

一种适用于 MMC 的混合步长电磁暂态仿真方法

林 毅¹, 林 威¹, 刘 鑫², 刘崇茹²

(1. 国网福建省电力有限公司经济技术研究院, 福建 福州 350000; 2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘 要:随着“双碳”目标的提出,大量新能源接入电网,以模块化多电平换流器(modular multilevel converters high voltage dc, MMC)为代表的柔性直流输电系统获得广泛的工程应用。而电磁暂态仿真在 MMC 系统规划与运行过程中均发挥重要作用,但是大步长机电暂态仿真精度不足,小步长电磁暂态仿真耗时过长,无法适应 MMC 的发展需求。因此基于混合仿真的基本思想,将 MMC 详细等效模型拆分为交流和直流两部分,建立了接口等值模型,提出数据交互算法,从而实现交流系统使用大步长仿真、直流系统采用小步长仿真。基于 PSCAD/EMTDC 的 MMC 系统仿真验证表明,混合仿真方法相较于大步长机电暂态仿真的仿真精度明显提高,相较于小步长电磁暂态仿真的仿真时间大幅缩短。

关 键 词:模块化多电平换流器;混合步长仿真;接口模型;仿真精度

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.02.007 中图分类号: TM744 文章编号: 1673-9140(2023)02-0058-09

A hybrid step-size electromagnetic transient simulation method suitable for MMC

LIN Yi¹, LIN Wei¹, LIU Xin², LIU Chongru²

(1. State Grid Fujian Economic Research Institute, Fuzhou 350000, China; 2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: With the proposal of "double carbon" goal, many new energy sources are connected to the power grid, and the flexible DC transmission system represented by modular multilevel converters (MMC) has been widely used in engineering. Electromagnetic transient simulation plays an essential role in the planning and operation of the MMC system, but the accuracy of the large-step electromechanical transient simulation needs to be improved, and the small-step electromagnetic transient simulation takes too long to meet the development needs of MMC. Therefore, based on the basic idea of the hybrid simulation, the MMC detailed equivalent model is divided into AC and DC parts, the interface equivalent model is established, and the data interaction algorithm is proposed, so as to realize the long-step simulation of AC system and small-step simulation of DC system. The simulation verification of the MMC system based on PSCAD/EMTDC shows that the simulation accuracy of the hybrid simulation method is obviously improved compared with the large-step electromechanical transient simulation, and the simulation time is greatly shortened compared with the small-step electromagnetic transient simulation.

Key words: modular multilevel converter; hybrid step simulation; interface model; simulation precision

收稿日期: 2022-03-14; 修回日期: 2022-08-29

基金项目: 国网福建省电力有限公司科技项目(52130N20000C)

通信作者: 刘崇茹(1977—), 女, 博士, 教授, 主要从事交直流输电系统分析、稳定和控制研究; E-mail: chongru.liu@ncepu.edu.cn

电磁暂态仿真是电力系统模拟的重要组成部分之一,它能准确地模拟系统的动态过程,对物理现象刻画深刻,数值收敛性好,这种仿真可以应用于电力系统的规划、设计、运行及科学研究等领域,是学习和探究电力系统暂态复杂行为机理的必要工具^[1]。

典型的对交直流混联大系统的仿真分析通常采用机电暂态模型,积分步长一般为毫秒级,其仿真过程忽略了复杂的电磁过程,结果更接近于稳态^[2]。电磁暂态仿真更关注系统的动态行为和暂态过程,积分步长为微秒级^[2]。

针对VSC-HVDC系统,需要根据仿真需求选择机电暂态仿真、电磁暂态仿真或机电—电磁混合仿真方法中的一种。文献[3]总结了VSC-HVDC的机电暂态数学方程,并基于机电仿真程序PSS/E的用户自定义模型实现了VSC-HVDC系统的机电暂态仿真。文献[4]为了解决VSC-HVDC交流侧数学模型不能精确解耦的问题,建立了基于 $\alpha\beta$ 静止坐标系的VSC-HVDC机电暂态模型,并利用PSASP_UPI编写VSC-HVDC系统子程序实现机电暂态仿真,为了更好地体现VSC控制器动态响应,其机电仿真过程采用了双时步的仿真方法。文献[5-6]分别提出了电磁暂态仿真程序(PSCAD/EMTDC)下适用VSC-HVDC和MMC-HVDC的电磁暂态仿真模型,并作了仿真分析,后者还详细介绍了MMC的子模块戴维南等效模型。文献[7-8]介绍了VSC-HVDC系统的小时步仿真在实时仿真器RTDS中的应用。文献[9]提出了一种混合仿真方法,可用PSCAD程序调用嵌入的机电暂态仿真程序(transient simulation program, TSP)对外部系统进行功角仿真,而PSCAD自带的元件图库方便地搭建柔性交流输电系统(FACTS)元件及其控制器电路,对其进行精确的电磁暂态仿真,从而实现全系统的混合仿真。文献[10]提出了一种电力系统电磁—机电暂态联合模拟的通用接口,在对暂态网络计算时,机电暂态网络进行戴维南等值;在对机电暂态网络计算时,电磁暂态网络进行诺顿等值。当柔性直流输电接入交流系统时,交流系统的运行控制需要考虑更多的细节。当所连接的直流线路增加与电压等级提升时,模拟数据的计

