

MMC 电磁暂态快速仿真模型

周阳¹, 常非²

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)中大量的开关器件给电磁暂态仿真程序(如PSCAD/EMTDC)带来巨大的计算量, 使得仿真速度极其缓慢, 给仿真研究以及工程设计带来极大的不便。通过进一步推导电容、电感 Dommel 电磁暂态数值计算方法, 得到了电容、电感等值计算中的历史电流源递推公式, 使得历史电流源的计算过程中不必再进行支路电流的中间计算, 加快了计算速度。基于此历史电流源递推公式建立了 MMC 电磁暂态快速仿真模型, 并在 PSCAD/EMTDC 中搭建不同端数、不同电平数 MMC-HVDC 系统, 验证了该快速模型的仿真精度和提速效果。

关键词: 电磁暂态仿真; 柔性直流输电; 模块化多电平换流器; 子模块; 戴维南等效电路

Quick model of MMC in electromagnetic transient simulations

ZHOU Yang¹, CHANG Fei²

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Plenty of switching devices in MMC for electromagnetic transient simulation program (e.g., PSCAD/EMTDC) brings a huge amount of calculation which makes the simulation speed very slow, simulation research and engineering design great inconvenient. Through further derivation capacitance and inductance Dommel electromagnetic transient numerical calculation method, history current source recursion formula in the calculation of capacitance and inductance is got, which reduces intermediate computations of branch current and thus speeds up the calculation. Quickly model of MMC electromagnetic transient is built based on the proposed history current source recursive formula, and MMC-HVDC system with different terminals and different levels is set up in the PSCAD/EMTDC, which validates the simulation precision and speed acceleration of the quick model.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1134205).

Key words: electromagnetic transients (EMT) simulation; HVDC; modular multilevel converter (MMC); sub-module; Thévenin equivalent circuit

中图分类号: TM614

文章编号: 1674-3415(2016)01-0001-08

0 引言

近几年, MMC 广泛应用于 HVDC 系统中^[1-5]。随着 HVDC 不断朝着端数更多、电压等级更高、功率输送更大的方向发展, 单个桥臂所需要串联的子模块(Sub-Module, SM)数量也随之增加。例如, 南方电网于 2013 年 12 月投运的南澳三端 MMC-HVDC 系统, 直流电压 ± 160 kV, 输送额定功率 200 MW, 桥臂 SM 数 200 个; 2014 年 7 月国家电网在浙江舟山投运的 MMC-HVDC 端数多达 5 端, 直流电压等

级 ± 200 kV, 最大换流站容量 400 MW, 桥臂 SM 数 250 个; 此外, 正在建设中的我国大连双端 MMC-HVDC 工程, 额定容量 1 000 MW, 直流电压 ± 320 kV, 桥臂 SM 数 400 个。大量的 SM 数量将给换流器的仿真建模带来很大的工作量, 造成多 SM 系统仿真速度过慢的原因主要是^[5-6]: 1) 开关器件数量的增加将导致系统的结构每时每刻都发生着较大的变化, 这增加了软件求取系统矩阵的时间; 2) 电力系统电磁暂态仿真软件每进行一个步长的仿真, 软件都需要对网络进行迭代求解, 求解过程中包含了对整个网络导纳矩阵进行一次求逆的过程。然而, 网络导纳矩阵的规模与网络的节点数成正相关的关

基金项目: 国家自然科学基金(U1134205)

系；因此，大量的 SM 个数就意味着网络含有更多的节点数，而更多的节点数就意味着网络矩阵的规模将变得更加庞大，运行仿真程序的计算机不得不消耗更多的时间进行大规模阻抗矩阵的生成以及求逆的运算。

