

DOI: 10.7667/PSPC180162

MMC-HVDC 功率硬件在环仿真的 SDIM-ITM 接口算法与延时补偿

李国庆¹, 王一捷¹, 熊毅²

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 北京京西燃气热电有限公司, 北京 100041)

摘要: 针对功率接口硬件延时影响 MMC-HVDC 功率硬件在环仿真精确性问题, 设计了一个模拟一阶 RC 高通滤波器的相位超前校正单元进行延时补偿。MMC 采用戴维南等效电路模型, 以便于计算 SDIM 接口中的实时阻尼阻抗和降低数字仿真计算量。MMC-HVDC 功率硬件在环仿真采用 SDIM-ITM 接口, 其中 ITM 接口作为驱动环节, SDIM 接口作为观测环节, 在运行点变化和故障条件下呈现出较高的稳定性和精确性。但接口延时(或功放延时)对物理侧仿真精度影响较大。故通过所设计的相位超前校正单元对激励功放的交流电压信号进行相位补偿, 以进一步提高物理侧仿真精度。仿真结果验证了该延时补偿方法的有效性。

关键词: MMC-HVDC; 功率硬件在环; SDIM-ITM 接口; 仿真精确性; 延时补偿

SDIM-ITM interface algorithm and time delay compensation for a power hardware-in-the-loop simulation of MMC-HVDC

LI Guoqing¹, WANG Yijie¹, XIONG Yi²

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;
2. Beijing Jingxi Gas-fired Thermal Power Corporation, Beijing 100041, China)

Abstract: To deal with the accuracy problem of Power Hardware-In-the-Loop (PHIL) simulation for Modular Multilevel Converter-based HVDC (MMC-HVDC) caused by the power interface hardware, a phase-lead correction unit that simulates an first-order high-pass RC filter is designed for time delay compensation. In this paper, the MMC is modeled with Thevenin's equivalent circuit to derive the real time value of damping impedance for SDIM interface and reduce the calculation burden. The SDIM-ITM interface is adopted for MMC-HVDC PHIL simulation, where ITM interface acts as a driver and SDIM interface acts as an observer, and it shows high accuracy and stability under conditions of both change of operating point and fault. However, the physical simulation accuracy is influenced by the interface (or power amplifier) time delay. Thus the phase of AC voltage signal exciting power amplifier is compensated by the proposed phase-lead correction unit to further improve the physical simulation accuracy. The effectiveness of the proposed time delay compensation method is verified by simulation results.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900903) and Science and Technology Development Plan of Jilin Province (No. 20160307014GX).

Key words: MMC-HVDC; PHIL; SDIM-ITM interface; simulation accuracy; time delay compensation

0 引言

近年来, 基于模块化多电平换流器的高压直流输电技术(Modular Multilevel Converter-based High Voltage Direct Current transmission, MMC-HVDC)在

新能源接入, 城市电网互联等领域得到广泛应用^[1-4]。为深入研究柔性直流输电系统与交流系统的交互作用, 传统的数字仿真手段已经满足不了对更高计算精度与仿真效率的要求; 动态物理模拟仿真能够直观展现 MMC-HVDC 的动态性能, 但仿真规模受到限制, 很难做到对复杂交直流混合系统进行全规模动态模拟^[5-6]。由此, 诞生了数字物理混合仿真技术, 也称功率硬件在环(Power Hardware-In-the-Loop,

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900903); 吉林省科技发展计划项目资助(20160307014GX)

PHIL)仿真, 采用数字仿真模拟大规模交流系统, MMC-HVDC 动模平台通过程控功率放大器与数字系统相连, 实现数字与功率号的双向传输, 同时在数字系统中依靠接口算法完成交直流系统的接口映射^[7-9]。

接口算法的稳定性和精确性是 PHIL 仿真的两个核心问题, 而稳定性是首要的^[10-12]。已经有多种接口算法在国内外文献中发表。ITM 算法是最早提出的, 由于易操作而大量用于各类 PHIL 仿真中, 缺点是稳定性较差。文献[13]详细对比了五种常见的接口算法的优缺点, 包括理想变压器模型(ITM)法、输电线路模型(TLM)法和阻抗电阻(DIM)法、时变一阶近似(TFA)法、部分电路复制(PCD)法, 结果表明前三种算法的综合性能较好, 且发展空间较大。文献[14-15]提出了适用于有源被试系统的简化的 DIM 与 ITM(SDIM-ITM)混合接口算法, 在仿真过程中利用 ITM 接口作驱动环节, 激励物理系统, 利用 SDIM 接口作观测环节, 获得高精度数字仿真结果, 兼顾了稳定性与精确性。在满足稳定性的前提下, 接口的噪声和延时对仿真精确性的影响不可忽略。文献[16]在 MMC-HVDC 的 PHIL 仿真中, 采用傅里叶分解并重构电压信号的方法对电压基波及主要谐波进行补偿以减小接口延时的负作用, 但此方法只能应用于稳态运行, 当交流系统发生接地短路故障后, 系统将会失稳。文献[17]提出了一种改进的 ITM 算法用于并网 STATCOM 的 PHIL 仿真, 使用二阶高通滤波器来补偿激励物理系统的电压的相位延时, 改善了精确性。