算规模将会出现指数型增长^[11-13]。文献[14]采用了VSC-HVDC的混合仿真技术,在一定程度上提高了VSC仿真模型的仿真速度并能很好地反映VSC-HVDC的动态特性。

目前针对模块化多电平换流器开关器件的精确仿真,一般都是在电磁暂态仿真程序下采用微秒级的步长进行仿真计算。但是,当系统规模较大时,仿真耗时过长,严重降低仿真效率。工程实际中,MMC-HVDC的控制系统的控制周期是固定的,一般为50 μs 或100 μs 。

为了兼顾仿真时长与仿真精度,本文针对PSCAD/EMTDC本身不具备实现混合仿真的条件,提出在PSCAD/EMTDC环境下实现MMC桥臂器件在小步长下仿真、控制系统以及交流系统在大步长下仿真的MMC-HVDC系统多种步长结合的电磁暂态仿真算法。在PSCAD/EMTDC环境下搭建单端MMC-HVDC系统,运用混合步长电磁暂态仿真算法,通过比较MMC桥臂仿真小步长下,控制系统以及交流系统在不同步长下的仿真时间和MMC桥臂电压的仿真精度,证实仿真准确度和仿真花费时间方面,本文提出的多种步长仿真算法具有更好的优越性。另外搭建双端MMC-HVDC系统,将其中一端采用混合步长仿真算法的换流站代替,从系统动态响应特性方面验证该算法的可靠性和实用性。

1 MMC桥臂详细模型等效方法

MMC桥臂详细等效模型基于Dommel等值原理建立的戴维南等值模型,模块化多电平换流器的六桥臂上级联的 N 个子模块等值为 N 个戴维南等值电路串联的形式,每个戴维南等值电路中包含一个戴维南电压源和串联的等效电阻^[15-16],等效后整个MMC换流器的结构如图1所示, L_0 为桥臂电感。

实际运行中,当MMC直流侧发生故障时,子模块会闭锁隔离故障。闭锁状态的桥臂等值模型如图2所示。其中,EN表示上IGBT触发信号,取值0、1分别代表闭锁和正常状态; D_1 、 D_2 表示桥臂等值后的二极管元件; U_{am} 表示桥臂电压; I_{am} 表示流过

桥臂的电流; ΣR_{eq} 、 ΣU_{ceq} 分别表示单个桥臂上串联的所有子模块电容的戴维南等值电阻之和以及戴维南等效电压源之和。

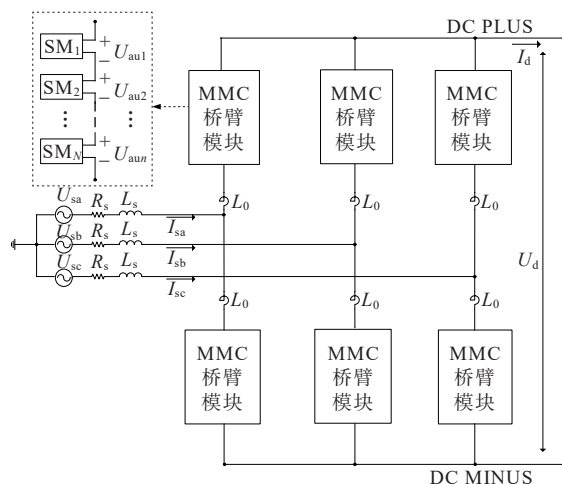


图1 MMC换流器等效结构

Figure 1 Topology of MMC-HVDC system

在关断状态下,子模块中只存二极管元件,所有IGBT闭锁。在静态电磁转换模拟程序中,应对二极管进行插值,以正确模拟二极管的单向导电性^[17]。由于PSCAD/EMTDC不提供插补算法的外部接口,用户很难适应插补算法的应用。因此,使用集成在PSCAD/EMTDC中的二极管元件来模拟桥架的锁定距离。整体闭锁时,IGBT的触发信号EN为0,桥臂各子模块的控制信号强制为1,每个子模块投入电路部分相当于电容;正常状态下,IGBT的触发信号EN为1,由于电容电压的恒定正特性,所有子模块的控制信号由外部控制器决定。具体电路通路如图2的加粗黑线所示,因为子模块成串联结构,所有子模块流过的电流相等,从而在整个桥臂等值模型中加入二极管能正确模拟闭锁状态。

