

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.06.017

MMC 系统级拓扑及其直流故障电流阻断能力研究

唐 立^{1,2}, 袁旭峰^{1,2}, 李 宁^{1,2}, 唐圣辉¹, 谈竹奎²

(1. 贵州大学电气工程学院, 贵阳 550025; 2. 贵州电力科学研究院, 贵阳 550002)

摘要: 由于直流断路器成本较为昂贵,尚处于试验阶段,具备直流故障电流阻断能力的 MMC 拓扑才是实现输电网可控性,提高 MMC 运行可靠性的关键。文中在分析传统半桥型模块化多电平换流器(half bridge sub module based modular multilevel converter, HBSM-MMC)直流侧故障机理的基础上,对具有直流故障电流阻断能力 MMC 相关研究进行综述。分析了桥臂优化 MMC 的拓扑结构及直流故障抑制能力,包括子模块混合型 MMC 及二极管阻断型 MMC;分析了单相优化 MMC 拓扑结构及直流故障电流阻断能力,包括桥臂交替导通 MMC 和混合级联型 MMC。仅从理论角度来说,具备直流故障电流阻断能力的 MMC 拓扑结构研究已经较为成熟,但混合子模块优化控制、改进子模块封装、串联子模块和开关器件的协调配合、器件冷却等工程实现诸多问题还有待进一步研究。

关键词: 模块化多电平换流器(MMC); 直流故障; 优化拓扑; 故障阻断

MMC System Topology and Its DC Fault Current Blocking Capability

TANG Li^{1,2}, YUAN Xufeng^{1,2}, LI Ning^{1,2}, TANG Shenghui¹, TAN Zhukui²

(1. College of Electric Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Guizhou Electric Power Research Institute, Guiyang 550002, China)

Abstract: Because of high cost and immaturity of DC circuit breaker, the modular multilevel converter (MMC) topology with DC fault current blocking capability plays an important role in realizing the controllability of power grid and improving the operation reliability of MMC. In this paper, based on the analysis of DC-side fault mechanism of the traditional half bridge MMC, the researches on MMC are reviewed. The topology and the DC fault current suppression capability of the MMC with optimized bridge are analyzed, including the submodule hybrid MMC and the diode blocking type MMC. The topology and the DC fault current blocking capability of the single-phase optimized MMC are discussed, including the bridge arm alternately conducting type MMC and the hybrid cascaded MMC. It is concluded that the theoretical researches on the MMC topology with DC fault current blocking capability have become mature, but the engineering implementation topics, such as optimum control of hybrid submodule, improvement of submodule packaging, coordination of serial module and switching device, and device cooling, need further study.

Key words: modular multilevel converter(MMC); DC fault; optimization topology; fault blocking

0 引言

基于全控型电力电子器件的电压源换流器构建的高压直流输电系统(voltage source converter based HVDC, VSC-HVDC)是一种新兴的直流输电技术,其

具有独立的有功无功功率快速解耦控制、不存在换相失败、可进行无源孤岛供电等优点,非常适用于分布式电源并网、城市配电网扩容,多端柔性直流输电系统互联等领域^[1-5]。与传统的两电平、三电平换流器相比,采用模块化多电平换流器构建的直流输电系统(modular multilevel converter based HVDC, MMC-

收稿日期:2017-01-14; 修回日期:2017-03-18

基金项目:国家自然科学基金(51667007);中国南方电网有限责任公司重点科技项目(GZKJQQ00000417)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51667007), the Key Science and Technology Projects of China Southern Power Grid Co., Ltd.(GZKJQQ00000417).

HVDC)更以其模块化程度高、拓展性好、易于冗余设计、开关损耗小、谐波性好等诸多优点而倍受关注^[6-7]。鉴于 MMC 自身的这些特点,使得其在高压直流输电领域更具有竞争力^[8-9]。

对于输电线路而言,全部采用铺设电缆的方法可以降低发生直流故障的概率,提升输电系统的可靠性,但是电缆价格昂贵,不符合实际工程中对经济性的要求。对于长距离输电线路以及部分因为实际情况限制无法铺设电缆的场所,通常选择架空线路^[10-11]。对于架空线路,不可避免会发生直流侧短路故障,而直流输电系统的阻尼系数相对较小,故障时电流应力巨大^[12],且存在故障点定位困难的问题^[13]。如果不能及时迅速的清除巨大应力的直流故障电流,很可能造成功率器件的永久性损坏,甚至会使故障扩大,使整个系统崩溃,停止运行^[14-15]。

一般而言,针对直流故障可以断开交流或直流断路器,间接断开交流电网与故障点的连接^[16]。对于常规的交流断路器,其采用机械开关,响应速度慢,并且功率器件在断路器响应期间仍然需要承受高电流应力^[17];另外在故障清除后,系统重启时序复杂,恢复时间较长^[18]。固态直流断路器具有快速中断直流故障电流的能力,但是其研制难点在于直流电流没有过零点且直流故障电流上升率快;其主电路全部采用半导体材料,成本高昂,并且其通态损耗较大,因此采用固态直流断路器阻断故障电流的方法还不太成熟^[19-20]。针对上述问题,文[21-24]提出了混合直流断路器。其在正常运行时,机械路径作为电流的主要流通过程,这样可以减小损耗;故障时,断开直流固态断路器用于故障隔离。然而这样的混合直流断路器具有相对较大的体积,且其成本仍然较高。

针对现有的技术缺陷,国内外相关学者在具有直流故障电流阻断能力的 MMC 系统级拓扑方面开展了广泛深入的研究,并取得了不错的研究成果,提出了多种不同的桥臂优化拓扑和单相优化拓扑结构^[25-26]。考虑到不同的拓扑在控制复杂性,换流器效率,经济性等方面各自的特点,对各类拓扑的特点进行归纳总结对后续的研究工作有重要意义。文中从 HBSM-MMC 拓扑结构的工作原理出发,分析了直流侧故障机理,然后重点分析了桥臂优化拓扑和单相优化拓扑两类 MMC 系统级拓扑。对故障隔离和故障电流阻断机理以及各自的优缺点和适用范围进行对比分析,为业内学者开展相关的研究工作提供参考。

