc}/4$	0	$-U_{dc}/4$	$-U_{dc}/2$	$-U_{dc}/4$
N_{pa}	2	1	0	1	2	3	4	3
N_{na}	2	3	4	3	2	1	0	1
N	4	4	4	4	4	4	4	4

MMC 换流器电路中, 子模块数目越多, 输出波形越逼近正弦波, 谐波含量越小; 在成本允许的情况下, 尽量增加子模块的个数, 来提高电压的质量。MMC 换流器的开关频率远远小于 VSC 换流器, 换流器的损耗也得到了很大程度的改善, 但随着输电电压的升高, 需要增加大量的模块单元, 增加了其控制系统的设计和实现难度。

另外国际上学者提出了基于混合型多电平换流器(HMC)^[21]的柔性输电系统及 HMC 换流器采用子模块均压控制策略^[22], 实现了在任意方向桥臂电流下对子模块的充放电。2010 年的 CIGRE 会议上, ABB 公司提出了级联两电平换流器(Cascaded Two-level Converter)^[23]。阿尔斯通则提出了全桥式 MMC, 这种全桥式 MMC 要比普通的半桥型 MMC 多用大约一倍的开关器件, 但可以有效抑制直流线路发生短路时的故障电流, 避免直接跳开交流侧断路器。MMC 的创始人 Marquardt R 也提出了一种双箝位子模块的 MMC 结构^[24]。

4 系统主接线拓扑结构

输电系统主接线方式需要考虑接地点的选择, 另外要考虑正常运行时接地点是否会流过工作电流。选择合适的接地点要求尽量降低直流线路的对地电压, 从而可以通过降低绝缘水平以节省工程成本。如果正常运行时接地点有工作电流流过, 则需要专门设置接地极, 这样会造成工程成本的增加。因此, 选择合适的主接线具有很大的经济价值。

4.1 由 VSC 或 MMC 基本单元构成的伪双极系统

目前已投运的两电平或三电平 VSC-HVDC 工程主接线方式大多如图 8 所示, 直流侧电容器的中点接地, 构成了正负极对称的直流输电线路, 这样既降低了直流线路的绝缘水平, 正常运行情况下又不会有工作电流流过接地点。

MMC-HVDC 直流侧没有集中布置的电容器, 无法采用图 8 中所示接地方式。为了降低直流线路的对地绝缘水平, 需构造正负极对称的直流线路。

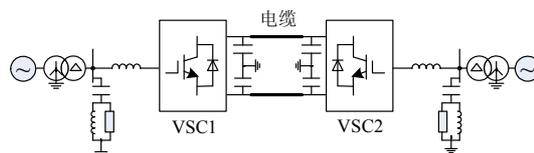


图 8 典型两端 VSC-HVDC 主接线

Fig. 8 Main electrical scheme of double-ended VSC-HVDC

Trans Bay Cable 柔性直流输电工程的主接线如图 9, 由于直流侧不能满足要求, 将接地点移到了交流侧。通过在换流变压器阀侧安装一组星形电抗, 然后经接地电阻接地, 使直流线路呈现对称的正、负极性。

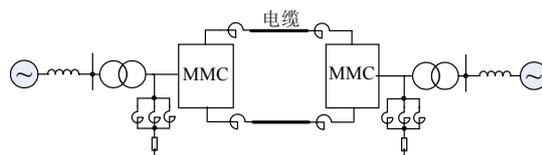


图 9 Trans Bay Cable 柔性直流输电工程主接线

Fig. 9 Main electrical connection of Trans Bay Cable Flexible HVDC Project

上海南汇柔性直流输电工程的主接线如图 10。上海南汇直流输电示范工程的换流变压器是 Δ -Y 绕组, 工程采用了将阀侧绕组的中性点经电阻接地的方式, 这样也达到了直流线路对地呈现出对称的正、负极性。

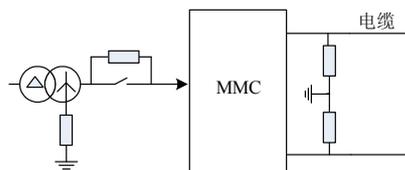


图 10 上海南汇柔性直流输电工程主接线

Fig. 10 Main electrical connection of Shanghai Nanhui Flexible HVDC Project

上述工程尽管接地点选择不同, 正常运行时工作电流也不流经接地点, 而且不需要设置专门的接地极, 但换流器发生故障或任一单极直流线路发生故障, 整个双极系统将不能再运行, 所以称为“伪双极系统”^[25]。