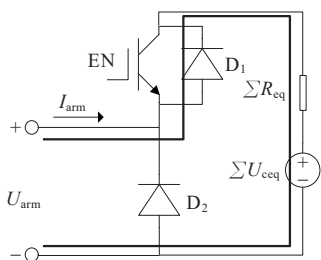


图2 闭锁状态下桥臂等值模型

Figure 2 Topology of bridge arm model in blocked state

2 PSCAD下的混合步长电磁暂态仿真原理

2.1 混合步长仿真的整体实现

多仿真接口实现方法逻辑如图3所示。

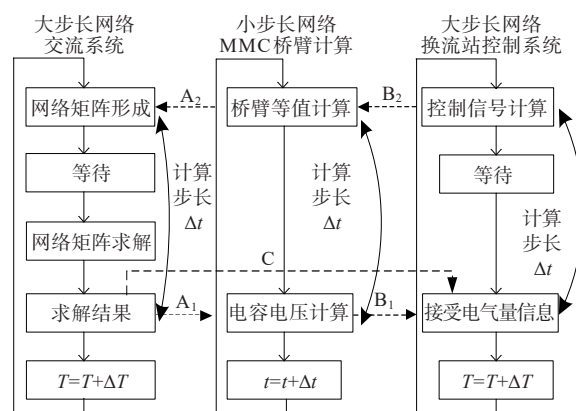


图3 接口实现方法逻辑

Figure 3 Frame system of the interface model

图3的3个主框图依次是交流一次系统、MMC电容电压计算、换流站系统,它们负责的逻辑计算内容如下。

- 1) 交流一次系统单元:负责交流一次系统的模拟验证,它的功能是求解整体等值网络矩阵。
- 2) MMC桥臂计算单元:计算桥臂的戴维南等值电路,包括所有桥臂中子电容的电压。
- 3) 换流站的控制单元:担任电容电压均衡控制、功率平衡和MMC桥臂中环流控制任务。

图3中关于数据交互模块的结构功能如下。

A₁:将大步长网络求解得到的桥臂电流 I_{arm} 传输给MMC桥臂模拟电容电压。

A₂:将MMC桥臂计算单元得到的等效电路参数传输给交流系统。

B₁:将MMC桥臂计算单元求解的电容电压传输给换流站控制系统。

B₂:分析前一步长的系统状态,把控制信号送给MMC桥臂的分析模块。

C:把MMC桥臂计算单元得到的电气信号送给换流站控制系统。

ΔT 表示电磁暂态仿真大步长, Δt 表示电磁暂态仿真小步长。

2.2 接口位置的选取

混合步长电磁暂态混合仿真接口问题,其主要思路是:将仿真的系统根据用户自身的需求拆分成需要精确仿真的网络和不需要精确仿真的网络,并选择合适的接口位置,建立起两部分的电气联系;精确仿真的网络在用户定义的小步长下仿真,不需要精确仿真的网络在电磁暂态仿真程序定义的大步长下仿真。

上述混合步长仿真接口的模拟,应从以下 4 个方面进行:①接口位置的选择;②大小步长网络接口等值模型的建立;③接口模型的整体实现;④接口仿真时序的给定。

对于 MMC-HVDC 系统,在系统换流器的出口母线设置接口。大小步长电磁暂态网络对彼此的等值比较简单,同时网络复杂程度不会限制这种等值^[18]。

2.3 大小步长网络接口等值模型

如图 4 所示, v 点为大小步长网络分割点,分割点左侧为交流系统大步长网络,分割点为需要更精确仿真的小步长网络。大步长网络对小步长网络的接口模型等效为注入网络分割点的受控电流源 I_t ,它的大小是流经 MMC 桥臂电流 I_{arm} ;反之可等效成和 MMC 桥臂并联的电压源 V_t ,电压源 V_t 的大小等于桥臂电感的压降总和。

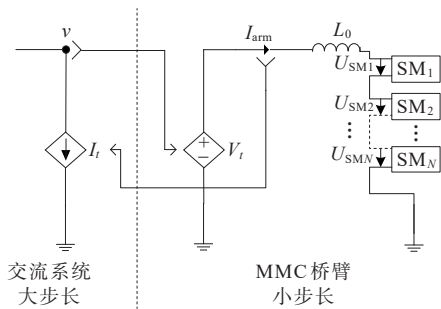


图 4 大小步长接口等值模型设计

Figure 4 Interface model for different time step

2.4 电磁暂态大步长网络和小步长网络时序接口设计规则

基于 MMC 的电磁暂态混合步长仿真的基本原理为:拆分的大小步长网络分别利用对侧网络上一步长的计算结果,结合本侧网络参数进行计算,两侧网络由于选择的计算步长不同,其数据交互在特定的时间点进行,一般选择在大步长网络的各时间

点进行数据交互。大步长网络和小步长网络时序接口流程如图 5 所示。

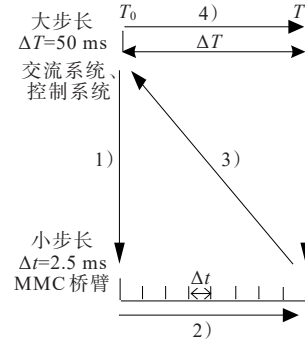


图 5 大小步长接口等值模型设计

Figure 5 Interface model for different time step

具体交换过程如下。

1) 仿真初始时刻,小步长网络的 MMC 桥臂接收大步长网络传来的桥臂电流及控制信号。

2) 小步长网络计算中,MMC 桥臂计算单元依据戴维南等值原理得到等值网络的 U_{eq} 、 R_{eq} 以及电容电压 U_c ,并计算总的桥臂电压 U_{armeq} ,这个时候大步长交流系统的仿真处于暂停状态。

3) 由于前一阶段的计算中每一个小步长都需要重新得到一次总的桥臂电压 U_{armeq} ,最后传递给大步长交流系统的桥臂等效电压源 $U_{armeq}(T_{big})$ 如下:

$$U_{armeq}(T_{big}) = \frac{\sum_{i=1}^k U_{armi}(t_{small})}{k} + U_{L0} \quad (1)$$