本文中 MMC-HVDC 的 PHIL 仿真采用了 SDIM-ITM 混合接口算法。在满足稳定性的前提下, 针对功率接口延时影响, 本文提出了一种基于相位超前校正单元的延时补偿方法, 利用相位超前校正单元对激励功率的交流电压信号进行相位补偿, 从而提高系统的仿真精度; 最后对不同工况下 SDIM-ITM 接口算法的稳定性和精确性, 以及所提出的延时补偿方法的有效性进行仿真验证。

1 MMC-HVDC 的 PHIL 仿真建模

PHIL 仿真系统包括数字侧仿真系统(Digital Simulation System, DSS)、物理侧仿真系统(Physical Simulation System, PSS)和功率接口(Power Interface, PI)三部分。在图 1(a)所示的 MMC-HVDC 系统中交流母线 B2 断面打开, 嵌入功率接口, 左侧部分为 PSS, 右侧部分为 DSS, 如图 1(b)所示, 即本文研究的 MMC-HVDC 的 PHIL 仿真系统。为方便分析接口算法特性的影响, 本文中 MMC-HVDC 的

PHIL 仿真采用全数字方式。

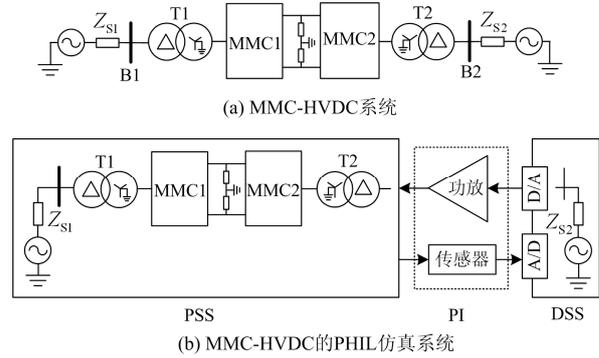


图 1 MMC-HVDC 的 PHIL 仿真

Fig. 1 PHIL simulation of MMC-HVDC

确定 DSS 和 PSS 的等效阻抗是分析 PHIL 系统功率接口算法的稳定性和精确性的基础。在本文中, DSS 侧交流系统直接用戴维南等效支路表示; PSS 的等效阻抗则通过计算 MMC 的戴维南等效模型得到, 而且 MMC 的戴维南等效模型可以精确模拟桥臂中各子模块的实时动态过程, 保证仿真精度^[18-19]。

1.1 采用理想开关的 MMC 的戴维南等效电路

在不损失仿真精度的前提下, MMC 采用理想开关器件假设的简化戴维南等效模型, 如图 2 所示, 即假设 IGBT 开关断态电阻无穷大, 通态电阻为 R_{ON} , 可以简化桥臂等效电阻计算, 缩短计算时间。

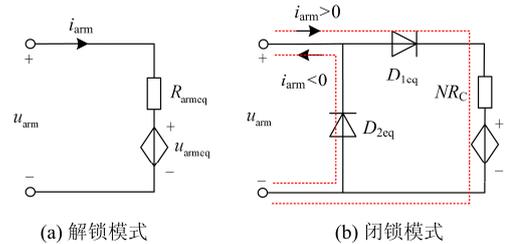


图 2 MMC 桥臂的戴维南等效电路

Fig. 2 Thevenin's equivalent circuit of MMC arm

图 2(a)中, 解锁模式下简化的桥臂等效电阻计算公式为

$$R_c = \frac{\Delta T}{2C_0} \quad (1)$$

$$R_{smeq} = \begin{cases} R_{ON} + R_c & \text{投入} \\ R_{ON} & \text{切出} \end{cases} \quad (2)$$

$$R_{armeq}(t) = NR_{ON} + N_{ON}R_c \quad (3)$$

式中: ΔT 为仿真步长; C_0 为子模块电容; R_c 为子模块电容的戴维南等效电阻; R_{smeq} 为子模块戴维南等效电阻; N 为桥臂子模块个数(无冗余); N_{ON} 为 t 时刻桥臂导通的子模块数量; R_{armeq} 为桥臂戴维南

等效电阻。

在子模块闭锁条件下，MMC 子模块进入不控整流模式，一个桥臂的 N 个子模块由桥臂电流 i_{arm} 的方向决定全部投入或全部切出。图 2(b)中， D_{1eq} 、 D_{2eq} 分别等效一个桥臂 N 个子模块的反并联二极管。故可得闭锁时桥臂等效电阻 R_{arreq} 为

$$R_{arreq}(t) = \begin{cases} N(R_{ON} + R_C) & i_{arm} > 0 \\ NR_{ON} & i_{arm} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

