

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.180646

基于实时数字仿真器的模块化 多电平换流器内部故障混合仿真模型

王洁聪¹ 刘崇茹¹ 徐东旭¹ 朱毅²

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学) 北京 102206

2. 国网山东省电力公司经济技术研究院 济南 250021)

摘要 高电压模块化多电平换流器(MMC)中大量子模块级联给实时仿真带来了极大的挑战。通过对桥臂或换流器进行封装等效可以提高 MMC 仿真系统的计算效率,但高度封装化的模型给换流器内部故障的仿真造成了困难。相比于离线仿真软件,实时数字仿真器(RTDS)对模型计算速度和效率的要求更高,而且由于不能进行插值,对电力电子器件的模拟较为困难。为了兼顾实时仿真对故障仿真功能和模型计算效率的双重需求,该文采用详细等效和简化等效相结合的混合仿真方法,利用 CBuilder 工具开发了一种适用于 RTDS 的具备内部故障仿真功能的 MMC 桥臂混合仿真模型。该模型避免了不同类型仿真模型间一个步长的延时问题,不仅能够快速仿真大规模 MMC 系统,还能够模拟多种换流器内部故障。在 RTDS 中搭建单端 MMC 系统,验证了所提模型的精确性和有效性。

关键词: 模块化多电平换流器 实时数字仿真 桥臂混合仿真模型 故障模拟

中图分类号: TM743

Hybrid Simulation Model of Modular Multilevel Converter Internal Fault Based on Real-Time Digital Simulator

Wang Jiecong¹ Liu Chongru¹ Xu Dongxu¹ Zhu Yi²

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources
North China Electric Power University Beijing 102206 China

2. State Grid Shandong Economics Research Institute Jinan 250021 China)

Abstract A large number of series-connected submodules in a high-voltage modular multilevel converter (MMC) system introduce a great challenge for real-time simulation. Though the simulation efficiency of the MMC model can be improved by encapsulating equivalent model of the bridge arm or the converter, the internal fault of the converter fails to be simulated by using existing encapsulated equivalent model. Compared with off-line simulation tool, the interpolation calculation method cannot be utilized in real-time digital simulator (RTDS), it is more difficult to simulate power electronic devices, and has higher requirements on calculation speed and efficiency. To enhance the calculation effectiveness while keeping the precision under various fault situation, a hybrid simulation model of MMC arm combining the detailed and simplified equivalent models is proposed, which is implemented by utilizing CBuilder in RTDS. The proposed model can be conveniently used to simulate various internal faults of converters, bridge arms, and submodules with real-time calculation. The calculation

国家电网公司科学技术(张北柔性直流电网系统构建方案研究)项目资助(SGSDJY00JHJS1600141)。

收稿日期 2018-04-17 改稿日期 2019-04-19

precision and effectiveness of the proposed model are verified in RTDS.

Keywords: Modular multilevel converter, real-time digital simulation, hybrid simulation model of bridge arm, simulation of fault

0 引言

模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 需要达到数百电平才能满足实际工程对高电压、大容量的需求^[1-2], 这给 MMC 的电磁暂态仿真带来了极大的挑战。针对这一问题, 国内外学者提出了很多高效建模方法, 根据研究对象的不同, 将 MMC 子模块^[3-4]、桥臂^[5-13]或者整个三相换流单元^[14-15]等效为封装模块, 降低了仿真系统的求解维度。其中, 以桥臂为单元进行封装建模的方法既可以充分利用 MMC 模块化的结构特点从而减小计算量, 又可以保留较多换流器内部的细节特征, 且模型搭建较方便, 在现有文献中应用较多。根据能否保留子模块内部细节特征又可以将模型分为两类: 第一类模型可以保留子模块内部特征, 但需要对大量子模块电容进行积分运算, 计算效率较低, 文献[5-9]中的模型属于该类模型; 第二类模型模拟桥臂电压的动态特性, 不保留子模块内部特征, 但计算简单, 文献[10-13]中的模型属于该类模型。

现有高度封装化的建模方法能够准确模拟 MMC 稳态、换流器闭锁、交流故障和直流故障等过程的动态特性, 而且具有较高的仿真效率, 但给换流器内部故障的仿真造成了困难。为了模拟子模块故障, 现有文献都是利用仿真平台提供的元件模型按照子模块拓扑结构额外搭建若干个子模块模型 (子模块详细模型)。文献[2]用子模块详细模型的仿真信息替换等效模型中对应子模块模型的数值信息, 因此存在一个仿真步长的滞后。文献[6]则是直接将详细子模块模型串联接入桥臂之中, 只能模拟某一个或少数几个子模块的故障情况, 而且该方法并不适用于实时数字仿真器 (Real-Time Digital Simulator, RTDS), 因为 RTDS 提供的电力电子器件和用户自定义模型分属不同的仿真步长, 相互连接需要用到接口变压器从而引入新的误差。电力电子换流器结构越发复杂, 这势必导致设备故障概率大大增加^[16], 如何对换流器内部故障, 包括子模块的内部故障以及桥臂故障进行建模, 仍然是该领域研究的难点。

RTDS 是 MMC 控制器及保护装置在设计、研发及调试过程中常用的仿真装置, 与离线的电磁暂

态仿真软件相比, RTDS 由于其实时性的仿真特性以及有限的硬件资源, 对于模型的计算速度和效率有着更高的要求; 而且由于 RTDS 不提供插值算法, 不能准确判断电力电子器件的准确动作时刻, 不能在网络拓扑突变时重新对网络初始化, 对含电力电子器件的电路仿真较为困难。用户可以通过两种方法使用 RTDS 进行 MMC 仿真: 一是利用 RTDS 平台提供的 MMC 桥臂封装模块搭建仿真系统; 二是利用 RTDS 的 CBuilder 工具自定义 MMC 子模块或桥臂模型。

RTDS 平台提供了两种基于 GPC/PB5 处理器板卡的 MMC 封装模块^[17]: rtds_vsc_MMC5 和 rtds_vsc_CHAINV5, 以及两种基于 FPGA 板卡开发的 MMC 模型: Unified Model (U5) 和 Generic Model (GM)。其中, rtds_vsc_MMC5 不能模拟单个子模块的动态特性, rtds_vsc_CHAINV5 可以模拟每个子模块电容的充放电过程, 但单桥臂子模块个数最大仅为 56 个, 这两种模型都没有提供故障仿真功能。基于 FPGA 的模型需另外购买 GTFPGA Unit 才能使用, U5 和 GM 模型分别能够实现不超过 501 电平和 1 025 电平的 MMC 系统仿真, 这两种模型都具备部分换流器内部故障仿真功能, 但只包括电容短路故障、电容值下降和子模块旁路等三种子模块故障和桥臂电抗器短路故障, 不具备模拟子模块中电力电子开关元件故障的功能, 也不能模拟桥臂接地、短路、断路等故障。但子模块和桥臂故障会严重影响系统的稳定运行^[18-20], 有必要对其建立精确的仿真模型用于故障特性、诊断及保护策略的研究。

用户在利用 RTDS 的 CBuilder 平台进行自定义开发实现 MMC 系统仿真时, 会受到计算资源的限制, 进而影响模型的计算效率。文献[3-4]利用 CBuilder 平台开发了可用于子模块内部特性及控制保护策略研究的自定义子模块模型, 但由于对每个子模块单独建模, 计算资源需求较多, 因此所开发的模型无法应用于高电平 MMC 系统的仿真。

