

DOI: 10.7667/PSPC151951

模块化多电平换流器多维度建模方法研究

行登江¹, 吴金龙¹, 杨美娟¹, 王先为¹, 姚为正²

(1. 西安许继电力电子有限公司, 陕西 西安 710075; 2. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 目前可用于对模块化多电平换流器系统进行分析的仿真模型包括详细模型、高速等效模型和宽频模型, 三种仿真模型各有优劣, 应用范围有限。结合详细模型、高速等效模型以及宽频模型的优点, 采用每个桥臂每种子模块单个详细模型、剩余子模块高速等效模型的方法, 并考虑实际系统杂散元件的影响, 在桥臂对应位置接入杂散元件, 建立了模块化多电平换流器多维度模型。该模型兼具器件级电磁暂态特性仿真能力、高效性以及高准确度的特点, 能够满足对模块化多电平换流器系统仿真的所有需求。基于 PSCAD/EMTDC 搭建了双端系统进行仿真, 验证了所建立模块化多电平换流器多维度模型的正确性和有效性。

关键词: 模块化多电平换流器; 器件级电磁暂态特性; 高速等效模型; 宽频模型; 多维度模型

Study on multi-dimension model of modular multilevel converter

XING Dengjiang¹, WU Jinlong¹, YANG Meijuan¹, WANG Xianwei¹, YAO Weizheng²

(1. Xi'an XJ Power Electronics Technology Co., Ltd., Xi'an 710075, China; 2. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: Present simulation models used to analyze MMC-HVDC are limited, there is no a model which is suitable for all situations. This paper takes detail model, accelerated model and wide-band model as lessons, and acquires a multi-dimension model about modular multilevel converter. It has one sub-module as a detail model and the other sub-modules accelerated model per arm. It also considers the effect of stray elements of real system by accessing the stray elements to the right positions. This model has the ability of device level electromagnetic transient simulation, and has the characteristics of high-efficiency and high-accuracy, so it could meet all the demand when the MMC-HVDC is simulated. A two-terminal simulation model of MMC-HVDC is built in PSCAD/EMTDC. It turns out that the multi-dimension model of modular multilevel converter is correct and effective.

Key words: modular multilevel converter; device level electromagnetic transient; accelerated model; wide-band model; multi-dimension model

0 引言

基于模块化多电平换流器的柔性直流输电系统 (Modular Multilevel Converter based High Voltage Direct Current, MMC-HVDC) 由于其无需交流滤波器、可靠性高和易于扩展等优点, 是高压大容量柔性直流输电系统的发展趋势^[1-6]。随着柔性直流输电系统不断向更高的传输功率容量和直流电压等级发展, MMC 所需要的子模块(sub-module, SM)数目也随之增加。在实际 MMC-HVDC 工程投运之前, 首先需要建立离线仿真模型进行仿真, 验证主回路参数设计的正确性以及控制保护系统的有效性, 庞大的子模块数量增加了 MMC-HVDC 系统仿真的难度。

现有文献依据不同的仿真目标, 建立了不同的

仿真模型。文献[7]提出了 MMC 的详细模型。在仿真软件中搭建详细模型进行仿真是最直观的方法, 其优点是能够对器件级电磁暂态特性进行仿真分析, 但是由于每个仿真周期都要对高阶导纳矩阵求逆, 使得仿真过程变得极其缓慢。文献[8-17]提出了建立 MMC 高速等效模型进行仿真, 能够缩短系统仿真所用时间, 提高了仿真效率, 但是由于对换流器进行了等效或者简化, 无法对器件级电磁暂态特性进行仿真分析。文献[18]提出了建立 MMC 的宽频模型进行仿真, 考虑了实际系统中杂散元件对系统运行特性的影响, 使得模型更贴近实际系统, 提高了仿真模型的准确度, 但是所需元器件更多, 所需计算的导纳矩阵阶数更高, 仿真效率更低。已有的仿真模型应用范围有限, 在对 MMC-HVDC 系统

特性及参数进行分析和验证的过程中, 需要频繁地切换仿真模型, 为克服这一缺点, 亟待提出一种兼具器件级电磁暂态特性仿真能力、高效性和高准确度的 MMC 建模方法。

为方便对 MMC-HVDC 系统特性及参数进行分析和验证, 克服仿真过程中反复切换仿真模型的问题, 本文结合详细模型、高速等效模型、宽频模型的优点, 提出了一种 MMC 多维度建模方法, 不仅能够实现器件级电磁暂态特性仿真, 还能够提高系统仿真效率, 同时考虑了杂散元件对系统运行特性的影响, 仿真结果更贴近实际系统, 准确度更高。在 PSCAD/EMTDC 环境中搭建了双端仿真模型, 分别对 MMC 多维度模型的三种特性进行了仿真, 验证了模型的正确性和有效性。

