

# 基于戴维宁定理的 MMC 子模块等效数学模型的研究

刘喜梅, 李梅航, 朱炯

(青岛科技大学自动化与电子工程学院, 山东 青岛 266000)

**摘要:** 模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 的每个子模块都包含两个电力电子开关元件 IGBT。随着系统模块数的增加, 仿真的速度大大降低, 如何在有限的资源中实现 MMC 的实时仿真成为了仿真系统的瓶颈。根据 IGBT 在 MMC 中的工作原理, 把 IGBT 等效为两个不同状态的等效电阻, 然后根据戴维宁等效定理建立 MMC 子模块的等效数学模型。最后在 Matlab/Simulink 环境下进行该数学模型的仿真, 并与采用器件模型的仿真结果进行了对比。仿真结果表明该数学模型在一定的误差范围内可以取代 MMC 子模块的物理模型, 具有一定的实用性。

**关键词:** 模块化多电平换流器; 子模块; 戴维宁定理; 等效数学模型; Matlab/Simulink

## Research of equivalent mathematical model of MMC sub-modules based on Thevenin's theorem

LIU Xi-mei, LI Mei-hang, ZHU Jiong

(College of Automation & Electronic Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266000, China)

**Abstract:** Every sub-module of modular multilevel converter contains two IGBTs. With increase the number of system module, the simulation speed is greatly reduced, how to realize the MMC in limited resource becomes the bottleneck of the simulation system of real-time simulation. According to the working principle of IGBT in the sub-module of MMC, the equivalence model of IGBT is two different resistors. Then this paper uses the Thevenin's theorem to build the equivalent mathematic model of sub-module. The correctness of the established sub-module is proved with Matlab/Simulink. Compared with the circuit which uses the device model, the simulation results show that the mathematical model can replace the physical model of MMC sub-module in a certain error range. It has a certain practicality.

**Key words:** modular multilevel converter; sub module; Thevenin's theorem; equivalent mathematic model; Matlab/Simulink

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)18-0101-04

## 0 引言

近年来, 高压柔性直流输电(High Voltage Direct Current, HVDC)和柔性交流输电系统(Flexible Alternative Current Transmission Systems, FACTS)设备在电网系统中得到快速发展<sup>[1]</sup>, 基于全控型开关器件的电压源换流器在高压直流输电中得到越来越多的应用<sup>[2]</sup>。其中基于 IGBT 的串联半桥的模块化多电平变换器 (Modular Multilevel Converter, MMC)<sup>[3-6]</sup>因其输出电压谐波含量少、无需额外的滤波器和换流器以及容易实现能量双向流动和四象限运行等优点被应用于高压直流输电系统中<sup>[7-10]</sup>。

然而, MMC 中使用大量开关器件, 这对于换流器电磁暂态(EMT)建模带来了困难。为了解决这个问题, 本文根据戴维宁定理<sup>[11]</sup>, 建立 MMC 子模块的等效数学模型, 该方法大大降低了建模难度,

并且提高了 MMC 电路的仿真速度。

## 1 MMC 子模块建模

MMC 子模块由两个反并联二极管的 IGBT 开关管 T1、T2 与一个大电容 C 组成<sup>[12]</sup>, 其原理图如图 1 所示。

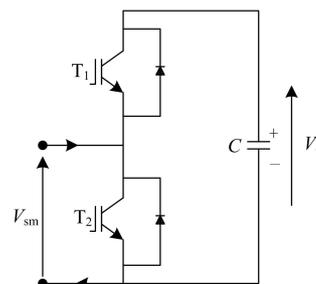


图 1 MMC 子模块原理图

Fig. 1 Sub module of MMC

根据 T1、T2 的导通关断状态，MMC 共有 3 种运行状态<sup>[13]</sup>，如表 1 所示。

表 1 MMC 输出状态  
Table 1 Output state of MMC

状态	T1	T2	$V_{sm}$
1	ON	OFF	$U_c$
2	OFF	ON	0
3	OFF	OFF	0

据此，当 T1 处在 ON 状态时， $V_{sm}$  等效为  $V_c$ ；当 T2 为 ON 状态时， $V_{sm}$  等效为 0；因此，可以分别独立控制子模块，使之输出为  $V_c$  或 0。根据 T1、T2 的导通状态，可将开关管等效为两个状态的等效电阻，当开关管为 ON 状态时，等效电阻  $R=R_{on}$ ；当开关管为 OFF 状态时，等效电阻  $R=R_{off}$ <sup>[14]</sup>。