由于目前运行的柔性直流输电系统容量较小, 另外大多采用电缆作为直流线路, 故障率较低, 所以大多采用这种为双极系统接线, 但考虑到大容量或采用架空线路做直流线路的发展需求, 这种接线方式显然无法满足要求。

4.2 由组合式换流器构成的双极系统主接线

两电平或三电平 VSC 或 MMC 基本单元虽然理

论上可以通过可关断期间的串并联或子模块的级联不断提升容量,但其最终受制于换流变压器的容量。而通过基本单元串并联的组合式换流器,可以达到提升总容量的目的。

组合式换流器结构如图 11 所示,整个组合整流器有 nk 个 MMC(或 VSC)构成,若一个 MMC(或 VSC)单元额定参数为直流电压为 100 kV、直流电流 1 kA,则整个组合换流器额定参数为:直流电压 $100 \times n$ kV,直流电流 $1 \times k$ kA。组合式换流器构成的双极系统的主接线如图 12 所示。

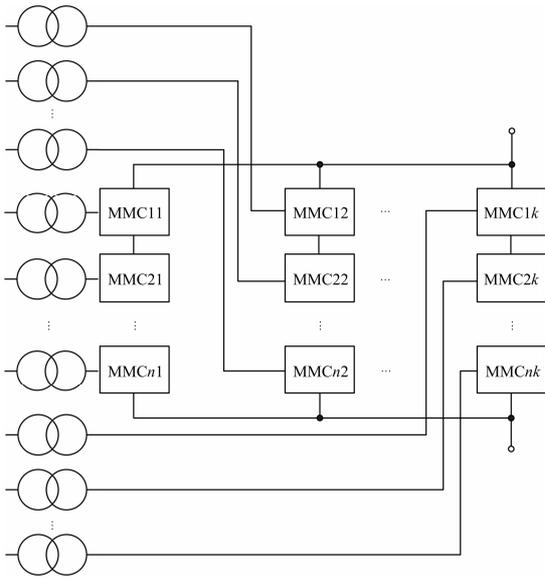


图 11 组合换流器结构图

Fig. 11 Curve configuration of the combination converter

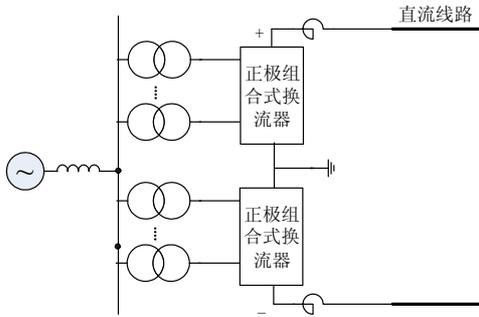


图 12 组合式换流器构成的双极系统主接线

Fig. 12 Main electrical connection of bipolar system consist of combination converter

组合式换流器双极系统克服了直流侧单极故障时对健全极的一个系列,提高了系统的可靠性,另外也降低了直流线路的绝缘水平。

4.3 基于 CDSM 的 C-MMC-HVDC 双极系统主接线

如图 13 所示,将常规 MMC 模块进行改进,在原来的每个子模块间增加两个箱位二极管(D6、D7)

和一个引导 IGBT(T5 和 D5 组成),形成一个箱位双子模块(CDSM),不仅可以保留常规 MMC 的所有优点,还能利用换流器本身的控制实现直流侧故障的自清除。