1 MMC-HVDC 系统简介

1.1 MMC 拓扑介绍

为涵盖目前的 MMC 主流子模块, 同时便于研究近期提出的新型子模块混合型 MMC 拓扑, 本文以图 1 所示 MMC 拓扑换流器^[19]为研究对象进行研究。它由三相六个桥臂组成, 每个桥臂由 m 个半桥子模块、 n 个全桥子模块、 p 个箝位双子模块和一个桥臂电抗器串联构成, 上下 2 个桥臂构成一个相单元。其中 HBSM 为半桥子模块, FBSM 为全桥子模块, CDSM 为箝位双子模块, C 为子模块电容, L 为桥臂电抗器。

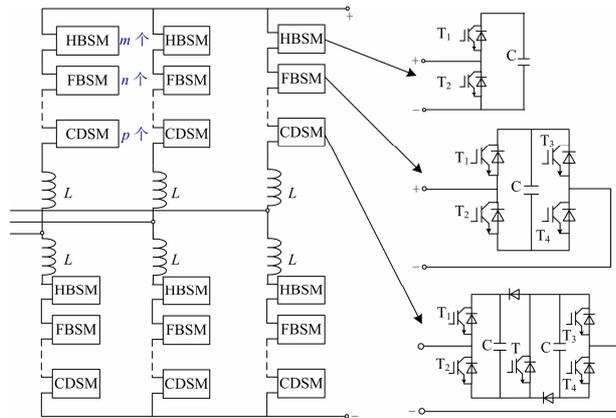


图 1 MMC 换流器拓扑
Fig. 1 Structure of MMC

1.2 MMC 工作原理

MMC 通过控制 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T 的导通和关断, 可以实现子模块不同的输出状态。每相每时刻投入的子模块个数之和为 N (一个箝位双子模块视为两个子模块), 通过控制每相上下桥臂投入的子

模块个数来拟合出期望的交流输出电压, 从而实现功率的控制和传输^[20]。

2 MMC 多维度建模

本文提出的 MMC 多维度建模方法, 其目的在于使得仿真模型兼具详细模型的器件级电磁暂态仿真能力、高速模型的高效率仿真能力和宽频模型的高准确度仿真能力, 便于对 MMC-HVDC 系统特性和参数进行仿真分析和验证。

2.1 器件级电磁暂态仿真能力

为实现器件级电磁暂态特性仿真, 需要将模型细化至器件级, 即采用详细模型建模方法, 如图 1 所示。MMC 每个桥臂可包含半桥子模块、全桥子模块、箝位双子模块三种子模块, 每种子模块的内特性都相同, 因此在进行器件级电磁暂态特性分析时, 仅需要对同一类型的单个子模块进行分析即可。本文选择对三种子模块采取单个详细子模块的方法, 来满足器件级电磁暂态特性的仿真分析需求, 单个桥臂的结构如图 2 所示, 桥臂内其他子模块的仿真模型实现方法后续给出。

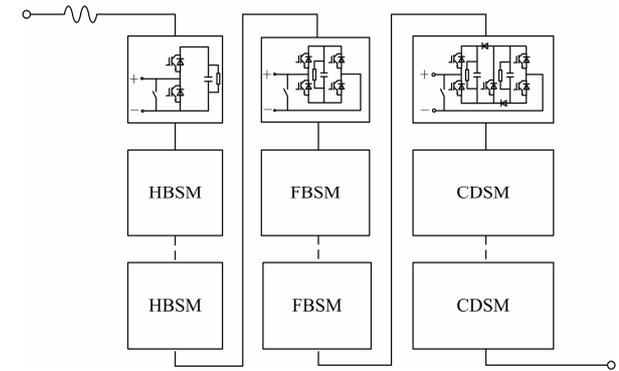


图 2 具备器件级电磁暂态仿真能力的模型图示
Fig. 2 Model with ability of device level electromagnetic transient simulation

2.2 高效率仿真能力

为提高仿真效率, 需引入 MMC 的高速等效模型。上节已经确定每个桥臂中每种子模块均有一个子模块采用详细模型建模方法, 因此剩余的子模块采用高速模型。综合分析已有高速等效模型, 选择基于戴维南等效的 MMC 高速建模方法建立其余子模块的高速等效模型。

1) 半桥子模块高速模型

半桥子模块高速模型将开关器件等效为电阻器件, 当有电流流过时电阻为 R_{on} , 无电流流过时电阻为 R_{off} ; 将电容等效为电压源 V_{CEQh} 与等效电阻