文献[7-8]分别提出一种 MMC 动态简化平均模型，这种平均简化模型能够用于 MMC 换流器的稳态仿真，但是这种平均简化模型使用交流电流源模拟桥臂，无法单独模拟每一个 SM 的行为，因此这种平均简化模型不适用于 MMC 的故障暂态仿真。文献[9]用一个理想开关来替换 MMC 换流器中的一组 IGBT 和续流二极管，通过减少支路数来实现仿真提速，其最大的缺点是不能模拟 MMC 故障闭锁过程，而且随着 MMC 电平数的增加，仿真用时明显变长。文献[10]提出一种 MMC 连续模型，将 MMC 的桥臂等效成一个可控的电容器，但该模型对 SM 电容不加区分，无法使用该模型验证电容电压平衡控制算法。文献[11]提出一种超大规模 MMC 电磁暂态仿真提速模型。其本质是将 SM 电路与受控电流源联解，然后将 SM 输出电压通过受控电压源等效，代替桥臂与整个网络联解。但当 MMC 电平数非常多的时候，需要联解的电路数也会自然增多，将会影响到仿真速度。文献[12]基于 Dommel 电磁暂态数值计算方法，提出一种 MMC 高效仿真模型，可以在保证仿真精度的前提下显著提高 MMC 仿真速度。但文中并未对桥臂电感进行 Dommel 等效以进一步较少节点数目，加快计算速度。文献[13]在文献[12]的基础上说明了电力电子开关等效电阻取值的选择判据。但该文献在求取等值模型中 SM 电容电压、电流值时需要再回推一个步长，影响了仿真速度。

本文通过进一步推导 Dommel 等值计算方法，得到了电容、电感历史电流源递推公式，使得历史电流源的计算过程中不必再进行支路电流的中间计算，加快了计算速度。基于此历史电流源递推公式建立的 MMC 快速仿真模型在求取元件电流、电压值时，不必再回推一个步长，加快了仿真速度。

1 MMC 及其子模块拓扑

MMC 的桥臂不是由多个开关器件直接串联构成的，而是采用了 SM 级联的方式^[14]，如图 1 所示。SM 一般采用半 H 桥结构，也有 H 桥结构和箝位双子模块结构，如图 2 所示。虽然基于半 H 桥 SM 的 MMC 不能够有效清除直流侧短路故障电流，但是相比于 H 桥结构和箝位双子模块，半 H 桥 SM 使用

电力电子器件更少，经济性更好，并且最为简单，因此目前全世界所有 MMC-HVDC 工程全部采用的是半 H 桥 SM 结构^[15-18]。

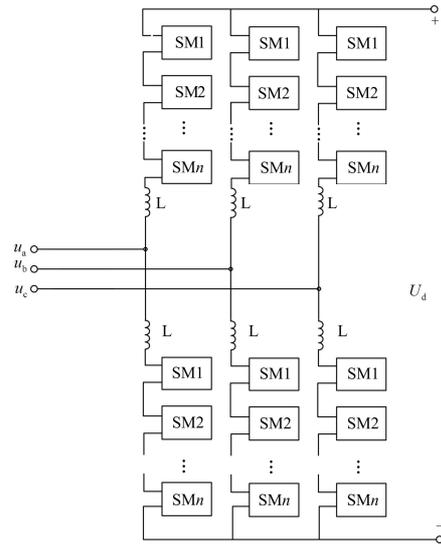


图 1 MMC 结构

Fig. 1 Schematic of MMC

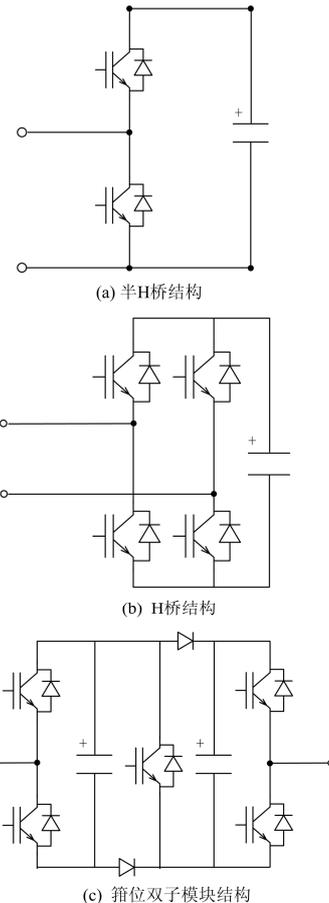


图 2 常见的 3 种 SM 结构

Fig. 2 Common structure of three kinds of SM

2 MMC 电磁暂态等值计算模型

2.1 元件快速等值计算模型

电容 C Dommel 电磁暂态等值计算电路如图 3 所示^[15]。其暂态过程用电磁感应定律来描述

$$i_c(t) = C \frac{du_c(t)}{dt} \quad (1)$$

把式(1)写成积分形式为

$$u_c(t) - u_c(t - \Delta t) = \frac{1}{C} \int_{t-\Delta t}^t i_c(t) dt \quad (2)$$

