

面向高压直流输电的 电流源型主动换相换流器研究综述

李子欣^{1,2}, 徐飞^{1,2*}, 赵成勇³, 郭小强⁴, 栾轲栋^{1,2}, 罗进华^{1,2},
高范强^{1,2}, 赵聪^{1,2}, 王平^{1,2}, 李耀华^{1,2}

- (1. 中国科学院电力电子与电气驱动重点实验室(中国科学院电工研究所), 北京市 海淀区 100190;
2. 中国科学院大学, 北京市 石景山区 100049; 3. 华北电力大学, 北京市 昌平区 102206;
4. 燕山大学, 河北省 秦皇岛市 066004)

Research Review of Current-source Type Actively Commutated Converter for High Voltage Direct Current Transmission Systems

LI Zixin^{1,2}, XU Fei^{1,2*}, ZHAO Chengyong³, GUO Xiaoqiang⁴, LUAN Kedong^{1,2}, LUO Jinhua^{1,2},
GAO Fanqiang^{1,2}, ZHAO Cong^{1,2}, WANG Ping^{1,2}, LI Yaohua^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drive, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Shijingshan District, Beijing 100049, China;
3. North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China;
4. Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei Province, China)

ABSTRACT: Current-source type actively commutated converter (ACC) using self-turn-off power semiconductors is characterized by decoupled control of active and reactive power, avoidance of commutation failure, no requirement of a large amount of energy storage capacitors and so forth. ACC has good application prospects in high voltage direct current (HVDC) transmission systems. This paper reviewed and analyzed the power semiconductors with voltage sharing technology, converter circuit topology, modulation method, active and reactive power characteristics, control schemes, fault and protection problems of ACC for HVDC applications. The comparisons among ACC, the conventional line commutated converter (LCC) and modular multilevel converter (MMC) were also done for a specific HVDC inverter with the same voltage rating, current rating, and power semiconductor stresses. This paper also analyzed the potential application scenarios, the existing problems, and future trends of ACC technology.

KEY WORDS: self-turn-off power semiconductor; current-source converter; actively commutated converter; high voltage direct current

摘要: 采用自关断功率半导体器件的电流源型主动换相换流器(actively commutated converter, ACC)具有有功与无功功率可解耦、不存在换相失败、无需大量储能电容等特点,在高压直流输电领域具有较好的应用前景。该文针对适用于高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)的ACC功率半导体器件及其均压方法、电路拓扑、调制方法、功率特性、控制策略、故障及保护方法等进行调研和分析。结合具体实例,将ACC与现有HVDC的2种换流器,即电网换相换流器(line commutated converter, LCC)和模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)进行对比分析。同时,对ACC的潜在应用、存在的问题以及发展的方向进行总结和归纳。

关键词: 自关断半导体器件; 电流源型换流器; 主动换相换流器; 高压直流

0 引言

高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)技术具有输电线路损耗小、线路走廊占地小、可连接异步电网等诸多优点,在远距离大容量输电、可再生能源并网、大型电网互联等领域获得了广泛的应用。HVDC的换流器是实现电能AC/DC或DC/AC变换的核心,目前换流器主要包括基于晶闸管的电网换相换流器(line commutated

基金项目: 国家自然科学基金项目(52077206)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52077206).

converter, LCC-HVDC)和基于可关断器件的电压源型换流器(voltage source converter, VSC-HVDC)^[1-4] 2种方案。其中 VSC-HVDC 在中国也称为柔性直流输电技术^[5]。

自 20 世纪以来,无论是 LCC-HVDC 还是 VSC-HVDC,在国内外都获得较为广泛的应用,有多个工程完成建设并投入运行^[1-5]。自从模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)提出并在 HVDC 系统获得应用之后,使得 VSC-HVDC 技术在过去十多年以来获得了快速的发展,尤其是在多端直流系统以及风电等可再生能源并网发电系统^[2-8]。然而, LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 2 种技术仍然存在若干问题,影响了 2 种技术的发展和推广应用。以图1所示典型的 LCC 和 MMC 电路拓扑为例,2 种技术存在的问题主要包括:

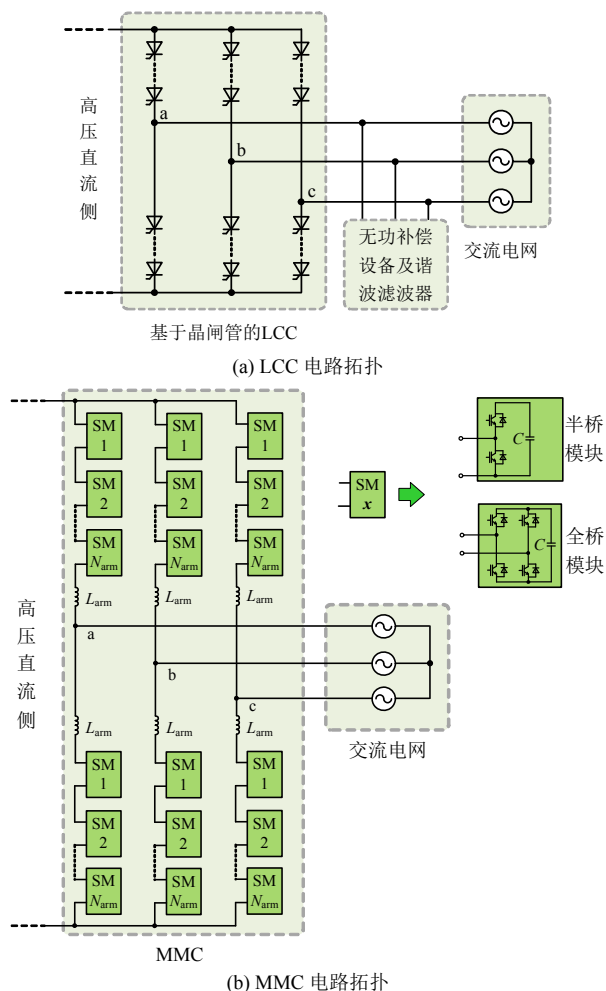


图1 两种 HVDC 换流器的典型电路拓扑

Fig. 1 Typical circuit topologies of the two types of HVDC Converters

1) LCC 换相失败和黑启动问题。

LCC 具有输送容量大、建造成本低等优点,目前我国已建成数十条高压直流输电工程。然而 LCC

采用晶闸管作为功率半导体开关器件,需要外部交流电源提供换相电压才能保证换流器正常运行,换流器工作没有独立性,从而存在如下问题:一是存在换相失败风险,一旦交流系统发生故障导致电压降低,将发生换相失败,造成传输功率波动,甚至换流阀闭锁,停止直流功率传输,严重时将引起多馈入直流系统多条直流输电同时发生换向失败,严重威胁受端电网安全性,二是由于 LCC 必须依靠电网电压进行换相,因此 LCC 无法实现向无源网络供电时的黑启动功能,也不具备风电场、光伏电站等可再生能源发电系统并网和孤岛供电能力。

2) MMC 功率密度低、造价高。

MMC 具备功率四象限控制、有功无功解耦、电流及电压谐波较小等优点。然而 MMC 因功率模块电容储能需求高且功率半导体器件数量大导致 MMC-HVDC 系统体积大、重量重、造价高。目前,国内外专家学者针对可以减少功率模块电容储能需求的 MMC 已开展一定研究,通常采用注入谐波环流或者共模/零序电压方法来减小电容需求^[9-13]。但由于 MMC 的电路拓扑结构决定了其功率模块端口的瞬时功率及储能电容的瞬时功率必然存在基频波动,从根本上避免 MMC 功率模块电容电压基频波动十分困难。

实际上,对于现有的 LCC 和 VSC/MMC 技术来说在很多领域很难直接应用,或者即便可以应用,但代价较大。例如,在海上风电直流汇集及输送领域,基于晶闸管的 LCC 连接风电场时无法正常换相,不能采用;MMC 虽然可以用于此场合,但是由于 MMC 的体积大、重量重,在海上建造换流站代价很高。因此,在海上风电等特殊场合亟需研究不同于现有 LCC 和 VSC/MMC 的新型 HVDC 换流器技术。

不同于 LCC 和 VSC/MMC,本文研究的第 3 种 HVDC 换流器,即基于自关断器件(如 IGBT、GTO、IGCT 等)的电流源型主动换相换流器(actively commutated converter, ACC)。不同于 LCC 中晶闸管需要外部交流电源提供换相电压,ACC 采用自关断器件实现换流器功率器件的主动关断和功率的双向流动控制,避免了换相失败风险并具备对无源网络供电能力。不同于 MMC,ACC 不需要大量的元器件和较高的储能电容需求。因此,ACC 在 HVDC 领域具有良好的应用前景。

本文针对适用于 HVDC 领域的 ACC(ACC-

HVDC), 调研并归纳了其典型的电路拓扑、适用的功率半导体器件及器件均压方法、调制方法、控制策略、故障特性分析及保护方法、ACC 与其他类型的换流器构成的混合 HVDC 系统、ACC 的潜在应用场合等, 并对 ACC 技术的未来发展等进行了总结和展望。希望本文工作能对 ACC 及其他新型 HVDC 换流器的研究和开发提供一定借鉴。

1 适用于 ACC-HVDC 的功率半导体器件及均压方法

1.1 适用于 ACC-HVDC 的功率半导体器件分析

适用于 ACC 的功率半导体器件需具备主动开通和自关断能力, 在 HVDC 场合 ACC 中的功率半导体器件需要承受较大的电压及电流应力, 且需具备承受反向电压的能力, 即需要逆阻型(或称反向阻断型, reverse blocking)器件。另外, 在 HVDC 场合应用时, 为了承受数百千伏甚至上千千伏的高电压, ACC 一般需采用功率半导体器件串联。由于压接封装(press pack)的功率半导体器件在失效后通常表现为短路状态, 为了保证串联连接的器件中部分器件失效后不影响整个换流器的正常运行, ACC 通常需采用压接封装的功率半导体器件。依据现有功率半导体器件发展的水平, 适用于 ACC-HVDC 的压接封装的功率半导体器件主要有绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)和集成门极换流晶闸管(integrated gate-commutated thyristor, IGCT)2 种。