由 MMC 桥臂的戴维南等效电路，作出 MMC 的一相等效电路如图 3 所示。图 3 中， R_T 、 L_T 分别为输电线路和换流变压器的等效电阻和电感； L_0 为桥臂电感。由从交流端子 x 和地看进去的戴维南阻抗，可计算出基频时 PSS 的等效电阻 R_x 和等效电感 L_x ，见式(5)和式(6)。

$$R_x = \left[\frac{R_T + (R_{arreq_px} + R_{arreq_nx})(R_{arreq_px} R_{arreq_nx} + \omega^2 L_0^2)}{(R_{arreq_px} + R_{arreq_nx})^2 + 4\omega^2 L_0^2} \right] \quad (5)$$

$$L_x = L_T + \frac{L_0(R_{arreq_px}^2 + R_{arreq_nx}^2 + 2\omega^2 L_0^2)}{(R_{arreq_px} + R_{arreq_nx})^2 + 4\omega^2 L_0^2} \quad (6)$$

式中：下标 $x \in \{a, b, c\}$ 表示变量所在相；p、n 分别表示上下桥臂； R_{arreq_px} 、 R_{arreq_nx} 为 x 相上下桥臂戴维南等效电阻； ω 为基波角频率。

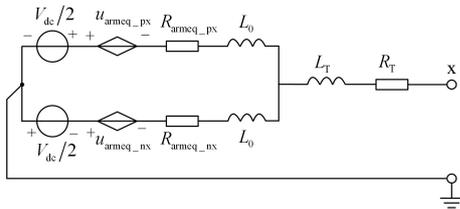


图 3 MMC 单相等效电路

Fig. 3 Single phase equivalent circuit of MMC

1.2 SDIM-ITM 接口算法

SDIM-ITM 接口算法原理图见图 4，其中，DSS1 和 DSS2 的初始状态，结构和参数完全相同；PSS 与 DSS2 之间采用闭环的电压型 ITM 接口作为驱动环节，可以得到更精确的 PSS 仿真结果；PSS 与 DSS1 之间采用开环的 SDIM 接口作为观测环节，当满足阻抗实时匹配，数字仿真结果则不受延时影响^[17]。启动仿真后，DSS2 侧通过输出控制电压信号 v_1 激励功放作用于 PSS 侧， $G_1(s)$ 对 v_1 进行相位补偿(见下节)；之后由电压、电流传感器分别测得 PSS 侧的 v_1 和 i_2 ，并将 i_2 反馈回 DSS2 侧和将 v_1 、 i_2

输入 DSS1 侧。由于接口算法不同，DSS1 与 DSS2 中各状态量在仿真过程中会出现偏差，最终数字仿真结果取自 DSS1 侧。

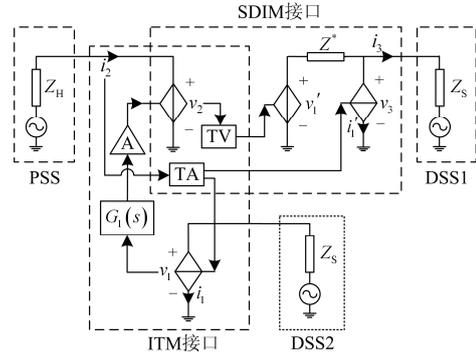


图 4 SDIM-ITM 接口算法原理图

Fig. 4 Schematic of SDIM-ITM interface algorithm

为使 SDIM-ITM 接口算法稳定，首先要保证 ITM 接口算法稳定。对 PSS-ITM-DSS2 构成的系统，其开环传递函数为

$$G_{OL_ITM_V} = -\frac{Z_s}{Z_H} e^{-st_{d1}} \quad (7)$$

式中： Z_s 为 DSS 的等效阻抗； Z_H 为 PSS 的等效阻抗； t_{d1} 为 ITM 接口延时。

式(7)表明当 $|Z_H| > |Z_s|$ ，系统是收敛的^[20]。故本文中 MMC-HVDC 的 PHIL 系统默认符合这一条件，即不计入电阻，PSS 的等效电抗大于 DSS 的等效电抗。

SDIM 算法是阻尼阻抗(DIM)法的简化形式，它忽略了连接阻抗。对 PSS-SDIM-DSS1 构成的系统，其开环传递函数为

$$G_{OL_SDIM} = \frac{Z_s(Z_H - Z^*)}{Z_H(Z_s + Z^*)} e^{-st_{d2}} \quad (8)$$

式中： Z^* 为阻尼阻抗； t_{d2} 为 SDIM 接口延时。

由式(8)可知，当满足 $Z_H = Z^*$ 时， $G_{OL_SDIM} = 0$ ，仿真系统达到绝对稳定状态，在一个积分步长中产生的仿真误差不会向下传递和累计^[21]。若 Z_H 实时变化，则 Z^* 必须快速而准确地跟踪 Z_H 。

