一种MMC并行建模方法研究

截至目前，国内已有四个MMC－HVDC工程投运，正在建设中并即将投运的鲁西背靠背直流工程将成为世界上电压等级最高、输送容量最大的柔性直流输电工程。MMC超大规模的子模块数量会导致对MMC的仿真分析效率大大降低，不利于开展参数设计校验、控制策略验证等工作。提出一种基于FPGA的MMC并行建模方法，可实现MMC的实时仿真。在dSPACE实时仿真平台中建立MMC的FPGA模型，并与PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真环境中的器件模型进行对比，验证了所提建模方法的精确性和实时性。

徐慧慧　赵宇洋　张中丹　张海生　宋汶秦／国网甘肃省电力公司经济技术研究院

徐慧慧／工程师

关键词／Keywords
模块化多电平变换器·
FPGA·
柔性直流输电·
电容电压·
并行计算·

0　引言

基于电压源换流器的高压直流输电（Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current，VSC－HVDC）利用全控电力电子器件和脉冲调制技术，能够准确、快速地控制与交流电网交换的有功功率和无功功率，并为交流电网提供电压支撑，克服了传统直流输电技术中存在的一些固有问题[1]。然而早期的柔性直流输电采用两电平或三电平换流器技术，通过绝缘栅双极型晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor，IGBT）器件的直接串联来实现不同电压和容量，存在开关损耗大、谐波含量高和IGBT器件串联动态均压难等缺陷，这使得早期柔性直流输电技术应用困难且装置性能较差。

为解决上述两电平、三电平VSC－HVDC技术存在的缺陷，2001年，德国Bundeswehr Munich大学的R. Marquardt和A. Lesnicar提出了模块化多电平换流器（Modular Multilevel Converter，MMC）拓扑。MMC采用子模块（Submodule，SM）串联的方式构造换流阀，避免了大量器件的压接式串联，降低了对器件一致性的要求[2-5]。同时，特殊的调制方法决定了其可以在较低的开关频率（150～300 Hz）下获得很高的等效开关频率。随着电平数的升高，输出波形接近正弦，可以省去交流滤波器[6]。我国已建成的上海南汇柔性直流工程、南澳三端柔性直流工程、舟山五端柔性直流输电工程、厦门柔性直流工程和鲁西背靠背工程都采用MMC结构。

MMC超大规模的子模块数量，会导致对MMC的仿真分析效率大大降低。如子模块总数量达到3 000个左右，仿真步长为20 μs时，仅5 s的仿真时长，就需要125天以上[8]。而随着高压大容量应用场合的到来，MMC仿真分析消耗的时间将达到天文数字，不利于开展参数设计校验、控制策略验证等工作。

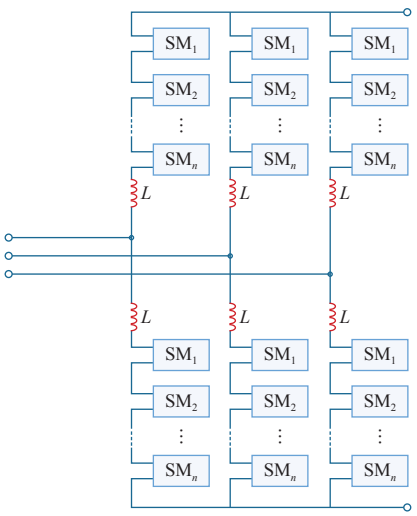
目前，可以将现有的MMC模型按照所建模型是否可以精确仿真每个子模块电容电压充、放电这一本质特征作为判据，将全部模型分为两类：第一类模型主要包括文献[9]、文献[10]所提出的模型。如上所述，在文献[9]所提出的模型中，电磁暂态仿真平台中搭建的两节点戴维南等效模型可以整体等效详细模型的桥臂中N个子模块的戴维南等效信息，并可以反解求出每个子模块的电容电压值。在文献[10]所提出模型中，MMC桥臂经过局部优化，子模块间仍为直接串联，仍然可以精确仿真全部子模块电容的充、放电过程。第二类模型为MMC的