IGBT 是一种电压控制型器件, 具有驱动功率小而饱和压降低等优点。逆阻型 IGBT, 如图 2(a)所示, 可以承受较高的反向电压。但是, 目前可以承受很高反向电压(如 3.3kV 以上)的大电流(如 1kA 以上)逆阻型 IGBT 商用压接封装器件很少。而大规模商用的压接封装 IGBT 通常不能承受反向电压, 或只能承受很低的反向电压。对于 ACC-HVDC 来说, 为了能够承受反向电压, 可采用非逆阻型 IGBT 串联二极管方式实现, 如图 2(b)所示。

IGCT 是门极换流晶闸管(gate-commutated thyristor, GCT)和集成门极驱动电路的合称, 结合 IGBT 与门极可关断晶闸管(gate turn-off thyristor, GTO)的优点, 具有容量较大、通态损耗较小, 无需庞大而复杂的缓冲电路等优点^[14-16]。根据是否能够承受反向电压, IGCT 可分为对称型(symmetrical)和非对称型(unsymmetrical) 2 种。其中, 对称型

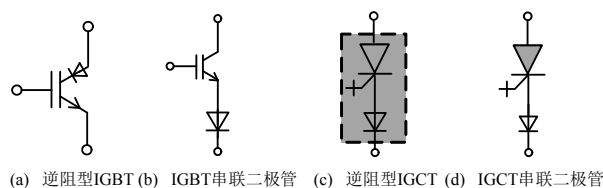


图 2 适用于 ACC-HVDC 的功率半导体器件

Fig. 2 Power semiconductors suitable for ACC-HVDC
IGCT 也称为逆阻型 IGCT, 如图 2(c)所示, 可以承受较高的反向电压, 适用于 ACC-HVDC 场合^[17-19]。但是目前对称型 IGCT 还缺少批量生产的商用产品。非对称型 IGCT 一般不能承受很高的反向电压, 在 ACC-HVDC 场合应用时也需要串联二极管使用, 如图 2(d)所示。

对于 ACC-HVDC 应用, 上述几种器件各具特点, 需根据实际需求选择和设计。例如, IGCT 是电流控制型器件, 其导通压降较低, 适合大容量场合应用。但是, IGCT 的驱动电路功率损耗较大, 对器件均压电路的设计和驱动电路的取电形式会产生影响。而 IGBT 为电压控制型器件, 其驱动电路功率损耗一般较小, 但是其导通压降一般显著高于 IGCT。另外, IGCT 的电流变化率(di/dt)承受能力一般比 IGBT 要低很多, 这会影响整个 ACC-HVDC 换流器的电路参数设计, 甚至可能需要采用类似于 LCC-HVDC 的饱和电抗器对电流变化率进行限制。尽管 IGBT 的电流变化率承受能力较强, 但是目前缺少高压大电流的逆阻型压接封装器件, 在 ACC-HVDC 场合使用时需要串联数量可观的二极管。加之 IGBT 比 IGCT 的导通压降一般要高, 在 ACC-HVDC 场合应用时, IGBT 串联二极管来承受反压的方式如何实现系统损耗优化是需要重点研究的问题之一。因此, 在 ACC-HVDC 应用领域, 亟待开发高电压、大电流的逆阻型压接封装 IGBT。

1.2 适用于 ACC 的功率半导体器件均压方法

由于 ACC-HVDC 系统电压等级较高, 一般需将功率半导体器件大规模串联使用。但在实际应用中, 很多因素会导致串联连接的功率半导体器件电压分布不均, 这些因素包括: 1) 电路中存在杂散电感; 2) 多个自关断器件之间的驱动信号时间延迟不一致; 3) 均压电路的参数不一致; 4) 串联连接的多个功率半导体器件的参数不一致等^[20-22]。串联连接的功率半导体器件的电压分布不均会导致器件的损耗分布不均, 降低系统的可靠性, 严重情况下会导致串联器件因承受过电压而损坏, 系统无法正常工作。因此, 在功率半导体器件大规模串

联时一般必须配置均压电路。

目前,关于自关断功率半导体器件的均压电路主要针对电压源型换流器设计,此类均压电路的特点是串联连接的功率半导体器件一般只承受正向电压。针对电压源型换流器中的功率半导体器件串联均压问题,国内外开展了较多研究,均压方法主要包括无源电路均压和主动控制均压两种。IGCT 为电流控制型器件,只能通过负载侧均压,在开关暂态中一般无法控制 di/dt 与 dv/dt 。IGBT 为电压控制型器件,不仅可以通过负载侧均压,还可以通过控制门极控制各个器件的串联均压,实现开关暂态的 di/dt 与 dv/dt 更加精细的控制。因此,IGCT 一般采用无源电路均压^[23],而 IGBT 除了可以采用无源电路均压还可以采用有源钳位控制^[23]、有源电压控制^[25]、反馈闭环控制^[26-27]等主动控制均压方法。

不同于电压源型换流器,ACC-HVDC 中串联连接的功率半导体器件需要承受正向和反向两种电压,因此其均压电路需同时考虑正向和反向电压均衡。另外,对应用于 HVDC 系统的 ACC 来说,其内部的功率半导体器件串联均压电路还具有如下特点:1) 功率半导体器件的开关频率相对较低,例如,一般不超过 500Hz;2) 均压电路需考虑功率半导体器件承受反向电压;3) 若通过功率半导体器件串联二极管形成逆阻特性,需综合考虑功率半导体开关器件与二极管的均压电路。

此外,ACC-HVDC 与 LCC 和电压源型换流器的工作原理和电气应力特性有显著差别,其内部的功率半导体器件串联均压需根据 ACC-HVDC 在各种工况下的电气应力,结合现有半导体器件的工作特性综合设计。目前,这一问题尚有待深入研究。

2 适用于 HVDC 的 ACC 电路拓扑

适用于 HVDC 的 ACC 电路拓扑应具备如下特点:能够承受高电压、大电流;能够在较低的开关频率下实现较高的电能质量和可控性;所使用的功率半导体器件的电压、电流应力应基本一致等等。目前,国内外学者针对 ACC 的电路拓扑已开展了较多研究^[28-50],但关于适用于 HVDC 的 ACC 研究仍然较少。本文就适用于 HVDC 的 ACC 电路拓扑,按照 ACC 输出电流电平数以及拓扑实现形式,将其分为三电平电路拓扑、三电平组合式电路拓扑和模块化多电平电路拓扑三大类分别进行总结。

2.1 三电平 ACC 电路拓扑

三电平 ACC 电路拓扑为三相六桥臂电路,如图 3 所示,6 个桥臂 S1-S6 由一定数量的自关断逆阻型功率半导体器件串联构成以承受交流和直流侧的高电压,直流侧一般串联滤波电抗器 L_{dc} ,交流侧一般通过 LC 二阶滤波器与交流电网连接。正常工作时,上桥臂 S1、S3、S5 和下桥臂 S2、S4、S6 中均有且仅有一个桥臂的功率半导体器件处于全部导通状态。不考虑换相过程时,ACC 的某一相的上桥臂导通时,直流电流由该相的上桥臂流出,由其他两相中其中一相的下桥臂流回,该相输出电流为 I_{dc} ;某一相的下桥臂导通时,直流电流由其他两相中其中一相的上桥臂流出,由该相的下桥臂流回,该相输出电流为 $-I_{dc}$;某一相的上下桥臂同时导通时,直流电流由该相上桥臂流出,下桥臂流回;或者上下桥臂同时关断时,直流电流由其他两相中的其中一相流出,由另一相流回时,则该相输出电流为 0。也就是说,此种 ACC 的交流侧电流可以输出 3 个电平,因此本文称之为三电平 ACC。通过相应的控制和调制策略,三电平 ACC 可以在交流侧输出幅值和相位均可控的三电平交流电流^[28-31],从而实现三电平 ACC 有功功率和无功功率的控制。

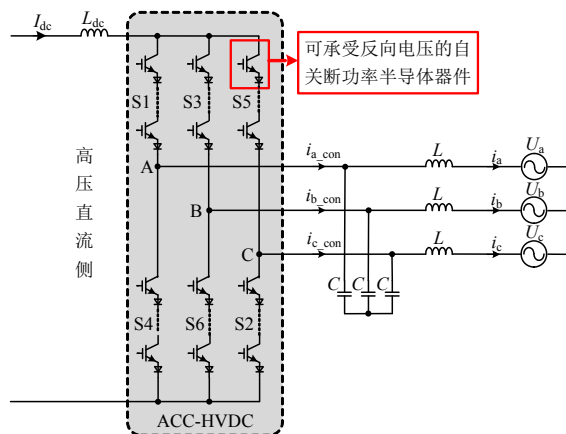


图3 三电平 ACC 电路拓扑

Fig. 3 Typical circuit topology of the three-level ACC

三电平 ACC 的每个桥臂一般需采用功率半导体器件直接串联,这对半导体器件的静态和动态均压特性以及开关频率会产生限制。而在 HVDC 场合应用时,一般系统容量很大,功率半导体器件的开关频率不高,三电平 ACC 输出电流中含有的谐波成分较多。为了改善三电平 ACC 输出电流的波形,此时一般需在交流侧配置 LC 滤波器,而滤波器电容的容值通常会随着开关频率降低而相应增大。

文献[32-33]在图 3 的基础上,增加了一个由自

关断功率半导体器件和功率二极管组成的桥臂 S7, 构成三电平 H7 ACC 电路拓扑, 如图 4 所示。其中, 桥臂 S7 被用来代替调制过程中含有的零开关状态, 使得桥臂 S1-S6 功率半导体器件可以实现零电流开通, 在降低桥臂 S1-S6 功率半导体器件开关频率的同时提高 ACC 的工作效率。此外, 桥臂 S7 的存在增强了 ACC 换流器在直流侧发生短路故障时的故障穿越及退出正常运行的能力, 相应的, 功率半导体器件的数量也有所增加, 成本更高。

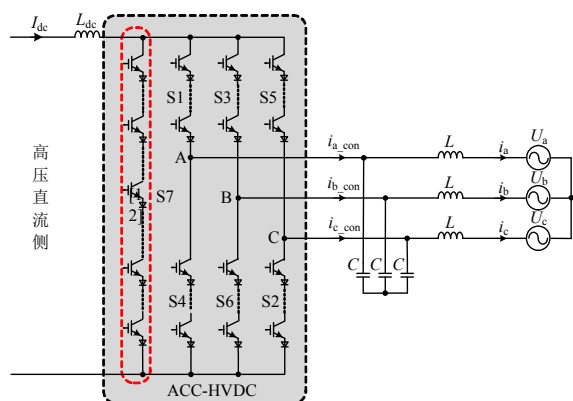


图 4 三电平 H7 ACC 电路拓扑

Fig. 4 Typical circuit topology of the H7 three-level ACC

2.2 三电平组合式 ACC 电路拓扑

三电平 ACC 的交流侧电流可以产生 3 个电平, 蕴含的谐波成分相对较多, 对与交流网络连接的二

阶 LC 滤波器提出了较高的要求。为扩大系统容量并降低 ACC-HVDC 交流侧输出电流的谐波, 国内外学者提出将三电平 ACC 通过串联、并联等不同的连接方式进行组合, 构成三电平组合式 ACC 电路拓扑。