R_{ch} 的串联; 最后进行戴维南等效, 半桥子模块等效过程如图 3 所示。

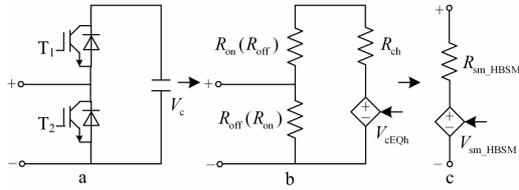


图 3 半桥子模块高速模型
Fig. 3 Accelerated model of HBSM

图中: R_{sm_HBSM} 为半桥子模块等效电阻; V_{sm_HBSM} 为半桥子模块等效电压。

2) 全桥子模块高速模型

全桥子模块高速模型的建立过程与半桥子模块类似, 不同的是受控电压源可能输出负电压, 全桥子模块高速模型的建模过程如图 4 所示。

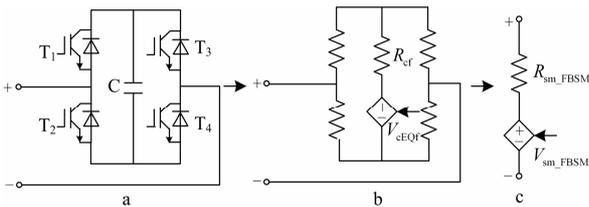


图 4 全桥子模块高速模型
Fig. 4 Accelerated model of FBSM

图中: V_{sm_FBSM} 为等效电压源; R_{sm_FBSM} 为等效串联电阻; V_{ceQf} 为电容等效电压源; R_{cf} 为电容等效电阻。

3) 箝位双子模块高速模型

箝位双子模块高速模型的建立过程与全桥子模块类似, 建模过程如图 5 所示。

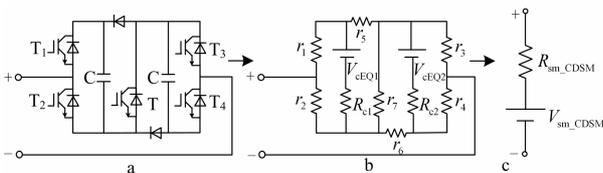


图 5 箝位双子模块高速模型
Fig. 5 Accelerated model of CDSM

图中: V_{sm_CDSM} 为等效电压源; R_{sm_CDSM} 为等效串联电阻, V_{ceQ1} 为电容等效电压源; R_{ci} 为电容等效电阻。

结合上节所建立的三个详细子模块以及本节所建立三种子模块的高速等效模型, 可以得到兼具器件级电磁暂态特性仿真能力和高效性仿真能力的模型, 如图 6 所示。

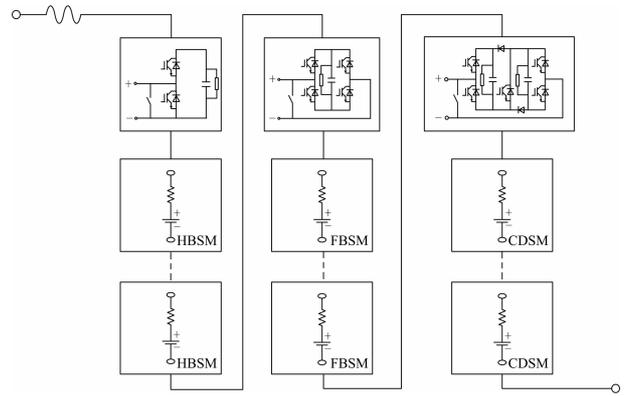


图 6 兼具器件级电磁暂态和高效仿真能力的模型图示
Fig. 6 Model with ability of device level electromagnetic transient simulation and high-efficiency

2.3 高准确度仿真能力

建立 MMC 的宽频模型时, 需要考虑实际系统中屏蔽罩之间、屏蔽罩对地的杂散电容, 由于考虑的杂散元件较多, 宽频模型的计算工作量较大。本文参考实际 MMC-HVDC 工程中的桥臂结构, 以阀塔为单位, 仅考虑阀塔进出线对地杂散电容及杂散电阻、阀塔进出线之间的杂散电容, 建立 MMC 的宽频模型, MMC 单个桥臂的宽频模型如图 7 所示, 图中红色虚线框内为一个阀塔, 每个阀塔都包含有三种子模块。

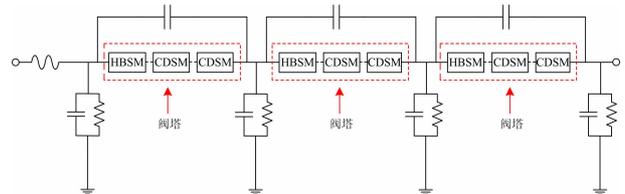


图 7 MMC 宽频模型

Fig. 7 Wide-model model of MMC

由于受杂散参数的影响, 位于不同阀塔的同一种子模块的电气参数将出现差异, 因此结合前文建立的模型, 针对每个阀塔, 采用每种子模块单个详细建模、其余高速建模的方法, 最终建立 MMC 多维度模型, 如图 8 所示。以阀塔为单位进行建模, 可以大大简化宽频建模计算工作量, 虽然仅可以体现 MMC 桥臂内阀塔间的电气发展规律, 阀塔内部不能体现, 但对工程研究应用已经具有较好的指导意义。