平均值模型[11-15]，基频简化动态模型和连续模型等均属于这一类。这些模型将每个MMC的桥臂等效为一个元件，并且无法求解桥臂内部子模块电容电压等信息，经过如此简化后，大都无法仿真诸如换流器闭锁以及严重交直流故障等一些特殊运行工况。如果不考虑这些缺点，单就仿真效率而言，其非常适合于超大规模MMC组成的多端直流电网。

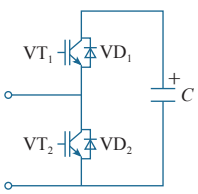
本文提出一种可以精确仿真每个子模块电容电压充、放电过程的基于FPGA的MMC并行建模方法。

1　MMC换流器的等效模型

2003年，德国学者R. Marquardt 等首次提出了MMC的拓扑结构[16]，如图1所示。MMC包含三个相单元，每个相单元包含上、下两个桥臂，每个桥臂由一个电抗器L和n个子模块（Sub-Module，SM）串联而成。图1b为半桥子模块的拓扑结构。其中，VT_1和VT_2代表IGBT；VD_1和VD_2代表反并联二极管；C代表子模块电容[17-19]。



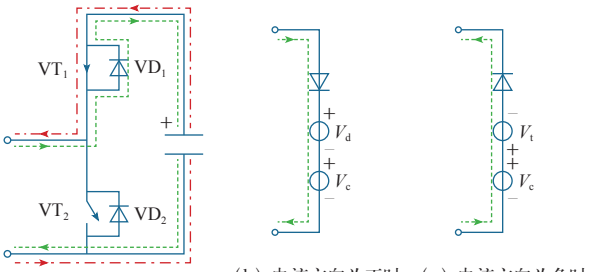
（a）MMC电路结构



（b）半桥SM

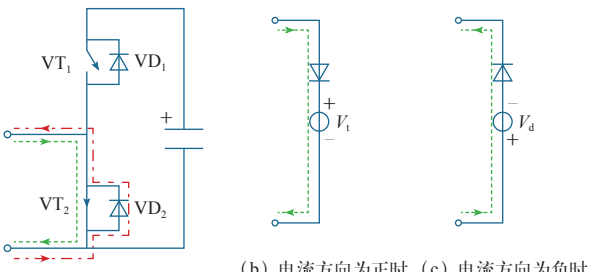
图1　MMC的电路结构图

通过分析可知，子模块共有三种工作状态，分别为投入状态、切除状态和闭锁状态，如图2～4所示。



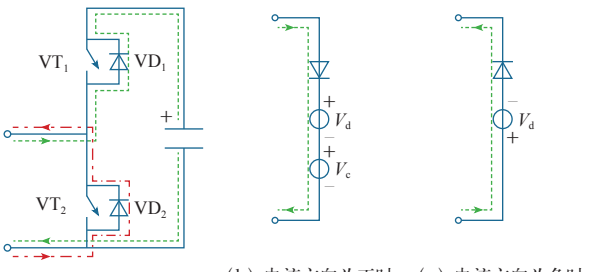
（a）投入状态　（b）电流方向为正时的等效电路　（c）电流方向为负时的等效电路

图2　工作状态一



（a）切除状态　（b）电流方向为正时的等效电路　（c）电流方向为负时的等效电路

图3　工作状态二



（a）闭锁状态　（b）电流方向为正时的等效电路　（c）电流方向为负时的等效电路

图4　工作状态三

在投入状态（见图2a），上管VT_1开通，下管VT_2关断，无论电流方向如何，子模块电容总是投入。电流方向为正、负时的等效电路分别如图2b、图2c所示。等效电路中，二极管为理想器件，V_d、V_t分别为二极管和IGBT的正向导通电压降，V_c为电容电压。

在切除状态，如图3a所示，上管VT_1关断，下管VT_2开通，无论电流方向如何，子模块电容总是被切除。电流方向为正、负时的等效电路分别如图3b、图3c所示。

在闭锁状态，如图4a所示，上管VT_1和下管VT_2均关断。电流方向为正时，通过续流二极管VD_1对电容进行预充电；电流方向为负时，通过二极管VD_2将故障时的子模块旁路。