运用梯形积分法则, 式(2)写成式(3)。

$$i_c(t) = -i_c(t - \Delta t) + \frac{2C}{\Delta t} [u_c(t) - u_c(t - \Delta t)] \quad (3)$$

将式(3)改写成

$$i_c(t) = \frac{u_c(t)}{R_c} + I_c(t - \Delta t) \quad (4)$$

$$I_c(t - \Delta t) = -i_c(t - \Delta t) - \frac{1}{R_c} u_c(t - \Delta t) \quad (5)$$

式中: Δt 为仿真步长; $R_c = \Delta t / (2C)$ 称为电容 C 暂态计算等值电阻; $I_c(t - \Delta t)$ 称为电容在暂态计算时反映历史记录等的值电流源。

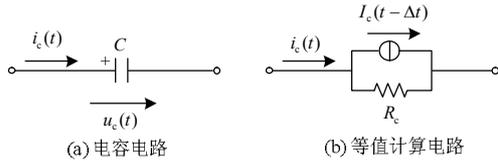


图 3 电容元件等值计算电路

Fig. 3 Equivalent calculation circuit of capacitance

从式(5)可以看出, 电容 C 历史电流源不仅与计算前一步 $t - \Delta t$ 时电压值 $u_c(t - \Delta t)$ 有关, 而且与计算前一步 $t - \Delta t$ 时流过电容的电流 $i_c(t - \Delta t)$ 有关。为了加快计算速度, 对式(5)进行进一步推导。

由式(4)递推得到 $t - \Delta t$ 时刻电流为

$$i_c(t - \Delta t) = \frac{u_c(t - \Delta t)}{R_c} + I_c(t - 2\Delta t) \quad (6)$$

将式(6)代入式(5), 得到电容等值计算中历史电流源递推公式

$$I_c(t - \Delta t) = -I_c(t - 2\Delta t) - \frac{2}{R_c} u_c(t - \Delta t) \quad (7)$$

对比式(5)和式(7)可以看出, 电容历史电流源计算式中不再出现 $i_c(t - \Delta t)$, 所以在历史电流源的求解过程中不必再进行电容支路电流的中间计算, 直接基于上一步长历史电流源的计算结果进行递推, 加快了计算速度。这与经典的 Dommel 电磁暂态等

值计算方法不同, 也是本文区别于文献[12-13]之处。

电感 L Dommel 电磁暂态等值计算电路如图 4 所示^[11]。

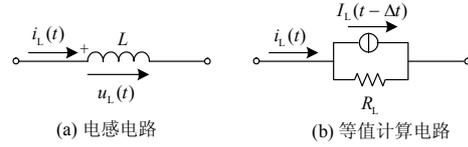


图 4 电感元件等值计算电路

Fig. 4 Equivalent calculation circuit of inductance

其中:

$$i_L(t) = \frac{u_L(t)}{R_L} + I_L(t - \Delta t) \quad (8)$$

$$I_L(t - \Delta t) = i_L(t - \Delta t) + \frac{1}{R_L} u_L(t - \Delta t) \quad (9)$$

式中: $R_L = 2L / \Delta t$ 称为电感 L 暂态计算等值电阻, 只要 Δt 确定, R_L 就为定值; $I_L(t - \Delta t)$ 称为电感在暂态计算时反映历史记录等的值电流源。

与电容元件同样的方法, 可得电感等值计算中的历史电流源递推公式为

$$I_L(t - \Delta t) = I_L(t - 2\Delta t) + \frac{2}{R_L} u_L(t - \Delta t) \quad (10)$$

2.2 基于历史电流源递推公式的 SM 等值计算模型

本节以半 H 桥 SM 为例推导其等值计算模型, H 桥 SM 和箝位双子模块 SM 的等值原理与此类似。如图 5 所示, 将 IGBT 及其反并联的二极管用具有两状态的可变电阻 R_1 、 R_2 来等效替代。可变电阻值取决于 IGBT 的触发信号, 当 IGBT 导通时, 可变电阻值取较小的数值(一般取 0.001Ω)来模拟器件的导通; 当 IGBT 关断时, 可变电阻值取极大的数值(一般取 $1e8 \Omega$)来模拟器件的关断。 $i_{arm}(t)$ 为整个桥臂的等值计算模型参与 t 时刻系统矩阵求解后的已知值。电容用 2.1 节中本文推导出的快速等值计算模型来替代。

