

基于 FPGA 的柔性直流实时仿真技术及试验系统

林雪华^{1,2}, 郭琦^{1,2}, 郭海平^{1,2}, 王宇³, 刘崇茹³

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东省广州市 510663;

2. 中国南方电网公司电网仿真重点实验室, 广东省广州市 510663; 3. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 102206)

摘要: 未来柔性直流输电技术大容量、高电压、远距离的发展趋势,对现有的柔性直流仿真建模技术提出了更高的要求。为了建立更符合控制保护装置测试需求的大容量、高电压、远距离柔性直流实时仿真模型,提出了适用于各种子模块拓扑结构且能灵活定义模块级故障的模块化多电平换流器(MMC)等效建模方法,采用基于现场可编程门阵列(FPGA)技术实现灵活柔性直流换流器算法,通过双向高速通信板卡 GTFPGA 在实时数字仿真器(RTDS)中实现灵活自定义的柔性直流 MMC 仿真建模,为未来含新型子模块拓扑结构的大容量、高电压、远距离柔性直流工程的控制保护特性研究及其闭环试验,提供有效的实时仿真试验系统和重要的仿真技术支持。

关键词: 柔性直流输电; 现场可编程门阵列(FPGA); 实时仿真; 试验系统

0 引言

柔性直流输电是一种以电压源换流器(voltage source converter, VSC)、可控关断器件和脉宽调制技术为基础的新型直流输电技术^[1-3]。它与常规直流输电技术相比,在控制上更灵活,可实现功率的四象限控制,并适用于新能源接入电网以及向无源网络供电等场合^[4-7]。特别是基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔性直流输电具有拓扑灵活,输出电压谐波小,不需要额外滤波器,换流站占地面积小等优点,近几年得到了国内外的广泛研究和应用^[8-13]。

控制保护的功能和性能对柔性直流工程的安全可靠稳定运行有重要作用,为了测试柔性直流输电控制保护装置的功能和性能,需要将控制保护装置与柔性直流仿真模型连接构成实时闭环试验测试系统。目前常用的实时闭环试验仿真工具主要是实时数字仿真器(RTDS)和实时仿真平台 RT-LAB,其提供的柔性直流 MMC 封装模型已在南方电网南澳多端柔性直流示范工程以及云南异步联网鲁西背靠背直流工程的控制保护闭环试验中得到应用,可基本满足已有柔性直流工程的控制保护测试需求。但在试验过程中也发现已有封装 MMC 模型的局限性,如阀模型与阀控传输变量的不灵活性,模拟阀组

故障类型有限,需要工程实际中不同厂家的阀控装置按照仿真模型的要求修改调整阀控到阀组的传输协议内容等;另外考虑到未来大容量、高电压、远距离送电柔性直流的发展及对新型子模块拓扑结构的仿真要求,现有封装模型子模块结构单一,只有半桥和全桥两种类型,无法满足未来新型子模块拓扑结构阀组的仿真测试。而现有的封装 MMC 仿真模型的任何改动和自定义需求都过分依赖商用实时仿真软件公司,仿真建模与控制保护测试工作十分被动,工程控制保护测试周期延长,仿真建模自主性和灵活性也大大受限,因此十分有必要研发建立一种“仿真模型适应被测试对象(不同的阀控装置)”的 MMC 实时仿真模型,可根据被测试的阀控装置的功能特点,灵活自定义模块拓扑、阀组内部故障与阀控交互信号等。

本文提出了一种基于现场可编程门阵列(FPGA)的灵活柔性直流实时仿真建模方法,建立更符合控制保护装置闭环测试需求的高电压、大容量、远距离的柔性直流输电实时仿真模型。首先,以钳位型双子模块(clamp double sub-module, CDSM)为例提出了适用于各种新型子模块拓扑且能灵活定义模块故障类型的 MMC 等效建模方法;然后,在 FPGA 中编程实现 MMC 算法以及其数据通信接口,通过 RTDS 提供的双向高速数据通信板卡 GTFPGA 与 RTDS 中建立的受控戴维南支路进行实时数据交互,实现可灵活自定义的柔性直流 MMC 仿真建模;接着,本文还提出了适用于高电