根据SM三种工作状态时等效电路的相似性，提出一种通用的SM等效电路，如图5所示。图5中，二极管为理想器件，V_{sp}、V_{sn}可通过表1得到。表1中，1代表IGBT开通状态，0代表IGBT关断状态。

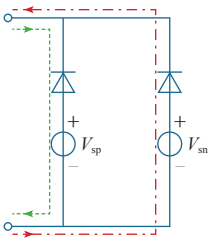


图5 SM通用等效电路

表1 子模块等效电路中的电源电压

工作状态	VT_1	VT_2	V_{sp}	V_{sn}
投入	1	0	V_c+V_d	V_c-V_t
切除	0	1	V_t	$-V_d$
闭锁	0	0	V_c+V_d	$-V_d$

电容电压计算公式为

$$V_c(t)=\frac{1}{C}\int i_c(t)\mathrm{d}t=\frac{1}{C}\int\left[k(t)i_{arm}(t)\right]\mathrm{d}t \quad (1)$$

式中，$V_c(t)$为电容电压；$i_c(t)$为电容电流；C为SM电容值；$i_{arm}(t)$为桥臂电流；$k(t)$为一个二进制变量，其值取决于桥臂电流是否流经子模块电容，具体如表2所示。

表2 变量$k(t)$的确定原则

工作状态	VT_1	VT_2	桥臂电流方向	$K(t)$
投入	1	0	任意	1
切除	0	1	任意	0
闭锁	0	0	正	1
			负	0

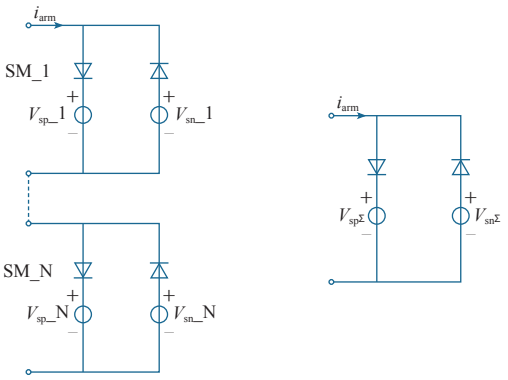
运用梯形积分法则将式（1）离散化，Δt为仿真步长，得

$$V_c(t)=V_c(t-\Delta t)+\frac{\Delta t}{2C}\left[k(t)i_{arm}(t)+k(t-\Delta t)i_{arm}(t-\Delta t)\right] \quad (2)$$

如图6a所示，桥臂SM等效电路串联，可得桥臂等效电路，如图6b所示。其中

$$V_{sx\Sigma}=\sum_{i=1}^{N}V_{sx-i},\ \text{where}\ \ x=\text{p or n} \quad (3)$$

式中，$V_{sx\Sigma}$为桥臂子模块电压之和，其中x代表桥臂电流方向为正（positive，p）或为负（negative，n）。



（a）桥臂SM串联　　（b）桥臂等效电路

图6 等效电路

各子模块电压V_{sx-i}可以独立、并行计算，这就非常方便于FPGA实现，而且只要FPGA计算资源足够多，不论桥臂SM数量多少，MMC仿真的实时性总能得到保证。

2 仿真分析

为了验证所提MMC建模方法的正确性，在PSCAD/EMTDC仿真环境中建立器件模型，在dSPACE实时仿真平台中建立FPGA模型，从仿真准确度和仿真效率两方面进行详细对比分析。建立的10 MV·A/±40 kV的MMC－HVDC系统如图7所示。桥臂子模块数目$N=24$，器件模型换流器采用载波移相调制和电容电压冒泡排序算法。