文献[34]对直流侧并联、交流侧也并联的三电平组合式 ACC 电路拓扑进行了研究。以 2 台三电平 ACC 模块组成的五电平 ACC 为例, 电路拓扑如图 5 所示, 2 台三电平 ACC 直流侧通过直流电抗器并联, 交流侧通过变压器直接并联后经二阶 LC 滤波器连接交流网络。五电平 ACC 的直流端口总电流为 I_{dc} , 2 台三电平 ACC 控制流经各自连接的直流电抗器的电流为 $I_{dc}/2$, 2 台三电平 ACC 在交流电网侧电流可叠加为幅值为 $\pm I_{dc}$ 、 $\pm I_{dc}/2$ 和 0 的 5 个电平。直流侧并联的多电平 ACC 电路拓扑可以通过增加并联的三电平 ACC 模块的数量来增加交流输出电流电平数。如果并联的三电平 ACC 模块数量为 S , 则交流输出电流的电平数为 $2S+1$ 。三电平 ACC 模块中的直流电抗器减少了电流波动, 可以在相间提供相等的阻抗。但是, 直流侧并联的三电平组合式 ACC 电路拓扑需要增加额外的控制来处理三电平 ACC 模块间的电感电流均衡以及三电平 ACC 模块之间存在的环流问题。

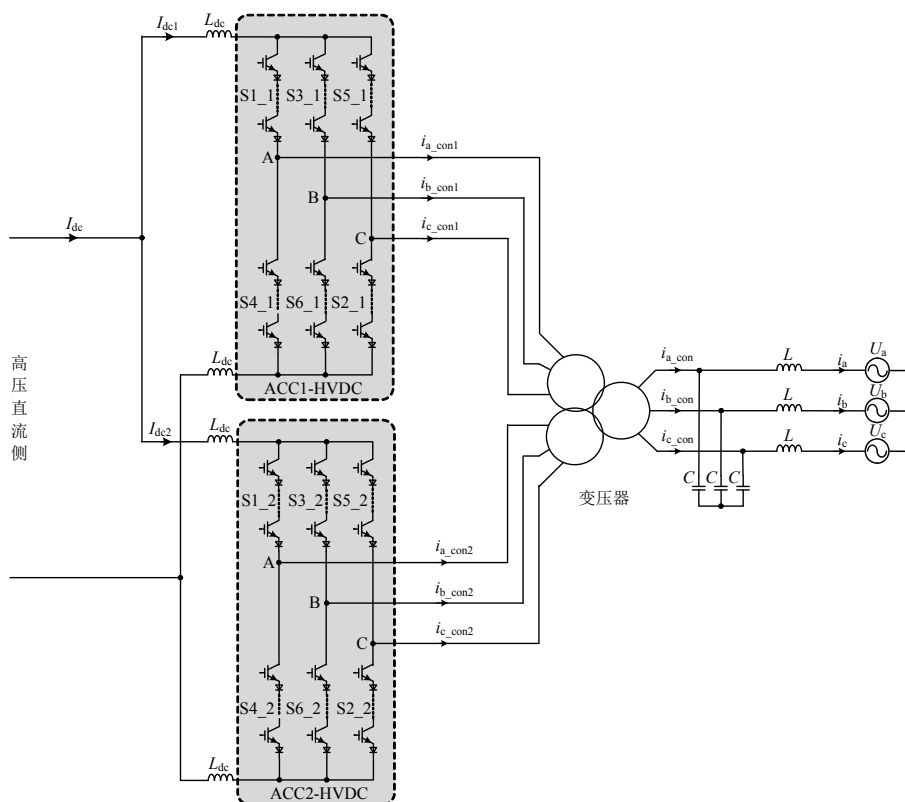


图 5 直流侧并联型三电平组合式 ACC 电路拓扑

Fig. 5 Combined circuit topology based on three-level ACCs by parallel connecting DC side

文献[35]通过对空间矢量调制中冗余矢量的选择实现三电平 ACC 模块电感电流均衡;文献[36]对移相式脉宽调制策略进行调整实现三电平 ACC 模块的电流平衡,但是,文献[35-36]提出的调制策略扩展较为复杂,不适合组合模块数较多的场景;而文献[37]针对五电平单相 ACC 的电流均衡问题,提出引入额外硬件电路。

文献[38-40]将 2 个三电平 ACC 的直流侧串联连接,交流侧通过变压器并联连接,电路拓扑如图 6 所示。

由于 2 台三电平 ACC 的直流侧经直流电抗器串联连接,流经 ACC1 和 ACC2 的直流电流的大小和方向保持一致,不存在图 5 所示拓扑的环流和均流问题。直流侧串联的三电平组合式 ACC 采特定次谐波消除 11、13 次谐波电流,可通过调整交流侧连接的移相变压器的相角差消除网侧电流中的 5、7、17、19 次谐波,使得网侧电流不含 23 次以下的谐波电流,只需较小的滤波器就可以滤除高次谐波。

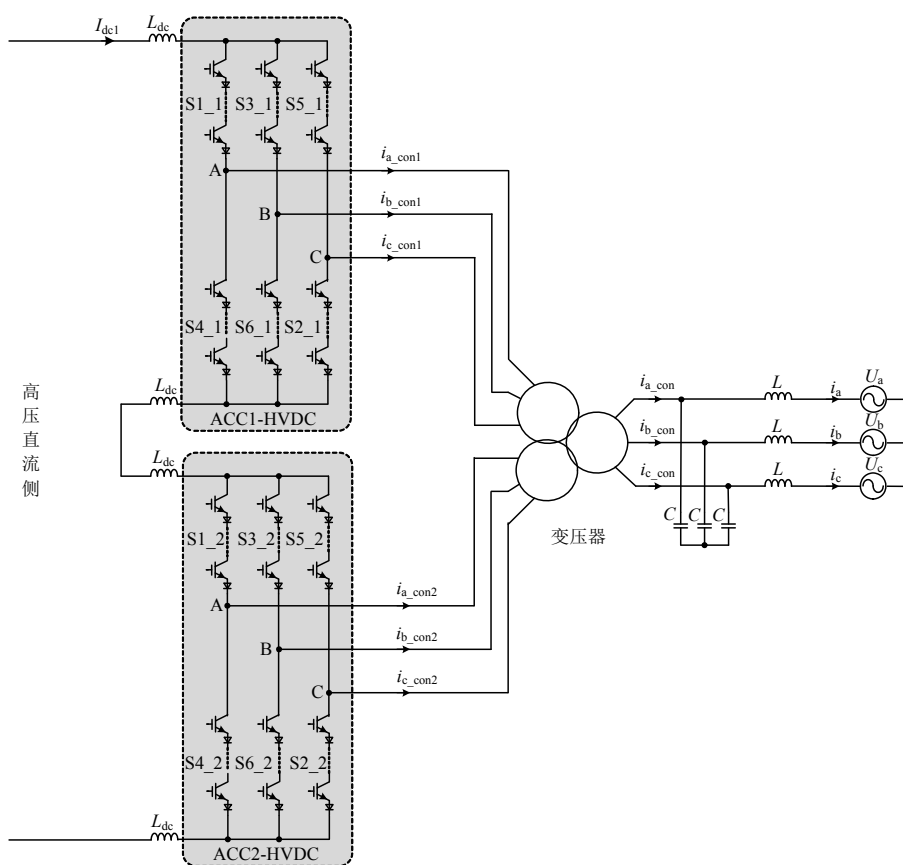


图 6 直流侧串联型三电平组合式 ACC 电路拓扑

Fig. 6 Combined circuit topology based on three-level ACCs by series connecting DC side

2.3 模块化多电平 ACC 电路拓扑

根据电路对偶原理,依据电压源型的 MMC,也有学者对模块化多电平 ACC,即 MMACC(或称为电流源型模块化多电平换流器,CSMMC)开展了研究。MMACC 采用基于电感作为储能元件的功率子模块,通过切换桥臂并联的功率子模块投入或者旁路状态实现输出电流的控制,其电路拓扑如图 7 所示,由 6 个桥臂组成,每个桥臂由并联的功率子模块和桥臂电感串联构成,常见的功率子模块可分为半桥结构和全桥结构。

文献[41]对 MMACC 的工作模式和特性进行详细分析,并提出一种基于功率模块的电感选择方法

和基于电感电流排序的平衡方法,保证了电感的纹波电流最小,从而减少循环电流。采用电感作为储能元件,功率子模块存在电流断流的风险。如图 8 所示,文献[42]提出在功率模块中加装二极管或晶闸管反并联电路,为电感电流提供通路,并在模块中添加了电容对功率半导体器件承受的电压进行钳位,通过串联改进后的功率模块,可以使得 MMACC 承受更高等级的电压,使其适用于高压场合,但是,这种电路拓扑需要同时平衡功率模块中的电感电流和串联电容电压,使得控制设计非常复杂。MMACC 使用大量的功率模块使得系统仿真工作量较大,文献[43]对 MMACC 的数学模型进行简

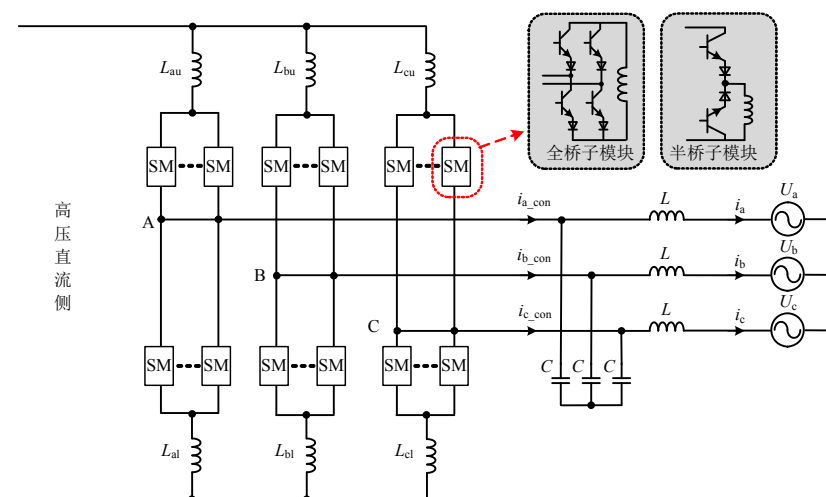


图7 MMACC 的电路拓扑

Fig. 7 Typical circuit topology of MMACC.