收稿日期: 2017-02-13; 修回日期: 2017-04-28。

上网日期: 2017-05-10。

中国南方电网有限责任公司科技项目(CSGTRC-K142031)。

压、大容量、远距离柔性直流输电的控制保护闭环试验实时仿真系统;最后,在 RTDS 实时仿真器中采用所开发的模型建立双端柔性直流输电模型,并与 RTDS 已有的模型进行对比,验证所开发仿真模型的正确性和有效性。

1 柔性直流输电系统的仿真建模算法

目前在柔性直流输电系统中 MMC 常用的子模块拓扑结构有半桥子模块(half bridge sub-module, HBSM)、全桥子模块(full bridge sub-module, FBSM)、CDSM 以及其他新型的拓扑结构等^[14-18]。其中,CDSM 由于其不仅能够隔离直流侧故障,而且在经济性、性能上具有较强的优势^[18],特别适用于采用架空线远距离输电的柔性直流输电系统,得到了国内外的广泛研究。本文以基于 CDSM 拓扑结构的 MMC 为例,提出了基于戴维南等效电路的 MMC 等效建模方法,该方法具有通用性,适用于其他各种拓扑结构的子模块。

1.1 CDSM 工作原理

基于 CDSM 的 MMC 的拓扑结构如附录 A 图 A1 所示。其中 1 个 CDSM 中主要包含 5 个绝缘栅双极型晶体管(IGBT)(T_1 至 T_5)及其反并联的二极管(D_1 至 D_5)、2 个电容(C_1 和 C_2),以及 2 个独立的二极管(D_6 和 D_7)。

1.1.1 正常工作

CDMS 在正常工作状态下, T_5 保持一直导通, T_1 与 T_2 、 T_3 与 T_4 触发信号互补,相当于 2 个 HBSM 级联。如附录 A 表 A1 所示, T_1 和 T_2 控制第 1 个 HBSM 中电容 C_1 的投入和切除,当 T_1 导通、 T_2 闭锁时,电容 C_1 投入运行; T_3 和 T_4 控制第 2 个 HBSM 中电容 C_2 的投入和切除,当 T_3 闭锁、 T_4 导通时,电容 C_2 投入运行。

1.1.2 闭锁状态

CDSM 在闭锁状态下,根据流过电流方向的不同,有如图 1(a)和(b)所示的 2 种通路。

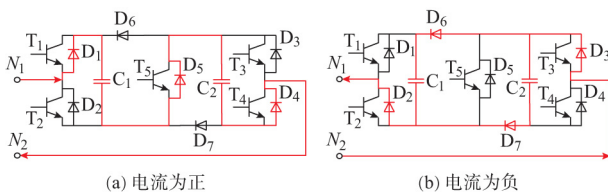


图 1 CDSM 闭锁状态下的电路

Fig.1 Circuit of CDSM when working in blocking state

由图 1 所示的电流通路可知,当电流的方向为正(定义从节点 N_1 流向 N_2 的方向为正)时,子模块对外特性相当于 2 个电容的串联,输出电平为 $2U_c$;

当电流方向为负(定义从节点 N_2 流向 N_1 的方向为负)时,子模块的对外特性相当于 2 个电容的并联,输出电平为 $-U_c$ 。

1.2 基于 CDSM 换流器建模

根据对 CDSM 拓扑结构和工作原理的分析,下面对基于 CDSM 拓扑结构的换流器进行等效建模。

1.2.1 元件的等效

首先是对 CDSM 中主要包含的三类元件进行等效,具体如下。

1) IGBT

根据触发脉冲的状态,可将 IGBT 开关等效成导通状态时的小电阻 R_{on} ,以及关断状态的大电阻 R_{off} ,则第 n 个 IGBT 可以用式(1)所示的可变电阻 R_n 进行等效:

$$R_n = S_n R_{on} + \bar{S}_n R_{off} \quad (1)$$

式中: S_n 为第 n 个 IGBT 触发脉冲的状态, $S_n = 1$ 则导通, $S_n = 0$ 则关断; \bar{S}_n 为 S_n 的相反状态。 R_{on} 一般设置为极小电阻值; R_{off} 一般设置为极大电阻值。