1 HBSM-MMC 工作原理及直流侧故障机理

目前已经建成投运的工程均是采用的 HBSM-

MMC 拓扑结构,如西门子公司在 2010 年建成的美国 Trans bay cable ± 200 kV 直流输电工程,中国在 2011 年 8 月投运的上海南汇风电场 ± 30 kV 柔性直流输电示范工程等^[27]。当 HBSM-MMC 发生直流侧故障时,HBSM 反并联的二极管为交流侧向故障点注入电流提供通路,系统类似于发生三相短路故障^[28]。HBSM-MMC 不具有故障电流阻断能力,无论何种情况下直流故障电流均不会自动清除,严重影响系统的正常运行。

1.1 HBSM-MMC 工作原理

三相半桥型模块化多电平换流器拓扑结构见图 1。其包括 A、B、C 三个相单元,每个相单元分为上、下两个桥臂,每个桥臂由若干个半桥型子模块(half bridge sub module, HBSM)串联构成,上、下桥臂完全对称。其中 U_a 、 U_b 、 U_c 为交流侧电压; L_s 为交流侧电感; L_x 为桥臂电抗器; L_{dc} 为直流侧平波电抗器^[29]。可以通过改变 MMC 子模块投入数量来改变其输出电压等级。其中桥臂电抗器 L_x 有减小相电流变化率和抑制相间环流的作用。直流侧电容正常工作为系统输出提供电压支撑,续流二极管在 IGBT 闭锁时提供电流通路^[27]。

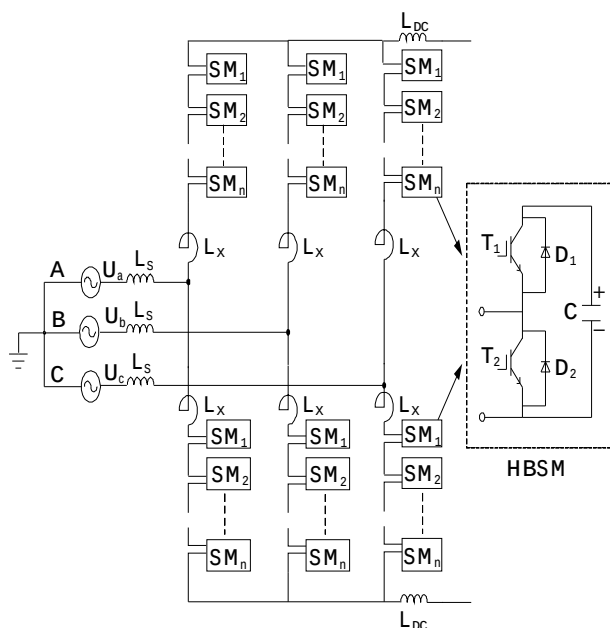


图 1 三相半桥型模块化多电平换流器拓扑结构

Fig. 1 The topology of three-phase half bridge sub module based modular multilevel converter

半桥型子模块(HBSM)由两个 IGBT,两个反并联二极管 D_1 、 D_2 和一个直流电容 C 构成。正常工作时由 T_1 、 T_2 交替导通,输出电压 0 和 U_c 。故障时, T_1 、 T_2 均闭锁关断,故障电流通过续流二极管流通。

1.2 HBSM-MMC 直流侧故障机理

一般而言,HBSM-MMC 的直流侧故障主要包

括3种^[30]:断线、单极接地和双极短路故障。对架空线路而言,考虑到自然原因,双极短路故障是最容易发生也是最严重的故障之一。文中仅对双极短路故障的机理进行分析,其余类型的分析方法类似。根据保护系统检测到直流侧故障到IGBT器件闭锁的过程,直流双极短路故障的发展可分为保护动作前和保护动作后^[26]两个阶段。

保护动作前:此时所有的IGBT器件均按正常工作时的脉冲触发信号导通关断,故障电流由相对独立的两部分电流组成^[30]:一是交流系统通过子模块对故障点的注入电流,见图2(a);二是换流器子模块中的串联电容产生的放电电流,见图2(b)。其中 R_{DC} 为故障时故障点到换流器直流侧的等效电阻。

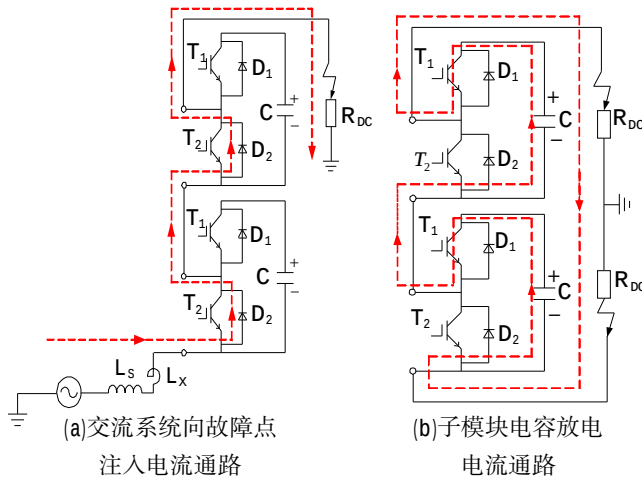


图2 保护动作前故障电流通路

Fig. 2 The fault current path before protection action

从文[28]可知,保护动作前的故障电流大小与桥臂电抗器 L_x 、子模块电容 C 、上、下桥臂子模块个数有关。另外还与故障瞬间的直流侧电压 U_{DC} 和直流线路电流 I_{DC} 有关。