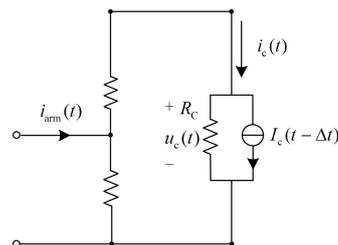


图 5 t 时刻半 H 桥 SM 等值计算模型

Fig. 5 Equivalent calculation circuit of half H bridge sub-module at time t

图 5 中:

$$\begin{cases} R_c = \Delta t / (2C) \\ I_c(t - \Delta t) = -I_c(t - 2\Delta t) - \frac{2}{R_c} u_c(t - \Delta t) \end{cases} \quad (11)$$

对图 5 进一步推导得到:

$$\begin{cases} i_c(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_c} i_{arm}(t) + \\ \frac{R_c}{R_1 + R_2 + R_c} I_c(t - \Delta t) \\ u_c(t) = [i_c(t) - I_c(t - \Delta t)] R_c \end{cases} \quad (12)$$

计算得到的 $u_c(t)$ 输出用于 MMC 电容电压排序算法的使用。

根据诺顿定理, 图 5 简化为图 6。

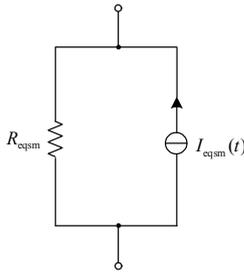


图 6 SM 诺顿等值计算模型

Fig. 6 Norton equivalent circuit of sub-module

其中:

$$\begin{cases} R_{eqsm} = \frac{(R_1 + R_c)R_2}{R_1 + R_2 + R_c} \\ I_{eqsm}(t) = \frac{R_c}{R_1 + R_c} I_c(t - \Delta t) \end{cases} \quad (13)$$

由于 MMC 桥臂 SM 串联联接, 故将 SM 诺顿等值计算模型等效成戴维南型式如图 7, 有利于电路的进一步化简。

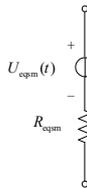


图 7 SM 戴维南等值计算模型

Fig. 7 Thévenin equivalent circuit of sub-module

其中:

$$\begin{cases} R_{eqsm} = \frac{(R_1 + R_c)R_2}{R_1 + R_2 + R_c} \\ U_{eqsm}(t) = \frac{R_2 R_c}{R_1 + R_2 + R_c} I_c(t - \Delta t) \end{cases} \quad (14)$$

2.3 桥臂电感等值计算模型

前 2.1 节中给出了电感的等值计算模型, 如图 8 所示。

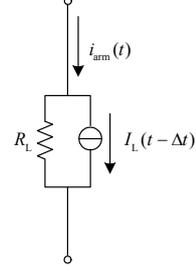


图 8 t 时刻桥臂电感等值计算模型

Fig. 8 Equivalent circuit of inductance at time t

进一步等效为戴维南等值计算模型, 如图 9 所示。

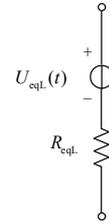


图 9 电感戴维南等值计算模型

Fig. 9 Thévenin equivalent circuit of inductance

其中:

$$\begin{cases} R_{eqL} = R_L \\ U_{eqL}(t) = -R_L I_L(t - \Delta t) \end{cases} \quad (15)$$

2.4 桥臂等值戴维南计算模型

用桥臂 SM 和桥臂电感戴维南等值计算模型替代原始的桥臂网络, 如图 10 所示。

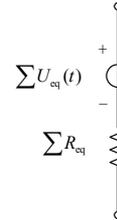


图 10 桥臂戴维南等值计算模型

Fig. 10 Thévenin equivalent circuit of the bridge arm

其中:

$$\begin{cases} \sum U_{eq}(t) = \sum_{i=1}^N U_{eqi}(t) + U_{eqL}(t) \\ \sum R_{eq} = \sum_{i=1}^N R_{eqi} + R_{eqL} \end{cases} \quad (16)$$