针对换流站内部故障仿真困难的问题, 兼顾实时仿真对模型计算效率的需求, 本文建立了子模块内部故障详细等效模型和子模块组简化等效模型, 在这两种模型的基础上, 采用详细等效和简化等效

相结合的混合仿真方法,设计一种具备内部故障仿真功能的 MMC 桥臂混合仿真模型。

1 子模块内部故障详细等效模型

1.1 子模块详细等效模型

图 1 所示为半桥子模块拓扑结构,在电磁暂态仿真软件中按照图中电路结构搭建详细模型,能够模拟每个子模块的运行状态,但会受到仿真软件资源对节点数的限制,无法仿真大规模 MMC 系统。

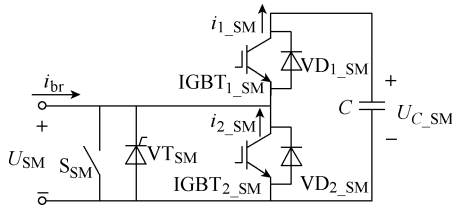


图 1 半桥子模块拓扑结构

Fig.1 Structure of HBSM

为了能够较快地模拟各个子模块的运行状态,文献[5]提出了一种详细的等效模型,其核心内容是建立单个子模块的戴维南等效模型后进行代数叠加。该模型可以整体等效一个桥臂上的 N 个子模块的戴维南信息,并可以求出每个子模块的电容电压值,仿真精度高。文献[3]以此为基础,在 CBuilder 工具中开发了子模块详细等效模型,将图 1 中的子模块电容 C 等效为一个电阻 R_{Ceq_SM} 串联电压源 U_{Ceq_SM} 的戴维南模型,将 IGBT_{1_SM} 和二极管 VD_{1_SM} 整体等效为可变电阻 R_{1_SM} ,将 IGBT_{2_SM}、VD_{2_SM}、晶闸管 VT_{SM} 和旁路开关 S_{SM} 整体等效为可变电阻 R_{2_SM} (导通状态为阻值很小的 R_{ON} ,关断状态为阻值很大的 R_{OFF}),子模块等效为等效电阻 R_{eq_SM} 和等效电压源 U_{eq_SM} 串联的戴维南等效模型,计算方法为

$$\begin{cases} R_{eq_SM} = \frac{R_{Ceq_SM}(R_{1_SM} + R_{2_SM})}{R_{Ceq_SM} + R_{1_SM} + R_{2_SM}} \\ U_{eq_SM} = \frac{U_{Ceq_SM}R_{2_SM}}{R_{Ceq_SM} + R_{1_SM} + R_{2_SM}} \end{cases} \quad (1)$$

1.2 子模块故障模型

本文在文献[3]的基础上,对子模块故障状态进行建模。子模块故障包括电容故障和开关元件故障,模拟子模块故障特性要对元件的等效模型进行修正。当第 i 个子模块的电容发生故障时,需对第 i 个子模块的电容的等效电阻 R_{Ceq_SMi} 和等效电压源 U_{Ceq_SMi} 进行修正;当第 i 个子模块的开关元件发生故障时,需对第 i 个子模块的开关元件等效电阻 R_{1_SMi} 和 R_{2_SMi} 进行修正。

1.2.1 电容器故障

1) 电容击穿故障

电容击穿短路时,电容器的导体之间电阻降低,无法蓄积原有的电势量,基本上等同于一段导体。此时电容等效为一个阻值很小的电阻,等效电阻 R_{Ceq_SMi} 和等效电压源 U_{Ceq_SMi} 分别为

$$\begin{cases} R_{Ceq_SMi} = R_{ON} \\ U_{Ceq_SMi} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

2) 电容值下降

电容值下降时,电容的等效电阻 R_{Ceq_SMi} 和等效电压源 U_{Ceq_SMi} 分别为

$$\begin{cases} R_{Ceq_SMi} = \frac{\Delta t}{2C_{fault}} \\ U_{Ceq_SMi} = U_{C_SMi}(t - \Delta t) + R_{Ceq_SMi}I_{C_SMi}(t - \Delta t) \end{cases} \quad (3)$$

式中, C_{fault} 为故障后的电容值; U_{C_SMi} 和 I_{C_SMi} 分别为第 i 个子模块电容的电压和电流。

1.2.2 开关元件故障

(1) 二极管击穿和断路故障。若二极管击穿,则二极管不再具备单向导通性,对应 R_{1_SMi} 或 R_{2_SMi} 修正为 R_{ON} ;若二极管断路,则对应的 R_{1_SMi} 或 R_{2_SMi} 由 IGBT 状态决定。

(2) IGBT 击穿故障。当 IGBT 击穿时,对 IGBT 和其反并联二极管组成的开关组来说,正向和反向电流都有通路,将对应的 R_{1_SMi} 或 R_{2_SMi} 修正为 R_{ON} 。

(3) IGBT 断路故障。当 IGBT 发生断路故障时,对应的 R_{1_SMi} 或 R_{2_SMi} 由其反并联二极管决定,此时需要判断二极管的状态。在电磁暂态仿真时,二极管通常以两端电压的正负作为导通或关断的条件,但仿真中所获得电压值实际为 t 时刻的值,以此作为判据可能会导致二极管在开关动作时刻进入错误状态,因此在电路拓扑发生变化的时刻需要加入修正判据才能对二极管的状态做出正确判断。

以 IGBT_{1_SMi} 发生断路故障为例,子模块的等效电路如图 2 所示, R_{1_SMi} 为二极管 VD_{1_SMi} 的等效电阻, $U_{SMi}(t)$ 为子模块端口电压。当 IGBT_{2_SMi} 状态发生变化时,电路拓扑发生变化,导致 $U_{SMi}(t)$ 突变为 $U_{SMi}(t^+)$,应根据动作后的新拓扑计算 $U_{SMi}(t^+)$ 作为二极管通断的判断条件。实际要判断二极管的通断,并不需要计算出 $U_{SMi}(t^+)$ 的值,对于二极管 VD_{1_SMi} 来说,只需要比较 $U_{SMi}(t^+)$ 和 $U_{C_SMi}(t^+)$ 的大小关系,对于二极管 VD_{2_SMi} 来说只需要判断 $U_{SMi}(t^+)$ 的正负。

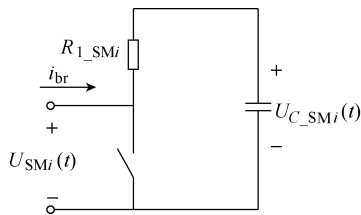


图2 IGBT_{1_SMi}故障时子模块等效电路
Fig.2 Sub-model equivalent circuit for IGBT_{1_SMi} fault condition

因此选作修正判据的状态量要满足两个条件：

- ①在拓扑变化时不突变；②能够反映电压大小关系。
- 由于桥臂电抗的存在，桥臂电流不会发生突变，因此选择桥臂电流作为判断条件。IGBT 发生断路故障时，开关组的等效电阻计算方法为：IGBT_{1_SMi}故障时，IGBT_{2_SMi}关断瞬间，桥臂电流 i_{br} 为正时 $R_{1_SMi}=R_{ON}$ ， $R_{2_SMi}=R_{OFF}$ ，反之则相反；IGBT_{2_SMi}导通瞬间， $R_{1_SMi}=R_{OFF}$ ， $R_{2_SMi}=R_{ON}$ ；IGBT_{2_SMi}故障时，桥臂电流 i_{br} 为正时 $R_{1_SMi}=R_{ON}$ ， $R_{2_SMi}=R_{OFF}$ ，反之则相反；IGBT_{1_SMi}导通瞬间， $R_{1_SMi}=R_{ON}$ ， $R_{2_SMi}=R_{OFF}$ 。