保护动作后:当故障电流快速上升时,控制保护系统检测到故障,闭锁所有的IGBT,见图3。图3中以A、B两相为例分析其保护动作后故障电流流向,其余任意两相之间同理。当电流从A流向B时,交流侧电流对所有子模块电容串联充电,见图3路径①;当电流从B流向A时,交流侧电流通过续流二极管持续向故障点注入电流,见图3路径②。

HBSM-MMC发生直流侧故障,在保护动作前,子模块的电容 C 、 T_1 、 D_2 需要承受故障过电流。在保护动作后只有 D_2 需要承受故障过电流,且此时的电流大小与桥臂电流一样。

2 桥臂优化拓扑

2.1 子模块混合型MMC

针对HBSM-MMC不具有直流故障电流阻断能

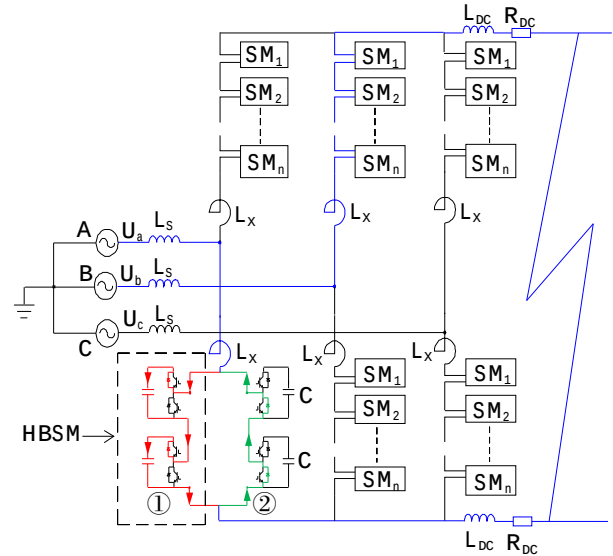


图3 保护动作后故障电流通路

Fig. 3 The fault current path after protection action

力的问题,实际工程中兼顾系统可靠性,硬件电路设计,控制方法等多种要求,将不同种类子模块混合级联,便得到了子模块混合型(hybrid MMC, H-MMC)拓扑^[25]。其基本结构见图4。其中子模块类型1、2代表具有直流故障电流阻断能力的子模块拓扑(文中图以FBSM代表具有直流故障电流阻断能力的子模块拓扑)。

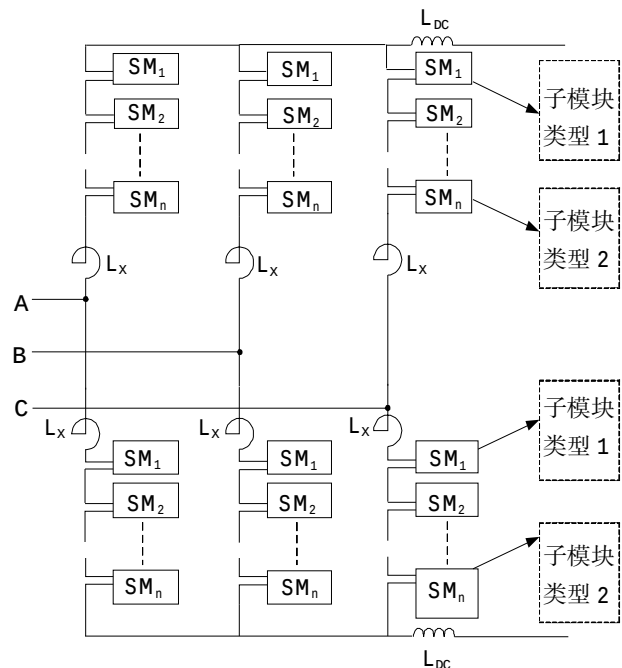


图4 混合型子模块拓扑

Fig. 4 The topology of hybrid MMC

文[30-31]提到了子模块全部采用全桥型子模块(fullbridge submodule, FBSM)的拓扑结构。FBSM-MMC具有直流故障电流阻断能力,且其具有对称的电平输出能力,适用于直接AC/AC功率变换的场

合。其缺点在于使用的功率器件过多,增加了换流器的投资成本和运行损耗。文[32-33]提到了由 HBSM 和 FBSM 混合组成的 H-MMC。这种类型的 H-MMC 利用 HBSM 使用较少的功率器件和 FBSM 的直流故障电流阻断能力折中,具有直流故障电流阻断能力的同时还节省了硬件的投资成本。

文[34]将 FBSM 中的一个 IGBT 管用二极管替代,提出了单相电压全桥子模块(positive voltage full-bridge submodule, PFSM);文[35]用自阻型子模块(self-blocking submodule, SBSM)去替代 FBSM。这两种改进型 H-MMC 比由 HBSM 和 FBSM 构成的 H-MMC,每个子模块单元均少使用一个 IGBT 器件,在系统复杂性、硬件成本方面得到进一步减少,发展前景良好。

文[36]提到了用箝位双子模块(clampdouble submodule, CDSM)去替代 FBSM;文[37]提到了用箝位电路型双子模块(clampcircuitdouble submodule, CCDSM)去替代 FBSM。这两种改进型 H-MMC 具有较强的直流故障电流阻断能力,但是其控制系统较为复杂,工程中可根据实际情况选用。

对于上述任何一种 H-MMC,由于其各个桥臂均使用了不同类型的子模块,其充放电时间不完全相同,所以各子模块的数量应符合一定的设计原则,也需重新设计子模块的电压波动和平衡控制策略^[38-41]。

