

模块化多电平技术在电力系统中的应用前景分析

季振东^{1,2}, 赵剑锋¹

(1.东南大学电气工程学院,江苏南京210096;2.南京理工大学自动化学院,江苏南京210094)

摘要:模块化多电平变流器(MMC)以其模块化、低损耗、低谐波等优点,受到越来越多的关注,是未来电力系统中交直流电能转换利用的大趋势。文中在结合 MMC 特点的基础上,比较现有 MMC 的相关电路拓扑结构,分析 MMC 的关键技术点,总结 MMC 在电力系统中的应用研究,进而展望其发展前景。

关键词: MMC; 电路拓扑; 电力系统

中图分类号: TM74

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2015)06-0041-05

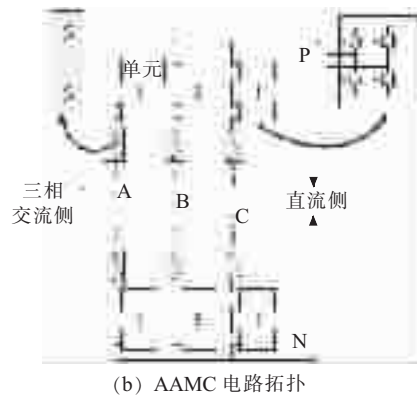
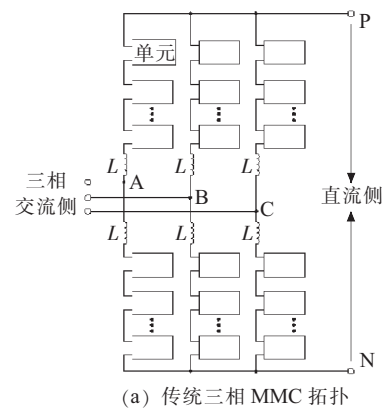
模块化多电平变流器(MMC)已成为高压应用领域最受关注的多电平拓扑^[1-5],特别是在柔性直流输电领域。相比于其他的多电平的拓扑结构,模块化多电平变流器具有如下突出的优点:可以无变压器地接入高压电网;结构上易于模块化实现;具有较低开关损耗和谐波输出;在提供了公共的直流母线的同时取消了直流电容。近些年来,MMC 应用方面已经取得了一些突破性进展。西门子公司率先开发了基于 MMC 的高压直流输电系统 HVDC-plus (High Voltage Direct Current-Power link universal systems, plus)^[1],并于 2010 年建成了连接美国匹兹堡和旧金山的世界首条商业化 HVDC-plus 项目。我国也逐步形成了具有自主知识产权的柔性直流输电技术,相继建成了上海南汇柔性直流示范工程(亚洲首条柔性直流输电工程,2011 年)、南澳多端柔性直流输电工程(世界首个四端柔性直流输电工程,2013 年)、浙江舟山±200 kV 五端柔性直流工程(世界首个五端柔性直流输电工程,2014 年)。但目前国内外电力系统中的 MMC 应用仍集中于柔性直流输电领域,而且局限在德国学者 Marquardt R.^[2]提出的传统 MMC 拓扑结构,对于 MMC 其他应用及相关拓扑仍处于探索阶段。因而对 MMC 近年来的相关研究进行总结和分析,具有重要理论价值和现实指导意义。

1 MMC 相关电路拓扑和关键技术点

1.1 相关电路拓扑

图 1(a)为传统的三相 MMC 拓扑结构,每相由 2 个桥臂构成,每个桥臂又包含 n 个串联而成的单元模块和并网电抗器 L 。其中单元模块可由图 2 所示的电路构成。图 2(a)所示电路为目前最广泛应用的半桥结构,该结构所需开关器件少,但不具有直流短路抑制能力(公共直流母线发生短路并进行开关器件闭锁情

况下,电路拓扑中仍存在短路电流的流通过程),图 2(b)至 2(d)则是为解决该问题所使用的典型拓扑结构。图 2(b)为 H 桥结构单元^[3],去掉 S_3 中开关管亦是一种简化拓扑^[4],由于开关数量提升了 2 倍,相比于半桥结构,成本提高的同时却带来了更多的开关损耗。图 2(c)为箝位双型子模块^[5],正常运行状态下, S_5 处于导通状态,单元等效于 2 个串联的半桥模块。相比于同样输出电平下的全桥模块,开关器件数量和损耗都得到了一定程度的降低。图 2(d)为五电平交叉结构^[6],亦可使用取消 S_6 中开关器件的结构^[7],由于 S_5 和 S_6 的耐压要达到单直流侧电压的 2 倍,相比于箝位双型子模块成本有所提高。4 种单元拓扑在直流故障抑制能力、成本、损耗、输出电平方面的对比如表 1 所示,其中 U_{dc} 为单直流侧电压,排序对比均在输出电平数相同情况下进行。