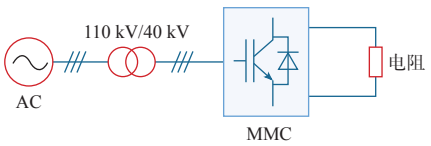


图7 系统结构图

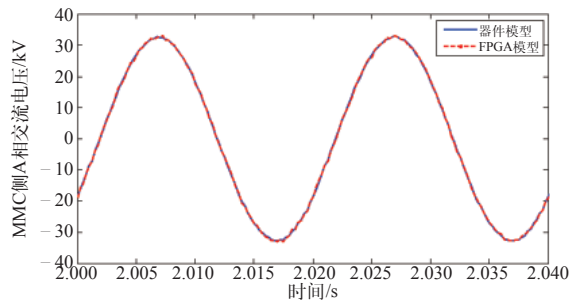
2.1 仿真准确度

通过波形对比的方式，来评估FPGA模型的准确性。器件模型和FPGA模型的对比波形如图8所

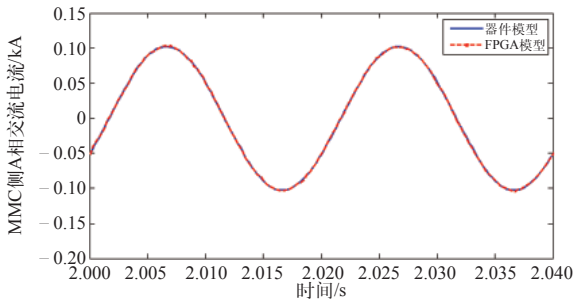
示，依次展示了MMC的外部电气量，包括a相交流电压、a相交流电流、直流线路电压和直流线路电流。

（1）稳态

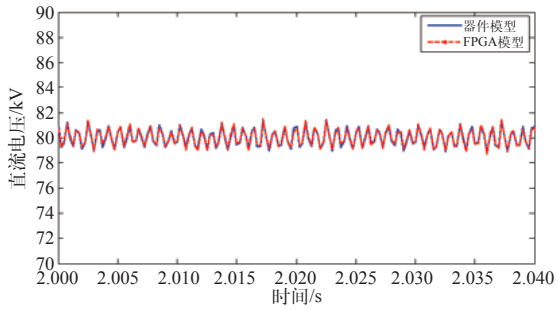
MMC从交流系统中吸收5 MW有功功率输送到直流侧。从图8可以看出，FPGA模型的仿真波形和器件模型的仿真波形非常匹配。