2.2 二极管阻断型 MMC

文[42]提出了一种在 HBSM-MMC 直流出口处串联一个大功率二极管的二极管阻断型 MMC (D-MMC)。其拓扑结构见图 5。利用二极管的单向导电性,可以在直流侧故障时阻断电流流通;在直流故障清除后可以快速重启,恢复稳态运行。

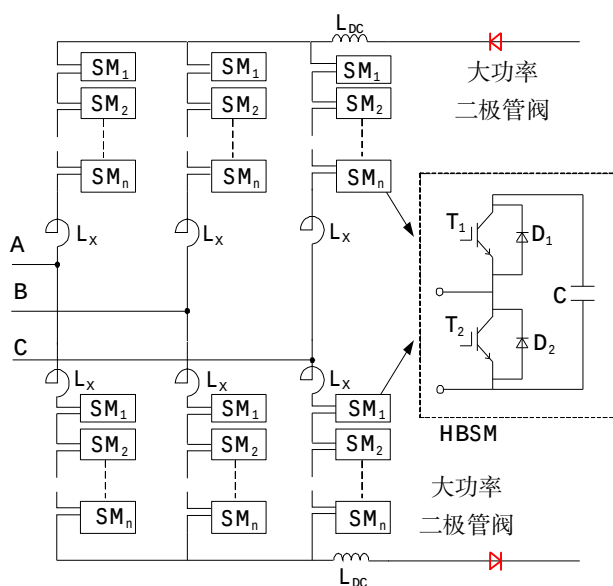


图 5 二极管阻断型拓扑

Fig. 5 The topology of D-MMC

D-MMC 具有直流故障电流阻断能力,由于二极管的单向导电性,其适用于海上风电场等大型分布式能源发电系统单向功率输送的场合。

3 单相优化拓扑

文[43]提到了桥臂交替导通多电平换流器(alternative arm multi-level converter, AAMC)拓扑结构。考虑到 AAMC 使用器件较多的问题,文[44-46]提出了一种混合级联型多电平换流器(hybrid cascaded multilevel converter, HC-MC)拓扑结构。HC-MC 的整形电路位于 IGBT 开关的交流侧,单相的上、下桥臂共用一个整形电路,使得 HC-MC 的结构更加紧凑。

3.1 AAMC

将具有直流故障电流阻断能力的子模块和带反并联二极管的 IGBT 串联开关直接连接,则得到了 AAMC 拓扑结构,见图 6。根据整形电路和 IGBT 开关分布的位置, AAMC 有两种结构类型^[47]:①整形电路与 IGBT 开关相对独立布置,见图 6(a);②整形电路与 IGBT 开关混合布置,此时的 IGBT 开关与整形电路可构成一个新的集成子模块,有利于换流器组合封装,见图 6(b)。

对于 AAMC,其稳态运行时,控制各个桥臂循环开通或关断,便可以得到期望的交流电压波形。此外,IGBT 串联开关可以分担部分直流电压,从而可以减少整形电路子模块数量^[25]。

考虑到使用 IGBT 串联开关成本及通态损耗较高的问题,文[48]提出了用晶闸管替代 IGBT 的方案 T-AAMC,见图 7。

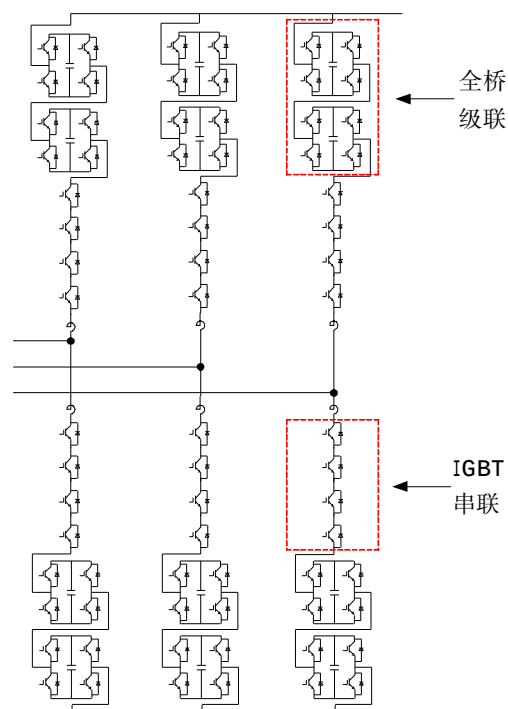
T-AAMC 在保持 IGBT 型 AAMC 换流器优点的同时,能有效的降低成本和功耗,达到预期的目的。晶闸管自身没有自关断能力,仅能在吸收感性无功时才能实现过零关断,因此效率略低^[48]。该拓扑结构主要适用于 HVDC 和大型分布式能源并网逆变器领域。

3.2 HC-MC

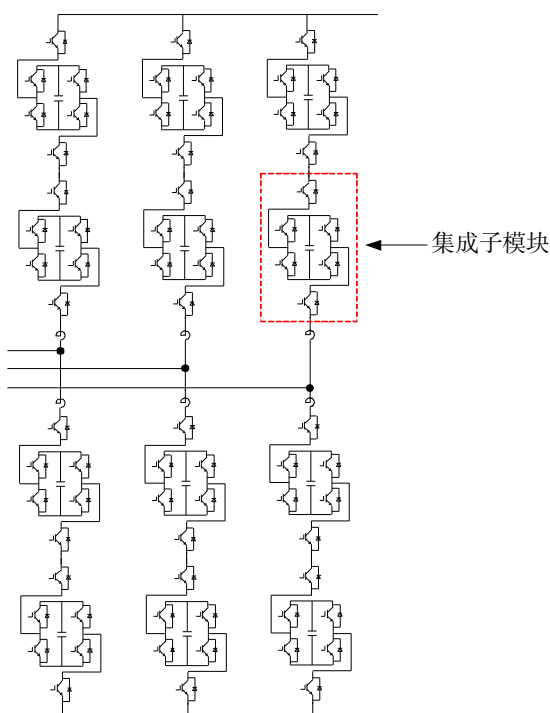
HC-MC 的拓扑结构与 AAMC 呈对偶形式,其整形电路不再位于上、下桥臂上,而是安装在 IGBT 开关的交流侧^[46],见图 8。