收稿日期:2015-08-03;修回日期:2015-09-14

国家自然科学基金项目:51477030;

江苏省产学研前瞻性联合研究项目:BY2014127-15。

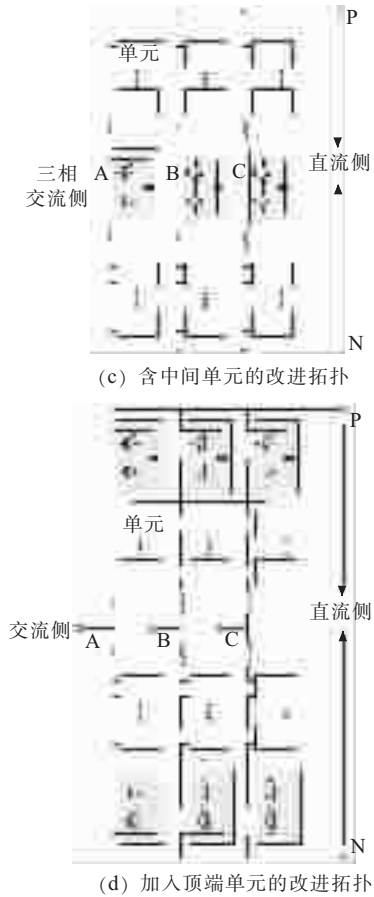


图1 MMC 相关电路拓扑

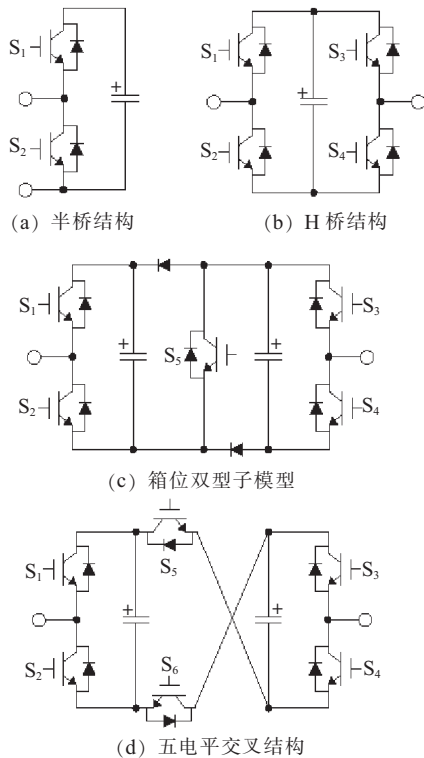


图2 MMC 单元拓扑

在主电路拓扑方面,针对 MMC 无直流故障抑制能力、单元数量多、控制复杂等缺点出现了一些改进的电路结构。为了具有直流故障抑制能力,除了可以将图 2(b)至 2(d)使用于传统三相 MMC 结构^[3]外,还可以

表 1 子模块对比

子单元	直流故障抑制	输出电平	成本排序 (低→高)	成本排序 (低→高)
半桥	×	$0, U_{dc}$	1	1
全桥	√	$0, U_{dc}$	4	4
箱位双型	√	$0, U_{dc}, 2U_{dc}$	2	2
五电平交叉	√	$0, U_{dc}, 2U_{dc}$	3	2

将半桥子单元和具有直流故障抑制能力的子单元进行混合级联,这一定程度上降低了装置的成本,但也一定程度上增加了控制上的复杂度。另外 Alstom 公司提出了图 1(b)所示的桥臂交替导通换流器(AAMC)拓扑^[8,9],由开关器件串联组成的导通开关和全桥子模块级联而成,它减少了子模块单元数量,消除了环流问题,可有效处理直流故障,但需要解决串联开关管同步导通和多直流侧平衡等问题。图 1(c)为含中间单元的改进型拓扑,它在输出端口中间连接了一个单元模块,这样可以减少单元数量,也一定程度上降低了桥臂平衡控制的复杂度^[10]。图 1(d)为加入顶端单元的改进拓扑^[11],它在上下两端各引入一个三桥臂变流器,在简化控制系统的同时也可以减少公共直流母线的电压波动。上述这些改进型的拓扑结构分别解决了 MMC 拓扑某些方面的问题,但由于异类单元的引入,降低了整个装置的容错能力,削弱了装置的可靠性。