需要注意的是，该修正判据仅在同一子模块的另一 IGBT 发生状态变化时刻使用。

1.2.3 旁路开关闭合

子模块发生故障后，保护装置发出信号令故障子模块退出运行，此时闭合旁路开关 S_{SMi} ，同时闭锁 IGBT_{1_SMi}和 IGBT_{2_SMi}。对于该过程的模拟，应将故障子模块旁路等效电阻 R_{1_SMi} 修正为 R_{OFF} ， R_{2_SMi} 修正为 R_{ON} 。

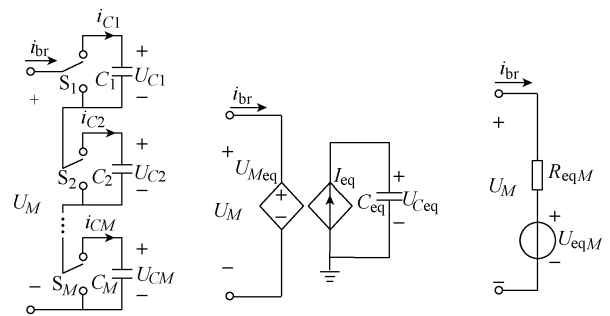
2 具备内部故障仿真功能的桥臂混合仿真模型

子模块内部故障详细等效模型可以模拟子模块内部的动态特性，但大量子模块电容和开关元件的等效计算一定程度上降低了模型的计算效率。在 RTDS 中对 MMC 系统建模时，如果对全部子模块建立内部故障详细等效模型，那么 MMC 系统仿真规模将会受到硬件资源的限制，无法满足对高电压 MMC-HVDC 系统的仿真需求。为此，本文采用详细等效与简化等效相结合的方法，设计一种具备内部故障仿真功能的桥臂混合仿真模型。

2.1 串联子模块组的简化等效模型

假设子模块中 IGBT 和反并联二极管开关组在关断时电阻无穷大，在导通时电阻为 0，那么每个子模块可以简化为由开关控制投切的电容，如图 3a 所示。由于串联在同一桥臂的 M 个子模块电容参数

相同，当 MMC 桥臂的电路结构没有发生变化时，无论 MMC 处于稳态还是暂态过程，同一桥臂中所有子模块的运行状态都基本保持一致，因此可以忽略子模块电容电压平衡控制和调制过程带来的差异，而假设所有子模块电容电压相等。现有研究提出用受控电压源 U_{Meq} 来代替桥臂中的串联子模块^[10-13]，受控电压源的数值信息来自等效电容 C_{eq} 的电压 U_{Ceq} ，等效电路模型如图 3b 所示。由于电磁暂态仿真中不能将当前求解步长中电容电压的计算值赋值给受控电压源，受控电压源的电压值实际上得到的是上一个步长的计算值，存在一个仿真步长的延时，即人为地将受控电压源电压的计算与桥臂电流的求解在时间上解耦，从而导致动态下模型不稳定^[7]。针对这一问题，本文根据子模块平均电容电压与开关函数和桥臂电流的数学关系，推导出一种基于戴维南模型的子模块组等效模型，避免出现仿真延时，等效后的模型如图 3c 所示， R_{eqM} 和 U_{eqM} 分别为等效电阻和等效电压源。



(a) 简化串联子模块组 (b) 受控源模型 (c) 戴维南等效模型
图3 串联子模块组的简化等效模型

Fig.3 Simplified equivalent model of submodules group

采用梯形积分法对子模块平均电容电压 \bar{U}_{Ci} 进行差分得到

$$\bar{U}_{Ci}(t) = \bar{U}_{Ci}(t - \Delta t) + \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left[\frac{\Delta t}{2C} i_{Ci}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2C} i_{Ci}(t) \right] \quad (4)$$

式中， C 为子模块电容参数； i_{Ci} 为第 i 个子模块电容的电流，与桥臂电流 i_{br} 的关系为

$$i_{Ci}(t) = S_i(t) i_{br}(t) \quad (5)$$

式中， S_i 为子模块投切信号， $S_i=1$ 表示投入， $S_i=0$ 表示未投入。

串联子模块组的端口电压 U_M 为

$$U_M(t) = \sum_{i=1}^M S_i(t) \bar{U}_{Ci}(t) \quad (6)$$

将式 (4) 和式 (5) 代入式 (6), 并写成戴维南等效模型的形式, 即可得到 M 个子模块组的简化等效模型, 等效电阻 R_{eqM} 和等效电压源 U_{eqM} 分别为

$$\begin{cases} R_{eqM} = \frac{\Delta t}{2C} MS_M^2(t) \\ U_{eqM} = MS_M(t) \bar{U}_{Ci}(t - \Delta t) + \\ \quad \frac{\Delta t}{2C} MS_M(t) S_M(t - \Delta t) i_{br}(t - \Delta t) \end{cases} \quad (7)$$

式中, $S_M(t)$ 为开关函数, $S_M(t) = m(t)/M$, $m(t)$ 为处于投入状态的子模块的个数。

上述简化等效模型计算过程中所需的控制信号和电气量均可以在当前仿真步长获取, 因此该模型不会因为等效计算而造成一个步长的延时, 不会将电压和电流的计算在时间上解耦。该模型可以反映子模块电容充放电的平均状态, 模拟桥臂的动态特性, 可以用于研究换流站站级控制策略和环流抑制控制策略, 且仿真时间与电平数无关, 适用于大规模交直流系统的建模与仿真。

2.2 桥臂混合仿真模型

为了使大规模 MMC 仿真中既能体现单个子模块的故障特性, 又能保持很高的仿真效率, 本文设计了如图 4 所示的桥臂混合仿真模型。首先将 MMC 桥臂中级联的子模块按是否需要研究内部故障特性分为特殊子模块和一般子模块。对 L 个特殊子模块建立子模块内部故障详细等效模型 SM_1, SM_2, \dots, SM_L 。对 M 个一般子模块整体建立子模块组简化等效模型, R_{eqM} 和 U_{eqM} 是子模块组简化等效模型的等效电阻和等效电压源。开关 SW 和二极管 VD_1, VD_2 构成的开关组合, 模拟桥臂处于闭锁与非闭锁状态, SW 断开模拟换流器闭锁状态, SW 闭合模拟非闭锁状态。