HC-MC 上、下桥臂共用一套整形电路,使得其结构更加紧凑;HC-MC 中整形电路对 IGBT 开关输出的两电平电压进行整形,可以在交流侧得到高质量正弦电压波形。

文[49-50]提出了 HC-MC 的变形拓扑结构,过渡桥臂 MMC(transition arm MMC, TA-MC)和可控型过渡臂 MMC (controlled transition arm MMC, CTA-



(a) 整形电路与 IGBT 开关独立布置



(b) 整形电路与 IGBT 开关混合布置

图6 AAMC 的两种拓扑结构

Fig. 6 Two topologies of AAMC

MC), 见图 9(a)、(b)。

对于 TA-MC 拓扑结构, 其运行时, 随着 IGBT 开关的开通与关断, 对应桥臂会产生共模电流, 所以在实际运用时, 要合理配置桥臂电抗器的参数^[43]。对于 CTA-MC, 其 IGBT 开关器件作为主要的 DC/AC 能量转换通道, 过渡臂则是用作三相输出能量交换通道。

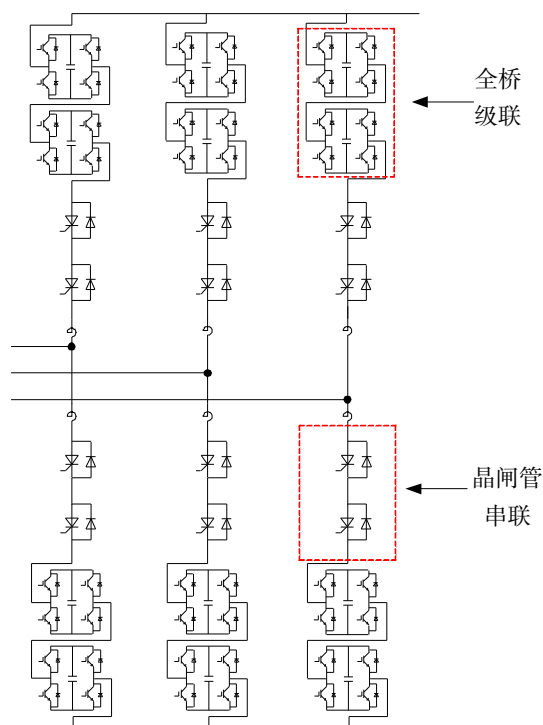


图7 晶闸管型 AAMC 拓扑结构

Fig. 7 The topology of thyristor type AAMC

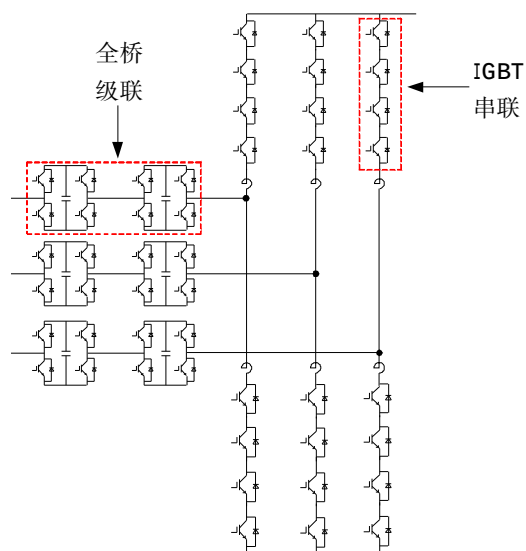


图8 HC-MC 拓扑结构

Fig. 8 The topology of HC-MC

3.3 AAMC 与 HC-MC 小结

AAMC 和 HC-MC 从减少功率器件使用的角度出发, 结合了传统两电平和 MMC 的特点, 与传统的 MMC 相比, 其主要优点有:

1) 采用级联子模块与 IGBT 开关或晶闸管直接连接, 减少了子模块的数量, 大大减小了换流器的体积与重量。

2) 以 FBSM 为代表的具有直流故障电流阻断能力子模块的使用, 使得 AAMC 和 HC-MC 系统均有直流故障阻断能力。

3) 当 IGBT 开关开通时, AAMC 和 HC-MC 可重

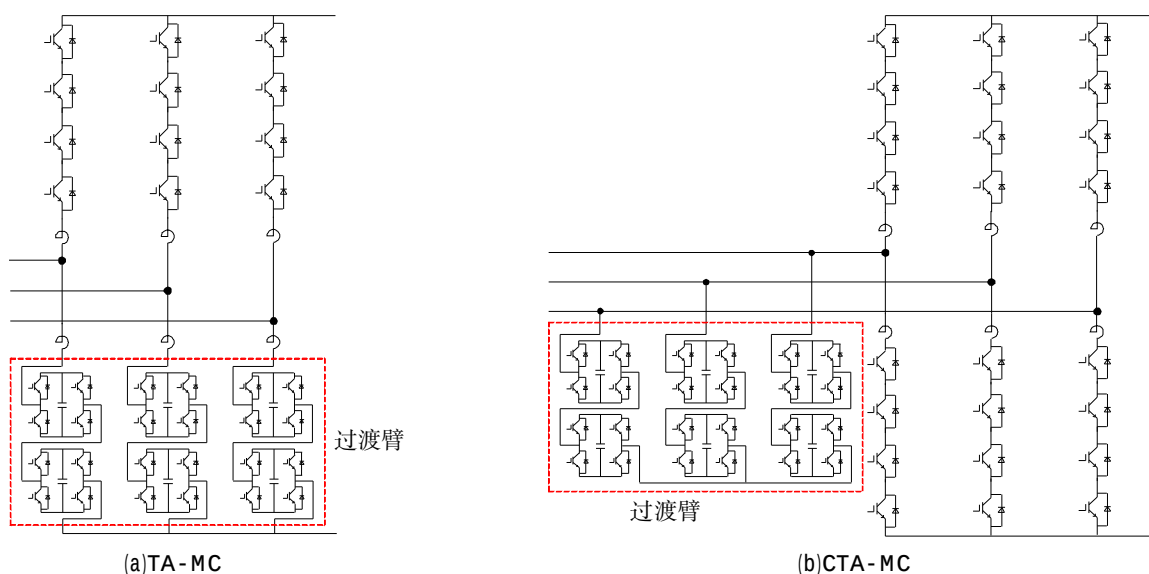


图9 HC-MC 变形拓扑结构

Fig. 9 The improved topologies of HC-MC

构为 STATCOM, 在直流故障期间能为交流系统提供无功支持。

AAMC 和 HC-MC 其缺点在于, 由于采用了 IGBT 直接串联开关, 串联器件的同步触发及稳态运行时整形电路与 IGBT 开关的配合是研究的

难点。

4 各类优化 MMC 拓扑比较

通过对上述各类优化 MMC 系统级拓扑的对比分析, MMC 拓扑结构的特征见表 1。

表 1 各类优化 MMC 拓扑结构比较

Table 1 Comparison of various MMC topological structure of optimized

类型	拓扑结构	直流侧谐波	故障阻断能力	设计控制复杂性	损耗	能否运行于 STATCOM	推广前景
桥臂优化拓扑	全 FBSM	很小	强	一般	较高	否	一般
	HBSM-FBSM	很小	较强	较复杂	一般	否	较好
	HBSM-PFSM/SBSM	很小	强	较复杂	较低	否	好
	HBSM-CDSM/CCDSM	很小	强	复杂	较高	否	一般
单向优化拓扑	D-MMC	整流侧 12n 次	单向阻断能力	较复杂	较低	能	适用于单向功率流动
	AAMC	6n 次	强	复杂	较高	能	较好
	T-AAMC	6n 次	较强	复杂	较高	能	较好
	HC-MC	6n 次	一般	复杂	较高	能	较好
	TA-MC	6n 次	较强	复杂	高	能	一般
	CTA-MC	6n 次	较强	复杂	较高	能	一般

对于桥臂优化拓扑, 全 FBSM 拓扑具有对称的输出能力和较强的故障电流阻断能力, 但是存在使用器件较多的问题。HBSM-FBSM 拓扑, 一定程度上降低了成本和损耗, 采用成熟的控制方法, 有望用于实际工程当中。HBSM-PFSM 和 HBSM-SBSM 进一步减少了功率器件的使用, 控制方法相对容易, 是最具有潜力的子模块混合型 MMC。HBSM-CDSM 和 HBSM-CCDSM 具有较强的电平输出能力和直流故障电流阻断能力, 其缺点在于控制方法较为复杂和子模块封装困难, 可根据实际情况选用。D-MMC 使用的功率器件较少, 但由于二极管的单向导电性, 只适

用于功率流向不变的场合, 具有一定的局限性^[51-52]。

对于单相优化拓扑 AAMC, HC-MC, 可以很大程度降低 MMC 换流器的体积和成本, 且在直流故障期间能够运行于 STATCOM 模式, 为交流系统提供无功支持。其难点在于串联器件的同步触发技术。TA-MC 运行时会出现共模电流, 系统需要加装较大体积的滤波器。

5 结论

分析了不同的 MMC 系统级拓扑及其直流故障电流阻断能力, 分析了具有发展前景的系统拓扑结

构,然而还有一些问题亟待开展进一步的深入研究。

1)以 HBSM-FBSM 拓扑为基础,重点研究 HBSM-PFSM和 HBSM-SBSM 子模块混合型 MMC,优化控制算法,在实际工程中实现。

2)改进子模块封装技术,让以 HBSM-CDSM 为代表的子模块混合型 MMC 在实际工程中不因封装问题而受到限制。

3)使用新型半导体材料(如碳化硅等)制造的功率器件构成 MMC 子模块,一方面可以改善因使用普通功率器件通态时发热量大带来的散热问题,另一方面还可以降低系统故障时的响应时间,达到快速切断故障电流的目的。

4)重点研究串联功率器件的同步触发技术,解决各子模块间的协调配合问题。

参考文献:

- [1] 徐政,陈海荣.电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术,2007,33(1):1-10.
XU Zheng,CHEN Hairong. Review and applications of VSC HVDC[J]. High Voltage Engineering,2007,33(1): 1-10.
- [2] 汤广福.基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
TANG Guangfu. Voltage source converter based hvdc power transmission technology[M]. Beijing: China Electric Power Press,2010.
- [3] AMIRNASER Y,REZA I.Voltage-sourced converters in power systems[M]. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [4] 汤广福,刘泽洪.2010年国际大电网会议系列报道高压直流输电和电力电子技术[J]. 电力系统自动化,2011,35(5):1-4.
TANG Guangfu,LIU Zehong. A review of CIGRE' 2010 on HVDC transmission and power electronic technology [J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(5): 1-4.
- [5] 高燃,贾凤鸣,廖羽晗,等.电压源换流器技术的最新发展及其在柔性交流输电系统领域中的应用[J]. 高压电器,2016,52(11):10-17.
GAO Ran,JIA Fengming,LIAO Yuhan,et al. Recent development of voltage source converter technology and its application to FACTS[J]. High Voltage Apparatus,2016,52(11): 10-17.
- [6] HAGIWARA M,MAEDA R,AKAGI H. Control and analysis of the modular multilevel cascade converter based on double-star chopper-submodules(MMCC-DSCC)[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2011,26(6): 1649-1658.
- [7] SOLAS E,ABAD G,ANDONI BARRENA J A,et al. Modular multilevel converter with different submodule Concepts-Part I: Capacitor voltage balancing method [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2013,60(10): 4525-4535.
- [8] 汤广福,贺之渊.2008年国际大电网会议系列报道——高压直流输电和电力电子技术最新进展[J]. 电力系统自动化,2008,32(22):1-5.
TANG Guangfu,HE Zhiyuan. A review of CIGRE 2008 on HVDC and power electronics technologies [J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(22): 1-5.
- [9] 杨晓峰,林智钦,郑琼林,等.模块组合多电平变换器的研究综述[J]. 中国电机工程学报,2013,33(6):1-14.
YANG Xiaofeng,LIN Zhiqin,ZHENG Qionglin,et al. A review of modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(6): 1-14.
- [10] 李笑倩,刘文华,宋强,等.一种具备直流清除能力的 MMC 换流器改进拓扑[J]. 中国电机工程学报,2014,34(36):6389-6397.
LI Xiaoqian,LIU Wenhua,SONG Qiang,et al. An enhanced MMC topology with DC fault clearance capability [J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(36): 6389-6397.
- [11] 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.
- [12] 姚良忠,吴婧,王志冰,等.未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报,2014,34(34):6007-6020.
YAO Liangzhong,WU Jing,WANG Zhibing,et al. Pattern analysis of future HVDC grid development[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(34): 6007-6020.
- [13] 商立群,梁文丽.高压直流输电线路故障定位综述[J]. 高压电器,2016,52(8):1-6.
SHANG Liqun,LIANG Wenli. Review of high voltage DC transmission lines fault location[J]. High Voltage Apparatus,2016,52(8): 1-6.
- [14] ADAM G P,AHMED K H,FINNEY S J,et al. New breed of network fault-tolerant voltage-source-converter HVDC transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(1): 335-346.
- [15] CAO Jun,DU Wenjuan,WANG Haifeng,et al. Minimization of transmission loss in meshed AC/DC grids with VSC-MTDC networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(3): 3047-3055.
- [16] BUCHER M K,WALTER M M,PFEIFFER M,et al. Options for ground fault clearance in HVDC offshore networks[J]. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE),2012:2880-2887.
- [17] International Electrotechnical Commission.High-voltage direct current(HVDC) transmission using voltage sourced converters(VSC)[R]. UK:International Electrotechnical Com-

- mission, 2011.
- [18] SCHMITT D, WANG Y, WEYH T, et al. DC-side fault current management in extended multiterminal-HVDC-grids[C]//9th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices. Chemnitz, German:[s.n.], 2012: 1-5.
- [19] 周万迪, 魏晓光, 高冲, 等. 基于晶闸管的混合型无弧高压直流断路器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(18): 2990-2996.
- ZHOU Wandi, WEI Xiaoguang, GAO Chong, et al. Thyristor based hybrid arc-less high voltage direct current circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(18): 2990-2996.
- [20] 史宗谦, 贾申利. 高压直流断路器研究综述[J]. 高压电器, 2015, 51(11): 1-9.
- SHI Zongqian, JIA Shenli. Research on high-voltage direct current circuit breaker: a review[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11): 1-9.
- [21] 刘路辉, 庄劲武, 江壮贤, 等. 混合型中压直流真空断路器的研究[J]. 高压电器, 2014, 50(5): 18-23.
- LIU Luhui, ZHUANG Jinwu, JIANG Zhuangxian, et al. Development of hybrid medium voltage DC vacuum breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(5): 18-23.
- [22] MEYER J M, RUFER A. A DC hybrid circuit breaker with ultra-fast contact opening and integrated gate-commutated thyristors(IGCTs)[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 646-651.
- [23] 马钊. 直流断路器的研发现状及展望[J]. 智能电网, 2013, 1(1): 12-16.
- MA Zhao. R & D status and prospects of HVDC circuit breakers[J]. Smart Grid, 2013, 1(1): 12-16.
- [24] GOWAID I A, ADAM G P, MASSOUD A M, et al. Quasi two-level operation of modular multilevel converter for use in a high-power DC transformer with DC fault isolation capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 108-123.
- [25] 杨晓峰, 郑琼林, 薛尧, 等. 模块化多电平换流器的拓扑和工业应用综述[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 1-10.
- YANG Xiaofeng, ZHENG Qionglin, XUE Yao, et al. Review on topology and industry applications of modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 1-10.
- [26] 吴婧, 姚良忠, 王志冰, 等. 直流电网 MMC 拓扑及其直流故障电流阻断方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2681-2694.
- WU Jing, YAO Liangzhong, WANG Zhibing, et al. The study of MMC topologies and their DC fault current blocking capacities in DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2681-2694.
- [27] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153.
- JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.
- [28] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过电流分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 31(1): 1-7.
- WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Analysis of submodule over current caused by DC pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 31(1): 1-7.
- [29] 邢航, 刘子伟, 陈堂贤. 模块化多电平换流器(MMC)的拓扑结构研究综述[J]. 通信电源技术, 2016, 33(4): 20-22.
- XING Hang, LIU Ziwei, CHEN Tangxian. Research on the topology of modular multilevel converter[J]. Telecom Power Technologies, 2016, 33(4): 20-22.
- [30] 刘欣和, 吴金龙, 郭宁宁, 等. 直流故障下全桥型多电平换流器模块电压分析[J]. 高压电器, 2016, 52(5): 101-108.
- LIU Xinhe, WU Jinlong, GUO Ningning, et al. Analysis of submodule capacitor voltage caused by DC pole-to-pole fault in FBMMC HVDC system[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(5): 101-108.
- [31] 罗永捷, 李耀华, 李子欣, 等. 全桥型 MMC-HVDC 直流短路故障穿越控制保护策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1933-1943.
- LUO Yongjie, LI Yaohua, LI Zixin, et al. DC short-circuit fault ride-through control strategy of full-bridge MMC-HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1933-1943.
- [32] 许烽, 徐政. 基于 LCC 和 FHMMC 的混合型直流输电系统[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2520-2530.
- XU Feng, XU Zheng. Hybrid HVDC system based on LCC and FHMMC[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2520-2530.
- [33] ADAM G P, AHMED K H, WILLIAMS B W. Mixed cells modular multilevel converter[C]//2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Istanbul: IEEE, 2014: 1390-1395.
- [34] 王—, 刘建政. 用于 MMC-HVDC 直流故障保护的新型拓扑及重合闸控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2312-2319.
- WANG Yi, LIU Jianzheng. An enhanced MMC-HVDC topology and system recovery strategy for DC fault protection[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2312-2319.
- [35] 向往, 林卫星, 文劲宇, 等. 一种能够阻断直流故障电流的新型子模块拓扑及混合型模块化多电平换流器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5171-5179.
- XIANG Wang, LIN Weixing, WEN Jinyu, et al. A new topology of sub-modules with DC fault current blocking