2 接口延时补偿方法

在真实的 PHIL 仿真中，由接口硬件装置引起的延时会影响仿真系统的精确性。对于 PSS，虽然所采用的 ITM 接口算法电流误差较小，但延时问题是固有的；数字仿真结果取自采用 SDIM 接口的 DSS1，也由于很难达到阻抗实时完全匹配，接口延时并会发挥作用，所以应采用合适的接口延时补偿

方法提高系统的仿真精度。

接口硬件装置主要包括电压/电流传感器、A/D、D/A 和功放, 其中功放产生的延时为主导因素, 其余忽略不计。交流信号的延时在频域中表现为相位滞后, 则对接口的延时补偿可转化为对电压相位的补偿^[22]。此外, 在稳态运行时, 由于功率接口连接处的交流电压谐波含量较少, 则忽略各次谐波电压分量因接口延时产生的误差, 仅考虑对电压基波分量进行补偿。因此, 本文的延时补偿方法是通过采用模拟一阶 RC 高通滤波器的相位超前校正单元对激励功放的交流电压信号的基波进行相位补偿来实现的, 其步骤如下所述。

(1) 见图 4, 利用锁相环实时采集 PSS 和 DSS1 在功率接口连接处的电压信号 v_2 、 v_3 的相位, 计算出两者的基波相位差 $\Delta\theta$;

(2) 设基波角频率为 ω , 根据相位差 $\Delta\theta$, 由式 (9) 确定相位校正单元 $G_1(s)$ 。该单元模拟一阶 RC 高通滤波器, 数字信号 v_1 经过该单元进行相位超前校正后, 再激励功放。由于 $\Delta\theta$ 很小, 该单元对数字信号 v_1 的幅值影响可以忽略。

$$G_1(s) = \frac{s}{s + \omega \arctan \Delta\theta} \quad (9)$$

3 仿真分析

为了验证 SDIM-ITM 接口算法的稳定性与精确性, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建双端背靠背 11 电平 MMC-HVDC 的 PHIL 仿真系统, 见图 1 和图 4。

换流站 MMC1 控制方式为定直流电压和定无功功率控制, 换流站 MMC2 控制方式为定有功功率和定无功功率控制, 设置仿真步长为 $20 \mu\text{s}$, MMC-HVDC 的 PHIL 仿真其他参数见表 1。以下将分别验证 MMC-HVDC 功率硬件在环仿真 SDIM-ITM 接口算法的稳定性和精确性。

3.1 SDIM-ITM 接口算法稳定性验证

通过对改变 MMC-HVDC 的运行点, 交流系统发生故障以及 MMC 直流故障闭锁等工况进行仿真, 来验证 SDIM-ITM 接口算法的稳定性。

(1) 运行点改变时接口算法稳定性

为分析运行点改变时接口算法的稳定性, 在 $t = 0.3 \text{ s}$ 时, MMC1 运行于 $U_{dc} = 1.0 \text{ p.u.}$, $Q_1 = -0.1 \text{ p.u.}$, MMC2 运行于 $P_2 = 0 \text{ p.u.}$, $Q_2 = -0.9 \text{ p.u.}$; 在 $t = 1.51 \text{ s}$ 时, MMC2 改运行于 $P_2 = 0.9 \text{ p.u.}$, $Q_2 = 0 \text{ p.u.}$ 。

通过观察图 5 所示的 PSS 侧 MMC2 的 a 相实时匹配电阻、交流母线 B2 处的电压电流波形, 以及与参考系统对照的有功功率波形, 可以判断运行点改变时接口算法的稳定性能。

表 1 MMC-HVDC 的 PHIL 仿真参数

| Table 1 Parameters of MMC-HVDC PHIL simulation | | |
|--|---|--------------------|
| 部件 | 参数 | 数值 |
| 交流系统 | 交流线电压 U_{L-L}/kV | 35 |
| | 等效电阻 $R_s(\Omega)$ /电感 L_s/H | 0.1, 0.02 |
| 换流变压器 | 接线形式 | Δ/Yn |
| | 额定容量 S_{TN}/MVA | 30 |
| | 变比 $k(\text{kV}/\text{kV})$ | 35/31 |
| | 等效电阻/ Ω , 电感/ H | 0.01, 0.012 |
| 交流线路 | 等效电阻/ Ω , 电感/ H | 0.01, 0.01 |
| | 桥臂电感 L_0/H | 0.053 |
| | 子模块电容 C/Mf | 6 000 |
| MMC | 电容初始电压 U_{C0}/kV | 6 |
| | 功率器件 R_{ON}/Ω , R_{OFF}/Ω | 10^{-2} , 10^6 |
| 直流系统 | 直流电压 U_{dc}/kV | 60 |
| | 额定传输容量 S_N/MVA | 20 |
| 功率接口 | D/A 及功放延时/ μs | 26 |
| | A/D 及电流互感器延时/ μs | 3.5 |
| | A/D 及电压互感器延时/ μs | 12.5 |