图中: R_{gi} 为阀塔进出线对地杂散电阻; C_{gi} 为阀塔进出线对地杂散电容; C_{li} 为阀塔进出线之间的杂散电容。

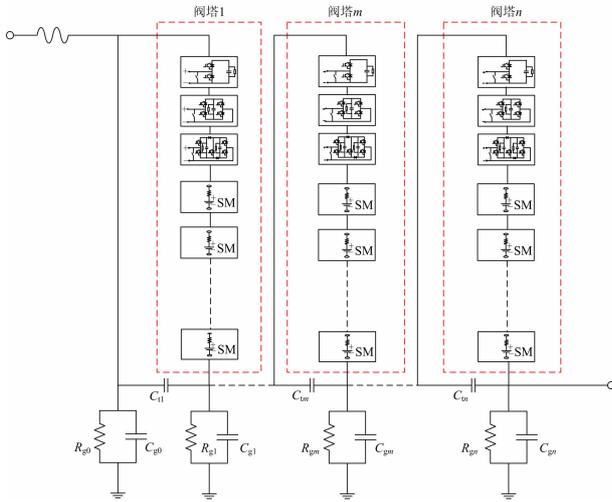


图 8 MMC 多维度模型

Fig. 8 Multi-dimension model of MMC

3 仿真验证

本文所建立 MMC 多维度模型具有器件级电磁暂态特性仿真功能、仿真效率高、仿真准确度高的特点, 因此在 PSCAD/EMTDC 仿真环境下搭建双端系统仿真模型, 分别从这三个方面对所建立模型进行仿真验证。

3.1 MMC-HVDC 仿真模型介绍

在 PSCAD/EMTDC 环境下搭建基于 MMC-HVDC 的双端仿真模型, 直流母线电压为 ± 200 kV, 系统容量 100 MW, 两端的参数完全相同。双端仿真模型相关参数具体如表 1 所示。

表 1 双端 MMC-HVDC 系统参数

Table 1 Parameters of MMC-HVDC

| 参数 | 取值及单位 |
|---------------|---------------------------------------------------|
| 直流母线电压 | ± 200 kV |
| 联接变容量 | 120 MVA |
| 联接变变比 | 115 kV/208.3 kV |
| 联接变短路阻抗 | 15% |
| 系统容量 | 100 MW |
| 交流阀侧线电压(有效值) | 208.3 kV |
| 桥臂子模块数 | HBSM $\times 4$ 、CDSM $\times 7$ 、FBSM $\times 2$ |
| 子模块额定电压 | 20 kV |
| FBSM 电容值 | 320 μ F |
| HBSM/CDSM 电容值 | 160 μ F |
| 桥臂电抗器 | 0.3 H |
| 接地电阻 | 3 000 Ω |

3.2 阀塔子模块分配

仿真模型每个桥臂包含 4 个半桥子模块、7 个箝位双子模块和 2 个全桥子模块, 考虑将桥臂分为 3 个阀塔, 其中 4 个半桥子模块与 1 个箝位双子模

块作为第一个阀塔, 3 个箝位双子模块作为第二个阀塔, 剩余 3 个箝位双子模块和 2 个全桥子模块作为第三个阀塔, 其结构如图 9 所示。

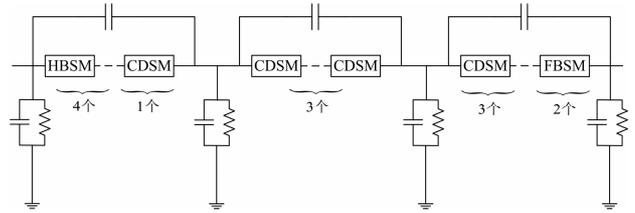


图 9 桥臂阀塔子模块分配图示

Fig. 9 Distribution of HBSM, FBSM and CDSM per arm

3.3 多维度模型仿真验证

1) 器件级电磁暂态特性仿真验证

本文采用子模块旁路开关的动作延迟来验证多维度模型的器件级电磁暂态仿真能力。实际系统中子模块发生故障后, 需要及时闭合旁路开关, 以防止子模块充电电压过高, 从而保护换流阀设备安全。由于控制系统延时以及旁路开关动作时间限制, 子模块故障后旁路开关闭合时间一般为 5~10 ms。设定 0.477 s 时刻(桥臂电流由负到正过零穿越点), 半桥子模块出现驱动故障, IGBT 进入关断状态, 子模块处于闭锁状态, 5 ms 后旁路开关动作, 观察多维度模型、高速模型及宽频详细模型子模块电压变化情况, 仿真结果如图 10 所示(仿真结果数据用 Matlab 处理放入一个图中)。