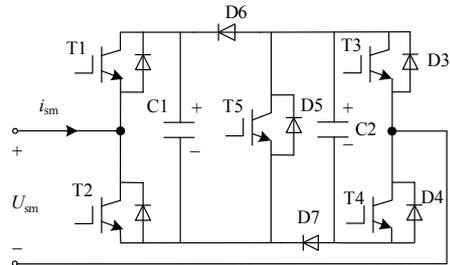


图 13 CDSM 结构示意图

Fig. 13 Curve configuration of CDSM

基于 CDSM 的 C-MMC-HVDC 双极系统主接线如图 14 所示,由于采用双极系统接线方式,单极故障时,不影响健全极的运行。

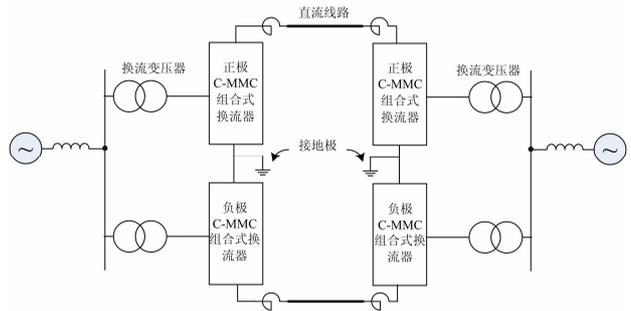


图 14 C-MMC-HVDC 双极系统主接线

Fig. 14 Main electrical connection of C-MMC-HVDC

基于 CDSM 的 C-MMC-HVDC 双极系统目前还没有运行工程,但其和常规的 MMC 的 HVDC 原理类似,比起常规的 MMC-HVDC 又多了直流侧故障的自清除能力,因此有很大的发展空间。但基于 CDSM 的 C-MMC-HVDC 双极系统的缺点是双向可控器件多,成本较高。

4.4 其他双极系统主接线

我国各地目前的能源分布资源和能源消耗需求严重不对称。西部地区集中了大部分煤炭资源,西南地区 and 西藏地区是水利资源的主要分布地,但东南沿海地区却是我国主要的能源消费中心。因此我国大规模的电力输送主要是西电东送。也就是仅仅考虑单向传输,根据这一特点,有人提出了整流站采用 LCC 整流站、逆变站采用二极管阀加 MMC 构成的混合式双极主接线^[26]。由于传统 LCC 直流输电技术成熟,另外逆变器端采用 MMC 技术,解决了受端系统容易换相失败问题,相当于融合了传统

直流输电技术和柔性输电技术的优点。这种拓扑接线对于我国目前的能源分布及消费特点非常适用, 但伴随国民经济的发展及产业结构调整, 西部地区未来也可能会发展成能耗中心, 而东部地区也有可能因为核能或其他新能源的利用成为电力资源中心, 双向电力传输对于混合式双极主接线则会成为软肋。

另外反过来整流站采用 VSC、逆变侧采用 LCC 也可构成混合式双极主接线^[2]。当这种拓扑结构运用于风电场时, VSC 系统可以调节风力发电场侧的交流电压, 解决了 LCC 系统容易换相失败的问题。特别当受端电网较强时, 会充分发挥其拓扑结构的优势。

还有学者提出了整流站采用 LCC 整流站、逆变站采用 C-MMC 构成的混合式双极主接线。此系统的优缺点和整流站采用 LCC 整流站、逆变站采用二极管阀加 MMC 构成的混合式双极主接线基本一致。

目前国内外学者对多端柔性直流输电的研究也越来越多^[4, 27-28], 并已应用于工程实践, 浙江舟山±200kV 五端柔性直流工程是世界首个五端柔性直流输电工程, 无论从电压等级、输送容量、输电距离及技术水平上都已赶上国际上最先进的柔性直流输电工程, 甚至在很多方面已领先国际水平。

5 柔性直流输电技术拓扑方案研究建议

柔性高压直流输电系统, 工程实践往往艰巨而复杂, 各项技术指标和各个部分的硬件的准确可靠参数在工程投运之前, 往往不容易在实际系统中得到, 为了保证系统运行的可靠性和控制策略的可行性, 在系统投运前期对各个部分进行细致的仿真分析和调试必不可少。目前已出现了能够完成电力系统的机电暂稳态分析的 VSC-HVDC 建模技术; 通过建立特定工况的 MMC 系统等效电路, 克服大规模柔性直流输电系统仿真计算时间超长的问題, 并掌握电力系统特性和柔性直流输电系统需求的 MMC 等效电路建模技术; 通过建立快速电磁暂态模型, 能够对复杂特别是多端柔性直流系统进行电磁暂态过程的详细仿真混合建模技术等, 柔性直流输电系统的潮流计算及稳定性分析、电磁暂态、数字闭环控制器设计及性能测试等都可以通过仿真技术来实现。建议将柔性直流输电仿真技术作为未来柔性直流输电技术拓扑方案研究的重要方向来研究。