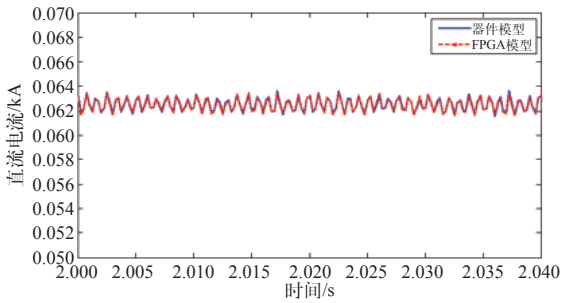
（a）MMC侧A相交流电压



（b）MMC侧A相交流电流



（c）直流电压

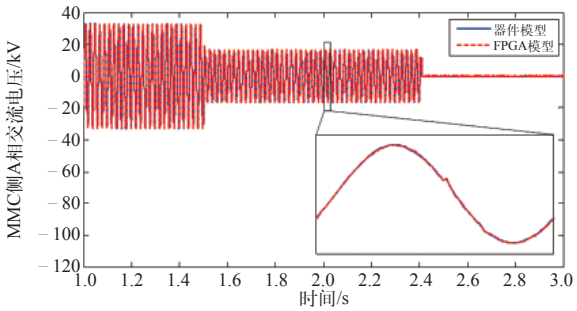


（d）直流电流

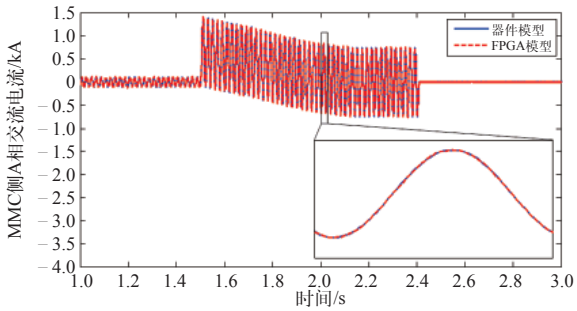
图8　稳态时器件模型与FPGA模型的仿真波形对比

（2）瞬时性直流短路故障

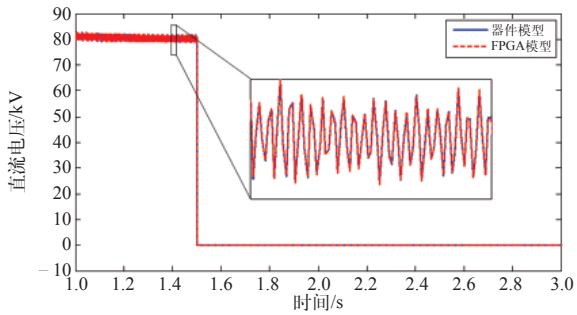
在系统稳定之后，在t=1.5 s时，引入直流双极短路故障（瞬时性，持续时间为0.01 s），故障后，直流电压会迅速下降，直流电流和交流电流显著上升，如图9b～d所示。考虑故障检测与保护逻辑单元动作，设定换流器闭锁时间为故障发生



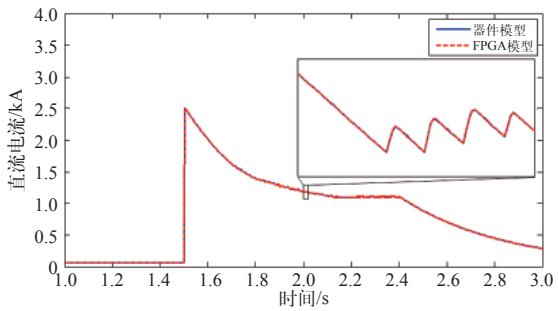
（a）MMC侧A相交流电压



（b）MMC侧A相交流电流



（c）直流电压



（d）直流电流

图9　瞬时性直流故障时器件模型与FPGA模型的仿真波形对比

后的5 ms，也即1.505 s。换流器闭锁后在二极管续流效应作用下，MMC变为不控整流桥，交流电源通过MMC向短路点持续提供短路电流。即使是瞬时性故障，短路电流也不会消失。在t=2.4 s时，交流断路器动作，将交流电源和MMC进行隔离，故障电流才会逐渐衰减，如图9d所示。在直流故障发生和保护过程中，FPGA模型与器件模型的仿真波形匹配且误差很小。FPGA模型能够准确地模拟半桥式MMC 的直流故障特性。

2.2 仿真速度

器件模型运行于微软windows7操作系统，3.1 GHz双核CPU，2.0 G内存，PSCAD/EMTDC V4.5.3，仿真步长为20 μs，仿真时长为5 s。FPGA模型MMC阀模型运行在dSPACE的DS5203 FPGA板卡上，仿真步长为250 ns；系统一次部分运行在DS1006处理器板卡上，仿真步长为20 μs，整个系统仿真时长为5 s。经实验测试，器件模型耗时3 216 s；FPGA模型用时为5 s，具有实时性。

3 结束语

提出一种基于FPGA的MMC并行建模方法，并与PSCAD/EMTDC环境下的器件模型对比测试，验证了FPGA模型的精确性和实时性。该方法可推广到不同子模块结构的MMC中，通用性强。

参考文献

[1] 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.

[2] Saeedifard M，Iravani R. Dynamic performance of a modular multilevel back-to-back HVDC system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery，2010，25 (4)：2903-2912.

[3] Rohner S，Bernet S，Hiller M，et al. Modulation，losses，and semiconductor requirements of modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2010，57 (8)：2633-2642.

[4] Akagi H. Classification，terminology，and application of the modular multilevel cascade converter (MMCC) [J]. IEEE Transactions on Power Electronics，2011，26 (11)：3119-3130.

[5] Hagiwara M，Akagi H. Control and experiment of pulsewidth-modulated modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics，2009，24 (7)：1737-1746.

[6] 汤广福，贺之渊，庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展 [J]. 电力系统自动化，2013 (15)：3-14.

[7] 刘涛，李婧靓，李明，等. 南方电网鲁西背靠背直流异步联网工程控制保护系统设计方案 [J]. 南方电网技术，2014 (6)：18-22.

[8] 许建中. 模块化多电平换流器电磁暂态高效建模方法研究 [D]. 北京：华北电力大学，2014.

[9] Gnanarathna U N，Gole A M，Jayasinghe R P. Efficient modeling of modular multilevel HVDC converters (MMC) on electromagnetic transient simulation programs [J]. IEEE Transactions on Power Delivery，2011，26 (1)：316-324.