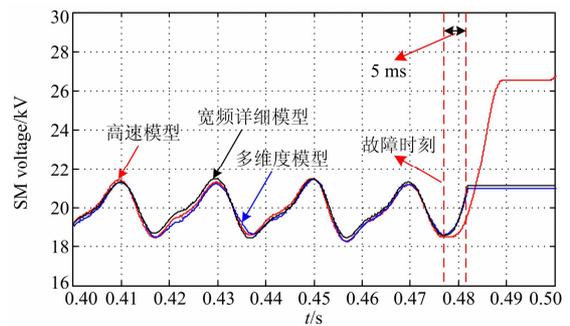


图 10 子模块驱动故障时仿真波形

Fig. 10 Simulation wave of driving fault

由图可知, 子模块出现驱动故障后, 经过 5 ms 后, 多维度模型及宽频模型中故障子模块旁路开关闭合, 子模块被旁路, 电流不再流经电容, 电容电压保持当前时刻电压不变; 高速模型由于无法实现旁路开关的建模以及动作, 子模块故障 5 ms 后电容仍然会因为充电而不断升高。类似的可以研究实际工程系统参数下的旁路开关延时是否满足应用要求。因此, MMC 多维度模型通过融合器件级电磁暂态模型, 可以对器件动作特性进行仿真模拟, 从

而研究器件性能指标是否满足 MMC 边界工况要求。

2) 高效性验证

仿真模型的高效性与仿真用时息息相关，可以用仿真耗时指标来衡量仿真模型的效率，且仿真的时长所用时间越短则效率越高。为验证所建立 MMC 多维度模型的高效性，本文选择多维度模型、宽频详细模型及高速模型分别仿真 0.1 s 的时长，并观察三者所需要的时间。同时为使验证结果更具说服力，对比时三种模型都工作在稳态定功率控制模式，有功指令为-100 MW，无功指令为 0 Mvar。仿真得到多维度模型、宽频详细模型及高速模型的并网功率、并网电流波形如图 11 所示，直流母线电压、a 相上桥臂电容电压波形如图 12 所示，a 相上桥臂电流、内部环流波形如图 13 所示，三者仿真耗时统计结果如图 14 所示(从左至右依次为多维度模型、宽频详细模型以及高速模型)。

由图 11~图 13 可知，在仿真条件等同的条件下，系统正常运行时，三种模型的仿真结果基本一致，此时换流阀杂散参数对系统的影响可以忽略不计；由图 14 可知，在仿真条件等同和仿真结果等效的约束下，对于 0.1 s 仿真时长，宽频详细电磁暂态模型需要将近 24 min，多维度模型需要 5 min 左右，高速模型不到 10 s，多维度模型的仿真效率比详细模型要高得多，但是较高速模型而言，还是要差一些。

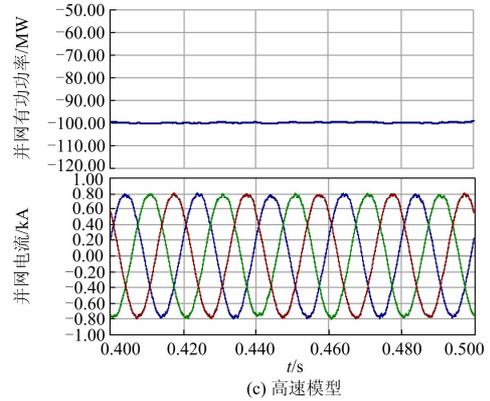
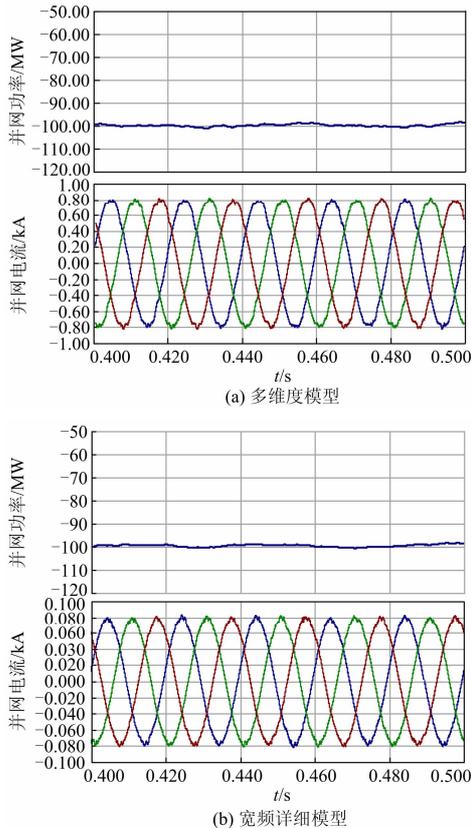