根据梯形积分法，对电容电压暂态方程进行离散化，可得

$$V_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t I_c(t) \approx V_c(t-\Delta T) + \frac{1}{C} \left( \frac{I_c(t-\Delta T) + I_c(t)}{2} \right) \Delta T \quad (1)$$

整理上述方程，得

$$V_c(t) = R_c \cdot I_c(t) + V_{cEQ}(t-\Delta T) \quad (2)$$

其中：

$$R_c = \frac{\Delta T}{2C} \quad (3)$$

$$V_{cEQ}(t-\Delta T) = \frac{\Delta T}{2C} I_c(t-\Delta T) + V_c(t-\Delta T) \quad (4)$$

根据上述方程建立的等效电容模型，并将开关管等效为两个状态电阻  $R_1$ 、 $R_2$ ，可得 MMC 子模块等效模型为如图 2 所示。

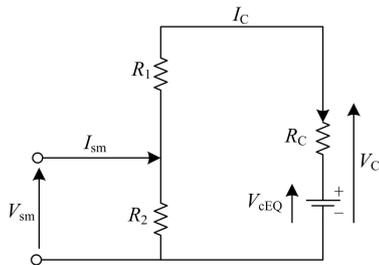


图 2 等效 MMC 子模块模型

Fig. 2 Equivalent circuit for a sub module

根据戴维宁定理将 MMC 子模块等效为戴维宁模型。

$$R_{smEQ}(t) = R_2 \left( 1 - \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_c} \right) \quad (5)$$

$$V_{sm}(t) = R_{smEQ} \cdot I_{sm}(t) + V_{smEQ}(t-\Delta T) \quad (6)$$

其中，

$$V_{smEQ}(t-\Delta T) = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_c} V_{cEQ}(t-\Delta T) \quad (7)$$

所得的戴维宁模型如图 3 所示。

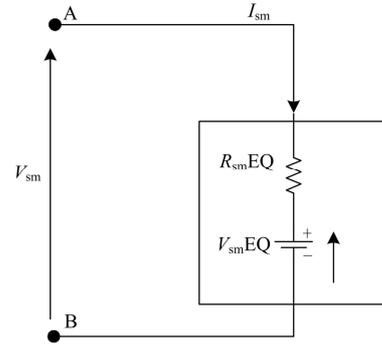


图 3 MMC 戴维宁等效模型

Fig. 3 Thevenin equivalent of a sub module of MMC

## 2 仿真结果

为了验证本文所提出的 MMC 子模块等效数学模型的正确性，对于子模块器件模型和子模块等效数学模型分别进行了仿真<sup>[15-16]</sup>。其中 MMC 子模块器件模型采用的是 Matlab/Simulink 中的 IGBT/Diode 模块搭建的，MMC 子模块的等效数学模型是用 Matlab 的 M 语言编写的自定义函数，其输入变量为触发脉冲信号和桥臂电流，输出为电容电压、电容电流和子模块输出电压。其仿真电路如图 4 所示，其中触发脉冲  $t_1$ 、 $t_2$  分别控制上下两个 IGBT/Diode 的导通和关断。

MMC 子模块仿真电路各个器件的参数设置如表 2 所示。

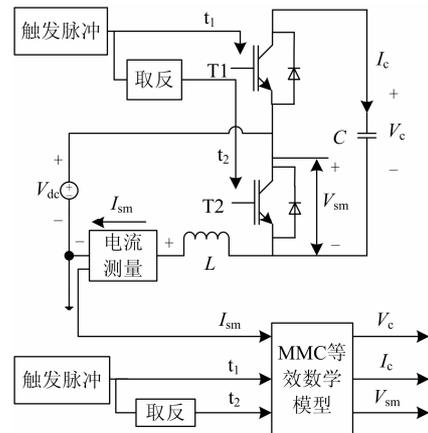


图 4 MMC 仿真电路

Fig. 4 Simulation circuit of MMC

表 2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

模块参数	数值
直流侧电压 $V_{dc}/V$	1 000
桥臂电感 $L/H$	0.001
子模块电容 $C/F$	0.001
电容初始电压 $V_c/V$	2 000
IGBT/Diode 模块通态电阻 $R_{on}/\Omega$	$10^{-5}$
IGBT/Diode 模块缓冲电阻 $R_s/\Omega$	$10^5$
IGBT/Diode 模块缓冲电容 $C_s/F$	Inf
桥臂初始电流 $I_{sm}/A$	0
仿真步长 $T_s/s$	$50 \times 10^{-6}$
触发脉冲周期/s	$100 \times 10^{-6}$
触发脉冲占空比/%	50
触发脉冲幅值/V	1