[10] Xu J，Zhao C，Liu W，et al. Accelerated model of modular multilevel converters in PSCAD/EMTDC [J]. IEEE Transactions on Power Delivery，2013，28 (1)：129-136.

[11] Ahmed N，Angquist L，Norrga S，et al. A computationally efficient continuous model for the modular multilevel converter [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics，2014，2 (4)：1139-1148.

[12] Sanders S R，Noworolski J M，Liu X Z，et al. Generalized averaging method for power conversion circuits [J]. IEEE Transactions on Power Electronics，1991，6 (2)：251-259.

[13] Chiniforoosh S，Jatskevich J，Yazdani A，et al. Definitions and applications of dynamic average models for analysis of power systems [J].

(下转第33页)

current suppression for modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Delivery，2011，26 (3)：2009-2017.

[34] 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.

[35] 周月宾，江道灼，郭捷，等. 模块化多电平换流器子模块电容电压波动与内部环流分析 [J]. 中国电机工程学报，2012，32 (24)：8-14.

[36] 宋强，刘文华，李笑倩，等. 模块化多电平换流器稳态运行特性的解析分析 [J]. 电网技术，2012，36 (11)：198-204.

[37] 宋强，许树楷，罗雨，等. 柔性直流输电系统的直流线路谐波分析方法 [C]. 2012年中国电机工程学会直流输电与电力电子专委会学术年会论文集，2012：1176-1182.

[38] 杨晓峰，郑琼林. 基于MMC环流模型的通用环流抑制策略 [J]. 中国电机工程学报，2012，32 (18)：59-65.

[39] 管敏渊，徐政. 模块化多电平换流器子模块故障特性和冗余保护 [J]. 电力系统自动化，2011，35 (16)：94-104.

[40] 李探，赵成勇. MMC子模块故障下桥臂不对称运行特性分析与故障容错控制 [J]. 电机工程学报，2015，35 (15)：3921-3928.

[41] Cong Zhao，Yaohua Li，Zixin Li，et al. Characteristics analyses and rebalancing method of modular multilevel converter under submodule fault conditions [C]. 2016 IEEE 7th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)，2016：1-7.

[42] 韩少华，梅军，郑建勇，等. 模块化多电平换流器不对称桥臂的环流稳态分析 [J]. 电力自动化设备，2014，34 (7)：38-42.

[43] 管敏渊，徐政，潘武略，等. 电网故障时模块化多电平换流器型高压直流输电系统的分析与控制 [J]. 高电压技术，2013，39 (5)：1238-1245.

[44] 孔明，汤广福，贺之渊，等. 不对称交流电网下MMC-HVDC输电系统的控制策略 [J]. 中国电机工程学报，2013，33 (28)：41-49.

[45] 周月宾，江道灼，郭捷，等. 交流系统不对称时模块化多电平换流器的控制 [J]. 电网技术，2013，37 (3)：622-628.

（收稿日期：2016－12－28）EA

(上接第26页)

IEEE Transactions on Power Delivery，2010，25 (4)：2655-2669.

[14] Saad H，Peralta J，Dennetiere S，et al. Dynamic averaged and simplified models for MMC-based HVDC transmission systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery，2013，28 (3)：1723-1730.

[15] Saad H，Dennetiere S，Mahseredjian J，et al. Modular multilevel converter models for electromagnetic transients [J]. IEEE Transactions on Power Delivery，2014，29 (3)：1481-1489.

[16] Lesnicar A，Marquardt R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range [C]. Bologna：Power Technolgy Conference Proceedings，2003：3-6.

[17] 李笑倩，刘文华，杨文博，等. 基于半压钳位子模块的MMC直流短路故障穿越研究 [J]. 电源学报，2015，13 (6)：1-8.

[18] 李瑞，王忠旭，Derrick Holliday，等. 基于三电平子模块的倍电平复合式MMC变换器 [J]. 电源学报，2015，13 (6)：28-35.

[19] 陈晓森，刘万勋，孔增辉，等. 单相交/交MMC的简化模型及电容电压平衡 [J]. 电源学报，2015，13 (6)：36-43.

（收稿日期：2017－03－19）EA