1.2 关键技术点

MMC 装置的模块数量众多,需要通过集中控制的方式来协调各单元模块以控制整个装置的直流母线电压、交流输出电流或输出电压。具体来说,MMC 控制中的关键技术点包括:

(1) 多直流电压平衡控制。类似于其他多电平拓扑,由于多直流侧的存在,需要有效的电压平衡控制方法将各直流电压稳定。

(2) 环流抑制。环流是在三相桥臂间流动的电流分量,它产生于三相桥臂电压不同,主要包含两倍频分量。环流对于交流侧的电压和电流并不产生影响,但会增加桥臂电流的峰值,这会影响到子单元电压的波动及装置的效率。故而需合适的环流控制算法加以抑制。

(3) 多电平调制技术。由于大量单元的串联,合适的多电平调制算法对装置的输出性能尤为关键,MMC 一般采用载波移相或最近电平逼近的调制方法。

(4) 容错技术。开关器件的大量使用一定程度上降低了装置的可靠性,故而需要研究多开关器件故障情况下如何保证 MMC 装置的正常运行,通常采用单元旁路和增加冗余单元的方式来进行处理,这就需要研究拓扑调整后的容错控制方法。

(5) 系统非正常情况下的 MMC 运行。需要分别针对系统电压不平衡和系统发生故障的情况进行研

究,以保证装置有条件地在系统非正常情况下工作,提升装置的可靠性。

2 MMC 在电力系统中的应用

除了柔性直流输电,MMC 亦可用于电力系统中其他领域,如电力电子变压器、高压电机驱动、电能质量治理、新能源并网、高压直流固态变压器等,下面就这些方面的应用做一些总结分析。

2.1 电力电子变压器

电子电力变压器(PET)又称为固态变压器(SST),它是一种将电力电子变换技术和基于电磁感应原理的中高频电能变换技术相结合,实现将一种电力特征的电能转变为另一种电力特征的电能的静止电力设备。电力特征,包括电压(或电流)的幅值、相位、频率、相数、相序和波形等^[12]。它在实现常规电力变压器电压等级变换、电气隔离和能量传递等基本功能的基础上,还可以灵活实现潮流控制、电能质量控制等柔性交流输电(FACTS)的功能;可大幅度提升电力系统的可控性,是实现电力系统智能化的关键设备;特别适合在微网、交直流配电网中应用。

2010年以来,中国科学院电工研究所提出了一种基于 MMC 的 PET,并研制了 10 kV/380 V 的样机^[13]。该 PET 拓扑结构如图 3 所示,由三部分组成,前级由传统 MMC 构成,中间级由输入串联输出并联(ISOP)的 DC/DC 变换器构成,输出则由传统三相四线制逆变器构成。该拓扑三部分相对独立,中间级分别通过高低压直流母线与两侧相连,硬件上配置也较为方便,但该结构由于使用了 ISOP 在高压直流侧串联了电容,不利用该直流母线的输出,限制了其应用场合。

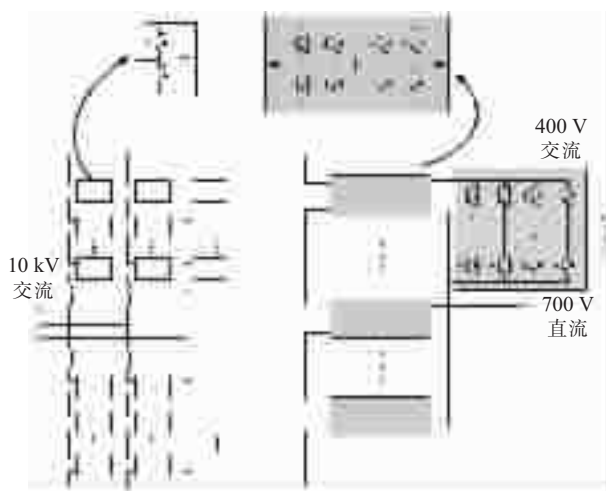
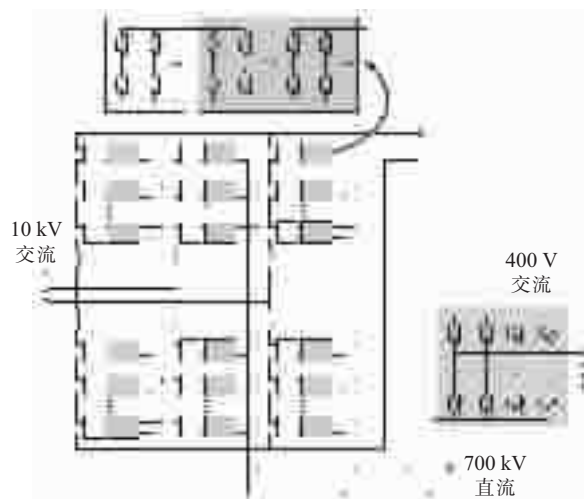