图 11 并网功率及并网电流波形

Fig. 11 Simulation wave of AC power and current

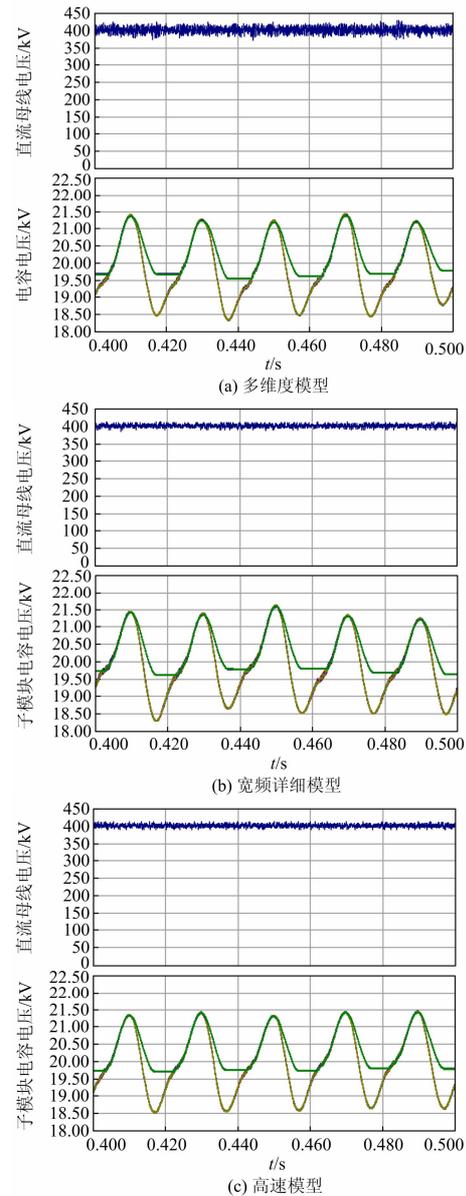
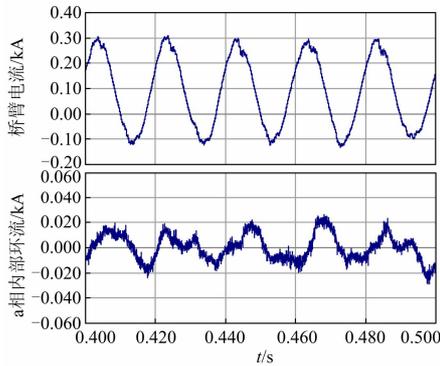
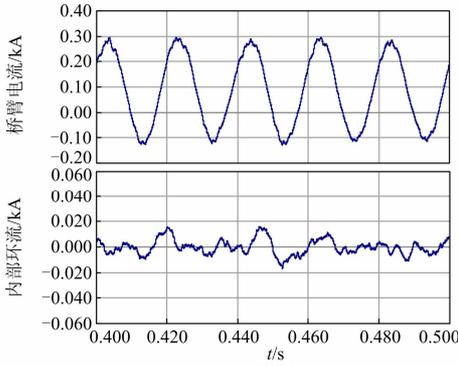


图 12 直流母线电压及子模块电容电压波形

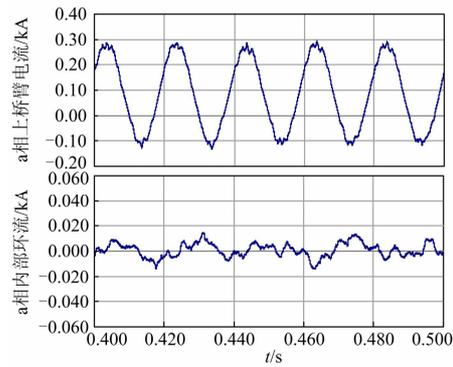
Fig. 12 Simulation wave of DC voltage and SM voltage