式中, $U_{armi}(t_{small})$ 为交流网络小步长模拟时每次等效计算的桥臂电压; U_{L0} 为桥臂电感上的电压; k 为交流网络小步长模拟时重复次数。

除此之外,柔性直流的触发信号需要步骤 2) 中仿真得到的电容电压 U_c 经过控制回路,利用均压控制策略产生。电容电压 U_c 如下:

$$U_c(t_2) = \frac{\Delta t}{2C} [I_c(t_1) + I_c(t_2)] + U_c(t_1) \quad (2)$$

式中, t_1 和 t_2 为 2 个相邻计算时间,且有 $t_2 = t_1 + \Delta t$; C 为电容值; $I_c(t_1)$ 、 $I_c(t_2)$ 为不同时间流过 MMC 桥臂子电容的电流; $U_c(t_1)$ 为 t_1 时刻的 MMC 桥臂的电容电压。

由于小步长网络计算的电容电压要利用当前时刻以及前一时刻的值,因此传回大步长网络控制系统的电容电压应是在大步长 ΔT 时间内最后一个小步长计算得到的 U_c ,因为在时序上二者最接近。

4) 接收步骤3)得到的控制系统和交流一次系统的网络参数,将控制系统再产生 T_1 时刻的触发脉冲信号,交流系统再计算 T_1 时刻的 I_{arm} ,大步长网络计算得到的桥臂电流和触发信号作为下次数据交互小步长网络计算的初值。

2.5 大小步长交互仿真流程图

由文2.4中提出的电磁暂态过程仿真混合仿真步长接口设计规则,得出基于PSCAD/EMTDC的混合仿真接口逻辑程序流程如图6所示。

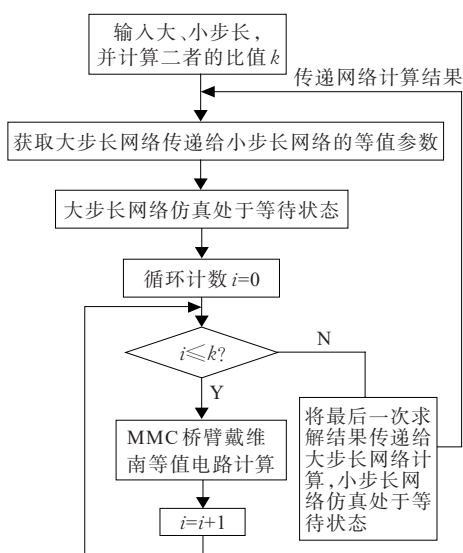


图6 接口逻辑程序实现流程

Figure 6 Flow diagram of the interface logic

3 仿真分析

3.1 仿真耗时分析

本文选择表1所示的3种方案来验证所提出的混合步长仿真算法的性能。

表1 3种方案的仿真步长分配

Table 1 Simulation time step for different cases

方案	仿真步长/ μs		
	交流系统	MMC等效桥臂模型	控制系统
1	2.5	2.5	2.5
2	50	2.5	50
3	50	50	50

采用Intel(R) Core(TM) i5-3330CPU处理器,8 GB内存,主频为3.00 GHz配置的电脑进行仿真,测试系统为单端101电平MMC-HVDC系统,系统

参数如表2所示。

表2 测试参数

Table 2 Introduction of the test system

交流系统				
U_{ac}/kV	R_s/Ω	L_s/H	P_s/MW	Q_s/MVar
110	0.314 2	0.001	100	50
MMC				
C_{sm}/F	L_{arm}/H	U_{dc}/kV	R_{dc}/Ω	L_{dc}/H
0.025	0.007 5	200	0.14	0.023

设置仿真时间为1 s,换流器A相上桥臂的等效建模、单端101电平模块化多电平换流器型高压直流输电系统开始执行仿真程序以及仿真程序运行完成的CPU工作时间如表3所示。

表3 仿真耗时对比

Table 3 Statistics for the equivalent arm progress time-consuming of different cases

方案	桥臂耗时 t_{CPU}/s	系统耗时 T_{CPU}/s
1	4.875 0	74.875 0
2	3.968 8	26.921 9
3	0.265 6	6.250 0

由表3可以看出,方案2无论桥臂仿真耗时还是系统耗时都介于方案1和方案3之间,且在减少系统仿真耗时上效果较为明显。

3.2 稳态仿真精度验证

对图7所示101电平单端MMC-HVDC系统进行仿真,系统参数见表2,使用P-Q的控制方式,底层阀控方法采取基于NLM调制的分层排序电压均衡控制。桥臂的电压波形如图8所示,由图8分析可得,3种方案下的桥臂电压仿真精度很高。考虑到方案1的交流系统计算步长为 $2.5 \mu\text{s}$,方案2、3的交流系统计算步长均为 $50 \mu\text{s}$,为了进一步分析3种方案对于桥臂电压仿真精度的误差,认为小步长仿真的仿真精度最高,因此本文选取 $50 \mu\text{s}$ 计算步长下方案1中20次桥臂电压计算均值分别与 $50 \mu\text{s}$ 计算步长下方案2和方案3的桥臂电压计算值作对比。