式中, N 为桥臂级联的 SM 数量。得到桥臂的戴维南等值计算模型之后, 用其替代原始的桥臂网络,

利用 EMT 工具进行系统网络求解。

2.5 MMC 电磁暂态快速仿真方法流程图

为了更加清晰地说明快速仿真方法的实现流

程,图 11 给出了算法的流程图。从图中也可以看出,本文中快速仿真方法是以历史电流源递推式(7)、式(10)为核心进行计算的,加快了仿真速度。

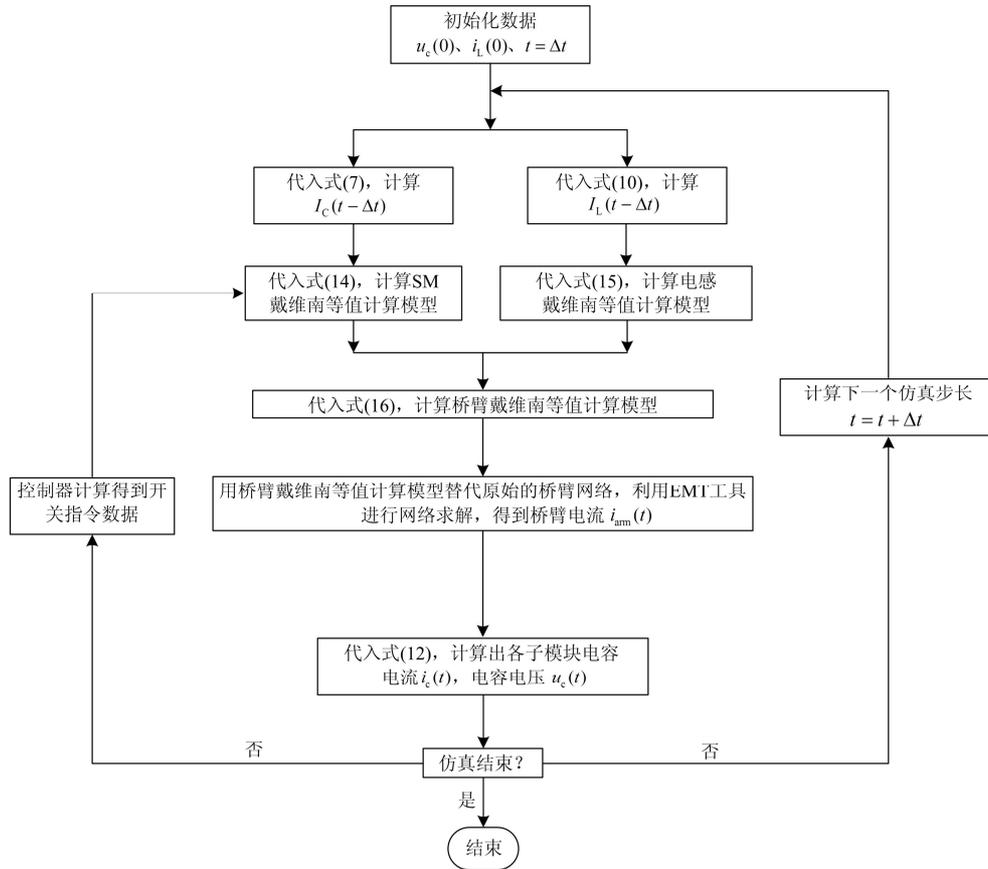


图 11 MMC 电磁暂态快速仿真方法流程图

Fig. 11 Flow chart of fast simulation method of MMC electromagnetic transient

3 MMC 电磁暂态快速仿真模型算例

3.1 MMC 电磁暂态快速仿真模型可行性验证

3.1.1 仿真精度验证

为了验证快速仿真模型的可行性,以 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件为验证平台,搭建半 H 桥 SM 结构的快速仿真模型,并与文献[12]中的高效仿真模型进行对比验证。由于文献[12]已经与实际物理器件模型进行过对比验证,所以这里就不再重复与实际物理器件模型进行对比,主要也是为了能够进行更高电平数的对比仿真验证。所搭建的双端 MMC-HVDC 仿真系统详细参数见表 1。