2) 二极管

二极管是半控元件,根据流经二极管的电流方向,只要将式(1)中的触发脉冲条件改为电流的正负,就可将二极管等效成类似 IGBT 的等效电阻。

3) 电容

由于电容为非线性元件,在电磁暂态仿真时需对其进行离散化处理,通常采用梯形积分法将其等效成诺顿等效支路,如附录 B 图 B1 所示。其电压电流关系如式(2)所示。

$$i_c(t) = \frac{U_c(t)}{R_c} - I_{cs}(t - \Delta t) \quad (2)$$

$$R_c = \frac{\Delta t}{2C} \quad (3)$$

$$I_{cs}(t - \Delta t) = \frac{U_c(t - \Delta t)}{R_c} + i_c(t - \Delta t) \quad (4)$$

式中: Δt 为仿真计算步长; R_c 为电容的诺顿等效支路中的电阻; I_{cs} 为诺顿等效支路中的电流源。

1.2.2 CDSM 的等效

1) 工作状态

首先定义变量 S_n ,表示第 n 个 IGBT 的触发信号($n = 1, 2, \dots, 5$), $S_n = 1$ 表示 IGBT 导通, $S_n = 0$ 表示关断;通过以上对 CDSM 正常工作状态的分析,则有 $S_5 = 1$; $S_1 = \bar{S}_2$; $S_3 = \bar{S}_4$ 。定义变量 R_n 表示第 n 个 IGBT(或二极管)的等效电阻。则在正常工作状态下,第 i 个 CDSM 输出的电压 U_{SMi} 为:

$$U_{SMi} = S_1 U_{HBSMi1} + \bar{S}_3 U_{HBSMi2} \quad (5)$$

式中: U_{HBSMi1} 和 U_{HBSMi2} 分别为正常工作状态下 2 个级联的 HBSM 上的电压。

根据以上对 3 种元件的等效,将每个 HBSM 进一步等效戴维南等值电路,可以得到第 i 个 HBSM 的电压分别为:

$$U_{\text{HBSM}_i}(t) = i_{\text{arm}}(t)R_{\text{eq}_i} + U_{\text{Si}}(t - \Delta t) \quad (6)$$

式中: i_{arm} 为流过 CDSM 的桥臂电流; R_{eq_i} 和 U_{Si} 分别为第 i 个 HBSM 的等效电阻和电压源。

正常工作状态下第 i 个 CDSM 中两个级联的 HBSM 的等效电阻 R_{eq_i1} 和 R_{eq_i2} , 以及等效电压源 $U_{\text{Si}1}$ 和 $U_{\text{Si}2}$ 分别为:

$$\begin{cases} R_{\text{eq}_i1} = \frac{(R_1 + R_c)R_2}{R_1 + R_2 + R_c} \\ R_{\text{eq}_i2} = \frac{(R_4 + R_c)R_3}{R_3 + R_4 + R_c} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} U_{\text{Si}1}(t - \Delta t) = I_{\text{csi}1}(t - \Delta t) \frac{R_c R_2}{R_1 + R_2 + R_c} \\ U_{\text{Si}2}(t - \Delta t) = I_{\text{csi}2}(t - \Delta t) \frac{R_c R_3}{R_3 + R_4 + R_c} \end{cases} \quad (8)$$

2) 闭锁状态

CDSM 在闭锁状态时,所有的 IGBT 处于关断状态,即 $S_n = 0 (n = 1, 2, \dots, 5)$, 则在闭锁状态下,第 i 个 CDSM 输出的电压 U_{SM_i} 为:

$$U_{\text{SM}_i}(t) = i_{\text{arm}}(t)R_{\text{eq}_i} + U_{\text{Si}}(t - \Delta t) \quad (9)$$

当桥臂电流 i_{arm} 为正时,等效电阻 R_{eq_i} 和电压源 U_{Si} 分别为:

$$R_{\text{eq}_i} = R_1 + R_5 + R_4 + 2R_c \quad (10)$$

$$U_{\text{Si}}(t - \Delta t) = 2(U_c(t - \Delta t) + R_c i_{\text{arm}}(t - \Delta t)) \quad (11)$$