在Matlab中编制程序计算三者之间的绝对误差,绝对误差的计算式如下:

$$U_{\text{err1}} = |U_{\text{armb}} - U_{\text{arms}}| \quad (3)$$

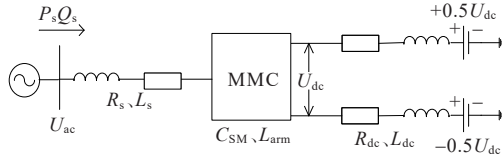


图7 101电平单端MMC-HVDC系统

Figure 7 Structure of the 101-level MMC-HVDC system

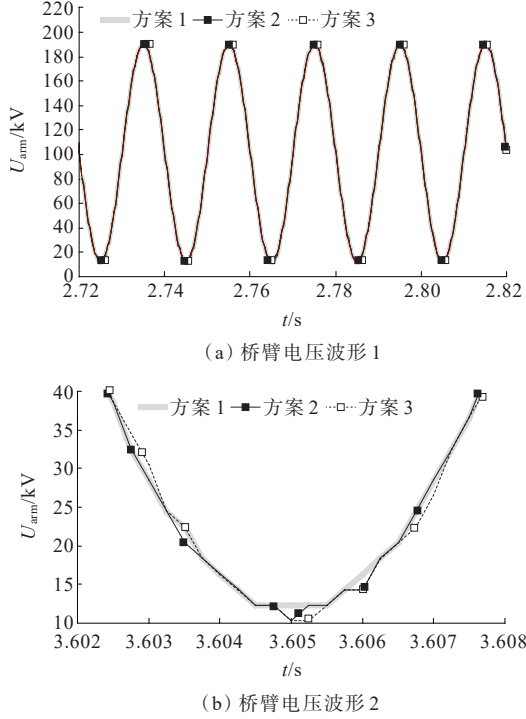


图8 桥臂电压对比

Figure 8 Comparison of the arm voltage among three cases

$$U_{err1} = |U_{armb} - U_{arms}| \quad (4)$$

式中, U_{err1} 为方案2相对方案1的绝对误差, U_{err2} 为方案3相对方案1的绝对误差; U_{arms} 为方案1的桥臂电压; U_{armb} 为方案2的桥臂电压; U_{armd} 为方案3的桥臂电压。

为了进一步分析方案2、3相对方案1的误差, 计算 e_{sum1} 、 e_{sum2} 、 s_{err1}^2 、 s_{err2}^2 , 其具体计算式为

$$\begin{cases} e_{sum1} = \sum_{i=10001}^{20000} U_{err1}(i) \\ e_{sum2} = \sum_{i=10001}^{20000} U_{err2}(i) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} s_{err1}^2 = \frac{\sum_{i=10001}^{20000} (U_{err1}(i) - \overline{U_{err1}}(i))^2}{10000} \\ s_{err2}^2 = \frac{\sum_{i=10001}^{20000} (U_{err2}(i) - \overline{U_{err2}}(i))^2}{10000} \end{cases} \quad (6)$$

式(5)、(6)中, e_{sum1} 、 e_{sum2} 分别为绝对误差 U_{err1} 、 U_{err2} 在 2.5~3 s 仿真时间时 1×10^4 次计算之和; $\overline{U_{err1}}(i)$ 、 $\overline{U_{err2}}(i)$ 分别为 U_{err1} 、 U_{err2} 在 2.5~3 s 仿真时间时 1×10^4 次计算的平均值; s_{err1}^2 、 s_{err2}^2 分别为 U_{err1} 、 U_{err2} 在 2.5~3 s 仿真时间时 1×10^4 次计算的方差。

具体计算结果如表4所示。

表4 误差对比情况

Table 4 Comparison of the absolute error

绝对误差	$e_{sum}/(10^3 \text{ kV})$	方差 s_{err}^2
U_{err1}	3.754 9	0.066 4
U_{err2}	3.808 9	0.068 6

经比较, 方案2绝对误差的方差以及绝对误差之和比方案3的更小, 因此方案2比方案1的精度更高。

3.3 暂态仿真精度分析及双端系统的应用

1) 暂态仿真精度分析。

图7的单端柔直系统设置在 $t=1$ s 时刻发生双极短路故障, 故障持续时间为 5 ms, $t=1.005$ s 时子模块闭锁, 图9对比了3种方案在发生直流侧双极短路故障下的暂态特性。

以方案1(小步长)仿真图形为基准, 由图9可得, 第2种方案的仿真精度介于第1种方案和第3种方案之间。比较第2种方案和第3种方案, 可以得到大步长模型和混合步长交互模型对模块化多电平变流器高压直流输电系统动态响应特性基本一致的结论。

2) 双端系统的应用。

将本算法应用在双端系统中, 系统参数见表5, 并对比混合步长模型(整流侧采用大小步长交互详细桥臂模型, 逆变侧采用大步长详细桥臂等效模型)和同为大步长模型(整流、逆变侧均为大步长详细桥臂等效模型)在功率阶跃时的系统稳定性特性如图10所示。