仿真情景 1—稳态仿真

图 12 为 A 相上桥臂的稳态电流,图 13 为阀侧 A 相电压波形。图 13 可以看出,文中 228 子模块系统阀侧电压已非常接近正弦。由稳态仿真波形图可

表 1 双端 MMC-HVDC 系统仿真参数

Table 1 System simulation parameters

参数	有名值
额定功率 P	750 MVA
交流系统电压 U_{s1} 、 U_{s2}	525 kV
电压比 U_d/U_v	525 kV/312 kV
直流母线电压 U_{dc}	570 kV
子模块个数 N	228
子模块电容 C	8 000 μ F
桥臂电感 L	67 mH
调制方式	载波移相+电容电压排序
功率指令值(P_{ref1}/Q_{ref1} 、 Q_{ref2})	750 MW/0 Mvar
仿真步长/时长	10 μ s/3 s

见,本文提出的快速仿真模型与文献[12]模型仿真结果吻合度很高,两条曲线几乎重合,误差几乎可以忽略,在稳态仿真的环境中具有较高的准确度。

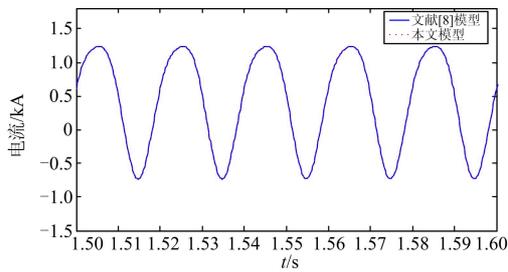


图 12 A 相上桥臂稳态电流

Fig. 12 Steady-state current of A phase on the bridge arm

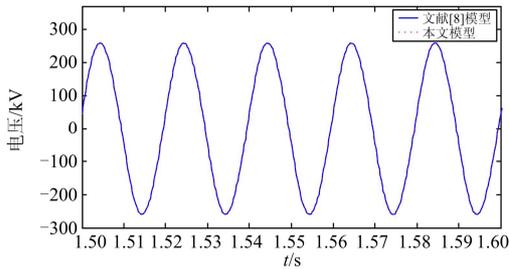


图 13 阀侧 A 相电压稳态波形

Fig. 13 Steady-state voltage of A phase in valve side

仿真情景 2—暂态仿真

在两个仿真系统中同时引入短时交流单相金属性接地故障，故障在 2 s 时于交流 A 相母线上引入，持续 5 个周波(100 ms)，其间不加入任何系统保护。图 14 为故障暂态期间 A 相上桥臂的电流波形，图 15 为阀侧 A 相电压波形。

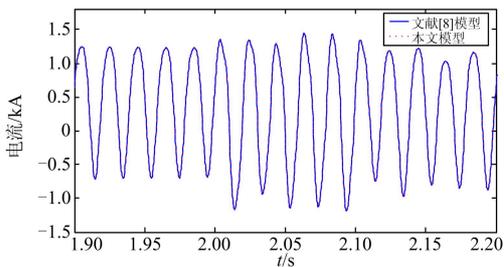


图 14 A 相上桥臂暂态电流

Fig. 14 Transient current of A phase on the bridge arm

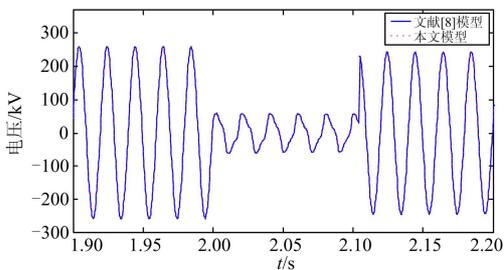


图 15 阀侧 A 相电压暂态波形

Fig. 15 Transient voltage of A phase in valve side

在暂态情况下，文中快速仿真模型与文献[12]模型仿真结果吻合度同样非常高，两条曲线几乎重合。可见不论是稳态情况还是暂态情况，本文快速仿真模型都具有与文献[12]一样高的准确度。

3.1.2 仿真速度验证

本文仿真程序运行于微软 win7 操作系统，3.1 GHz 双核 CPU, 2.0G 内存, PSCAD/EMTDC V4.5.3。以下对比了文献[12]模型和本文快速模型在不同 SM 数下的双端 MMC-HVDC 系统仿真用时。表格中的物理器件模型用时参考自文献[12]。

从表 2 可直观地看出本文快速仿真模型能显著提高仿真速度，从而使得研发工作的效率得到了大幅的提升，给从事 MMC 研究的工作人员以极大的便利。

表 2 双端 MMC-HVDC 系统仿真用时对比

Table 2 Comparison of simulation time of double-terminal

MMC-HVDC system

桥臂 SM 数	仿真用时/s			提速倍数 (相比于文 献[8]模 型)/%
	物理器件 模型	文献[8] 模型	本文模型	
12	682	28	20	40
24	5 892	37	24	54
96	52 668 (估计)	110	68	140