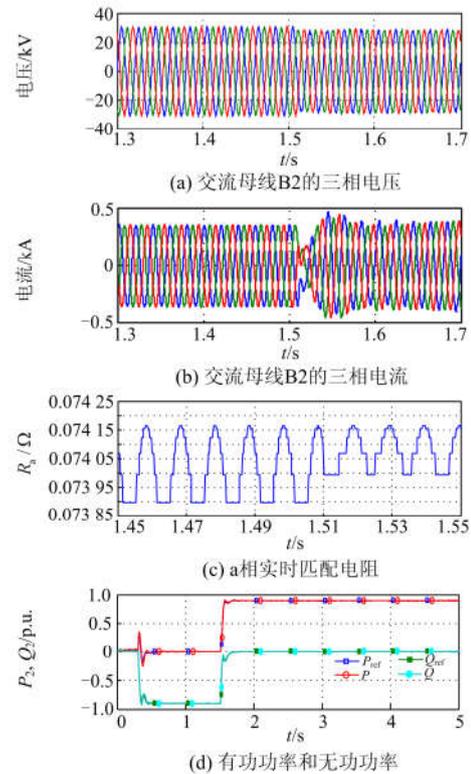


图 5 PSS 侧 MMC2 稳态运行点变化的响应特性
Fig. 5 Response characteristics at side of PSS with change of MMC2 steady-state operating point

由图 5(c)可知, a 相实时匹配电阻非常小, 根据表 1 的参数和式 (6), 近似计算得到 $L_a \doteq L_T + L_0/2 = 0.0375 \text{ mH}$, 则 $L_a > L_s = 0.02 \text{ mH}$,

满足式(7)的收敛判据。由图 5(d)可以看出,当运行点改变时,PSS 侧 MMC2 的有功和无功能够能够快速跟踪各自的功率参考值,而且与参考系统的动态过程基本相同。由此表明运行点变化时,SDIM-ITM 接口算法稳定性良好。

(2) 交流系统故障时接口算法稳定性

在图 1 中 MMC2 侧的交流母线 B2 处设置不同类型的接地短路故障,以测试交流故障时接口算法稳定性。在 $t = 0.3\text{ s}$, MMC2 运行于 $P_2 = 0.9\text{ p.u.}$, $Q_2 = -0.1\text{ p.u.}$; 在 $t = 1.5\text{ s}$, 设置单相接地短路故障,持续时间为 0.1 s , 在 $t = 2.5\text{ s}$, 设置三相接地短路故障,持续时间为 0.15 s 。PSS 侧仿真结果如图 6 所示。

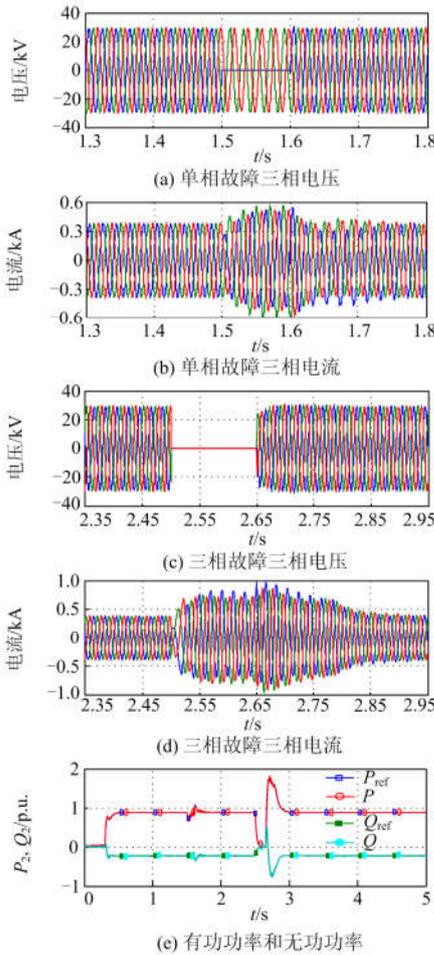


图 6 PSS 侧的交流故障响应特性

Fig. 6 AC fault response characteristics at side of PSS

由图 6 可以看出,故障发生后,接地相电压为 0,故障电流增大,故障解除后,PSS 侧电压、电流能够迅速恢复稳定状态,功率的整个动态过程与参考系统相一致。由此表明 SDIM-ITM 接口算法在交流故障情况下也表现出良好的稳定性。