当桥臂电流 i_{arm} 为负时,等效电阻 R_{eq_i} 和电压源 U_{Si} 分别为:

$$R_{\text{eq}_i} = R_2 + R_3 + 0.5(R_6 + R_c) \quad (12)$$

$$U_{\text{Si}}(t - \Delta t) = U_{\text{ci}}(t - \Delta t) + 0.5R_c i_{\text{arm}}(t - \Delta t) \quad (13)$$

由以上分析可知,不管在正常工作状态还是闭锁状态,子模块都可以采用戴维南等值进行等效计算,不同的是根据外部开关触发信号或者电流方向等条件不同,更新不同的等效电阻和电压源的算法。

1.2.3 换流器的等效

基于 CDSM 的 MMC 是由三相上、下桥臂构成,而每个桥臂又是由桥臂电抗器 L 和若干个级联的 CDSM 构成的。根据以上对 CDSM 的等效,可以得到由 N 个 CDSM 级联的桥臂模块电压 U_{SM_i} 和桥臂电流 i_{arm} 的关系如下:

$$U_{\text{SM}}(t) = i_{\text{arm}}(t)R_{\text{eq}}(t) + U_s(t - \Delta t) \quad (14)$$

$$R_{\text{eq}}(t) = \sum_{i=1}^N R_{\text{eq}_i}(t) \quad (15)$$

$$U_s(t) = \sum_{i=1}^N U_{\text{Si}}(t - \Delta t) \quad (16)$$

以上提出的 MMC 等效建模算法,不限于基于 CDSM 的 MMC,同样适用其他拓扑结构的 MMC。此外,还可以通过自定义输入不同类型的故障信号,修正等效模型中的等效电阻和电压源,实现 MMC 子模块级的故障仿真,如 IGBT 故障和电容故障等。

2 基于 FPGA 的柔性直流实时仿真技术

由于现有的实时仿真软件中的 MMC 仿真具有高度封装特点,且子模块拓扑结构不灵活,模拟模块级故障类型有限等局限性,本文提出了适用于不同拓扑结构子模块的 MMC 等效建模算法,并采用 FPGA 技术,建立可适用于大容量、高电压、远距离送电的灵活柔性直流实时仿真模型及控制保护闭环试验系统。下面详细阐述基于 FPGA 的灵活柔性直流实时仿真模型及试验系统的实现方法。

2.1 自定义模型开发

本文提出的基于 FPGA 板卡开发的自定义柔性直流换流器模型的算法主要是根据以上提出的等效仿真建模方法。在等效模型算法的基础上,根据外部控制保护系统测试需求添加特定的信号或者功能,以实现模型的灵活性和普适性。采用一块 FPGA 板卡模拟柔性直流 MMC 的 3 个桥臂,每个桥臂高达 512 个子模块,模拟一个换流站仅需 2 块 FPGA 板卡。

图 2 给出了基于 FPGA 自定义 MMC 实时仿真模型的计算实现流程,以及与外部阀控装置和 RTDS 的信息交互。

基于 FPGA 的自定义 MMC 实时仿真模型在 RTDS 的网络计算中是通过建立戴维南等效支路参与网络计算,如图 2 所示。以 CDSM 的 MMC 实时仿真模型为例,其计算流程如下。

步骤 1: 计算初始化。如图 2 中的 RTDS 实时仿真器中建立的 MMC 戴维南等效支路的电压源 $U_s(t - dt)$ 以及各个子模块的电容电压 $U_{\text{ci}}(t - dt)$ 赋值为 0。

步骤 2: 计算节点电压差。通过 RTDS 提供的 GTFPGA 板卡读取 RTDS 中当前时刻 t , MMC 在外部电网系统中连接的节点电压 $V_1(t)$ 和 $V_2(t)$, 计算出两端的电压差 $V(t)$ 。

步骤 3: 计算支路电阻。接收 MMC 所连接的外部阀控装置的各个子模块触发脉冲 $F_i(t)$, 根据不同的触发脉冲状态和桥臂电流方向,分别按照式(7)、式(10)及式(12),在 FPGA 中计算出当前时刻 t 、每个子模块等效电阻 $R_{\text{eq}_i}(t)$ 以及桥臂的总等效电阻 $R_{\text{eq}}(t)$ 。