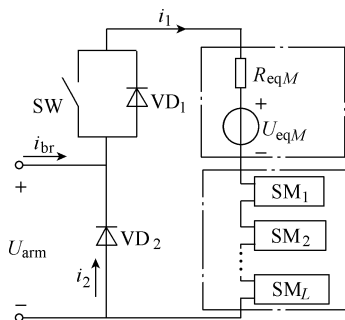


图 4 桥臂混合仿真模型等效结构

Fig.4 Equivalent structure of hybrid simulation model of bridge arm

其中, 简化等效模型的等效电阻和等效电压源由式 (7) 计算得到 (将式 (7) 中的 i_{br} 替换为 i_1

即可)。串联的 L 个子模块模型最终等效为等效电阻 R_{eqL} 和等效电压源 U_{eqL} , 将由式 (1) 得到的子模块等效模型进行代数叠加即可得到。

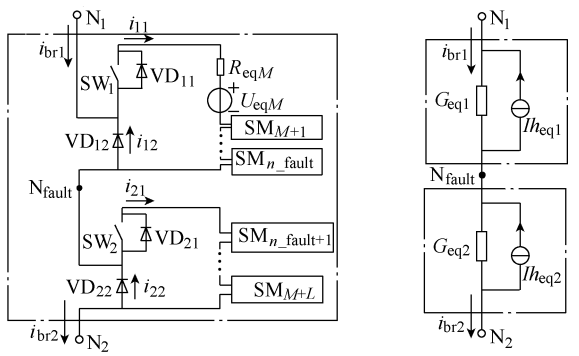
二极管采用文献 [21] 所建立的模型及计算方法, 开关 SW 和二极管 VD_1 整体等效为电阻 R_{VD1eq} 和电压源 U_{VD1eq} 串联, 二极管 VD_2 等效为电阻 R_{VD2eq} 和电压源 U_{VD2eq} 串联。桥臂混合仿真模型最终可以等效为一个诺顿等效模型, 等效电导 G_{eq} 和等效电流源 Ih_{eq} 的计算方法为

$$\begin{cases} G_{eq} = \frac{R_{VD1eq} + R_{VD2eq} + R_{eqL} + R_{eqM}}{R_{VD2eq} (R_{VD1eq} + R_{eqL} + R_{eqM})} \\ Ih_{eq} = \frac{U_{eqL} + U_{eqM} - U_{VD1eq}}{R_{VD1eq} + R_{eqL} + R_{eqM}} + \frac{U_{VD2eq}}{R_{VD2eq}} \end{cases} \quad (8)$$

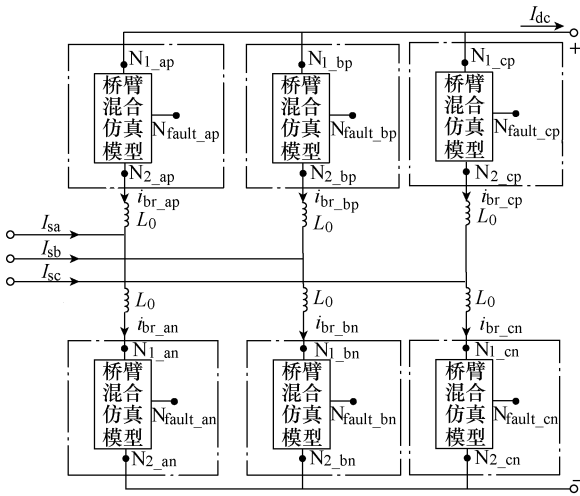
2.3 桥臂故障模型

为了实现对 MMC 桥臂故障的仿真, 在对 MMC 桥臂混合仿真模型进行自定义建模时, 增设一个位置灵活可调的故障节点, 将桥臂等效为一个 3 节点模型。然后使用该模型对三相 MMC 系统进行建模, 在故障节点处外接 RTDS 提供的故障模块即可模拟桥臂接地故障和不同桥臂之间的短路故障。

图 4 所示的桥臂混合仿真模型通过开关组合整体控制桥臂的闭锁与非闭锁, 若直接增设故障节点, 则故障状态的等效电路与实际电路不符。因此需要将故障节点上方和下方的级联子模块组分别看作一个整体, 各由一组的开关组控制闭锁或非闭锁, 如图 5a 所示。上方开关组由开关 SW_1 和二极管 VD_{11}, VD_{12} 组成, 分别等效为 R_{VD11eq}, U_{VD11eq} 和 R_{VD12eq}, U_{VD12eq} ; 下方开关组由开关 SW_2 和二极管 VD_{21}, VD_{22} 组成, 分别等效为 R_{VD21eq}, U_{VD21eq} 和 R_{VD22eq}, U_{VD22eq} 。故障节点上方和下方的桥臂电流分别为 i_{br1} 和 i_{br2} , 在对子模块进行等效时要使用子模块所在部分的桥臂电流: 故障节点上方的 L_1 个特殊子模块 ($SM_1 \sim SM_{n_fault}$) 和 M 个一般子模块用电流 i_{br1} 和 i_{11} 进行计算, L_1 个串联的特殊子模块等效为电阻 R_{eqL1} 和电压源 U_{eqL1} 串联, M 个一般子模块等效为电阻 R_{eqM} 和电压源 U_{eqM} 串联; 故障节点下方的 L_2 个特殊子模块 ($SM_{n_fault+1} \sim SM_L$) 用电流 i_{br2} 和 i_{21} 进行计算, 等效为电阻 R_{eqL2} 和电压源 U_{eqL2} 串联。对故障节点上方和下方部分分别进行等效计算, 等效为 G_{eq1}, Ih_{eq1} 和 G_{eq2}, Ih_{eq2} , 最终得到如图 5b 所示的诺顿等效模型, 计算方法如式 (9) 和式 (10) 所示。将图 5a 所示的桥臂混合仿真模型按照图 5c 所示方式连接, 得到三相 MMC 换流器仿真模型。



(a) 有故障节点的桥臂混合仿真模型 (b) 诺顿等效电路



(c) 三相 MMC 换流器模型

图 5 具备故障仿真功能的桥臂混合仿真模型

Fig.5 Hybrid simulation model of bridge arm for fault condition

$$\begin{cases} G_{eq1} = \frac{R_{VD11eq} + R_{VD12eq} + R_{eqL1} + R_{eqM}}{R_{VD12eq} (R_{VD11eq} + R_{eqL1} + R_{eqM})} \\ I_{heq1} = \frac{U_{eqL1} + U_{eqM} - U_{VD11eq}}{R_{VD11eq} + R_{eqL1} + R_{eqM}} + \frac{U_{VD12eq}}{R_{VD12eq}} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} G_{eq2} = \frac{R_{VD21eq} + R_{VD22eq} + R_{eqL2}}{R_{VD22eq} (R_{VD21eq} + R_{eqL2})} \\ I_{heq2} = \frac{U_{eqL2} - U_{VD21eq}}{R_{VD21eq} + R_{eqL2}} + \frac{U_{VD22eq}}{R_{VD22eq}} \end{cases} \quad (10)$$

由于简化等效模型的假设条件是子模块电容电压近似相等,而当故障发生在简化等效模型部分时,其子模块电容电压将不再保持一致,因此故障节点需设置在详细子模块模型部分。通过改变模型中详细等效子模块和简化等效子模块的数量以及两者的相对位置可以实现不同位置桥臂故障的仿真。

2.4 桥臂混合仿真模型的控制设计

每个子模块详细等效模型,需要独立的 IGBT

控制信号,利用子模块中上下两个 IGBT 的互补性,控制器需要传输给每个子模块 1 个 0-1 信号 S_{SM1}, \dots, S_{SM_L} 。子模块组简化等效模型需要一个开关信号 S_M ($0 \leq S_M \leq 1$) 控制子模块组的整体运行状态,因此桥臂控制器需要计算出子模块组中需要投入的子模块个数 $m(t)$,除以子模块组的个数 M 后,将结果传输给子模块组简化等效模型。桥臂混合仿真模型的控制设计框图如图 6 所示,桥臂控制器根据内外环及环流抑制控制器输出的调制波,以及从桥臂模型中采集的子模块详细等效模型电容电压 $U_{C_SM1}, \dots, U_{C_SM_L}$ 以及子模块简化等效模型平均电容电压 U_{C_M} 和桥臂电流 i_{br2} ,产生桥臂混合仿真模型的控制信号。