(3) MMC 直流故障闭锁时接口算法稳定性

对于处于稳态的 PHIL 仿真系统, $t = 3\text{ s}$ 时,在 MMC2 侧直流母线处设置直流双极短路故障;考虑 1 ms 的故障检测与闭锁延时,在 $t = 3.001\text{ s}$, MMC 闭锁;在 $t = 3.1\text{ s}$, 跳开交流侧断路器。可以得到 a 相实时匹配电阻、子模块上桥臂电流、交流母线 2 电流及直流电流的波形,如图 7 所示。

由图 7 可以看出,当直流侧发生双极短路故障,MMC 进入闭锁状态时,所采用的 SDIM-ITM 接口算法仍能精确模拟仿真系统的动态过程,接口稳定性良好。

综上,在 MMC-HVDC 的 PHIL 仿真中所采用的 SDIM-ITM 接口算法呈现出良好的稳定性,能够适应 MMC-HVDC 运行点变化、交流系统故障及 MMC 直流故障闭锁等运行工况。

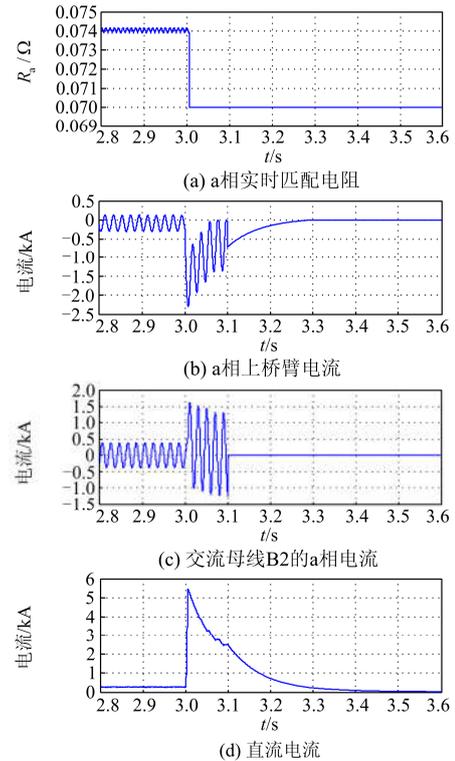


图 7 PSS 侧的直流故障响应特性

Fig. 7 DC fault response characteristics at side of PSS

3.2 SDIM-ITM 接口算法精确性分析

为验证接口算法对 PHIL 仿真精确性影响,在 $t = 0.3\text{ s}$, MMC2 运行于 $P_2 = 0.9\text{ p.u.}$, $Q_2 = -0.1\text{ p.u.}$, 功放延时设为 $t_d = 100\text{ }\mu\text{s}$, 通过观察 DSS1 侧与 PSS 侧交流母线 a 相电压、电流和有功功率,比较分别采用 DIM 接口算法和 SDIM-ITM 接口算法的 PHIL 仿真精确性,仿真结果如图 8、图 9 所示。