表5 双端系统参数

Table 5 Two terminal system parameters

参数	整流侧 MMC ₁	逆变侧 MMC ₂
交流侧电阻	$R_{s1}=0.01 \Omega$	$R_{s2}=0.01 \Omega$
交流侧电感	$L_{s1}=0.001 \text{ H}$	$L_{s2}=0.001 \text{ H}$
换流变压器阀侧等值电阻	$R_1=0.01 \Omega$	$R_2=0.01 \Omega$
换流变压器阀侧等值电感	$L_1=0.001 \text{ H}$	$L_2=0.001 \text{ H}$
直流侧电阻	$R_{dc}=0.15 \Omega$	$R_{dc}=0.15 \Omega$
直流侧电感	$L_{dc}=0.125 \text{ H}$	$L_{dc}=0.125 \text{ H}$
桥臂电感	$L_{arm1}=40 \text{ mH}$	$L_{arm2}=7 \text{ mH}$
传输功率	$P_{s1}=300 \text{ MW}$ $Q_{s1}=-30 \text{ Mvar}$	$P_{s2}=-300 \text{ MW}$ $Q_{s2}=0 \text{ Mvar}$
直流电压	$U_{dc}=200 \text{ kV}$	$U_{dc}=200 \text{ kV}$
子模块电容	$C=30 \text{ mF}$	$C=30 \text{ mF}$

图10中, Q_{ddt} 代表混合步长模型中的无功功率, P_{ddt} 、 $U_{\text{dc_ddt}}$ 分别为其中的有功功率和直流电压; P 、 Q 、 U_{dc} 代表大步长模型下的有功功率、无功功率和直流电压,由图10可以看出,两种模型的控制响应并无明显区别,它们的响应时间为10~20 ms,并最后达到了参考指令。

由上述分析可得,当系统运行状况改变时,采用混合仿真系统能够保证系统的稳定运行。混合仿真系统与大步长仿真系统相比,在二者对模块化多电平变流器高压直流输电系统的动态特性的反应几乎相同,说明大小步长系统的稳定性较好。