6 结语

“十二五”之后, 我国的远距离大容量输电工

程越来越大, 有的甚至超过 2 500 km, 而交流输电的经济距离一般不超过 1 000 km, 发展特高压直流成了必然的选择。柔性直流输电技术相对于传统直流输电技术的优势, 随着电力电子器件的发展及各种柔性直流输电技术的完善, 将在电力领域有着越来越大的作用。采取合理的换流器拓扑结构及主接线拓扑结构, 在构建高效率高可靠性柔性直流输电系统上也起着越来越关键的作用。

参考文献

- [1] 冯明, 李兴源, 李宽, 等. 多端柔性输电电流系统启动控制及其仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 60-65.
FENG Ming, LI Xingyuan, LI Kuan, et al. Control and simulation of VSC-MTDC start-up procedure[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 60-65.
- [2] 赵成勇, 刘文静, 郭春义, 等. 一种适用于风电场送出的混合型高压直流输电系统拓扑[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 146-151.
ZHAO Chengyong, LIU Wenjing, GUO Chunyi, et al. Topology of a hybrid HVDC transmission system for wind power grid connection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 146-151.
- [3] 李爽, 王志新, 王国强, 等. 三电平海上风电柔性直流输电变流器的 PID 神经网络滑模控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 20-28.
LI Shuang, WANG Zhixin, WANG Guoqiang, et al. PID neural network sliding-mode controller for three-level offshore wind power VSC-HVDC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 20-28.
- [4] 刘亚磊, 李兴源, 曾琦, 等. 多端多电平柔性直流系统在海上风电场中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 9-14.
LIU Yalei, LI Xingyuan, ZENG Qi, et al. VSC-MTDC system based on MMC for offshore wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 9-14.
- [5] 邓健俊, 文安, 魏承志, 等. 含柔性直流输电的交直流并列系统有功潮流优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 118-123.
DENG Jianjun, WEN An, WEI Chengzhi, et al. An optimization method for active power flow in AC/VSC-HVDC parallel transmission systems[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 118-123.
- [6] 王珂, 刘建涛, 李亚平, 等. 柔性直流输电系统的自适应下垂反馈控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 48-53.

- WANG Ke, LIU Jiantao, LI Yaping, et al. An adaptive power control strategy based droop feedback for VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 48-53.
- [7] 饶成诚, 王海云, 王维庆, 等. 基于储能装置的柔性直流输电技术提高大规模风电系统稳定运行能力的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 1-7.
- RAO Chengcheng, WANG Haiyun, WANG Weiqing, et al. Enhancement of the stable operation ability of large-scale wind power system based on the VSC-HVDC embedded in energy storage apparatus[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 1-7.
- [8] 邓旭, 王东举, 沈扬, 等. 舟山多端柔性直流输电工程换流站内部暂态过电压[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 111-119.
- DENG Xu, WANG Dongju, SHEN Yang, et al. Research on transient overvoltage for converter station of Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC project[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 111-119.
- [9] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
- YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [10] 姚致清, 刘涛, 张爱玲, 等. 直流融冰技术的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 57-62.
- YAO Zhiqing, LIU Tao, ZHANG Ailing, et al. Research & application on DC de-icing technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 57-62.
- [11] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.
- YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.
- [12] 朱晋, 韦统振, 霍群海. 一种新型全桥变臂型 VSC-HVDC 变流拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 52-61.
- ZHU Jin, WEI Tongzhen, HUO Qunhai. A new full-bridge alternative arm based VSC-HVDC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 52-61.
- [13] 王国强, 王志新, 李爽. 模块化多电平变流器的直流功率控制仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(6): 64-71.
- WANG Guoqiang, WANG Zhixin, LI Shuang. Simulation research on direct power control of modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(6): 64-71.
- [14] 赵昕, 赵成勇, 李广凯, 等. 采用载波移相技术的模块化多电平换流器电容电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21): 48-55.
- ZHAO Xin, ZHAO Chengyong, LI Guangkai, et al. Submodule capacitance voltage balancing of modular multilevel converter based carrier phase shifted SPWM technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(21): 48-55.
- [15] 管敏渊, 徐政, 屠卿瑞, 等. 模块化多电平换流器型直流输电的调制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 48-52.
- GUAN Minyuan, XU Zheng, TU Qingrui, et al. Nearest level modulation for modular multilevel converters in HVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 48-52.
- [16] 管敏渊, 徐政. MMC 型 VSC-HVDC 系统电容电压的优化平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(12): 9-14.
- GUAN Minyuan, XU Zheng. Optimized capacitor voltage balancing control for modular multilevel converter based VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(12): 9-14.
- [17] 屠卿瑞, 徐政, 管敏渊, 等. 模块化多电平换流器环流抑制控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 57-61.
- TU Qingrui, XU Zheng, GUAN Minyuan, et al. Design of circulating current suppressing controllers for modular multilevel converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 57-61.
- [18] 陆翌, 王朝亮, 彭茂兰, 等. 一种模块化多电平换流器的子模块优化均压方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 52-58.
- LU Yi, WANG Chaoliang, PENG Maolan, et al. An optimized method for balancing sub-module voltages in modular multilevel converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 52-58.
- [19] 汪谦, 宋强, 许树楷, 等. 基于 RT-LAB 的 MMC 换流器 HVDC 输电系统实时仿真[J]. 高压电器, 2015, 51(1): 36-40.
- WANG Qian, SONG Qiang, XU Shukai, et al. Real-time simulation of MMC based HVDC power transmission