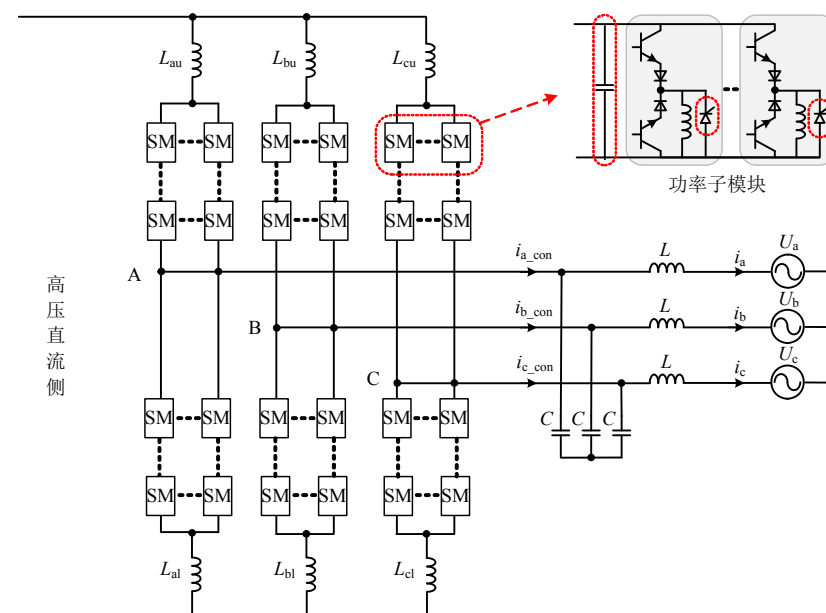


图8 MMACC 改进型电路拓扑

Fig. 8 Improved circuit topology of MMACC

化, 提出一种基于诺顿等效电路的快速仿真模型, 可提高计算机仿真速度, 节省计算时间。

2.4 其他拓扑

除去上述的几种拓扑, 相关学者也对 ACC 的其他类型拓扑开展了研究。文献[44-46]提出的单相直接式五电平 ACC 电路拓扑的功率半导体器件的开关频率较低, 控制较为简单, 开环控制下即可实现分流电感的均流, 可以将其拓展到三相以及更多电平的结构。然而该拓扑所使用的功率半导体器件和分流电感数量会成倍增加。在此基础上, 文献[47]提出一种由前端直流电感分流电路和后端逆变电路组成的五电平 ACC 拓扑, 并给出一种消除低次谐波的变脉宽控制方法, 但是分流电路和逆变电路所用的功率半导体器件的电压、电流应力存在明显

差异。将若干个直流侧相互独立的三电平 ACC 模块交流侧直接并联, 不存在电流均衡的问题, 但是需要多个特性一致的直流电流源。文献[48-50]对与飞跨电容式多电平电压源型电路拓扑对偶的直接型多电平 ACC 电路拓扑进行研究, 由于该电路中的电感参数以及流经的电流不一致, 故称为多值电感多电平电流源拓扑。但是, 由于这些电路拓扑存在电路参数复杂、电流应力不均匀、对直流电源有特殊要求等问题, 一般很难适用于 HVDC 场合。

3 ACC 的调制方法

VSC 在正常运行时, 其直流侧电压通常为恒定值。因此, VSC 的调制通常采用电压脉宽调制。而 ACC 正常运行时, 其直流侧电流通常为恒定值。与

VSC 类似, ACC 的调制也主要采用脉宽调制方式, 不过其需要调节电流脉冲宽度。以图 3 所示的三电平 ACC 为例: 与电压源型换流器不同, ACC 正常工作时, 为了维持直流侧电感电流连续, 其内部的开关需要满足一定的约束条件, 即任意时刻 ACC 的 6 个桥臂中, 只有 2 个桥臂处于导通状态, 且 3 个上桥臂中及 3 个下桥臂中均只有一个桥臂处于导通状态^[51-68]。在满足此约束条件的前提下, ACC 典型的调制方法包括特定谐波消除法、梯形波调制法、正弦脉宽调制、空间矢量调制等。

特定谐波消除法(selected harmonic elimination, SHE)在满足 ACC 开关约束条件的前提下, 对自关断功率半导体器件的开关角度进行优化设计, 在较低的开关频率下降低输出电流的谐波含量^[51-56]。文献[51]就适用于三电平 ACC 的 SHE 开关角度需要满足的条件, 并给出具体实现方法。在此基础上, 文献[52]对零开关状态分配进行研究, 提出一种通用 SHE 的实现方法。文献[53]分析了“虚拟相电流”和实际电流之间的关系, 提出根据适用于 VSC 的 SHE 开关角度得到适用于 ACC 的触发信号, 并给出了零开关状态分配方法。针对直流侧并联、交流侧并联的三电平组合式 ACC, 文献[55]对三电平 ACC 模块采用相同开关角度与不同开关角度时输出电流的谐波特性进行讨论, 采用不同开关角度时可以降低高次谐波幅值, 但是所需的计算量和处理时间也会相应增加。文献[56]将梯形脉宽调制方法引入开关角度初值计算, 加快非线性方程求解速度, 但是也会存在不收敛的问题。

梯形波调制法(trapezoidal pulse width modulation, TPWM)利用梯形调制波与三角载波进行比较得到开关信号。为了满足开关约束条件, 正半周期内, TPWM 仅在 $0 \sim \pi/3$ 和 $2\pi/3 \sim \pi$ 生成开关信号。文献[57]将移相 TPWM 应用在七电平 ACC, 并对不同移相角时的输出电流进行了对比研究。然而, TPWM 的调制度变化范围较小, 且半周期内的开关脉冲数较少时, 输出电流中的低次谐波很难被滤波电路彻底清除^[51]。

由于 ACC 的开关模型反映的是“+1”、“-1”和“0”的三值逻辑关系, 与 VSC 二值逻辑的开关模型存在差异, 使得适用于 ACC 的正弦脉宽调制法(sinusoidal PWM, SPWM)相较于适用于 VSC 的 SPWM 需要增加额外的处理步骤。文献[58]在适用于 VSC 的 SPWM 的基础上, 加入二三逻辑变换和

参考波预处理环节, 给出适用于 ACC 的 SPWM 调制方法。文献[59]提出一种 SPWM 过调制的实现过程, 文献[60]分析输出电流的谐波分布特性, 对于后续的谐波处理提供参考。文献[61]采用多个垂直分布的载波与正弦参考波进行比较得到开关信号, 省去二、三逻辑转换过程, 获得与多电平 VSC 同样的谐波消除效果。但是, 采用这种调制方法, 功率半导体器件的电压电流应力不一致, 尤其是调制度较大时, 换流器内部的功率半导体器件切换频繁, 开关频率较高。此外, 对于三电平组合式 ACC, 三电平 ACC 模块使用相位不同的载波, 可实现多电平电流输出并降低输出电流谐波含量^[62-64]。

与 VSC 类似, 适用于 ACC 的空间矢量调制法(space vector modulation, SVM)实现过程同样可以分解为有效矢量选择、矢量作用时间计算和零矢量排序优化 3 个步骤。SVM 易于数字实现^[65], 且与 SPWM 相比, SVM 可提高直流电流利用率、降低开关损耗^[66]。但是, 随着输出电流电平数增加, SVM 的开关状态数呈几何增长^[67-68], 在高电平数场合应用时 SVM 控制算法过于复杂, 难以实用化。因此, 目前对于适用于 ACC 的 SVM 的研究和应用主要是五电平及以下。

4 ACC 的功率特性及控制策略

4.1 ACC 的功率特性研究

由于 ACC 采用自关断的功率半导体器件, 相对于 LCC, ACC 可以实现有功功率和无功率解耦控制, 可以提高换流器可控性和灵活性。但是, 由于 ACC 的开关需要满足前文所述的约束条件, 且其交流侧滤波器的参数与有功无功功率设计相互耦合, 其运行范围受到一定制约。ACC 的运行特性与 LCC 及 VSC 也有显著的不同。

ACC 传输的有功功率与无功功率之间的关系可以用式(1)表示^[38], 其中, L 和 C 分别为 ACC 交流侧 LC 滤波器的电感值和电容值; U_{gd} 为交流电压在同步旋转坐标系下的 d 轴分量; U_{dc} 为 ACC 直流电压; m 为电流调制比; ω 为电网电压的角频率。可以看出, ACC 传输的有功功率和无功率之间存在明显耦合, 无功功率的运行范围受到所传输有功功率的限制。此外, ACC 正常工作范围内, 所使用的自关断半导体器件的电流电压应力应小于等于器件自身的标定电流电压应力。综合以上因素, 可以得到 ACC 的功率运行范围如图 9 所示。图 9 中