综上，本文所提出的快速仿真模型既能够保证仿真具有极高的精确性，又能够显著提高仿真速度，是值得推广的。

3.2 MMC 电磁暂态快速仿真模型应用于实际柔性直流输电工程

我国南方电网于 2013 年 12 月在南澳投运了世界首个多端柔性直流输电工程，该工程为三端 MMC-HVDC，额定容量 200 MW，直流电压 ± 160 kV，桥臂 SM 数 200 个。在 PSCAD/EMTDC 平台中采用本文所提出的 MMC 快速仿真模型搭建与南澳 MMC-HVDC 额定参数相同的仿真模型。MMC1 侧采用定直流电压控制，MMC2、MMC3 侧采用定交流电压控制，系统结构如图 16 所示。

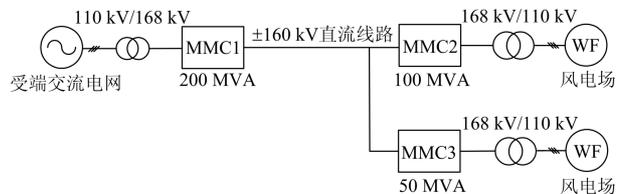


图 16 三端 MMC-HVDC 系统结构图

Fig. 16 Structure of three-terminal MMC-HVDC system

MMC-HVDC 系统直流母线电压如图 17 所示; MMC1 中 A 相上桥臂子模块电容电压及 MMC1 阀侧三相交流电压分别如图 18、图 19 所示。

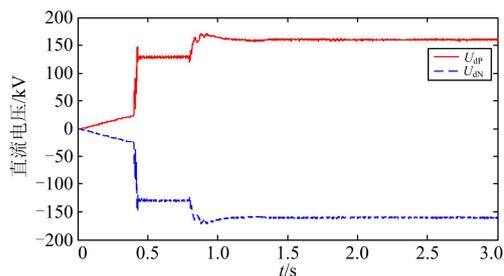


图 17 MMC-HVDC 系统直流母线电压

Fig. 17 DC side voltage of MMC-HVDC system

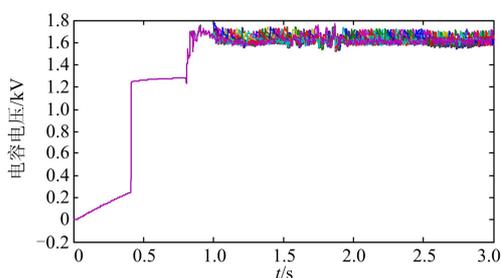


图 18 MMC1 中 A 相上桥臂子模块电容电压

Fig. 18 Capacitance voltage of sub-module of A phase on the bridge arm

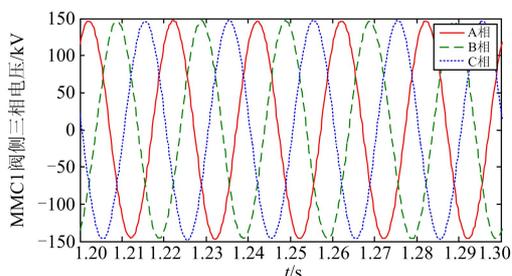


图 19 MMC1 阀侧三相交流电压

Fig. 19 Three-phase AC voltage in valve side of MMC1

从图 17 可知, 本文快速仿真模型验证的南澳 201 电平 3 端 MMC-HVDC 系统直流电压达到了南澳工程相应额定参数, 且稳态误差小; 图 18 中 MMC 子模块电容电压平衡且电容电压波动范围被限制在较小的范围内, 保证了换流器的正常工作及优良的输出特性。图 19 中, MMC1 阀侧三相交流电压波形已经非常接近正弦, 无需安装交流滤波器, 可直接并网。

可见, 本文提出的快速仿真模型可以应用于实际工程仿真和设计中。

4 结论

本文通过进一步推导电容、电感 Dommel 电磁暂态数值计算方法, 得到了电容、电感等值计算中的历史电流源递推公式, 基于此递推公式建立了 MMC 电磁暂态快速仿真模型。