为了能清楚地验证 MMC 子模块等效数学模型的合理性, 根据图 4 所示的 MMC 子模块仿真电路图, 本文只进行了 1 ms 的仿真, 这样就可以清楚地对比 MMC 子模块器件模型与 MMC 子模块等效数学模型的输出结果。仿真波形图如图 5~图 8 所示。

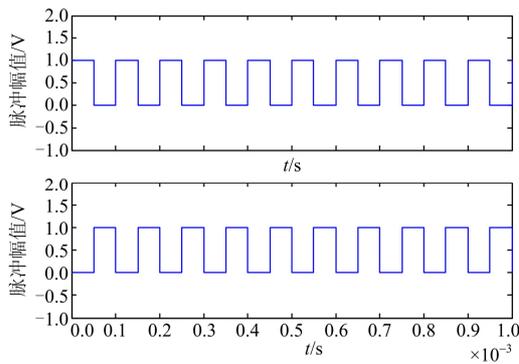


图 5 触发脉冲

Fig. 5 Firing pulse

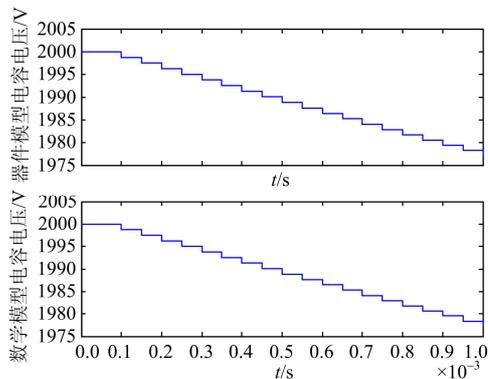


图 6 子模块电容电压

Fig. 6 Sub module capacitor voltage

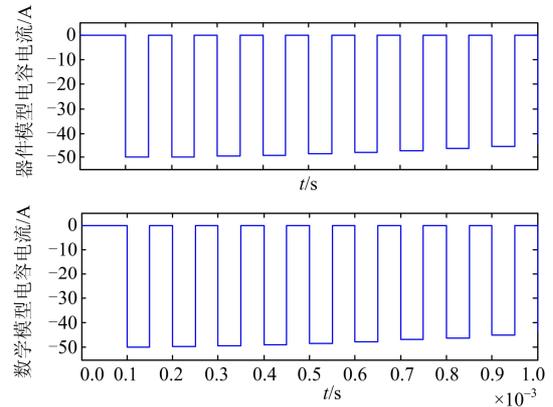


图 7 子模块电容电流

Fig. 7 Sub module capacitor current

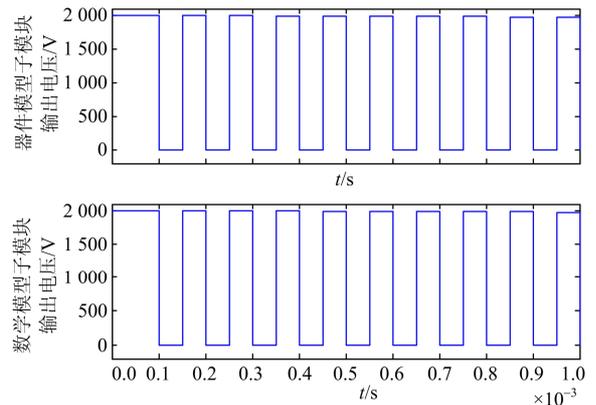


图 8 子模块输出电压

Fig. 8 Sub module output voltage

从图 6~图 8 可以看出, MMC 子模块的等效数学模型的电容电压  $V_c$ 、电容电流  $I_c$  和子模块输出电压  $V_{sm}$  的波形与原来物理仿真模型的波形基本一样。唯一的缺点就是由于数学模型与物理仿真模型的初始化问题, 导致了在仿真开始的时候, 初始状态不同, 导致了两种模型的波形相差一个步长, 因此为了使波形同步, 在物理仿真模型的输出波形上加入了一个延迟模块, 就可以使数学模型与物理模型完全统一, 因此出现了图 6~图 8 所示的波形。但是这并不影响 MMC 子模块的等效数学模型在实际中的应用, 仿真结果也表明了本文所提出的 MMC 子模块等效数学模型, 在一定的误差范围内是可以替代 MMC 子模块的物理模型的。

### 3 结论

对 MMC 子模块的物理模型建立戴维宁等效数学模型, 通过 Matlab/Simulink 验证了该数学模型的正确性。本文的建模方法适用于多个模块的 MMC 建模, 建立的 MMC 等效数学模型可以大大减少仿

真时间, 为 MMC 仿真实验提供了一种新的方法。

参考文献

[1] BAHRMAN M P, JOHANSSON J G, NILSSON B A. Voltage source converter transmission technologies: the right fit for the application[C] // Engineering Society General Meeting, IEEE, Zurich, Switzerland, 2003: 13-17.