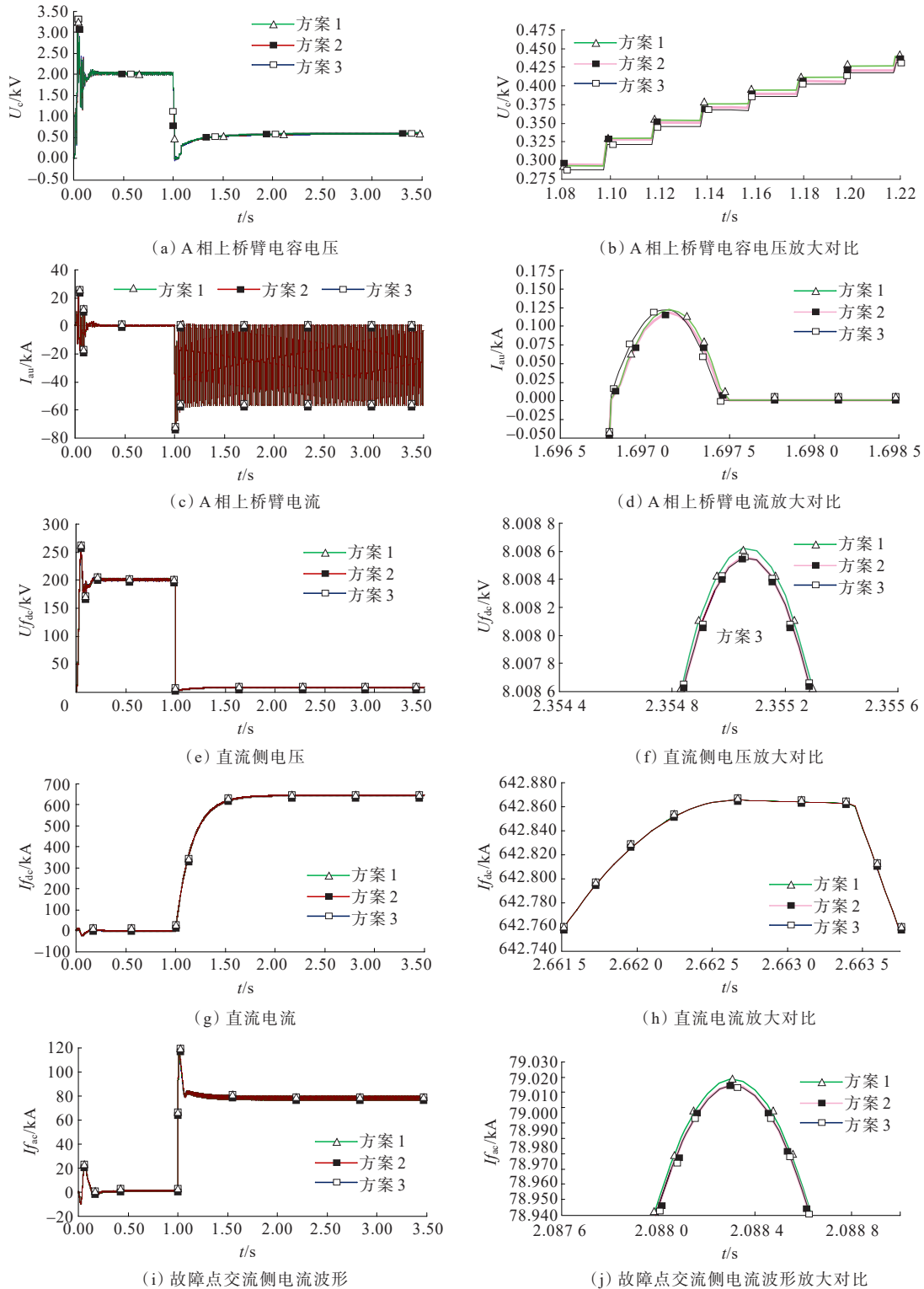


图9 3种方案下双极短路故障特性

Figure 9 Simulation results in bipolar short circuit fault on DC side among three cases

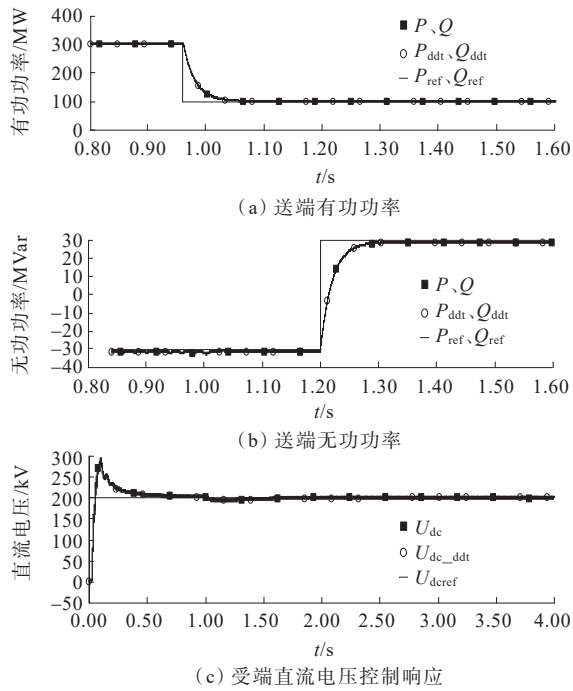


图10 功率阶跃时系统稳定性特性

Figure 10 Characteristics of stability in power step

3.4 机电暂态仿真对比

前述方案3的仿真步长为 $50\mu\text{s}$,本质上仍属于大步长的电磁暂态仿真。于是对比基于动态相量模型的机电暂态仿真方法^[19],以研究混合步长仿真方法同机电暂态仿真的差异。其中机电暂态仿真步长设置为 1ms 。

图11为仿真结果对比,可以看出采用不同仿真算法时,混合步长电磁暂态仿真算法与电磁暂态仿

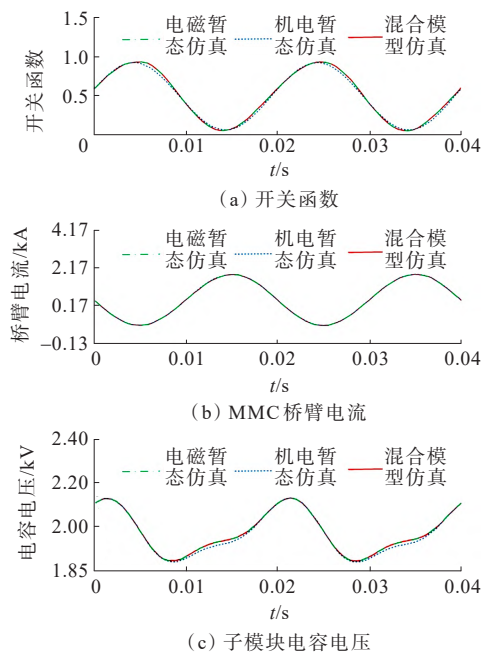


图11 仿真结果对比

Figure 11 Comparison results of simulation

真算法的曲线高度重合,说明混合步长仿真精度高于机电暂态仿真。同时机电暂态仿真耗时 1.364s ,混合步长电磁暂态仿真算法耗时 9.647s ,电磁暂态仿真耗时 18.515s 。因此混合步长仿真算法相较于电磁暂态仿真能显著减少系统仿真耗时,相较于机电暂态仿真在用时稍多的前提下有效提高仿真精度。

4 结语

本文在现有机电-电磁暂态混合仿真接口原理的基础上,提出了一种基于电磁暂态仿真软件PSCAD/EMTDC实现MMC型柔性直流输电系统混合步长仿真的算法。在PSCAD下就系统稳态、暂态以及动态响应进行了仿真验证,所提出的混合步长仿真算法可以很好地适应系统稳定运行、故障情况,还可扩展应用于多端MMC-HVDC系统的动态响应研究。与小步长电磁暂态仿真相比,减少了仿真算法耗时;与大步长电磁暂态仿真相比,有效地提高了仿真的仿真精度。本文的分析还存在不足,没有实现在PSCAD下交流系统、控制系统、桥臂器件三部分均在不同步长下的仿真,以后的工作将针对这方面展开。

参考文献:

- [1] 何海林,史华勃,王顺亮,等.用于大规模机电-电磁暂态仿真模型自动转化的分层布局方法[J].中国电力,2022,55(9):111-120.
HE Hailin, SHI Huabo, WANG Shunliang, et al. Hierarchical layout method for automatic transformation of large-scale electromechanical-electromagnetic transient simulation model[J]. Electric Power, 2022, 55(9): 111-120.
- [2] 王路,李兴源,罗凯明,等.交直流混联系统的多速率混合仿真技术研究[J].电网技术,2005,29(15):23-27.
WANG Lu, LI Xingyuan, LUO Kaiming, et al. Study on multirate hybrid simulation technology for AC/DC power system[J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 23-27.
- [3] 刘昇,徐政,唐庚,等.VSC-HVDC机电暂态仿真建模及仿真[J].电网技术,2013,37(6):1672-1677.
LIU Sheng, XU Zheng, TANG Geng, et al. Electromechanical transient modeling and simulation for voltage source converter based HVDC power transmission [J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1672-1677.

- [4] 张芳,李静远,李传栋.含VSC-HVDC交直流混合系统机电暂态仿真研究[J].电力自动化设备,2016,36(2):17-24.
ZHANG Fang, LI Jingyuan, LI Chuandong. Electromechanical transient simulation of AC/DC hybrid systems containing VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(2):17-24.
- [5] QAHRAMAN B, RAHIMI E, GOLE A M. An electromagnetic transient simulation model for voltage sourced converter based HVDC transmission[C]// Electrical and Computer Engineering ,Niagara Falls,Ont, Canada,2004.
- [6] 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, 2010, 26(1):316-324.
- [7] OU K,MAGUIRE T,WARKENTIN B,et al.Research and application of small time-step simulation for MMC VSC-HVDC in RTDS[C]// International Conference on Power System Technology.Chengdu,China,2014.
- [8] MAGUIRE T,GIESBRECHT J.Small time-step ($\leq 2\ \mu\text{s}$) VSC model for the real time digital simulator[C]// International Conference on Power Systems Transients, 2005.
- [9] 鄂志君,房大中,王立伟,等.基于EMTDC的混合仿真算法研究[J].继电器,2005,33(8):47-51.
E Zhijun,FANG Dazhong,WANG Liwei,et al.Research of hybrid simulation algorithm based on EMTDC[J]. Relay, 2005,33(8):47-51.
- [10] 和萍,李钊,李从善,等.基于虚拟同步机技术的储能机电暂态特性建模[J].电力系统保护与控制,2022,50(7):11-22.
HE Ping, LI Zhao, LI Congshan, et al. Electromechanical transient modeling of energy storage based on virtual synchronous machine technology[J]. Power System Protection and Control,2022,50(7):11-22.
- [11] 李占凯,李炬,张福民,等.基于交流信号注入的混合微电网功率均衡策略[J].电网与清洁能源, 2022, 38(2): 18-26+34.
LI Zhankai, LI Ju, ZHANG Fumin, et al. Power balance control strategy of hybrid microgrid based on AC signal injection[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(2): 18-26+34.
- [12] 刘栋,汤广福,贺之渊,等.模块化多电平柔性直流输电数字—模拟混合实时仿真技术[J].电力自动化设备, 2013,33(2):68-73+80.
LIU Dong, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. Hybrid real-time simulation technology for MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(2):68-73+80.
- [13] 刘栋,汤广福,郑健超,等.模块化多电平换流器小信号模型及开环响应时间常数分析[J].中国电机工程学报, 2012,32(24):1-7.
LIU Dong, TANG Guangfu, ZHENG Jianchao, et al. Small signal modeling and analysis of open-loop response time constant of MMC[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(24): 1-7.
- [14] 杨景刚,赵科,高山,等.多端口混合直流断路器特性分析及其仿真研究[J].高压电器, 2021,57(12):50-56.
YANG Jinggang,ZHAO Ke,GAO Shan,et al.Characteristic analysis and simulation study of multi-port hybrid DC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2021,57(12): 50-56+66.
- [15] 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.
- [16] 郭高朋,胡学浩,温家良,等.基于大规模子模块群的MMC建模与快速仿真算法[J].电网技术,2015,39(5):1226-1232.
GUO Gaopeng, HU Xuehao, WEN Jialiang, et al. A large-scale submodule group based algorithm for modeling and high-speed simulation[J]. Power System Technology,2015,39(5):1226-1232.
- [17] 唐庚,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 Geng,XU Zheng,LIU Sheng.Improved fast model of the modular multilevel converter[J].Automation of Electric Power Systems,2014,38(24):56-61+85.
- [18] 何昊,崔成,贾希浩,等.基于暂态响应轨迹的光伏逆变器参数辨识方法[J].智慧电力,2022,50(4):51-58.
HE Hao,CUI Cheng,JIA Xihao,et al.Photovoltaic inverter parameter identification method based on transient response trajectory[J].Smart Power,2022,50(4):51-58.
- [19] 马钰,韦钢,李扬,等.考虑孤岛源—荷不确定性的直流配电网可靠性评估[J].电工技术学报,2021,36(22):4726-4738.
MA Yu,WEI Gang,LI Yang,et al.Reliability evaluation of DC distribution network considering islanding source-load uncertainty[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2021,36(22):4726-4738.