通过在 PSCAD/EMTDC 中搭建 229 电平双端 MMC-HVDC, 与文献[12]对比验证了该快速仿真模型的准确性和快速性; 并按照我国南澳柔性直流输电工程额定参数搭建的三端 201 电平 MMC-HVDC 系统进一步验证了本文快速仿真模型的实用性和可行性。

参考文献

- [1] 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, 33(36): 27-33.
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [2] 邓旭, 王东举, 沈扬. 舟山多端柔性直流输电工程换流站内部暂态过电压[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 41(18): 111-119.
DENG Xu, WANG Dongju, SHEN Yang. Research on transient overvoltage for converter station of Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC project[J]. Power System Protection and Control, 2014, 41(18): 111-119.
- [3] 吉宇, 梅军, 卢宇, 等. 基于电流滞环型调制的模块化多电平变流器容错策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 269-277.
JI Yu, MEI Jun, LU Yu, et al. Research on the hysteresis-band current tracking strategy based on fault-tolerant control for modular multilevel converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 269-277.
- [4] 朱玲, 符晓巍, 胡晓波, 等. 模块化多电平变流器 HVDC 系统的模型预测控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 1-8.
ZHU Ling, FU Xiaowei, HU Xiaobo, et al. Model predictive control of modular multilevel converter for HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 1-8.
- [5] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [6] PSCAD X4 user's guide[M]. Winnipeg, MB, Canada, Manitoba Research Center, 2009.
- [7] TEEUWSEN S P. Simplified dynamic model of a voltage-sourced converter with modular multilevel

- converter design[C] // Power Systems Conference and Exposition. Atlanta, Georgia, USA: IEEE PES, 2009: 1-6.
- [8] PERALTA J, SAAD H, DENNETIÈRE S, et al. Detailed and averaged models for a 401-level MMC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1501-1508.
- [9] 管敏渊, 徐政. 模块化多电平换流器的快速电磁暂态仿真方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(6): 36-40.
GUAN Minyuan, XU Zheng. Fast electro-magnetic transient simulation method for modular multilevel converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6): 36-40.
- [10] NOMAN A, LENNART A, STAFFAN N, et al. Validation of the continuous model of the modular multilevel converter with blocking/deblocking capability[C] // 10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (AC/DC 2012), Birmingham, UK, 2012: 63.
- [11] 许建中, 赵成勇, 刘文静. 超大规模 MMC 电磁暂态仿真提速模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 114-120.
XU Jianzhong, ZHAO Chengyong, LIU Wenjing. Accelerated model of ultra-large scale MMC in electromagnetic transient simulations[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 114-120.
- [12] 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.
- [13] 罗雨, 饶宏, 许树楷, 等. 级联多电平换流器的高效仿真模型[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(15): 2346-2352.
LUO Yu, RAO Hong, XU Shukai, et al. Efficient modeling for cascading multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(15): 2346-2352.
- [14] MARQUARDT R, LESNICAR A, HILDINGER J. Modulares Stromrichterkonzept für Netzkupplungsanwendung bei hohen Spannungen[C] // ETG-Fachtagung. Bad Nauheim Germany: Fachtagung des VDE, 2002: 1-7.
- [15] DOMMEL H W. Digital computer solution of electromagnetic transients in single-and multiphase networks[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(4): 388-399.
- [16] 梁莹玉, 杨奇逊, 刘建政, 等. 电网电压不平衡时 MMC-HVDC 的无差拍直接功率控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 15-25.
LIANG Yingyu, YANG Qixun, LIU Jianzheng, et al. Deadbeat direct power control for MMC-HVDC under unbalanced grid voltages[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 15-25.
- [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, 30(3): 196-204.
LU Jingjing, XIAO Xiangning, ZHANG Jian, et al. MMC-UPQC coordinated control method based on fixed active current limit value control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 196-204.
- [18] 杨煜, 孙大卫, 谢小荣, 等. 模块化多电平换流器型柔性直流系统的等效仿真方法比较[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 43-48.
YANG Yu, SUN Dawei, XIE Xiaorong, et al. Comparative study on the accelerated models of MMC-based VSC-HVDC systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 43-48.

收稿日期: 2015-03-01; 修回日期: 2015-10-08

作者简介:

周 阳(1987-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统分析和供变电技术;

常 非(1986-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。E-mail: 14117397@bjtu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)