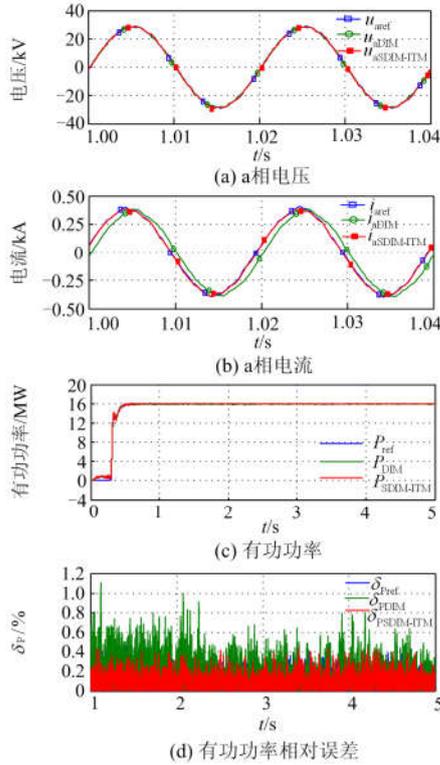


图 8 DSS1 侧仿真精确性

Fig. 8 Simulation accuracy at DSS1 side

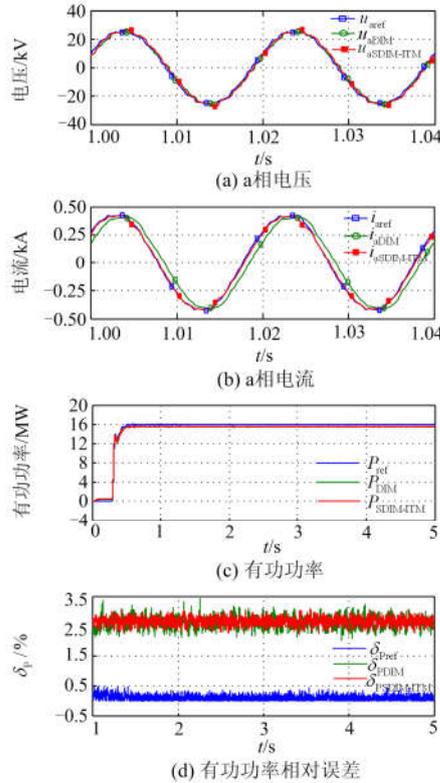


图 9 PSS 侧仿真精确性

Fig. 9 Simulation accuracy at PSS side

由图 8 和图 9 可以看出, 对于 DSS1 侧, 采用 SDIM-ITM 接口算法对应的交流母线电压电流与参考系统几乎重合, 故受接口延时影响非常小, 而采用 DIM 接口算法的交流电流明显滞后, 则受延时影响较大; 对于 PSS 侧, 采用 SDIM-ITM 算法和 DIM 算法都受到了延时影响, 前者对应的交流电压电流较参考系统出现微小延迟与畸变, 程度上小于后者。

为更好地分析 PHIL 系统的仿真精度, 定义有功功率稳态相对误差 δ_p 为

$$\delta_p = \left| \frac{P_{\text{ref}} - P}{P_{\text{ref}}} \right| \times 100\% \quad (10)$$

式中: P_{ref} 为有功功率参考值; P 为实际稳态有功功率。

按式(10)计算出图 8(c)、图 9(c)所示的 DSS1 侧和 PSS 侧有功功率的稳态相对误差, 见图 8(d)和图 9(d)。由图 8(d)和图 9(d)可知, 对于 DSS1 侧, 参考系统对应的 $\delta_{p_{\text{max}}}$ 为 0.3957%, 采用 DIM 算法对应的 $\delta_{p_{\text{max}}}$ 为 1.115%, 而采用 SDIM-ITM 算法的对应的 $\delta_{p_{\text{max}}}$ 为 0.4181%, 更接近参考系统, 故 SDIM-ITM 算法在数字侧呈现较高的精确性; 对于 PSS 侧, 采用 DIM 算法对应的 $\delta_{p_{\text{max}}}$ 为 3.434%, 而采用 SDIM-ITM 算法对应的 $\delta_{p_{\text{max}}}$ 为 3.106%, 均远大于参考系统的 0.455%, 两者的精确性稍差。总体而言, SDIM-ITM 算法较 DIM 算法具有更高的精确性, 但 PSS 侧仿真精度受功放延时影响较大。

针对功放延时对 PSS 侧仿真精度的影响, 应用本文所提出的延时补偿方法进行改善。当 $t_d = 100 \mu\text{s}$ 时, 参考系统与延时补偿前后的 PSS 侧的有功功率对比曲线见图 10。图 10(b)表明, 补偿前后 PSS 侧的 $\delta_{p_{\text{max}}}$ 由 3.106% 减小到 1.867%, 补偿效果较好, 从而验证了所提出的延时补偿方法的有效性。

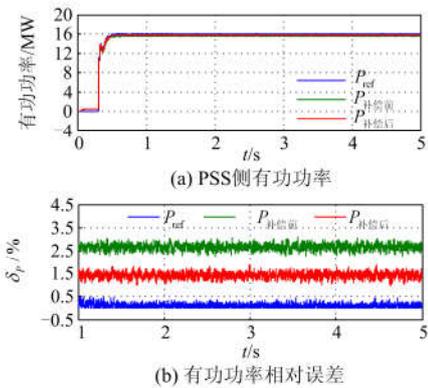


图 10 补偿前后对比

Fig. 10 Comparison before and after compensation

4 结论

本文将 SDIM-ITM 接口算法应用于双端 MMC-HVDC 的 PHIL 仿真系统中, 该接口算法呈现出良好的稳定性, 能够适应 MMC-HVDC 运行点变化、交流系统故障及 MMC 直流故障闭锁等运行工况; 同时, 相比 DIM 接口算法, 其在物理侧和数字侧呈现出更高的精度。此外, 接口硬件延时(或功放延时)对数字侧仿真精度影响较小, 但对物理侧仿真精度影响较大。为此, 设计了一个模拟一阶 RC 高通滤波器的相位超前超前校正单元来补偿延时, 能够有效减小功放延时带来的误差, 进一步提高了物理侧仿真精度。