步骤 4: 计算支路电流。由初始电压源 $U_{\text{CS}}(t -$

dt)、当前时刻的电压差 $V(t)$ 以及等效电阻 $R_{eq}(t)$ ，在 FPGA 中计算当前时刻的支路电流 $i(t)$ ，即

$$i(t) = \frac{V(t) - U_{CS}(t - dt)}{R_{eq}(t)} \quad (17)$$

步骤 5: 计算子模块电容电压。由计算得到支路电流 $i(t)$ ，计算当前时刻各个子模块的电容电压 $U_{ci}(t)$ ，即

$$U_{ci}(t) = i(t)R_{eqi}(t) + U_{Si}(t - dt) \quad (18)$$

步骤 6: 更新等效电压源。由计算得到的当前时刻节点电压差 $V(t)$ 、等效电阻 $R_{eq}(t)$ 以及支路电流 $i(t)$ ，在 FPGA 中计算得到当前时刻的电压源 $U_S(t)$ ，即

$$U_S(t) = V(t) - i(t)R_{eq}(t) \quad (19)$$

步骤 7: 更新戴维南等效支路。将计算得到 t 时刻的电压源 $U_S(t)$ 和电阻 $R_{eq}(t)$ 更新诺顿等效支路，参与下一个时刻的网络计算。

步骤 8: 更新下一个时刻的触发脉冲。由计算得到的 t 时刻每个子模块的电容电压 $U_{ci}(t)$ 和桥臂电流 $i(t)$ ，发送给外部阀控装置，经过阀控装置的电容电压排序计算后，得到下一个时刻 $t + dt$ 的各个子模块的触发脉冲 $F_i(t + dt)$ 。

再重复步骤 2 至 8 的过程，计算得到下一个时刻 $t + dt$ 的戴维南等值电路的电压源 $U_S(t + dt)$ 和电阻 $R_{eq}(t + dt)$ 以及各个子模块的电容电压 $U_{ci}(t + dt)$ 。

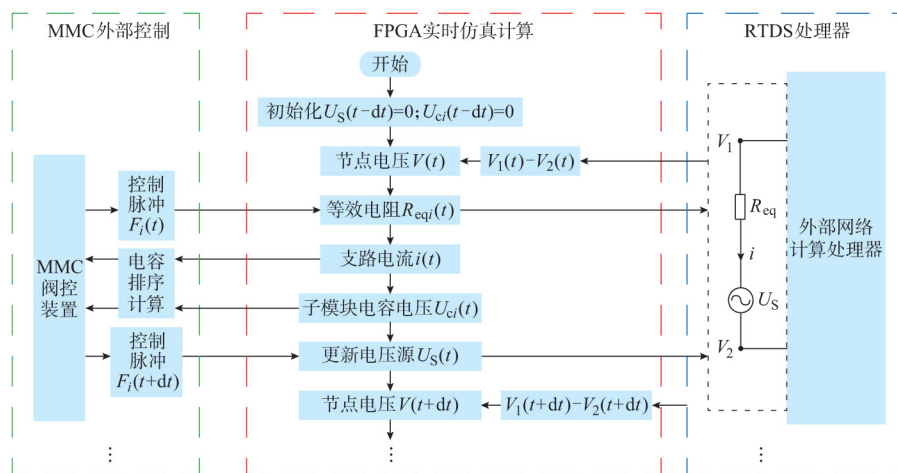


图 2 基于 FPGA 的 MMC 计算流程
Fig.2 Calculating proccession for MMC based on FPGA

2.2 试验系统结构

基于 FPGA 的灵活柔性直流实时仿真试验系统的结构如图 3 所示，主要包含：RTDS、大步长中搭建的交直流电网仿真模型、小步长中搭建的 MMC 戴维南等效支路模型、大小步长接口变压器模型、RTDS 提供的双向高速通信的 GTFPGA 板卡、实现自定义 MMC 模型算法和通信接口的 FPGA 板卡、MMC 阀控装置、MMC 及换流站级控制保护装置以及 IO 板卡等。