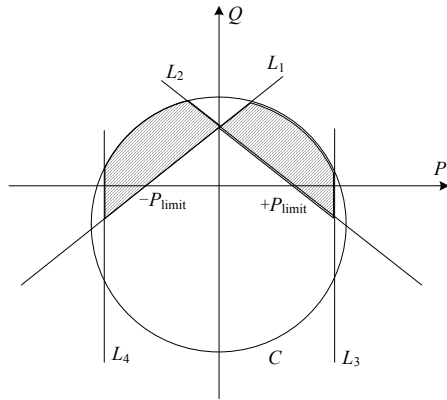


图9 ACC 功率运行范围

Fig. 9 Power range of ACC

曲线 C 为 ACC 每个桥臂中功率半导体开关器件电压的应力约束, L_1 和 L_2 为调制度约束线, L_3 和 L_4 为桥臂功率半导体开关器件的最大电流约束。可见, ACC 可以四象限运行, 但是其功率运行范围受调制度以及电路参数限制, 且随着有功功率的减小, 无功功率的调节范围也相应减小。也就是说, ACC 的有功功率在一定范围内可以实现完全解耦: 当 ACC 传输的有功功率的大于一定值 P_{limit} 时, 无功功率可以为零, 即 ACC 可以运行在单位功率因数下^[39-40]; 当 ACC 传输的有功功率小于 P_{limit} , 无功功率的最小值大于零, 此时的功率因数必定小于 1; 当 ACC 传输的有功为零时, 由于网侧 LC 滤波器的存在, ACC 会向电网发出无功功率。ACC 的这一功率运行特性与 LCC 及 VSC/MMC 有着显著的不同, 在 HVDC 中应用时的 ACC 系统参数设计方法也需深入研究。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{3\omega CU_{\text{gd}}^2}{2(1-\omega^2 LC)} - P \sqrt{\frac{3mU_{\text{gd}}}{2(1-\omega^2 LC)U_{\text{dc}}}} - 1 \leq Q \leq \frac{3\omega CU_{\text{gd}}^2}{2(1-\omega^2 LC)} + P \sqrt{\frac{3mU_{\text{gd}}}{2(1-\omega^2 LC)U_{\text{dc}}}} - 1, P \geq 0 \\ \frac{3\omega CU_{\text{gd}}^2}{2(1-\omega^2 LC)} + P \sqrt{\frac{3mU_{\text{gd}}}{2(1-\omega^2 LC)U_{\text{dc}}}} - 1 \leq Q \leq \frac{3\omega CU_{\text{gd}}^2}{2(1-\omega^2 LC)} - P \sqrt{\frac{3mU_{\text{gd}}}{2(1-\omega^2 LC)U_{\text{dc}}}} - 1, P < 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

4.2 ACC 的控制策略研究

国内外学者关于 ACC 的数学模型、控制方法、保护方法等也开展了一定的研究。由于 ACC 交流侧存在 LC 二阶滤波装置, ACC 的数学模型具有强耦合性、多状态变量和非线性的特点^[60,69-76], ACC 的控制也相对较为复杂。文献[60]对 ACC 在三相静止坐标系和同步旋转坐标系下基于电网电压定向

和基于电容电压定向的数学模型进行详细的推导; 文献[69]在两相静止坐标系下对考虑叠流时间的 ACC 数学模型进行了研究, 并提出一种平均电流前馈补偿策, 补偿基波幅值, 降低谐波畸变。为了 ACC 能够正常工作和调节传输功率, ACC 的控制目的主要是维持稳定的直流电流, 实现交流侧输出电流幅值相位的调节并尽量降低谐波含量。文献[70]建立了 ACC 的低频稳态电路模型, 提出一种基于比例积分(proportional and integral, PI)控制器的间接电流控制策略, 实现直流电流和网侧功率因数调节。文献[71]提出对调制波的相位进行补偿实现网侧功率因数校正。但是, 想要达到较高的控制精度, 需要详细精确的主电路参数, 且参数变化对于控制效果的影响较大。文献[72]在调制信号中加上延迟角来减小电路参数影响, 使得控制简化, 控制精度得到改善。相较于间接电流控制, 文献[73]在同步旋转坐标系下引入网侧电流反馈构成闭环控制, 直接控制网侧电流, 但未考虑其中的耦合项。文献[74]在两相静止坐标系下采用谐振(proportional and resonant, PR)控制器的控制策略, 实现 ACC 有功功率和无功功率的解耦控制。在此基础上, 文献[75]分析有源阻尼项对网侧电流的影响, 改善了 ACC 的动态响应。此外, 文献[76]针对 ACC 数学模型非线性、强耦合的特性, 建立网侧电流预测模型, 增强系统鲁棒性和响应速度。

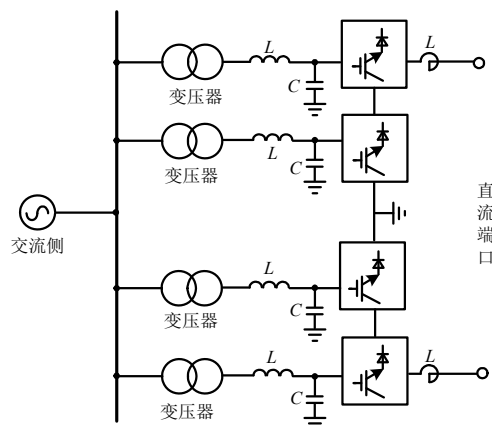
直流侧并联连接的三电平组合型 ACC 需要保证三电平 ACC 模块的直流侧电感电流基本均衡, 而电感电流不均衡的原因主要是电路参数差异, 尤其是电感、功率半导体器件差异以及触发信号的延迟。文献[77]提出利用耦合电感来增强电感参数的一致性, 同时减小电流纹波和系统体积。文献[78]从减小载波轮询周期减小分流电感参数的角度提出轮询子模块间驱动信号的方法。文献[79]分析分流电感电流的大小与调制波相位的关系, 并提出通过调节调制波的相位来实现均流。文献[80]提出使用错时采样空间矢量调制, 通过调整矢量作用时间来实现均流。文献[81]将 MMACC 的子模块电感电流排序, 并通过桥臂电压的正负和子模块投入数量确定具体的投入模块, 取得了良好的均流效果。文献[82]对 ACC 的黑启动过程进行了研究, 由连接稳定交流电网的一端控制直流电流, 为无源网络端 ACC 的启动提供恒定的直流电流, 无源端 ACC 控制交流侧电容电压实现 ACC 的黑启动。

目前,对于 ACC 故障工况下的特性及保护方法研究较少。文献[83-84]提出在交流侧故障时抑制直流电流二倍频波动的控制策略。但是,要达到很好的抑制效果需要较高的开关频率。文献[38]分析 ACC 在交流电网三相短路故障下的数学模型,并提出一种抑制电网负序电流和网侧单位功率因数运行的控制策略。直流短路故障保护能力是 ACC 的另一优势,文献[85]对直流侧短路故障时 ACC 的直流电流变化进行理论推导,并与 VSC 的直流电流进行了对比分析,结果表明 ACC 对于直流短路故障具有更好的抑制效果。虽然国内外学者对 ACC 的交直流故障工况下的特性进行了一些研究,但是对于 ACC 在故障监测与故障工况判定方法、交直流故障穿越控制策略以及故障后的启动策略研究还较少,需要进行更加深入的研究。

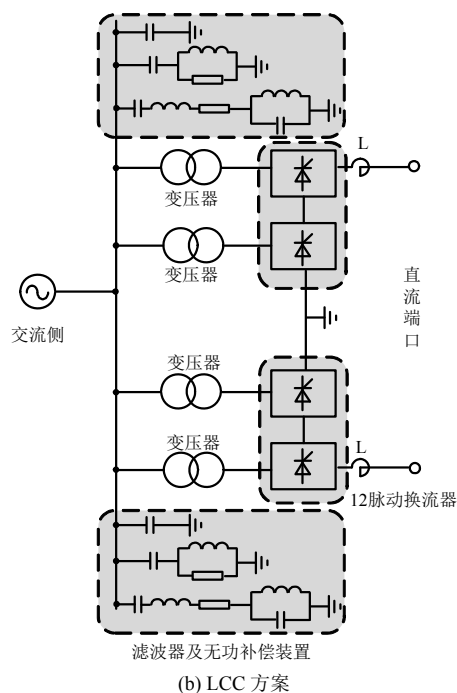
5 实例对比及潜在应用分析

本文以构建 $\pm 250\text{kV}/1\text{GW}$ 真双极直流输电系统为案例,在同等的交流电网电压、直流线路电压及传输容量的情况下,对逆变侧采用 ACC、LCC 和 MMC 3 种方案时的功率半导体器件数量、无源器件数量、有功与无功解耦特性、运行效率、故障穿越能力和造价等多个方面进行了对比分析。

ACC 方案为直流侧串联型三电平 ACC 组合式拓扑,如图 10(a)所示。该拓扑中,ACC 的每个桥臂承受的最大电压为交流侧滤波电容线电压幅值,约 175kV 。可承受反压的自关断器件采用 IGBT 与二极管串联实现,IGBT 及二极管均选用压接型器件,IGBT 型号为 ABB 公司的 5SNA 3000K452300,二极管型号为 ABB 公司的 5SDF 28L4521。IGBT 及二极管器件额定电压不超过 2.5kV ,每个桥臂需要串联的 IGBT 和二极管个数均为 70 个(不考虑冗



(a) ACC 方案



(b) LCC 方案

图 10 $\pm 250\text{kV}/1\text{GW}$ 真双极直流输电系统逆变侧换流器电路拓扑方案

Fig. 10 Converter circuit topology the inverter side of a $\pm 250\text{kV}/1\text{GW}$ bipolar DC transmission system

余和过电压)。LCC 方案为 2 台 12 脉动换流器,如图 10(b)所示。晶闸管额定电压不超过 2.5kV ,可选用 4.2kV 器件,每桥臂需串联晶闸管约 64 只(不考虑冗余和过电压)。晶闸管的型号为 ABB 公司的 5STP 38Q4200。

MMC 方案采用半桥、全桥功率模块混合拓扑,以便使 MMC 具备直流故障清除能力,其中全桥模块占比 50%。IGBT 额定电压 2.5kV ,半桥和全桥功率模块个数各 50 个(不考虑冗余)。IGBT 的型号为 ABB 公司的 5SNA 3000K452300。

针对 ACC、LCC 和 MMC 3 种方案进行了仿真计算,3 种换流器的损耗是通过计算机软件搭建仿真模型计算得到,换流器的损耗主要包括功率半导体器件的开关损耗和导通损耗,相关损耗数据是通过对所选功率半导体器件的数据手册查表得到。3 种方案的电路拓扑及仿真结果对比见表 1。由对比结果可见,ACC 方案的功率半导体器件数量、交/直流滤波器数量、功率运行范围、换流器效率、总体造价都介于 LCC 和 MMC 之间。需要说明的是,考虑现有功率半导体器件的发展水平,所分析的 ACC 中可承受反向电压的功率半导体器件由非逆阻型压接封装的 IGBT 串联二极管实现。因此表 1 中 ACC 的方案需要 1680 只 IGBT 和 1680 只二极管。

表 1 ACC、LCC 和 MMC 方案对比

Table 1 Comparison among ACC, LCC and MMC

内容	ACC	LCC	MMC
IGBT/晶闸管数量	1680	1536	3600
二极管数量	1680	0	3600
功率模块储能电容数量	无	无	1200
交流滤波器	LC 滤波器	滤波器组	直流分量 L
无功补偿需求	低	高	无
直流滤波器	大电抗	大电抗	无或小电抗
有功及无功功率解耦特性	部分范围解耦	不解耦	解耦
换流器效率	约 99.2%	约 99.4%	约 99.1%
交流故障穿越能力	强	弱	强
黑启动能力	有	无	有
换相失败风险	无	有	无
总体造价	较低	低	高