图 3 MMC+ISOP 型电力电子变压器拓扑

2014 年以来,在国家自然科学基金的支持下,东南大学也展开了基于全桥 MMC 的四端口高低压交直流 PET(见图 4),与前者不同的是中间级的 DC/DC 变换器连接于 MMC 的各低压直流侧。这样虽然增加了

DC/DC 模块的单元数,但增强了公共直流母线的可靠性,也有利于简化整个装置的控制系統。该种 PET 能够将 MMC 的拓扑优势充分地运用到 PET 中来,使 PET 适合高压直流的直接接入,适用范围广,因此具有重要的研究价值和广泛的应用前景。



(a) MMC+多 DAB 型电力电子变压器拓扑



(b) 690 V 样机实物图

图 4 四端口电力电子变压器

2.2 电机驱动

近年来,高压电机调速领域同样也引入了 MMC 结构^[14],可实现四象限的新型高压变频器拓扑如图 5 所示。相对于目前应用广泛的 H 桥级联型高压变频器,MMC 结构有如下优势:取消了多绕组变压器;易实现电机的四象限驱动;减少了对电网侧的冲击和污染。但由于开关器件较多,成本也较高,当前不具有价格优势,但对于未来电网特别是直流电网中的应用具有很好的前景。

2.3 电能质量治理

MMC 结构具有高质量的电压波形和快速电流控制能力,UPFC 和 UPQC 能充分利用这两点进行潮流控制和电能质量治理^[15-18],可采用图 6 所示的 MMC 背靠背结构,特别是对于并联部分可实现无变压器直接并网。2015 年,南京 220 kV 西环网 UPFC 工程进入施工阶段,这是我国首个自主知识产权的 UPFC 工程,也是国际上首个使用 MMC 技术的 UPFC 工程。

MMC 亦可用来做 STATCOM,但传统的 MMC 结

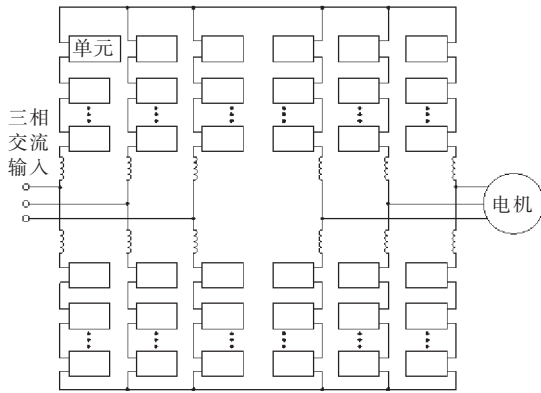


图5 MMC的电机驱动应用

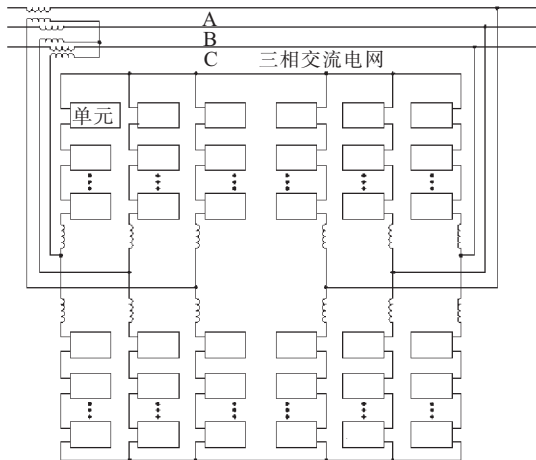


图6 基于 MMC 的 UPFC/UPQC

构在设备构成、控制性能、接地方式和电网故障穿越能力等方面综合比较于角形链式 STATCOM 不具优势^[19]。而采用图 7 所示的基于单星形 MMC 的 STATCOM 可以在降低成本的同时,简化控制策略,有利于提升控制系统的可靠性^[20]。