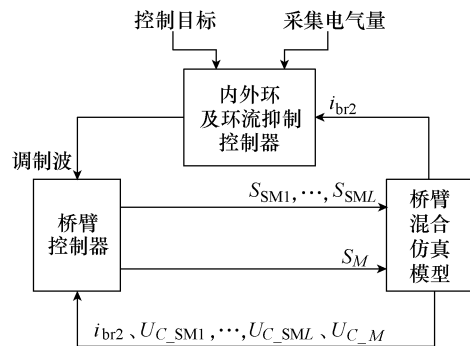


图 6 桥臂控制器框图

Fig.6 Block diagram of bridge arm controller

3 仿真与分析

3.1 仿真资源占用及最大仿真规模

在资源占用方面,本文在 CBuilder 中开发的桥臂混合仿真模型占用约 8% 的 PB5 板卡资源或 10% 的 GPC 板卡资源,且与桥臂子模块个数无关。一个单端 MMC 仿真系统需要占用 1 个 Rack 的 4 个 PB5/GPC 板卡,每个板卡包括 A、B 两个处理器,其中 3 个板卡的 6 个处理器分别分配给桥臂混合仿真模型和系统其他元件的计算,另 1 个板卡的 2 个处理器分配给网络求解和控制器计算。

仿真步长设置为 $50\mu s$,当设置采用子模块组简化等效模型的子模块个数 $M=0$ 时,基于最近电平逼近调制 (Nearest Level Modulation, NLM) 策略,则仿真规模受均压算法复杂度的影响较大,采用冒泡排序算法可实现 61 电平单端 MMC 系统的仿真;基于 CPS-SPWM 调制策略及文献[22]提出的均压算法可实现 151 电平单端 MMC 系统的仿真。

为了实现更高电平数的 MMC 系统仿真,可以增加简化等效模型的子模块个数 M 。采用 NLM 策略时,理论上对电平数没有限制,但对每个桥臂中

详细等效子模块个数 L 有所要求, L 应小于采用相同排序算法的详细等效模型所能实现的最大子模块数; 采用 CPS-SPWM 策略时, 产生 $M+L$ 个三角载波以及控制信号需要较大计算量, 当 L 设置为 0 时, 可以实现 601 电平单端 MMC 系统仿真。

3.2 模型精度验证

在 RTDS 中用开发桥臂混合仿真模型建立单端 21 电平 MMC 系统(后文表述为“本文所提模型”), 在 PSCAD/EMTDC 中用器件搭建相同的系统(后文表述为“PSCAD/EMTDC 详细模型”)用于对比验证, 仿真系统接线如图 7 所示。调制策略采用 CPS-SPWM, 并采用文献[22]所提均压算法和文献[23]所提环流抑制策略。系统采用定直流电压和定无功功率控制, 输送无功功率为 10Mvar。仿真步长设置为 50 μ s, 电容电压的额定值为 2kV, 系统具体参数见表 1, 其中子模块电容 C 和桥臂电抗 L_0 分别为

$$\begin{cases} C = \frac{P_N}{3kN\omega_0\varepsilon U_C^2} \left[1 - \left(\frac{k \cos \varphi}{2} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \\ L_0 = \frac{1}{8\omega_0^2 C U_C} \left(\frac{P_N}{3I_{km}} + U_{dc} \right) \end{cases} \quad (11)$$

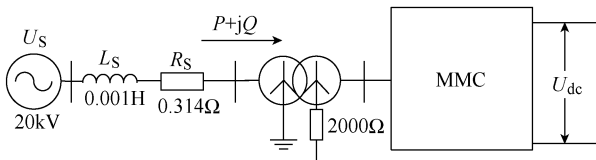


图 7 单端 21 电平 MMC 仿真系统

Fig.7 Simulation system of single terminal 21-level MMC

表 1 单端 21 电平 MMC 系统参数

Tab.1 Parameters of single terminal 21-level MMC

| 参 数 | 数 值 |
|-------------------|-------------|
| 交流系统电压/kV | 20 |
| 交流系统电阻/ Ω | 0.314 |
| 阻抗比 | 1 |
| 直流电压/kV | ± 20 |
| 变压器电压比 | 20kV : 22kV |
| 变压器联结组标号 | Dyn11 |
| 变压器接地电阻/ Ω | 2 000 |
| 变压器容量/(MV·A) | 10 |
| 变压器短路阻抗(%) | 12 |
| 子模块电容/ μ F | 2 099 |
| 子模块个数 | 20 |
| 桥臂电抗/H | 0.038 7 |

式中, P_N 为换流器额定功率, 取 10MW; k 为变压器空载调制比, 取 0.9; N 为单桥臂子模块个数, 取 20; $\omega_0=314.16\text{rad/s}$; ε 为电容电压波动百分比, 取 5%; U_C 为额定电容电压, 取 2kV; $\cos\varphi=1$; I_{km} 取桥臂电流基波分量的 20%。

3.2.1 换流器运行特性测试

测试子模块详细等效模型个数 L 分别为 0、5、10、15 和 20 时桥臂混合仿真模型的精度, 与 PSCAD/EMTDC 详细模型的误差对比见表 2~表 4。表 2 为稳态运行情况下的仿真误差, 表 3 为直流侧双极短路(换流站在故障发生 5ms 后闭锁)情况下的仿真误差, 表 4 为直流正极接地故障情况下的仿真误差。其中, 电容电压、直流电压、直流电流、节点电压误差为两种模型的相对误差; 对于桥臂电流, 由于其存在过零点, 误差取两种模型结果差值的绝对值(标么值)。仿真结果表明, 本文所提模型的平均电容电压、桥臂电流误差很小, 详细等效子模块个数 L 对模型外特性精度几乎没有影响。直流电压波形会有高频不规则的“毛刺”, RTDS 实时仿真的特性使其无法取到与 PSCAD/EMTDC 模型完全相同的时刻, 导致毛刺波形错开, 造成稳态时直流电压有超过 2% 的误差。对应的仿真结果如附图 1~附图 3 所示。

表 2 稳态运行情况下仿真误差

Tab.2 Error of operating characteristic under normal operation situation

| 详细等效子模块个数 L | A 相上桥臂平均电容电压 $U_{Cave_ap}(\%)$ | A 相上桥臂电流 $i_{br_ap}(\text{pu})$ | 直流侧电压 $U_{dc}(\%)$ |
|---------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| 0 | 0.470 8 | 0.008 4 | 2.076 4 |
| 5 | 0.598 9 | 0.004 8 | 2.069 6 |
| 10 | 0.372 3 | 0.001 4 | 1.333 1 |
| 15 | 0.326 2 | 0.003 6 | 1.714 8 |
| 20 | 0.246 6 | 0.002 4 | 2.287 7 |

表 3 直流双极短路故障情况下仿真误差

Tab.3 Error of operating characteristic under bipolar fault of DC system

| 详细等效子模块个数 L | A 相上桥臂平均电容电压 $U_{Cave_ap}(\%)$ | 直流侧电压 $U_{dc}(\%)$ | 直流侧电流 $I_{dc}(\%)$ |
|---------------|---------------------------------|--------------------|--------------------|
| 0 | 0.220 1 | 0.576 1 | 0.392 2 |
| 5 | 0.209 8 | 0.574 3 | 0.406 7 |
| 10 | 0.224 6 | 0.472 9 | 0.370 8 |
| 15 | 0.217 2 | 0.471 4 | 0.385 6 |
| 20 | 0.208 5 | 0.453 6 | 0.401 9 |