如果 ACC 中采用与表 1 中 IGBT 同等电压、同等电流的逆阻型的半导体器件，则表 1 中的 1680 只二极管不再需要。另外，从所需储能电容方面比较，

ACC 和 LCC 不需要电容，MMC 需要大量电容；从黑启动能力方面比较，ACC 和 MMC 具备黑启动能力，LCC 不具备黑启动能力。

通过上述对比分析也可以发现，ACC-HVDC 在很多场合的应用可以发挥其特点及优势。ACC 典型的应用场景之一是用于升级或改造现有的 LCC-HVDC 系统的逆变侧换流器，构成 LCC-ACC 混合直流输电系统，典型的系统电路拓扑如图 11 所示。LCC-ACC 混合直流输电系统将逆变侧的 LCC 改造为 ACC 后，在保持占地、造价、效率等性能基本相当的情况下，可以避免原有 LCC 存在的换相失败问题，并减少谐波滤波及无功补偿设备需求。ACC 典型的另外一个应用场景是用于海上风电的多端直流汇集及输送(ACC-MTDC)，其典型的系统电路拓扑如图 12 所示。ACC-MTDC 相比 MMC 方案可以降低系统造价，同时也支持风电场的无源启

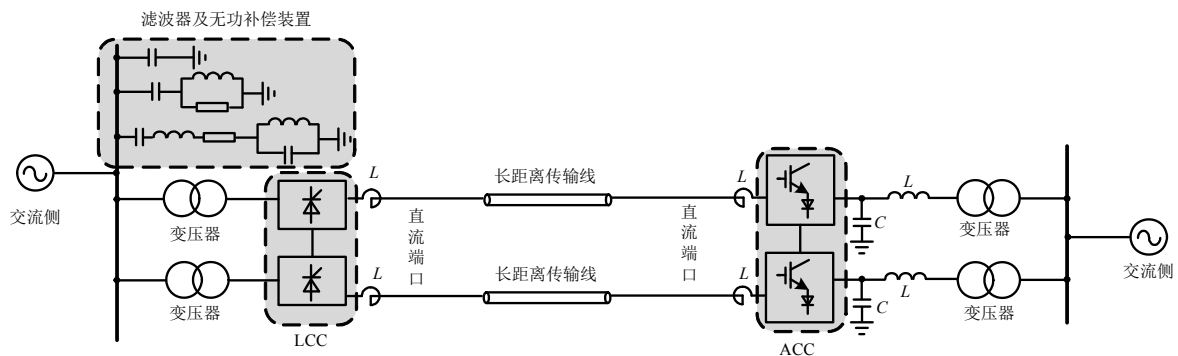


图 11 LCC-ACC 混合直流输电系统

Fig. 11 LCC-ACC hybrid HVDC transmission system

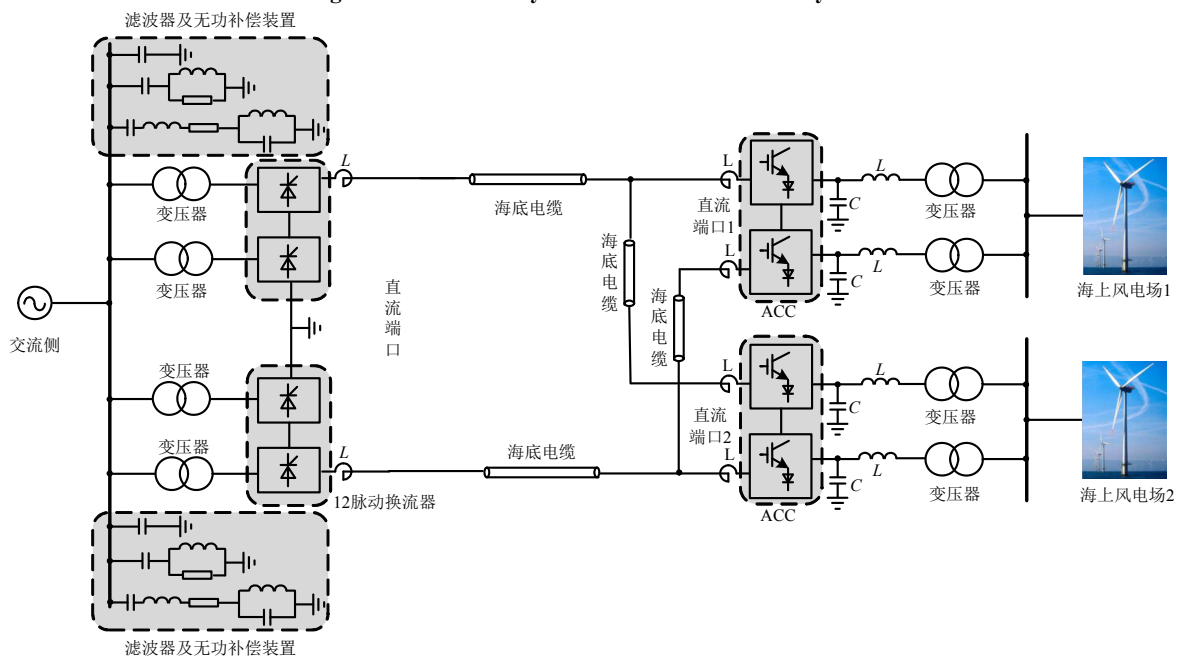


图 12 ACC 用于海上风电多端直流汇集及输电系统

Fig. 12 Multi-terminal HVDC system for offshore wind energy collection and transmission based on ACC

动;而逆变侧(电网侧)也不存在 LCC 的换相失败问题。因此, ACC-MTDC 是海上风电多端直流汇集及输送系统的一种较佳技术方案。由于目前针对 ACC-HVDC 绝缘配合及造价研究较少,3 种方案的总体造价主要从功率器件个数、储能电容及滤波电路的要求等方面进行初步的评估,较为准确全面的造价评估需要结合换流器绝缘配合、运行裕度、可靠性设计等具体设计需求进行详细计算。

6 总结与展望

本文针对适用于高压直流输电 ACC-HVDC 相关的功率半导体器件、均压方法、电路拓扑、调制方法、功率特性、控制策略、故障及保护方法等进行了调研和分析。结合 ± 250 kV/1 GW 的 HVDC 系统逆变侧换流器应用,对比了 ACC、LCC 和 MMC 3 种换流器的特点。根据文献调研和分析情况,本文得到以下结论:

1) ACC 需要采用可承受反向电压的自关断压接封装功率半导体开关器件。目前的功率半导体发展水平下,可以采用逆阻型 IGCT,也可以采用非逆阻型 IGBT 串联二极管实现。由于 IGBT 驱动电路功耗小,对均压电路影响较小,且 IGBT 相比 IGCT 可以承受更高的 di/dt , ACC-HVDC 应用中亟待开发高电压、大电流的逆阻型压接封装 IGBT。

2) 与电压源换流器中的情况不同, ACC 中串联连接的功率半导体开关器件的电压均衡需同时考虑正向和反向 2 种电压。ACC 中功率半导体开关器件的串联均压技术目前研究较少,需深入研究。ACC 的功率半导体开关器件均压电路与开关频率密切相关,因此 ACC 的低开关频率调制方法是实现良好均压的关键决定因素之一。

3) ACC 可以实现四象限运行,但是其有功和无功功率在特定运行区域才可实现完全解耦,且解耦的程度与系统参数有关,尤其是交流侧 LC 滤波电路参数、功率半导体开关器件的电压和电流应力等。ACC 的功率运行范围相比 VSC/MMC 有一定限制,但是相对 LCC 有了明显提高,且无需额外无功补偿设施即可实现功率因数调节。

4) 关于 ACC-HVDC 与弱交流系统谐振的风险、系统的故障特性及保护方法等目前研究较少,有待进一步深入研究。

5) 过电压和绝缘配合问题是影响 ACC 工程应用及造价的关键因素,目前针对 ACC 过电压和绝

缘配合问题研究也较少,未来需进一步深入研究。

6) 实例仿真计算结果对比表明, ACC 的功率半导体器件数量、交/直流滤波器数量、功率运行范围、换流器效率、总体造价都介于 LCC 和 MMC 之间。

7) ACC-HVDC 在升级或改造现有 LCC-HVDC 系统的逆变侧换流器以及海上风电多端直流汇集与输送等领域具有较好的应用前景。

参考文献

- [1] BAHRMAN M P, JOHNSON B K. The ABCs of HVDC transmission technologies[J]. IEEE power and energy magazine, 2007, 5(2): 32-44.
- [2] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES G D. VSC-based HVDC power transmission systems: An overview[J]. IEEE Transactions on power electronics, 2009, 24(3): 592-602.
- [3] ADAPA R. High-wire act: HVDC technology: The state of the art[J]. IEEE power and energy magazine, 2012, 10(6): 18-29.
- [4] KIRBY N. Current trends in dc: voltage-source converters[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2019, 17(3): 32-37.
- [5] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760-1771.
TANG Guangfu, PANG Hui, HE Zhiyuan. R&D and application of advanced power transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760-1771(in Chinese).
- [6] DEBNATH S, QIN J Jiangchao, BAHRANI B, et al. Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: A review[J]. IEEE transactions on power electronics, 2014, 30(1): 37-53.
- [7] NAMI A, LIANG Jiaqi, DIJKHUIZEN F, et al. Modular multilevel converters for HVDC applications: Review on converter cells and functionalities[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 18-36.
- [8] PEREZ M A, BERNET S, RODRIGUEZ J, et al. Circuit topologies, modeling, control schemes, and applications of modular multilevel converters[J]. IEEE transactions on power electronics, 2015, 30(1): 4-17.
- [9] ZHAO Cong, LI Yaohua, LI Zixin, et al. Optimized design of full-bridge modular multilevel converter with low energy storage requirements for HVDC transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(1): 97-109.
- [10] MERTENS A, KUCKA J. Quasi two-level PWM operation of an MMC phase leg with reduced module