参考文献

- [1] 蔡永梁, 任成林, 周竞宇, 等. 基于 MMC 的柔性直流输电电容电压波动抑制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 45-50.
CAI Yongliang, REN Chenglin, ZHOU Jingyu, et al. Control strategy for suppressing capacitor voltage ripple of MMC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 45-50.
- [2] 刘思源, 徐东旭, 梅念, 等. 直流侧故障对模块化多电平换流器的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 48-54.
LIU Siyuan, XU Dongxu, MEI Nian, et al. Research on the effect of DC side fault on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 48-54.
- [3] 许义佳, 罗映红, 史彤彤, 等. 具有直流故障自清除能力的新型 MMC 子模块及其混合拓扑[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 129-137.
XU Yijia, LUO Yinghong, SHI Tongtong, et al. A new MMC sub-module with DC fault self-clearing ability and its hybrid topology[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 129-137.
- [4] 曾繁耀, 乐开平, 韩韬. MMC 低开关频率子模块均压控制策略[J]. 广东电力, 2018, 31(6): 99-106.
ZENG Fanyao, YUE Kaiping, HAN Tao. Voltage-sharing control strategy for mmc low switching frequency sub-modele[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(6): 99-106.
- [5] 徐政, 唐庚, 潘伟勇, 等. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 19-24.
- [6] 仇雪娜, 赵成勇, 庞辉, 等. 基于 MMC 的多端直流输电系统直流侧故障控制保护策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 140-145.
ZHANG Xuena, ZHAO Chengyong, PANG Hui, et al. A control and protection scheme of multi-terminal DC transmission system based on MMC for DC line fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 140-145.
- [7] 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.
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.
- [8] 周俊, 郭剑波, 胡涛, 等. 高压直流输电系统数字物理动态仿真[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 221-228.
ZHOU Jun, GUO Jianbo, HU Tao, et al. Digital/analog dynamic simulation for ± 500 kV HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 221-228.
- [9] DIONE M, SIROIS F, BONNARD C H. Evaluation of the impact of superconducting fault current limiters on power system network protections using a RTS-PHIL methodology[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(3): 2193-2196.
- [10] REN W, SLODERBECK M. Interfacing issues in real-time digital simulators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 1221-1230.
- [11] REN W, STEURER M, BALDWINT L. Improve the stability and the accuracy of Power Hardware-in-the-Loop simulation by selecting appropriate interface algorithms[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(4): 1286-1294.
- [12] 蔡玲珑, 马志钦, 周原, 等. 功率接口算法的改进及应用[J]. 广东电力, 2018, 31(10): 29-35.
CAI Linglong, MA Zhiqin, ZHOU Yuan, et al. Improvement and application of power interface algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2018 31(10): 29-35.
- [13] 辛业春, 江守其, 李国庆, 等. 电力系统数字物理混合仿真接口算法综述[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 159-167.
XIN Yechun, JIANG Shouqi, LI Guoqing, et al. Review on interface algorithms of power hardware-in-the-loop simulation for power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 159-167.
- [14] 辛业春, 江守其, 李国庆, 等. 柔性直流输电系统数字物理混合仿真改进阻尼阻抗接口算法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 90-97.
XIN Yechun, JIANG Shouqi, LI Guoqing, et al. Improved damping impedance interface algorithm of power hardware-in-the-loop simulation for flexible DC

- transmission systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 90-97.
- [15] YIN C, SUN J J, LIU B, et al. Virtual impedance method of the Power hardware-in-the-loop simulation to improve its stability and accuracy[C] // IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), 2016: 2752-2758.
- [16] 胡昱宙, 张沛超, 方陈, 等. 功率连接型数字物理混合仿真系统: (一)接口算法特性[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7): 36-41.
HU Yuzhou, ZHANG Peichao, FANG Chen, et al. Power hardware-in-the-loop simulation system: part-I characteristics of interface algorithms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(7): 36-41.
- [17] 胡昱宙, 张沛超, 包海龙, 等. 功率连接型数字物理混合仿真系统: (二)适应有源被试系统的新型接口算法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 76-81.
HU Yuzhou, ZHANG Peichao, BAO Hailong, et al. Power hardware-in-the-loop simulation system: part-II a novel interface algorithm adapted to active hardware-under-test[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 76-81.
- [18] 许建中, 赵成勇, GOLE A M. 模块化多电平换流器戴维南等效整体建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 1919-1929.
XU Jianzhong, ZHAO Chengyong, GOLE A M. Research on the Thevenin's equivalent based integral modelling method of the modular multilevel converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 1919-1929.
- [19] 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 Haihang, 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.
- [20] MAHDI D, ARINDAM G. Controlling current and voltage type interfaces in power-hardware-in-the-loop simulation[J]. IET Power Electronics, 2014, 7(10): 2618-2627.
- [21] 李国庆, 江守其, 辛业春, 等. 柔性高压直流输电系统数字物理混合仿真功率接口及其算法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1915-1924.
LI Guoqing, JIANG Shouqi, XIN Yechun, et al. A novel interface algorithm of power hardware-in-the-loop simulation for MMC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1915-1924.
- [22] YOO I D, GOLE A M. Compensating for interface equipment limitations to improve simulation accuracy of real-time power hardware in loop simulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1284-1291.
-
- 收稿日期: 2018-02-06; 修回日期: 2018-05-23
作者简介:
李国庆(1963—), 男, 教授, 研究方向为电力系统安全性分析与控制、电力系统继电保护和柔性直流输电技术;
王一捷(1993—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电技术。E-mail: 760826582@qq.com
(编辑 姜新丽)