表4 直流正极接地故障情况下仿真误差

Tab.4 Error of operating characteristic under DC positive pole to ground fault

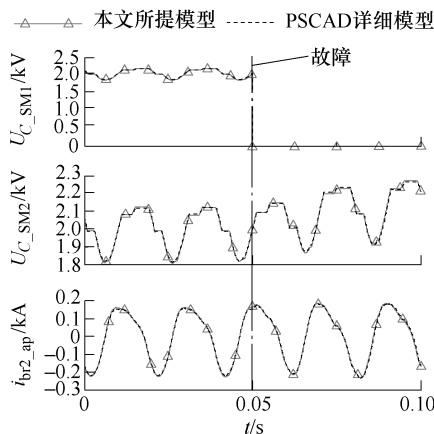
| 详细等效子模块个数 L | A相上桥臂平均电容电压 $U_{C_{ave_ap}}(\%)$ | 直流正极电压 $U_p(\%)$ | A相上桥臂电流 $i_{br_ap}(pu)$ |
|---------------|-----------------------------------|------------------|--------------------------|
| 0 | 0.356 1 | 0.108 2 | 0.005 4 |
| 5 | 0.426 3 | 0.345 7 | 0.006 2 |
| 10 | 0.578 9 | 0.362 3 | 0.007 9 |
| 15 | 0.468 7 | 0.240 3 | 0.001 7 |
| 20 | 0.168 9 | 0.080 6 | 0.002 7 |

3.2.2 子模块故障特性测试

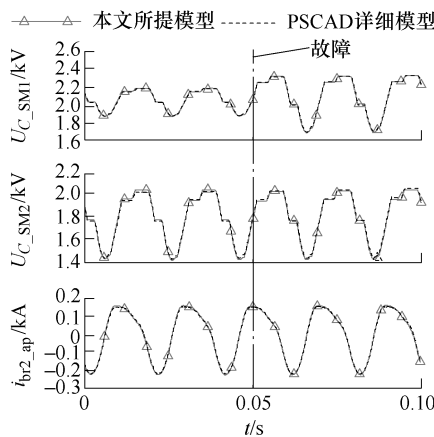
为了使控制信号尽可能与PSCAD/EMTDC详细模型一致,进行子模块故障特性对比测试仿真时,本文所提模型中采用简化等效模型的子模块个数 M 设为0。

1) 电容短路和电容值下降故障

图8a为A相上桥臂第1个子模块 $t=0.05s$ 时刻发生电容短路故障,A相上桥臂第1、2个子模块电容电压 U_{C_SM1} 和 U_{C_SM2} 以及桥臂电流 i_{br2_ap} 的仿真



(a) 电容短路



(b) 电容值下降

图8 电容故障仿真结果

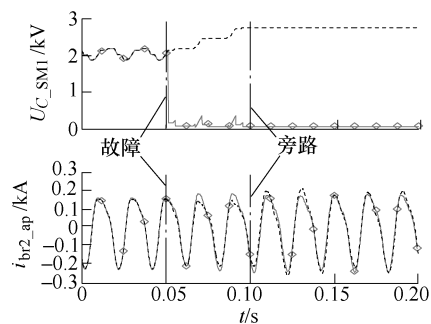
Fig.8 Simulation results of capacitor fault

结果。图8b为A相上桥臂第1个子模块 $t=0.05s$ 时发生电容值下降 1/2 故障的仿真结果,本文所提模型仿真曲线与PSCAD/EMTDC模型一致。误差计算方法与3.2.1节相同,电容短路故障时A相上桥臂第1、2个子模块电容电压相对误差分别为0.215 0%和0.402 9%,桥臂电流误差为0.004 1(pu);电容值下降时三者误差分别为0.402 9%、0.508 6%和0.004 6(pu)。可以看出模型的精度较高,电容电压的误差均小于1%,桥臂电流的误差小于0.01(pu)。

2) IGBT 断路及子模块旁路

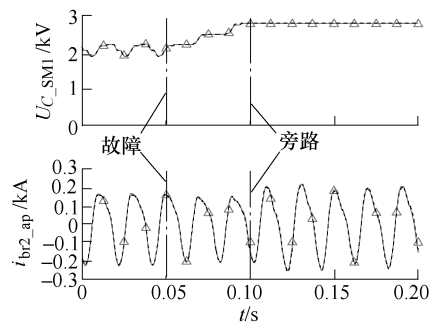
测试A相上桥臂第1个子模块 $IGBT_{1_SM1}$ 在 $t=0.05s$ 时发生断路故障,故障后0.05s故障子模块的旁路开关闭合。A相上桥臂第1个子模块电容电压 U_{C_SM1} 和A相上桥臂电流 i_{br2_ap} 的仿真结果如图9所示。图9中实线为PSCAD/EMTDC详细模型的仿真曲线,图9a中虚线为未采用二极管修正判据的仿真结果,可以看出,不采用二极管修正判据时会出现计算错误。图9b中实线为本文所提模型(采用二极管修正判据)的仿真曲线,与PSCAD/EMTDC详细模型仿真曲线一致,子模块电容电压的相对误差为0.013 8%,桥臂电流误差为0.002 7(pu),模型可以准确模拟IGBT断路和子模块旁路故障特性。

图9 开关元件故障仿真结果



(a) 未采用修正判据

图9 开关元件故障仿真结果



(b) 采用修正判据

图9 开关元件故障仿真结果

Fig.9 Simulation results of switch fault

3.2.3 桥臂故障特性测试

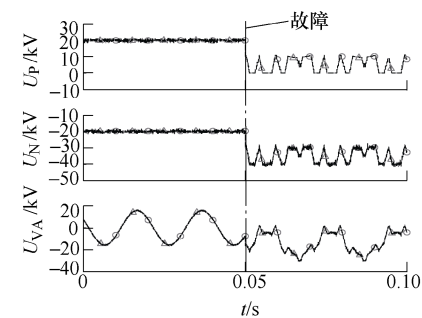
对比本文所提模型和 PSCAD/EMTDC 详细模型在桥臂发生故障时的换流器外特性和子模块特性,在进行换流器外特性对比仿真时,测试有、无简化等效模型两种情况,分别设置 $M=10$ 和 $M=0$;子模块特性仿真测试时,为了子模块控制信号尽可能一致,设置 $M=0$ 。

1) 桥臂接地故障

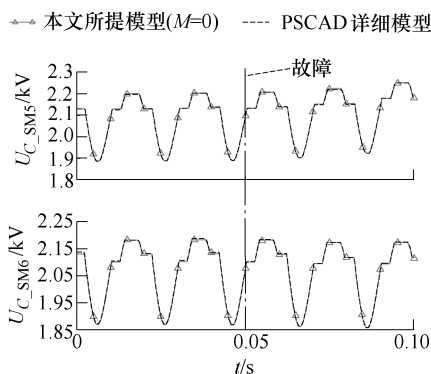
故障节点设置在 A 相上桥臂第 5、6 个子模块之间, $t=0.05\text{s}$ 时故障节点接地故障,该仿真电路变压器接线的零序电路电阻很大,因此发生桥臂接地故障后,由于参考零电位的改变,节点电压会发生偏置,子模块电容电压特性与正常运行状态基本相同。

桥臂接地故障仿真结果如图 10 所示。图 10a 所示为换流器直流正极电压 U_P 、直流负极电压 U_N 和阀侧 A 相电压 U_{VA} 的仿真结果,分别给出了 PSCAD/EMTDC 详细模型仿真结果, $M=0$ 和 $M=10$ 时本文所提模型的仿真结果,两种情况下本文所提模型与 PSCAD/EMTDC 模型的换流器外特性仿真曲线均一致, $M=0$ 时,换流器外特性误差分别为 1.072 3%、2.018 9%和 0.003 9(pu); $M=10$ 时,