- capacitance[J]. IEEE Transactions on power electronics, 2016, 31(10): 6765-6769.
- [11] HU Jiabing, XIANG Muchao, LIN Lei, et al. Improved design and control of FBSM MMC with boosted AC voltage and reduced DC capacitance[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(3): 1919-1930.
- [12] LI Binbin, ZHANG Yi, WANG Gaolin, et al. A modified modular multilevel converter with reduced capacitor voltage fluctuation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(10): 6108-6119.
- [13] ZHAO Cong, LEI Ming, HU Yang, et al. Energy storage requirement optimization of hybrid modular multilevel converter with circulating current injection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(9): 6637-6648.
- [14] WIRTH W F. High-speed snubberless operation of GTOs using a new gate drive technique[J]. IEEE transactions on Industry Applications, 1988, 24(1): 127-131.
- [15] 刘国友. IGCT—GTO 技术的最新进展[J]. 半导体技术, 2000, 25(3): 9-12.
- LIU Guoyou. IGCT: the recent development of GTO[J]. Semiconductor Technology, 2000, 25(3): 9-12(in Chinese).
- [16] 陈政宇, 余占清, 吕纲, 等. 基于 IGCT 串联的 10kV 直流混合断路器研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 317-326.
- CHEN Zhengyu, YU Zhanqing, LV Gang, et al. Researches on 10 kV DC hybrid circuit breaker based on IGCT series[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 317-326(in Chinese).
- [17] 刘文华, 胡雨辰, 刘炳, 等. IGCT 和 IEGT—适用于 STATCOM 的新型大功率开关器件[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(23): 66-70.
- LIU Wenhua, HU Yuchen, LIU Bing, et al. IGCT and IEGT—new high power silicon switches suitable for STATCOM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(23): 66-70(in Chinese).
- [18] VEMULAPATI U, ARNOLD M, RAHIMO M, et al. Reverse blocking IGCT optimised for 1kV DC bi-directional solid state circuit breaker[J]. IET Power Electronics, 2015, 8(12): 2308-2314.
- [19] SUNG W, HUANG A Q, BALIGA B J, et al. The first demonstration of symmetric blocking SiC gate turn-off(GTO)thyristor[C]//2015 IEEE 27th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's(ISPSD)Hong Kong, China: IEEE, 2015: 257-260.
- [20] TEERAKAWANICH N, JOHNSON C M. Design optimization of quasi-active gate control for series-connected power devices[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(6): 2705-2714.
- [21] BAGHERI A, IMAN-EINI H, FARHANGI S. A Gate Driver Circuit for Series-Connected IGBTs Based on Quasi-Active Gate Control[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(2): 791-799.
- [22] ABBATE C, BUSATTO G, IANNUZZO F. High-voltage, high-performance switch using series-connected IGBTs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(9): 2450-2459.
- [23] NAGEL A, BERNET S, BRUCKNER T, et al. Design of IGCT series connection for 6 kV medium voltage drives[C]//IEE Seminar PWM Medium Voltage Drives(Ref. No. 2000/063). Birmingham, UK: IET, 2000.
- [24] LU Ting, ZHAO Zhengming, YU Hualong, et al. Parameter design of a three-level converter based on series-connected HV-IGBTs[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(6): 3943-3954.
- [25] BARAIA I, BARRENA J A, ABAD G, et al. An experimentally verified active gate control method for the series connection of IGBT/diodes[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(2): 1025-1038.
- [26] CHIVITE-ZABALZA J, TRAINER D R, NICHOLLS J C, et al. Balancing algorithm for a self-powered, high voltage switch, using series connected IGBTs for HVDC applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(9): 8481-8490.
- [27] Zhu Jianxin, Xing Yan, Ding Shun, et al. Dynamic voltage-sharing among series-connected IGBTs during turning-on process[J]. Electronics Letters, 2019, 55(12): 707-709.
- [28] Xia Yuanye, Ahmed K H, Williams B W. A PWM current source-based DC transmission system for multiple wind turbine interfacing[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4): 784-796.
- [29] NAGUIB M F, LOPES L A C. Harmonics reduction in low switching frequency space vector modulated current source converters[C]//2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference. Rhodes, Greece: IEEE, 2008: 1434-1440.
- [30] TORRES-OLGUIN R E, GARCES A, MOLINAS M, et al. Integration of offshore wind farm using a hybrid HVDC transmission composed by the PWM current-source converter and line-commutated converter[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 28(1): 125-134.
- [31] GIRALDO E, GARCES A. An adaptive control strategy for a wind energy conversion system based on PWM-CSC

- and PMSG[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 29(3): 1446-1453.
- [32] BENDRE A, WALLACE I, NORD J, et al. A current source PWM inverter with actively commutated SCRs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(4): 461-468.
- [33] 郭小强. 三相 H7 电流源光伏逆变器共模电流抑制研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4665-4671.
Guo Xiaoqiang. Common mode current suppression for transformerless three-phase H7 current source photovoltaic inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4665-4671(in Chinese).
- [34] COSSUTTA P, AGUIRRE M P, ENGELHARDT M A, et al. Control system to balance internal currents of a multilevel current-source inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(3): 2280-2288.
- [35] Vishal, Vekhande, Nimish, et al. Switching state vector selection strategies for paralleled multilevel current-fed inverter under unequal DC-Link currents condition[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014.
- [36] BAO Jianyu, BAO Weibing, ZHANG Zhongchao, et al. A simple current-balancing method for a three-phase 5-level current-source inverter[C]//2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. Porto, Portugal: IEEE, 2009: 104-108.
- [37] ISMAIL N F N, RAHIM N A, RAIHAN S R S, et al. Parallel inductor multilevel current source inverter with energy-recovery scheme for inductor currents balancing[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(11): 2298-2304.
- [38] XIA Bing, LI Yaohua, LI Zixin, et al. Dual phase shift PWM-CSCs based hybrid HVDC transmission system[C]//2018 IEEE 27th International Symposium on Industrial Electronics(ISIE). Cairns, QLD, Australia: IEEE, 2018: 378-383.
- [39] XIA Bing, LI Yaohua, LI Zixin, et al. DC fault ride through strategy of a PWM-CSC based hybrid HVDC transmission system[C]//2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC). Shenzhen, China: IEEE, 2018: 1-6.
- [40] XIA Bing, LI Yaohua, LI Zixin, et al. Control strategy of dual current source inverters for high power application under unbalanced grid[C]//2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Jeju, South Korea: IEEE, 2018: 1110-1115.
- [41] LIANG Jiaqi, NAMI A, DIJKHUIZEN F, et al. Current source modular multilevel converter for HVDC and FACTS[C]//2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications(EPE). Lille, France: IEEE, 2013: 1-10.
- [42] BHESANIYA M M, SHUKLA A. Current source modular multilevel converter: Detailed analysis and STATCOM application[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 323-333.
- [43] BHESANIYA M M, SHUKLA A. Norton equivalent modeling of current source MMC and its use for dynamic studies of back-to-back converter system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(4): 1935-1945.
- [44] ANTUNES F L M, BRAGA H A C, BARBI I. Application of a generalized current multilevel cell to current-source inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46(1): 31-38.
- [45] DAHER S, SILVA R, ANTUNES F. Multilevel current source inverter-the switching control strategy for high power application[C]//Proceedings of the 1996 IEEE IECON. 22nd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation. Taipei, Taiwan, China: IEEE, 1996: 1752-1757.
- [46] XIONG Y, CHEN D, DENG S, et al. A new single-phase multilevel current-source inverter[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC '04. Nineteenth Annual IEEE. IEEE, 2004.
- [47] 熊宇, 陈丹江, 刘兆桑, 等. 一类新型的单相直接式电流型多电平变流器拓扑[J]. 电工技术学报, 2004, 19(5): 26-30.
XIONG Yu, CHEN Danjiang, LIU Zhaoshen, et al. A novel single-phase multilevel current-source inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(5): 26-30(in Chinese).
- [48] WANG Jiacheng, DAI Jingya, WU Bin, et al. Megawatt wind energy conversion system with diode rectifier and multilevel current source inverter[C]//2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Phoenix, AZ, USA: IEEE, 2011: 871-876.
- [49] 熊宇, 胡长生, 陈丹江, 等. 一类新型三相直接式电流型多电平逆变器拓扑的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 163-167.
XIONG Yu, HU Changsheng, CHEN Danjiang, et al. Research on a new three-phase direct type multilevel current source inverter topology[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 163-167(in Chinese).
- [50] 熊宇, 王培容, 鲍建宇, 等. 一种新的分相控制式三相电流型五电平逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 13-16.
XIONG Yu, WANG Peirong, BAO Jianyu, et al. A new split-control three-phase 5-level current-source inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 13-16(in Chinese).
- [51] WU Bin, NARIMANI M. High-power converters and AC drives[M]. New York: John Wiley & Sons, 2017.