- system using RT-LAB[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 36-40.
- [20] 洪莎莎, 武迪, 侯凯. VSC-HVDC 的暂态数学模型分析及控制系统设计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(5): 35-39.
HONG Shasha, WU Di, HOU Kai. Transient mathematical model analysis and design of control system of VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2013, 25(5): 35-39.
- [21] MERLIN M M C, GREEN T C, MITCHESON P D, et al. A new hybrid multi-level voltage-source converter with DC fault blocking capability[C] // IET 9th International Conference on AC and DC Power Transmission, London, October 2010.
- [22] 胡鹏飞, 江道灼, 郭捷, 等. 基于混合型多电平换流器的柔性直流输电系统[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 33-38.
HU Pengfei, JIANG Daozhuo, GUO Jie, et al. VSC-HVDC system based on hybrid multilevel voltage sourced converters[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 33-38.
- [23] JACOBSON B, KARLSSON P, ASPLUND G, et al. VSC-HVDC transmission with cascaded two-level converters[C] // Proceedings of CIGRE, Paris, 2010.
- [24] MARQUARDT R. Modular multilevel converter topologies with DC-short circuit current limitation[C] // 8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia, Jeju, Korea, 2011: 1425-1431.
- [25] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [26] 雷霄, 王华伟, 曾南朝, 等. LCC 与 VSC 混联型多端高压直流输电系统运行特性的仿真研究[J]. 电工电能新技术, 2013, 32(2): 48-52.
LEI Xiao, WANG Huawei, ZENG Nanzhao, et al. Simulation research operation characteristics of hybrid multi-terminal HVDC system with LCC and VSC[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2013, 32(2): 48-52.
- [27] 饶宏, 宋强, 刘文华, 等. 多端 MMC 直流输电系统的优化设计方案及比较[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 103-108.
RAO Hong, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. Optimized design solutions for multi-terminal VSC-HVDC system using modular multilevel converters and their comparison[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 103-108.
- [28] 吴俊宏, 艾芊. 多端柔性直流系统在风电场中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 22-27.
WU Junhong, AI Qian. Research on multiterminal VSC-HVDC system for wind-farms[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 22-27.

收稿日期: 2014-11-17; 修回日期: 2015-04-29

作者简介:

蒋冠前(1978-), 男, 通信作者, 在读硕士, 工程师, 从事电力系统控制保护技术研究和标准研究工作; E-mail: guanqianj@dlwg.net

李志勇(1968-), 男, 本科, 高级工程师, 从事电力系统控制保护技术研究和标准研究工作;

杨慧霞(1977-), 女, 在读硕士, 高级工程师, 从事继电保护与自动化设备行业的标准研究工作。

(编辑 周金梅)