- capability and a new type of hybrid MMC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5171-5179.
- [36] 丁云芝, 苏建徽, 周建. 基于钳位双子模块的 MMC 故障清除和重启能力分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 97-103.
- DING Yunzhi, SU Jianhui, ZHOU Jian. Analysis on fault current limitation and self-recovery of MMC based on clamp double sub-module[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 97-103.
- [37] LI R, FLETCHER J E, XU L, et al. A hybrid modular multilevel converter with novel three-level cells for DC fault blocking capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4): 2017-2026.
- [38] 孔明, 汤广福, 贺之渊. 子模块混合型 MMC-HVDC 直流故障穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5343-5351.
- KONG Ming, TANG Guangfu, HE Zhiyuan. A DC fault ride-through strategy for cell-hybrid modular multilevel converter based HVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5343-5351.
- [39] ZENG Rong, XU Lie, YAO Liangzhong, et al. Design and operation of a hybrid modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(3): 1137-1146.
- [40] 王宝安, 邢珏, 商姣, 等. 模块化多电平动态电压补偿器的控制策略研究[J]. 高压电器, 2016, 52(1): 112-117.
- WANG Bao'an, XING Jue, SHANG Jiao, et al. Study on control strategies of modular multilevel dynamic voltage restorer[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(1): 112-117.
- [41] 周建, 苏建徽, 王新颖, 等. 模块化多电平换流器的预充电控制[J]. 高压电器, 2014, 50(4): 103-107.
- ZHOU Jian, SU Jianhui, WANG Xinying, et al. Pre-charging control of modular multilevel converter[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(4): 103-107.
- [42] 唐庚, 徐政, 薛英林. LCC-MMC 混合高压直流输电系统[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 301-310.
- TANG Geng, XU Zheng, XUE Yinglin. A LCC-MMC hybrid HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 301-310.
- [43] MERLIN M C, GREEN T C. The alternate arm converter: a new hybrid multilevel converter with DC-fault blocking capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 310-317.
- [44] ADAM G P, FINNEYS J, WILLIAMS B W, et al. Network fault tolerant voltage-source-converters for high-voltage applications[C]//9th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. London, UK: IET, 2010: 1-5.
- [45] 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]//9th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC). London, UK: IET, 2010: 1-5.
- [46] 薛英林, 徐政, 唐庚, 等. 新型混合级联多电平换流器调制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 108-114.
- XUE Yinglin, XU Zheng, TANG Geng, et al. New modulation strategies for hybrid cascaded multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 108-114.
- [47] 徐政, 薛英林, 张哲任. 大容量架空线柔性直流输电关键技术及前景展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5051-5062.
- XU Zheng, XUE Yinglin, ZHANG Zheren. VSC-HVDC technology suitable for bulk power overhead line transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5051-5062.
- [48] 胡鹏飞, 江道灼, 郭捷, 等. 基于晶闸管换向的混合型多电平换流器[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 102-107.
- HU Pengfei, JIANG Daozhuo, GUO Jie, et al. Hybrid multilevel converters based on thyristor alternate-arms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 102-107.
- [49] GOWAID I A, ADAM G P, WILLIAMS B W, et al. The transition arm multilevel converter-A concept for medium and high voltage DC-DC transformers[C]//IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Seville: IEEE, 2015: 3099-3104.
- [50] OATES C, DYKE K, TRAINER D. The use of trapezoid waveforms within converters for HVDC[C]//16th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'14-ECCE Europe). Lappeenranta: IEEE, 2014: 1-10.
- [51] 牛得存, 孙中尉, 李楠, 等. 基于准 PR 控制器的 MMC-HVDC 新型环流抑制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37(4): 87-94.
- NIU Decun, SUN Zhongwei, LI Nan, et al. Study on MMC-HVDC new type loop current control strategy based on quasi-PR controller[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2016, 37(4): 87-94.
- [52] 刘盛焱, 宋奇吼, 杨颀, 等. 基于 MMC 的有源滤波器无差拍控制[J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37(3): 15-18.
- LIU Shenglang, SONG Qihou, YANG Yang, et al. Deadbeat control for active power filter based on modular multilevel converter[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2016, 37(3): 15-18.
- 唐立(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用。
- 袁旭峰(1976—), 男, 教授, 博士后, 主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用、电力系统运行与控制。
- 李宁(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用。
- 唐圣辉(1988—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用。
- 谈竹奎(1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化。