- [52] KARSHENAS H R, KOJORI H A, Dewan S B. Generalized techniques of selective harmonic elimination and current control in current source inverters/converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, 10(5): 566-573.
- [53] 栾轲栋, 李耀华, 李子欣, 等. 适用于高压直流输电的主动换相换流器特定谐波消除脉宽调制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3970-3979.
- LUAN Kedong, LI Yaohua, LI Zixin, et al. Research on selective harmonic elimination pulse width modulation strategy of actively commutated converter for HVDC applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3970-3979(in Chinese).
- [54] WANG Liqiao, WANG Yong. Multilevel current source converter based on SHEPWM[C]//2008 International Conference on Electrical Machines and Systems. Wuhan, China: IEEE, 2008: 1905-1908.
- [55] GUZMAN J I, MELIN P E, ESPINOZA J R, et al. Digital implementation of selective harmonic elimination techniques in modular current source rectifiers[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(2): 1167-1177.
- [56] 官二勇, 宋平岗, 叶满园, 等. 电流源型逆变器 SHE-PWM 开关角度的计算方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 62-65.
- GUAN Eryong, SONG Pinggang, YE Manyuan, et al. A method of solution to SHE-PWM switching angles for CSI[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 62-65(in Chinese).
- [57] Xu D, Wu B. Multilevel current source inverters with phase shifted trapezoidal PWM[C]//2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference. Recife, Brazil: IEEE, 2005: 2540-2546.
- [58] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- ZHANG Chongwei, ZHANG Xing. PWM rectifier and its control[M]. Beijing: China Machine Press, 2003(in Chinese).
- [59] WANG Xiao, OOI B T. Unity PF current-source rectifier based on dynamic trilogic PWM[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1993, 8(3): 288-294.
- [60] 谈龙成. IGBT 电流型变流技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.
- TAN Longcheng. Research on the current source converter based on IGCT[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2009(in Chinese).
- [61] XIONG Yu, LI Yuling, YANG Xin, et al. A new three-phase five-level current-source inverter[C]//Twentieth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005. APEC 2005. Austin, TX, USA: IEEE, 2005, 1: 424-427.
- [62] ZHANG Zhongchao, OOI B T. Multimodular current-source SPWM converters for a superconducting magnetic energy storage system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1993, 8(3): 250-256.
- [63] ZHANG Zhongchao, KUANG Jinbo, WANG Xiao, et al. Force commutated HVDC and SVC based on phase-shifted multi-converter modules[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(2): 712-718.
- [64] BAI Zhihong, ZHANG Zhongchao, ZHANG Yao. A generalized three-phase multilevel current source inverter with carrier phase-shifted SPWM[C]//2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference. Orlando, FL, USA: IEEE, 2007: 2055-2060.
- [65] LI Yunwei, WU Bin, XU D, et al. Space vector sequence investigation and synchronization methods for active front-end rectifiers in high-power current-source drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(3): 1022-1034.
- [66] CELANOVIC N, BOROYEVICH D. A fast space-vector modulation algorithm for multilevel three-phase converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(2): 637-641.
- [67] BEIG A R, RANGANATHAN V T. Space vector based bus clamped PWM algorithms for three level inverters: implementation, performance analysis and application considerations[C]//Eighteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2003. APEC'03. Miami Beach, FL, USA: IEEE, 2003, 1: 569-575.
- [68] 常国祥, 陈虎, 张晓华. 电流型多电平逆变器 SVPWM 控制方法[J]. 沈阳工业大学学报, 2014, 36(4): 367-372.
- CHANG Guoxiang, CHEN Hu, ZHANG Xiaohua. SVPWM control method for current source multilevel inverter[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2014, 36(4): 367-372(in Chinese).
- [69] 苗轶如, 刘和平, 王华斌, 等. 电流源型逆变器叠流时间效应的平均电流前馈补偿策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14): 4183-4193.
- MIAO Yiru, LIU Heping, WANG Huabin, et al. Average current feedforward compensation strategy of overlap-time effect for current source inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(14): 4183-4193(in Chinese).
- [70] CHOI J H, KOJORI H A, DEWAN S B. High power GTO-CSC based power supply utilizing SHE-PWM and operating at unity power factor[C]//Proceedings of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 1993:

- 76-79.
- [71] LI Yabin, LI Heming, PENG Yonglong. A unity power factor three-phase buck type SVPWM rectifier based on direct phase control scheme[C]//2006 CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference. Shanghai, China: IEEE, 2006, 1: 1-5.
- [72] 李玉玲, 鲍建宇, 张仲超. 间接电流控制可调功率因数电流型 PWM 变流器[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 49-53.
- LI Yuling, BAO Jianyu, ZHANG Zhongchao. Indirect current control adjustable power factor current source PWM converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 49-53(in Chinese).
- [73] WISEMAN J C, WU Bin, CASTLE G S P. A PWM current-source rectifier with active damping for high power medium voltage applications[C]//2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Proceedings(Cat. No. 02CH37289). Cairns, Qld, Australia: IEEE, 2002, 4: 1930-1934.
- [74] 柏吉宽, 郭军. 静止坐标系下电流源型 PWM 整流器多环控制策略[J]. 微电机, 2015, 48(11): 71-76.
- BAI Jikuan, GUO Jun. Improved multi-loop control strategy for pulse width modulation current-source rectifier in stationary reference frame[J]. Micromotors, 2015, 48(11): 71-76(in Chinese).
- [75] 郭强, 刘和平, 彭东林, 等. 静止坐标系下电流型 PWM 整流器电流环控制策略研究及其参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(15): 2353-2361.
- GUO Qiang, LIU Heping, PENG Donglin, et al. A novel control strategy and its parameter design of the current-loop in a stationary frame for current-source PWM rectifiers[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(15): 2353-2361(in Chinese).
- [76] 全生财, 郭文勇, 李大飞. 三相电流型 PWM 整流器改进型模型预测控制[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(8): 30-35.
- QUAN Shengcai, GUO Wenyong, LI Dafei, et al. Improved model predictive control of three-phase current source rectifier[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(8): 30-35(in Chinese).
- [77] DUPCZAK B S, PERIN A J, HELDWEIN M L. Space vector modulation strategy applied to interphase transformers-based five-level current source inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(6): 2740-2751.
- [78] BINESH N, WU B. 5-level parallel current source inverter for high power application with DC current balance control[C]//2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference(IEMDC). Niagara Falls, ON, Canada: IEEE, 2011: 504-509.
- [79] 白志红. 电流型多电平变流器的一些相关理论以及应用技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- BAI Zhihong. Research on some theories and application techniques of multilevel current source converters[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008(in Chinese).
- [80] WANG Zheng, CHAU K T, BO Yuwen, et al. Power compensation and power quality improvement based on multiple-channel current source converter fed HT SMES[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, 22(3): 5701204.
- [81] Alskran F A, Simoes M. Multilevel Current Source Converter-Based STATCOM Suitable for Medium-Voltage Applications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020.
- [82] LUAN Kedong, LI Yaohua, LI Zixin, et al. Study of black startup strategy of the turn-off device based current source HVDC converter[C]//2019 IEEE 4th International Future Energy Electronics Conference(IFEEC). Singapore: IEEE, 2019.
- [83] 郭小强, 杨勇, 张雪. 电网电压不平衡下电流源并网变换器控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(12): 3671-3679.
- GUO Xiaoqiang, YANG Yong, ZHANG Xue. Control of grid-connected current source converter under unbalanced grid voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(12): 3671-3679(in Chinese).
- [84] WANG Zheng, WU Bin, XU Dewei, et al. DC-link current ripple mitigation for current-source grid-connected converters under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(8): 4967-4977.
- [85] WANG Weiqi, GAO Feng, YANG Yongheng, et al. Cascaded H7 current source converter based power transmission system and fault analysis[C]//2017 IEEE Southern Power Electronics Conference(SPEC). Puerto Varas, Chile: IEEE, 2017: 1-7.



李子欣

在线出版日期: 2020-04-10.

收稿日期: 2020-01-13.

作者简介:

李子欣(1981), 男, 博士, 研究方向为高压大功率电力电子变换器, 智能电网、能源互联网电气设备, lzx@mail.iee.ac.cn;

*通信作者: 徐飞(1983), 男, 博士, 研究方向为大功率电力电子变换器控制与保护, xufei@mail.iee.ac.cn.

(责任编辑 邱丽萍)

Research Review of Current-Source Type Actively Commutated Converter for High Voltage Direct Current Transmission Systems

LI Zixin^{1,2}, XU Fei^{1,2*}, ZHAO Chengyon³, GUO Xiaoqiang⁴, LUAN Kedong^{1,2}, LUO Jinhua^{1,2},
GAO Fanqiang^{1,2}, ZHAO Cong^{1,2}, WANG Ping^{1,2}, LI Yaohua^{1,2}

(1. Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drive, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences;

2. University of Chinese Academy of Sciences; 3. North China Electric Power University; 4. Yanshan University)

KEY WORDS: self-turn-off power semiconductor; current- source converter; actively commutated converter; high voltage direct current

Current-source type actively commutated converter (ACC) adopting self-turn-off power semiconductors is characterized by decoupled control of active and reactive power, avoidance of commutation failure, no requirement of large amount of energy storage capacitors and so forth. ACC has good application prospects in high voltage direct current (HVDC) transmission systems.

This paper reviewed and analyzed the power semiconductors with voltage sharing technology, converter circuit topology, modulation method, active and reactive power characteristics, control schemes, fault and protection problems of ACC for HVDC applications.

The self-turn-off power devices suitable for ACC require press-pack package with reverse blocking (RB) ability. RB-IGCT or IGBT with series diode are the possible devices for ACC-HVDC systems. Press-pack IGBTs which have lower drive power and higher di/dt ability than other devices need fast development for ACC.

The series connected power devices in ACC must cope with both the forward and reverse voltage sharing problem, which is different from the voltage sharing situation in voltage source converter (VSC).

In this paper, the ACC circuit topologies suitable for HVDC is divided into three-level circuit topology, combined three-level circuit topology, and modular multilevel circuit topology according to the number of output current levels and topological forms. This paper also reviews and compares the modulation methods applicable to ACC, such as SPWM, SHE, TPWM, and summarizes the advantages and disadvantages of different modulation methods.

ACC can achieve four-quadrant operation, but its active and reactive power can be completely decoupled in a specific operating region shown in Fig. 1, in which the degree of decoupling is related to system parameters. This paper takes the a ± 250 kV /1 GW true bipolar DC

transmission system as an example, and compared and analyzed different aspects of the three solutions of ACC, LCC and MMC on the inverter side. The comparison results are shown in Table 1.

This paper also analyses the potential application scenarios, the existing problems and future trends of ACC technology for HVDC systems.

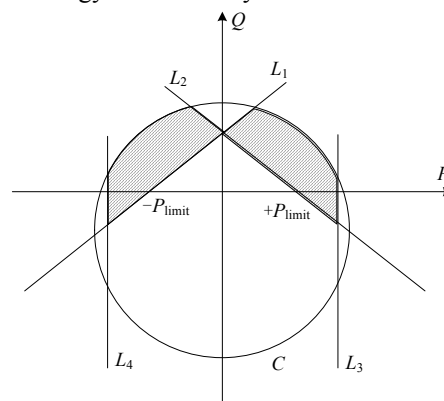


Fig. 1 Active (P) and reactive power (Q) of ACC.

Table 1 Comparison among ACC, LCC and MMC for a ± 250 kV /1 GW HVDC system

	ACC	LCC	MMC
Quantity of IGBT/thyristor	1680	1536	3600
Quantity of diode	1680	0	3600
Quantity of energy storage capacitors	—	—	1200
AC side filter	LC filter	Filter banks	Arm inductors
Reactive power compensation requirement	Low	High	No
DC side filter	Large reactor	Large reactor	No or small reactor
Decoupling of active and reactive power	Decoupled in partial region	Not decoupled	Decoupled
Converter efficiency	Around 99.2%	Around 99.4%	Around 99.1%
Ability to cope with AC side fault	Strong	Weak	Strong
Black-start ability	Yes	No	Yes
Commutation failure	No	Yes	No
Total cost	Medium	Low	High