(a) 多维度模型



(b) 宽频详细模型



(c) 高速模型

图 13 桥臂电流及内部环流波形

Fig. 13 Simulation wave of arm current and inner current

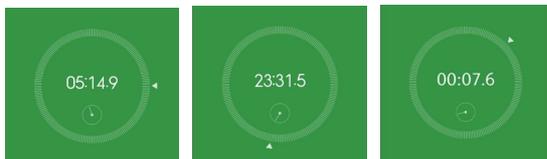


图 14 仿真耗时图示

Fig. 14 Simulation time of models

3) 高准确度仿真验证

由于实际 MMC-HVDC 系统中, 每个桥臂都由多个阀塔级联而成, 而阀塔进出线对地杂散电容及杂散电阻、阀塔进出线之间杂散电容都会有电流流过, 如图 15 所示, 会造成不同阀塔的同类型子模

块电容之间出现不均压, 这种情况尤其在大规模节点 MMC 软启过程中较为明显。

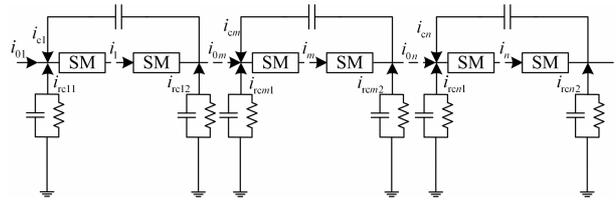


图 15 MMC 换流器电流分析图示

Fig. 15 Current analysis of MMC

图中: i_i 为流过第 i 个阀塔电流; i_{ci} 为流过第 i 个阀塔进出线之间寄生电容的电流; i_{oi} 为流入第 i 个阀塔的电流; i_{rci1} 为流过第 i 个阀塔进线对地杂散元件的电流; i_{rci2} 为流过第 i 个阀塔出线对地杂散元件的电流。

本文为验证多维度模型具有较高的准确度, 选择多维度模型、宽频详细模型及高速模型分别进行自然软启过程的仿真, 如图 16~图 18 所示, 为观察方便, 仅在 a 相上桥臂三个阀塔中各选取一个箝位双子模块的电容电压波形进行对比。

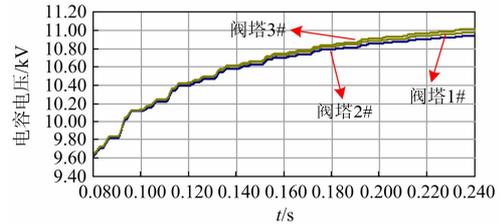


图 16 多维度模型软启过程电容电压波形

Fig. 16 SM voltage of multi-dimension model

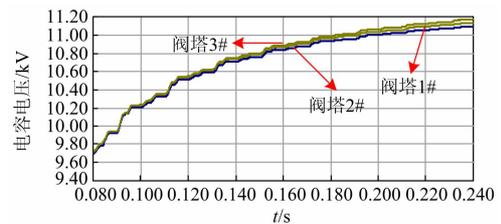


图 17 宽频详细模型软启过程电容电压波形

Fig. 17 SM voltage of wide-band model

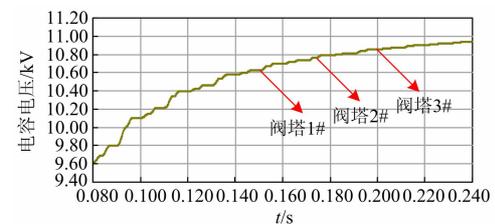


图 18 高速模型软启过程电容电压波形

Fig. 18 SM voltage of accelerated model

对比图 16~图 18 仿真波形可知,自然软启过程中,高速模型各个阀塔中箝位双子模块的电容电压是相同的,而多维度模型和宽频详细模型各个阀塔中箝位双子模块电容电压出现差异,这是因为阀塔杂散元件流过电流,从而导致三个子模块的充放电电流出现差异,引起 MMC 桥臂内子模块电压分布不同,而这种差异在大规模节点 MMC 的软启动过程中尤为明显,在一定的分布参数作用中,如果不采取主动均压策略,MMC 可能会由于子模块过欠压而导致软启失败。仿真得到软起过程中(0.1 s)三种模型所需要的时长如图 18 所示(从左至右依次为多维度模型、宽频详细模型以及高速模型),由图可知,高速模型仿真效率最高,但是仿真结果与实际系统相差较大,多维度模型更适合用于软起过程仿真。

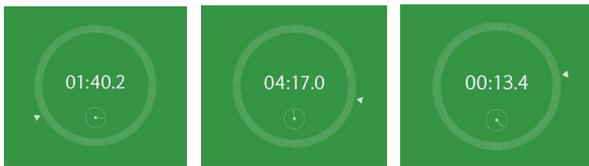


图 19 仿真耗时图示

Fig. 19 Simulation time of models

综上所述,高速模型仿真效率最高,但与实际系统有一定差异,且无法进行器件级仿真,适合进行不考虑元件特性的系统级仿真工作;多维度模型仿真效率不如高速模型,但是更贴近实际系统,较适合用于软启动、子模块故障等受元件特性影响较大的工况仿真;宽频详细模型仿真效率最低,仿真过程较少用到。