由于 MMC 仿真模型是采用约 $2.5 \mu s$ 的小步长仿真计算，而 RTDS 其他交直流电气网络是采用 $50 \mu s$ 及以上的大步长仿真计算，为了在同个实时仿真系统实现混合步长的协同计算，在实时仿真中需采用大小步长接口变压器模型，将 MMC 仿真模型与其他电气网络连接。此外，大小步长接口变压器还可以根据主电路中实际变压器参数设置变压器的一次参数，起到连接两个不同交流电压等级系统的实际变压器的作用。

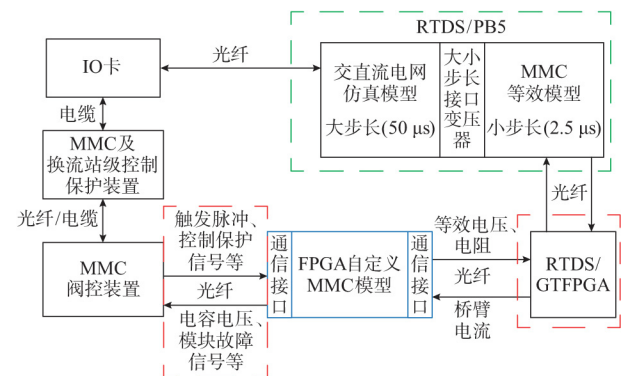


图 3 基于 FPGA 的柔性直流实时仿真系统结构
Fig.3 Structure of flexible DC real-time simulation system based on FPGA

由以上分析可知，柔性直流换流器的子模块模型可以采用如式(14)所示的戴维南等效模型模拟。为了实现在 FPGA 中模拟的 MMC 模型与 RTDS 中其他元件模型的数据交互，本文提出了在 RTDS 的小步长环境中搭建自定义灵活柔性直流 MMC 的

戴维南等效支路模型,并通过 RTDS 提供的具有双向高速数据通信功能的 GTFPGA 卡与 RTDS 中的仿真系统进行通信的方法。

GTFPGA 卡通过光纤和国际通用的 Aurora 通信协议将 RTDS 中流经戴维南等效支路模型的桥臂电流 i_{arm} 送给实现自定义 MMC 模型算法的 FPGA 卡;同时,FPGA 板卡也是通过光纤和国际通用的 Aurora 通信协议将计算得到的 MMC 等效模型中的等效桥臂电压 U_s 和等效电阻 R_{eq} 传送给 GTFPGA 卡,从而实现模拟自定义柔性直流换流器等效模型的 FPGA 卡与 RTDS 进行双向数据实时通信。

FPGA 卡通过光纤和 Aurora 通信协议接收从 MMC 阀控装置输出的一系列子模块开关的触发脉冲及其他用户自定义的控制保护信号;在 FPGA 卡中实时计算输出每个子模块电容上的电压及用户自定义的模块故障等信号,传输给 MMC 的阀控装置,用于 MMC 阀控装置实现电容电压排序和环流抑制等计算和控制保护策略。

阀控制装置通过光纤和电缆将阀控的状态等信号上传给上层的换流器控制,并接收换流器控制装置发出的调制波等信号;最后通过输入输出的 IO 板卡将 RTDS 模拟的柔性直流仿真系统与外部柔性直流换流器及换流站级控制保护装置相连,构成柔性直流控制保护闭环试验系统。

3 仿真验证

3.1 仿真系统

由于目前还未有大容量高电压柔性直流实际工程的整套控制保护装置,但为了验证所提出的基于 FPGA 的自定义 MMC 仿真模型的正确性和有效性,鉴于现有的 RTDS 封装阀组模型已成熟应用柔性直流工程的控制保护测试,本文通过采用 RTDS 封装阀组模型与开发的自定义 MMC 仿真模型,以一种“半闭环”测试方式进行比对试验结果,验证本文所提出的自定义 MMC 建模思路、算法以及通信协议的正确性,未来可在完全自主化的程序代码上再进一步根据测试需求自定义传输信号、功能以及模块拓扑等。