—●— 本文所提模型($M=0$) —○— 本文所提模型($M=10$) ---- PSCAD 详细模型



(a) 换流器外特性



(b) 子模块特性

图 10 桥臂接地故障仿真结果

Fig.10 Simulation results of arm to ground fault

误差分别为 1.327 9%、2.125 5%和 0.003 9(pu)。图 10b 所示为 $M=0$ 时, A 相上桥臂第 5、6 个子模块的电容电压 U_{C_SM5} 和 U_{C_SM6} 仿真结果,本文所提模型与 PSCAD/EMTDC 详细模型的仿真曲线基本吻合,第 5、6 个子模块的电容电压误差分别为 0.241 7%和 0.247 5%。模型可以准确模拟桥臂接地故障时的换流器外特性和子模块特性。

2) 桥臂相间短路故障

桥臂相间短路故障设置在 A 相上桥臂和 B 相上桥臂之间, A 相故障点为第 5、6 个子模块之间, B 相故障点为第 10、11 个子模块之间, $t=0.05\text{s}$ 时发生故障。图 11 所示为直流电压 U_{dc} 和 A 相上桥臂故障节点下方的桥臂电流 i_{br2_ap} 的仿真结果,分别给出了 PSCAD/EMTDC 详细模型仿真结果, $M=0$ 和 $M=10$ 时本文所提模型的仿真结果,两种情况下本文所提模型均与 PSCAD/EMTDC 详细模型仿真结果一致, $M=0$ 时直流电压和桥臂电流的误差分别为 1.697 0%和 0.001 8(pu); $M=10$ 时误差为 1.672 8%和 0.001 9(pu)。

图 12 所示为本文所提模型 ($M=0$) 与 PSCAD/EMTDC 详细模型仿真结果对比,图 12a 所示为直流电压 U_{dc} 和 A 相上桥臂故障节点下方的桥臂电流 i_{br2_ap} 的仿真结果,分别给出了 PSCAD/EMTDC 详细模型仿真结果, $M=0$ 和 $M=10$ 时本文所提模型的仿真结果,两种情况下本文所提模型均与 PSCAD/EMTDC 详细模型仿真结果一致, $M=0$ 时直流电压和桥臂电流的误差分别为 1.697 0%和 0.001 8(pu); $M=10$ 时误差为 1.672 8%和 0.001 9(pu)。

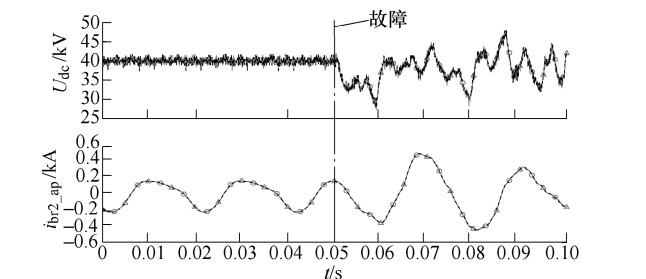
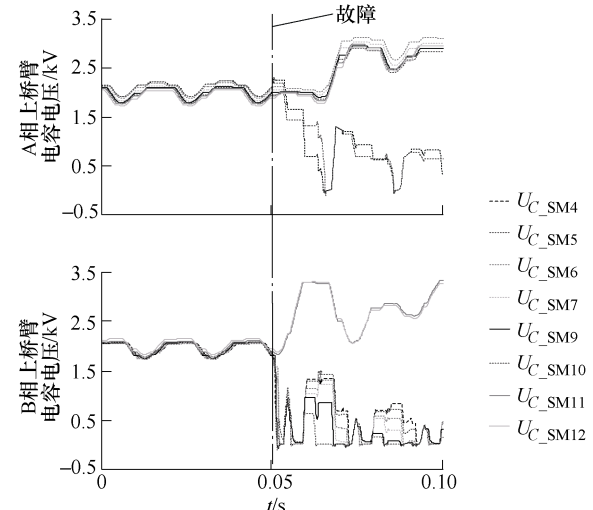


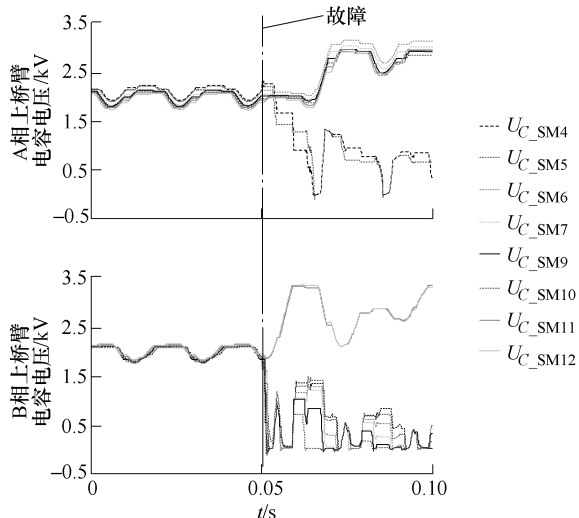
图 11 桥臂相间故障外特性仿真结果

Fig.11 Simulation results of external characteristic of

arm phase to phase fault



(a) RTDS 桥臂混合模型 ($M=0$)



(b) PSCAD/EMTDC 详细模型

图 12 桥臂相间故障子模块特性仿真结果

Fig.12 Simulation results of submodule characteristic arm phase to phase fault

EMTDC 详细模型 A 相上桥臂和 B 相上桥臂子模块电容电压的仿真结果，两者故障后子模块电容电压波形的变化趋势、过零点以及波动幅值等重要特性均一致。

4 结论

本文在 RTDS 平台中的 GPC/PB5 环境下，利用 CBuilder 工具，以桥臂为基本单元，开发了适用于大规模 MMC-HVDC 系统仿真的混合仿真模型，不仅能够仿真高电平 MMC 系统，还能够模拟换流器内部故障，该模型具有如下特征：

1) 为了模拟子模块内部故障，对子模块每个器件的故障状态进行建模，建立子模块内部故障详细等效模型。

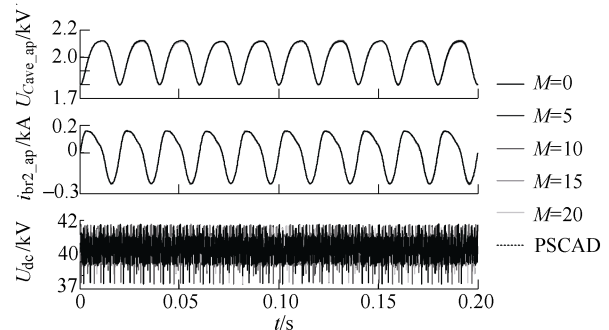
2) 为解决 CBuilder 下资源受限的问题，根据子模块平均电容电压与开关函数和桥臂电流的数学关系，提出一种基于戴维南等效的子模块组简化等效模型，避免了基于受控电压源的简化等效模型存在的滞后一个仿真步长的问题。

3) 采用详细等效和简化等效混合仿真的方法，将桥臂中的所有子模块分为两组：一组为特殊子模块，建立子模块内部故障详细等效模型；其余为另一组，建立子模块组简化等效模型，并在桥臂模型中增设故障节点，使得模型既可用于高电平系统仿真，又能够模拟换流器内部故障，包括子模块内部各类故障和桥臂故障。