4 结论

本文建立了 MMC 多维度模型,并对多维度模型的三种特性进行了仿真验证,得到了以下结论:

1) 本文提出的 MMC 多维度建模方法,其兼具详细模型的器件级电磁暂态仿真能力、高速模型的高效率仿真能力和宽频模型的高准确度仿真能力。

2) 本文的多维度模型以 MMC 阀塔为单位进行宽频建模,既简化了 MMC 宽频参数的计算,又体现了 MMC 桥臂内部的电气参数分布规律,具有良好的工程应用价值。

3) 本文仅提供了一种 MMC 的多维度建模方法,并没有利用该多维度模型对 MMC 各种电磁暂态进行深入研究,在此基础上,后续的研究点包括:多维度模型中的宽频参数准确提取,利用多维度模型对 MMC 各种电磁暂态进行深入的理论分析和仿真研究。

参考文献

- [1] 行登江, 吴金龙, 王先为, 等. MMC-HVDC 系统直流断线故障特性分析[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1825-1832.
XING Dengjiang, WU Jinlong, WANG Xianwei, et al. Analysis on characteristic of DC transmission line breakage fault in modular multilevel converter based HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1825-1832.
- [2] 梁营玉, 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.
- [3] 廖武, 黄守道, 黄晟, 等. 基于模块化多电平换流器的直流输电系统网侧不平衡故障穿越研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 197-203.
LIAO Wu, HUANG Shoudao, HUANG Sheng, et al. Unbalanced grid fault ride-through control method of HVDC power transmission based on modular multilevel converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 197-203.
- [4] 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. Comparison of simulation methods of modular multilevel converter based HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 43-48.
- [5] 张建坡, 赵成勇, 孙海峰, 等. 模块化多电平换流器改进拓扑结构及其应用[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 173-179.
ZHANG Jianpo, ZHAO Chengyong, SUN Haifeng, et al. Improved topology of modular multilevel converter and application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 173-179.
- [6] PENG F Z, LAI J S, MC-KEEVER J W, et al. A multilevel voltage-source inverter with separate DC sources for static Var generation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(5): 1130-1138.
- [7] LESNICAR A, MARGUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range[C] // IEEE Power Tech Conference, Bologna, Italy: IEEE, 2003: 23-26.
- [8] 刘喜梅, 李梅航, 朱炯. 基于戴维宁定理的 MMC 子模

- 块等效数学模型的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 101-104.
- LIU Ximei, LI Meihang, ZHU Jiong. Research of equivalent mathematical model of MMC sub-modules based on Thevenin's theorem[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 101-104.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 周阳, 常非. MMC 电磁暂态快速仿真模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 1-8.
- ZHOU Yang, CHANG Fei. Quick model of MMC in electromagnetic transient simulations[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 1-8.
- [14] EL-KHATIB W Z, HOLBOELL J, RASMUSSEN T W. Efficient modelling of a modular multilevel converter[C] // Power Engineering Conference (UPEC), 2013 48th International Universities: 1-6, 2013.
- [15] TEEUWSEN S P. Simplified dynamic model of a voltage-sourced converter with modular multilevel converter design[C] // Proc 2009 Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE '09. IEEE/PES: 1-6.
- [16] ROHNER S, WEBER J, BERNET S. Continuous model of modular multilevel converter with experimental verification[C] // Proc 2011 Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE: 4021-4028.
- [17] AHMED N, ANGQUIST L, NORRGA S, et al. Validation of the continuous model of the modular multilevel converter with blocking/de-blocking capability[C] // Proc 2012 International Conference on AC and DC Power Transmission, 2012 IET.
- [18] 徐政, 屠卿瑞, 管敏渊, 等. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 164-174.
- [19] MARQUARDT R. Modular multilevel converter topologies with DC-short circuit current limitation[C] // 2011 IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia(ICPE&ECCE). Jeju, Korea: IEEE, 2011: 1425-1431.
- [20] LESNICAR A, MARQUARDT R. A new modular voltage source inverter topology[C] // European Conference on Power Electronics and Applications. Toulous, France: European Conference on Power Electronics and Applications, 2003: 1-10.

收稿日期: 2015-11-06; 修回日期: 2016-04-06

作者简介:

行登江(1988-), 男, 通信作者, 硕士, 初级工程师, 研究方向为柔性直流输电系统分析; E-mail: xingdengjiang@163.com

吴金龙(1981-), 男, 硕士, 中级工程师, 研究方向为柔性直流输电系统分析与设计、控制策略设计;

杨美娟(1986-), 女, 硕士, 初级工程师, 主要从事直流输电技术方面的工作。

(编辑 魏小丽)