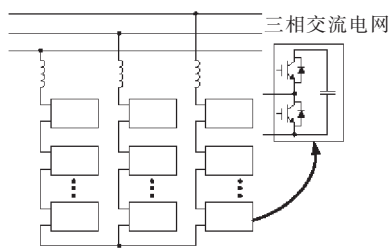


图7 单星 MMC 型 STATCOM

2.4 新能源并网

如图 8 所示,利用 MMC 的单桥臂结构^[21]可以实现串联型 DC/DC 变流器,有助于减小储能、光伏电池板等元件单体电压低与应用场合电压高间的矛盾,实现大容量储能、光伏等新能源直接进行直流并网。对于使用交流方式并网,可使用传统的 MMC 结构^[22,23],有利于提高大型新能源并网的效率、减少大容量新能源并网对电网的影响。

2.5 高压隔离型 DC/DC

如图 9 所示,不同电压等级的高压直流电网连接需要使用隔离型的 DC/DC 变流器,例如直流风电场并

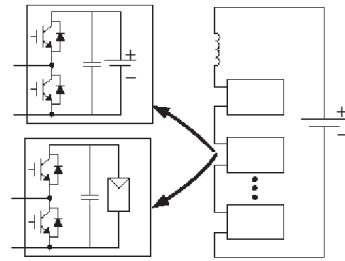


图8 基于 MMC 的新能源直流并网变流器

网等场合,利用双 MMC 交流侧连接的方式可实现该变换目的^[24],并可以通过提升交流侧电压频率的方法,减少变流器的整体体积。该结构的 DC/DC 变流器可以方便地实现高压大容量的直流变换,在工作效率、可靠性方面都有较好的保证。

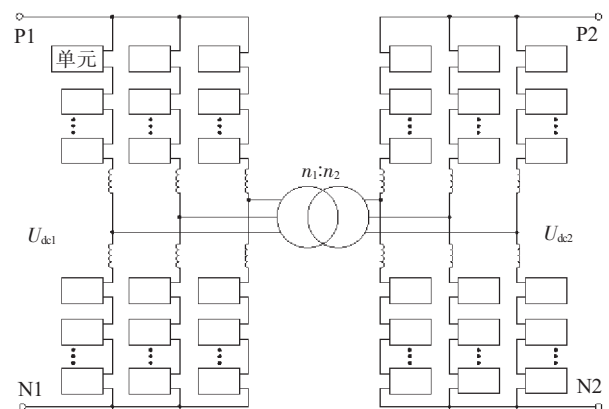


图9 基于 MMC 的高压隔离型 DC/DC 变流器

3 结束语

MMC 以其独特的性能和结构优势受到越来越多的关注,在近些年也是很多领域的研究热点。在电力传输领域,由于柔直工程的成功应用,MMC 结构已成为 HVDC,FACTS 系统所认可的技术,随着电网的发展,将有更多 MMC 投入该类型应用;在电力电子变压器方面,MMC 将高压直流引入进来,对未来各种类型和电压等级的电网互联、灵活电力潮流和电能质量控制起到了很好的示范作用;在中高压电机驱动领域,MMC 型的变频器仍有不少问题需要解决,特别是在成本和低频控制方面,但由于性能方面的优越性仍具有很好的应用前景;在电能质量控制方面,示范工程正在逐步推进,未来将有更大的发展空间;在新能源并网方面,MMC 结构简化了拓扑结构,更利于大容量、高效率地进行新能源并网,更加有力地促进清洁能源的发展。MMC 将成为未来电力系统中交直流电能转换利用的大趋势,除了柔性直流输电外,它还会在电力电子变压器、高压电机驱动、电能质量治理、新能源并网、高压直流固态变压器等领域大有可为。对于开展对 MMC 相关技术的研究对于推动电力系统的发展具有重要的意义。

参考文献:

- [1] DIETMAR R. HVDC Plus-innovative Multilevel Technology for Power Transmission[R]. 2009.
- [2] LESNICAR A, MARQUARDT R. A New Modular Voltage Source Inverter Topology[C]//European Conference on Power Electronics and Applications. Toulouse, France; 2003; 1-10.
- [3] THITICHAIWORAKORN N, HAGIWARA M, AKAGI H. Experimental Verification of a Modular Multilevel Cascade Inverter Based on Double-star Bridge Cells[J], IEEE Transaction on Industry Applications, 2014, 50(1):509-519.
- [4] 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(29):5171-5179.
- [5] MARQUARDT R. Modular Multilevel Converter: An Universal Concept for HVDC-networks and Extended DC-bus-applications [C].in Proc. Int. Power Electron. Conf., Jun. 2010; 502-507.
- [6] NAMI A, WANG L, DIJKHUIZEN F, et al. Five Level Cross Connected Cell for Cascaded Converters[C]. in Proc. Eur. Conf. PowerElectron.Appl., 2013; 1-9.
- [7] 张建坡, 赵成勇, 孙海峰. 基于改进拓扑的 MMC-HVDC 控制策略仿真[J]. 中国电机工程学报, 2015(5): 1032-1040.
- [8] TRAINER D R, CRITCHLEY D R. A New Hybrid Voltage-Sourced Converter for HVDC Power Transmission[C]. CIGRE Session, Paris, France: CIGRE 2010.
- [9] DAVIDSON C C, TRAINER D R. Innovative Concepts for Hybrid Multi-level Converter for HVDC Power Transmission[C]. 9th Institution of Engineering and Technology. International Conference on AC and DC Power Transmission, 19-21 October 2010, London, UK: Curran Associates, Inc., 2010.
- [10] WANG K, LI Y D, ZHENG Z D, et al. Voltage Balancing and Fluctuation-Suppression Methods of Floating Capacitors in a New Modular Multilevel Converter. IEEE Transactions on Industrial Electronics[J]. 2013,60(5):1943-1954.
- [11] Yang X F, Zheng T Q, LIN Z Q, et al. Power Quality Controller Based on Hybrid Mmodular Multilevel Converter[C]. in Industrial Electronics (ISIE), 2012 IEEE International Symposium on , pp.1997-2002, May 2012.
- [12] 何金平. 自平衡电子电力变压器试验系统的研制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [13] 李子欣, 王平, 楚遵方, 等. 面向中高压智能配电网的电力电子变压器研究[J]. 电网技术, 2013(9):2592-2601.
- [14] SPICHARTZ M, STAUDT V, STEIMEL A. Modular Multilevel Converter for Propulsion System of Electric Ships[C].in Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), 2013 IEEE , vol., no., pp.237-242, 22-24 April 2013.
- [15] LIU Z F, LU J J, OU Z G, et al. The Start Control Strategy Design of Unified Power Quality Conditioner Based on Modular Multilevel Converter[C]. in Electric Machines & Drives Conference(IEMDC), 2013 IEEE International , pp.933-937, May 2013.
- [16] 龙云波, 徐云飞, 肖湘宁, 等. 采用模块化多电平换流器的统一电能质量控制器预充电控制[J]. 电力系统自动化, 2015(7):182-187.
- [17] 陆晶晶, 肖湘宁, 张剑, 等. 基于定有功电流限值控制的 MMC 型 UPQC 协调控制方法[J]. 电工技术学报, 2015(3): 196-204.
- [18] 张振华, 江道灼. 基于 MMC 拓扑的 UPFC 控制策略仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012(3):73-77.
- [19] 饶宏, 陈俊, 许树楷, 等. 输电系统用 STATCOM 多电平主回路方案选择[J]. 电力系统自动化, 2013(23):83-87.
- [20] 王明达, 梁军, 王广柱, 等. 基于单星 MMC 的新型 STATCOM 及其控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015(18):108-113.
- [21] 武伟, 谢少军, 张墨, 等. 基于 MMC 双向 DC-DC 变换器的超级电容储能系统控制策略分析与设计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27):4568-4575.
- [22] 李善颖, 吴涛, 任彬, 等. 基于模块化多电平变换器的储能系统综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015(16):139-146.
- [23] 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(36): 27-33.
- [24] LUTH T, MERLIN M M C, GREEN T C, et al. High-Frequency Operation of a DC/AC/DC System for HVDC Applications [J], IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(8):4107-4115 .

作者简介:

季振东(1986),男,江苏东台人,博士,研究方向为高压大功率电力电子技术,电力电子变压器技术;
赵剑锋(1972),男,江苏临海人,教授,研究方向为电力电子在电力系统中的应用。

Prospect Analysis of Modular Multilevel Technology in Power System

JI Zhendong^{1,2}, ZHAO Jianfeng¹

(1.School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Modular multilevel converter is seen as the future development of AC-DC conversion in power system and attracts more and more attention for its superiority such as modular, low losses, low harmonic and so on. Based on the features of MMC, this paper compares related existing MMC circuit topologies, analyzes its critical technology, and summarizes its extensive application research on power system, so as to have an outlook for its broad prospects.

Key words: modular multilevel converter (MMC); circuit topology; power system