通过与 PSCAD/EMTDC 中用器件搭建的详细

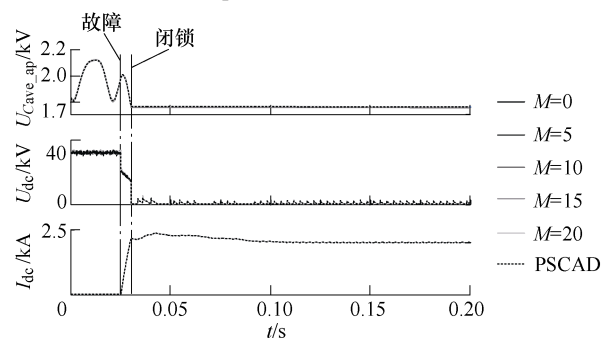
模型进行仿真对比，证明了所提模型的有效性和精确性以及动态下模型的稳定性。

附录



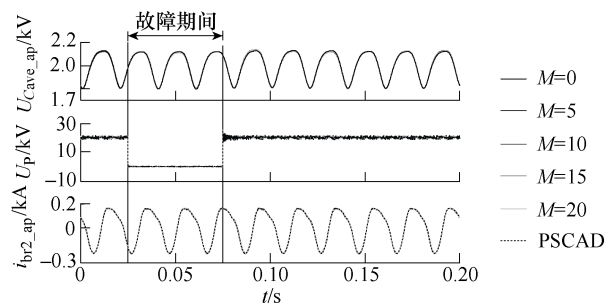
附图 1 稳态运行仿真结果

App.Fig.1 Simulation results of normal operation situation



附图 2 直流双极短路故障仿真结果

App.Fig.2 Simulation results of DC bipolar short circuiting



附图 3 直流正极接地故障仿真结果

App.Fig.3 Simulation results of DC positive pole to ground fault

参考文献

[1] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
 [2] 许建中, 李承昱, 熊岩, 等. 模块化多电平换流器高效建模方法研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3381-3391.

- Xu Jianzhong, Li Chengyu, Xiong Yan, et al. A review of efficient modeling methods for modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3381-3391.
- [3] 刘崇茹, 林雪华, 李海峰, 等. 基于 RTDS 的模块化多电平换流器子模块等效模型[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 93-99.
- Liu Chongru, Lin Xuehua, Li Haifeng, et al. An equivalent sub-module model for modular multilevel converter in RTDS[J]. Automation of Electric Power System, 2013, 37(12): 93-99.
- [4] Liu Chongru, Lin Xuehua, Li Haifeng, et al. Sub-module component developed in CBuilder for MMC control and protection test in RTDS[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2014, 56: 198-208.
- [5] 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.
- [6] 喻锋, 王西田, 林卫星, 等. 模块化多电平换流器快速电磁暂态仿真模型[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 257-263.
- Yu Feng, Wang Xitian, Lin Weixing, et al. Fast electromagnetic transient simulation models of modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 257-263.
- [7] 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.
- [8] 唐寅, 徐政, 刘昇. 改进式模块化多电平换流器快速仿真方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 56-61, 85.
- Tang Yin, Xu Zheng, Liu Sheng. Improved fast model of the modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(24): 56-61, 85.
- [9] Jaime Peralta, Hani Saad, Sébastien Denetiere, et al. Detailed and averaged models for a 401-level MMC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1501-1508.
- [10] Hani Saad, Sébastien Denetiere, Jean Mahseredjian, et al. Modular multilevel converter models for electromagnetic transients[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(3): 1481-1489.
- [11] Julian Freytes, Lampros Papangelis, Hani Saad, et al. On the modeling of MMC for use in large scale dynamic simulations[C]//2016 Power Systems Computation Conference, Genoa, 2016: 20-24.
- [12] 范新凯, 王艳婷, 张保会. 柔性直流电网的快速电磁暂态仿真[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 92-97.
- Fan Xinkai, Wang Yanting, Zhang Baohui. Fast electromagnetic transient simulation for flexible DC grid[J]. Automation of Electric Power System, 2017, 41(4): 92-97.
- [13] 刘崇茹, 洪国巍. 基于 PSCAD 的大规模钳位双分子模块-模块化多电平换流器高效仿真建模方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(2): 113-119.
- Liu Chongru, Hong Guowei. Efficient modeling and simulation method of large-scale modular multilevel converter based on clamp double sub-module in PSCAD[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(2): 113-119.
- [14] Saad H, Peralta J, Denetiere S, et al. Dynamic averaged and simplified models for MMC-based HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 3(28): 1723-1730.
- [15] Xu Jianzhong, Gole A M, Zhao Chengyong. The use of averaged-value model of modular multilevel converter in DC grid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 519-528.
- [16] 陈诗灿, 林琼斌, 陈四雄, 等. 电力电子变流器故障诊断的智能方法综述[J]. 电气技术, 2019, 20(3): 6-12.
- Chen Shican, Lin Qiongbina, Chen Sixiong, et al. Review on intelligence fault diagnosis in power electronic converters[J]. Electrical Engineering, 2019, 20(3): 6-12.
- [17] Real time digital simulator power system and control user manual[R]. RTDS Technologies, 2017.
- [18] 郑涛, 张滋行. 基于半桥子模块的模块化多电平换流器内部故障诊断及对策[J]. 电力建设, 2018, 39(6): 42-48.
- Zheng Tao, Zhang Zihang. Research on internal fault diagnosis and counter measure of modular multilevel

- converter based on half bridge sub-modules[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(6): 42-48.
- [19] 范志华, 苗世洪, 刘子文, 等. 模块化多电平换流器子模块故障特性分析与解耦控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(16): 3707-3718.
Fan Zhihua, Miao Shihong, Liu Ziwen, et al. Modular multilevel converter sub-module fault characteristics analysis and decoupling control strate[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(16): 3707-3718.
- [20] 郝亮亮, 张静, 顾亚旗, 等. 基于桥臂能量预测的模块化多电平换流器子模块故障优化容错控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(16): 3697-3706.
Hao Liangliang, Zhang Jing, Gu Yaqi, et al. Sub-module fault tolerant optimal control strategy of modular multilevel converter based on estimati[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(16): 3697-3706.
- [21] 王洁聪, 刘崇茹, 徐东旭, 等. 基于 RTDS 的 MMC 闭锁状态仿真建模方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(16): 3686-3696.
Wang Jiecong, Liu Chongru, Xu Dongxu, et al. Simulation method of MMC blocking state based on RTDS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(16): 3686-3696.
- [22] 赵昕, 赵成勇, 李广凯, 等. 采用载波移相技术的模块化多电平换流器电容电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(27): 48-54.
Zhao Xin, Zhao Chengyong, Li Guangkai, et al. Submodule capacitance voltage balancing of modular multilevel converter based on carrier phase shifted SPWM technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(27): 48-54.
- [23] 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.
Yang Xiaofeng, Zheng Qionglin. A novel universal circulating current suppressing strategy based on the MMC circulating current model[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(18): 59-65.

作者简介

王洁聪 女, 1992 年生, 博士研究生, 研究方向为柔性直流输电。

E-mail: wangjiecong@ncepu.edu.cn

刘崇茹 女, 1977 年生, 博士, 教授, 研究方向为交直流混合系统分析与仿真、运行与控制。

E-mail: chongru.liu@ncepu.edu.cn (通信作者)

(编辑 崔文静)