其中“半闭环”测试方式是:①图 3 中的 MMC 及换流站级控制保护装置与阀组只有常规的输入输出 IO 板卡的通信,可在 RTDS 中搭建相应控制保护逻辑并生成调制波;②由于在实际工程中,往往存在不同换流站采用不同厂家生产的阀控装置,不同

的阀控装置从传输变量的内容时序等方面也各不相同,因此,可采用 RTDS 提供的阀控装置与所开发的自定义 MMC 仿真模型连接,重点测试阀组与阀控装置的通信和信号交互。

在 RTDS 仿真平台中,分别采用本文所开发的基于 FPGA 的自定义 MMC 模型及 RTDS 已有的 MMC 仿真模块搭建如附录 C 图 C1 所示的双端对称双极大容量柔性直流输电仿真系统,每个极输出额定直流电压为 500 kV,双极额定直流功率为 3 000 MW,MMC 采用全桥拓扑结构,具体参数见附录 C 表 C1。由于 MMC 仿真板卡资源有限,在所建立的双端柔性直流输电系统中,双端换流站极 1 的 MMC 全部采用开发的自定义 MMC 模型,双端换流站极 2 的 MMC 则全采用 RTDS 自带 MMC 模型,阀控装置采用 RTDS 提供的阀控板卡模拟,极 1 和极 2 的控制策略完全相同。

3.2 仿真分析

1) 闭锁状态仿真结果

闭锁充电仿真结果如图 4 所示,其中 U_{aup1} 和 U_{vc1} 分别为自定义模型和 RTDS 自带模型的 A 相上桥臂第 1 个子模块电容电压; U_{B1UDL} 和 U_{B2UDN} 分别为自定义模型和 RTDS 自带模型的换流器直流正极电压。

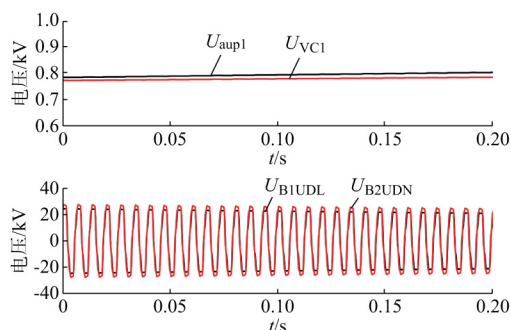


图 4 闭锁状态仿真结果对比
Fig.4 Simulation result comparison of blocking state

在充电过程中,正反向电流均对子模块电容充电,电容电压逐渐提高,最终达到稳态值,接近理论值 0.763 7 kV。两种模型的直流电压仿真结果十分接近,但自定义模型的仿真结果中充电的电容电压值略微比 RTDS 自带模型结果大,这主要是因为两个模型中对二极管元件的等效开断电阻设置不一致造成的。

另外对于所开发的自定义模型与 RTDS 自带模型,从闭锁到解锁以及达到稳态运行的仿真对比结果分别见附录 D 图 D1 和图 D2。

2) 故障暂态仿真结果

设置 A 相上桥臂第 1 个子模块发生电容短路故障, 仿真结果如图 5 所示。其中, U_{aup3} 和 U_{VC3} 分别为自定义模型和 RTDS 自带模型的 A 相上桥臂第 3 个子模块电容电压; I_{GB1PAi} 和 I_{GB2PAi} 分别为自定义模型和 RTDS 自带模型的 A 相上桥臂桥电流。当第 1 个子模块短路后, 电容迅速放电, 子模块电容电压由额定值 2.0 kV 降为 0 kV, 第 3 个子模块无故障, 继续保持额定值运行。桥臂电流在一个模块电容短路后略微增大, 自定义模型和 RTDS 自带模型仿真结果基本一致。

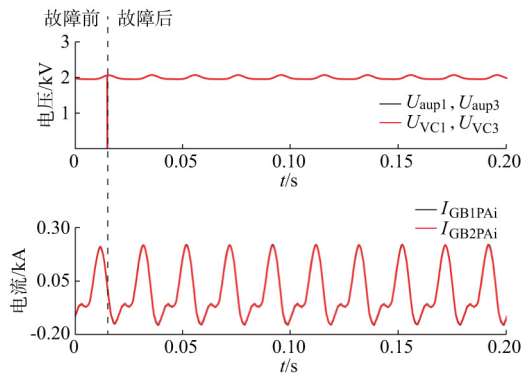


图 5 子模块电容故障仿真结果对比
Fig.5 Simulation result comparison of sub-modular capacitor fault