[2] 赵成勇, 李路遥, 翟晓萌, 等. 一种新型模块化多电平换流器子模块拓扑[J]. 南方电网技术, 2012, 6(6): 62-65.  
ZHAO Cheng-yong, LI Lu-yao, ZHAI Xiao-meng, et al. A new scheme of sub-module topology for modular multi-level converter[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(6): 62-65.

[3] 韦延方, 卫志农, 孙国强, 等. 一种新型的高压直流输电技术-MMC-HVDC[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 1-8.  
WEI Yan-fang, WEI Zhi-nong, SUN Guo-qiang, et al. New HVDC power transmission technology: MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7): 1-8.

[4] 屠卿瑞, 徐政, 姚为正. 模块化多电平换流器型直流输电电平数选择研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 33-44.  
TU Qing-rui, XU Zheng, YAO Wei-zheng. Selecting number of voltage levels for modular multilevel converter based HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 33-44.

[5] 屠卿瑞, 徐政, 郑翔, 等. 一种优化的模块化多电平换流器电压均衡控制方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 15-20.  
TU Qing-rui, XU Zheng, ZHENG Xiang, et al. An optimized voltage balancing method for modular multilevel converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 15-20.

[6] 王奎, 郑泽东, 李永东. 基于新型模块化多电平换流器的五电平 PWM 整流器[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 34-38.  
WANG Kui, ZHENG Ze-dong, LI Yong-dong. A five-level PWM rectifier based on new modular multilevel converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 34-38.

[7] 刘重淇, 宋强, 刘文华. 基于模块化多电平变流器的轻型直流输电系统[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 53-58.  
LIU Zhong-qi, SONG Qiang, LIU Wen-hua. VSC-HVDC system based on modular multilevel converters[J]. Automation of Electric power Systems, 2010, 34(2): 53-58.

[8] 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, 40(3): 73-77.  
ZHANG Zhen-hua, JIANG Dao-zhuo. Control strategy simulation of UPFC based on modular multilevel converters[J]. Power System Protection and Control,

2012, 40(3): 73-77.

[9] 王奎, 郑泽东, 李永东. 新型模块化多电平换流器电容电压波动规律及抑制方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 8-14.  
WANG Kui, ZHENG Ze-dong, LI Yong-dong. Voltage ripple principle and restrain method of floating capacitors in a new modular multilevel converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 8-14.

[10] 连霄壤, 江道灼. 基于模块化多电平的静止无功补偿器故障容错控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 83-89.  
LIAN Xiao-rang, JIANG Dao-zhuo. Fault-tolerant design and control of modular multilevel converter-based STATCOM[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 83-89.

[11] 邱关源, 罗先觉. 电路[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[12] 陈朋. 模块化多电平换流器控制与保护的研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2012.  
CHEN Peng. Research on control and protection of modular multilevel converter[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2012.

[13] 滕松, 宋新立, 李广凯, 等. 模块化多电平换流器型高压直流输电综述[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(8): 43-50.  
TENG Song, SONG Xin-li, LI Guang-kai, et al. A survey on HVDC transmission with modular multilevel converters[J]. Power System and Clear Energy, 2012, 28(8): 43-50.

[14] 韦延方, 卫志农, 孙国强, 等. 适用于电压源换流器型高压直流输电的模块化多电平换流器最新研究进展[J]. 高电压技术, 2012, 38(5): 1243-1252.  
WEI Yan-fang, WEI Zhi-nong, SUN Guo-qiang, et al. New projects modular multilevel converter applied to voltage source converter high voltage direct current transmission[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(5): 1243-1252.

[15] 朱桂萍, 陈建业. 电力电子电路的计算机仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

[16] 程晓娟, 林周宏, 刘崇茹, 等. MMC 子模块中 IGBT 等效模型的仿真验证[J]. 中国电力, 2013, 46(7): 47-51.  
CHENG Xiao-xuan, LIN Zhou-hong, LIU Chong-ru, et al. Simulation proof of the IGBT equivalent model in the MMC sub-module[J]. Electric Power, 2013, 46(7): 47-51.

收稿日期: 2013-12-05; 修回日期: 2014-03-31

作者简介:

刘喜梅 (1961-), 女, 博士, 博士生导师, 研究方向为智能控制, 复杂系统的建模及优化控制, 软测量技术;

李梅航 (1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能控制; E-mail: 632884326@qq.com

朱 炯 (1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术。