根据以上仿真对比分析可知, 所开发的基于 FPGA 的自定义 MMC 仿真模型可以外接阀控装置, 其闭锁、解锁以及子模块级的故障仿真结果与自带的 RTDS 结果基本一致, 验证了所提出的建模算法和自定义 MMC 实时仿真模型的正确性和有效性, 另外所建立的 CDSM 拓扑结构的 MMC 仿真结果也与理论分析一致, 如附录 E 图 E1 所示。此外由于高度的自定义灵活性, 可在模型中设置相应的模块级故障, 满足 MMC 阀控及上层控制保护装置的需求。

4 结语

未来大容量、高电压、远距离柔性直流输电系统对现有的仿真建模提出了更高的要求, 本文提出了一种基于 FPGA 的灵活可自定义的柔性直流实时仿真建模方法, 建立更符合未来含新型子模块拓扑结构的高电压、大容量、远距离输电的柔性直流输电工程控制保护装置闭环测试需求的实时仿真模型, 为控制保护特性研究及其闭环试验提供有效且可定制的实时仿真试验系统和重要的仿真技术支持。下一步将结合实际工程 MMC 换流阀功率模块的运行

数据继续完善模型的精确性, 考虑在模型中增加器件的损耗算法等, 并结合未来含新型拓扑的实际柔性直流工程闭环测试不断完善模型功能。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES G D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 24 (3): 592-602.
- [2] GNANARATHNA U N, GOLE A M, JAYASINGHE R P. Efficient modeling of modular multilevel HVDC converters (MMC) on electromagnetic transient simulation programs [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(1): 316-324.
- [3] 李庚银, 吕鹏飞, 李广凯, 等. 轻型高压直流输电技术的发展与展望 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 77-81.
LI Gengyin, LÜ Pengfei, LI Guangkai, et al. Development and prospects for HVDC light [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 77-81.
- [4] 赵静, 赵成勇, 孙一莹, 等. 模块化多电平直流输电联网风电场时的低电压穿越技术 [J]. 电网技术, 2013, 37(3): 726-732.
ZHAO Jing, ZHAO Chengyong, SUN Yiyong, et al. Low voltage ride-through technology for wind farms connected to power grid via MMC-based HVDC transmission [J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 726-732.
- [5] 赵成勇, 刘文静, 郭春义, 等. 一种适用于风电场送出的混合型高压直流输电系统拓扑 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 146-151.
ZHAO Chengyong, LIU Wenjing, GUO Chunyi, et al. Topology of a hybrid HVDC transmission system for wind power grid connection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 146-151.
- [6] 李文津, 汤广福, 康勇, 等. 基于 VSC-HVDC 的双馈式变速恒频风电机组启动及并网控制 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(12): 1864-1873.
LI Wenjin, TANG Guangfu, KANG Yong, et al. Starting up and integration control of doubly-fed variable-speed constant-frequency wind power generator based on VSC-HVDC [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(12): 1864-1873.
- [7] 管敏渊, 张静, 刘强, 等. 柔性直流输电系统的联网和孤岛运行通用控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 103-109. DOI: 10.7500/AEPS20140313002.
GUAN Minyuan, ZHANG Jing, LIU Qiang, et al. Generalized control strategy for grid-connected and island operation of VSC-HVDC system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 103-109. DOI: 10.7500/AEPS20140313002.
- [8] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering

- technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [9] 蒋冠前,李志勇,杨慧霞,等.柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J].电力系统保护与控制,2015,43(15):145-152.
JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-152.
- [10] 饶宏.南方电网大功率电力电子技术的研究和应用[J].南方电网技术,2013,7(1):1-5.
RAO Hong. Research and application of the high-power electronic technology in China southern power grid [J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(1): 1-5.
- [11] 吴博,李慧敏,别睿,等.多端柔性直流输电的发展现状及研究展望[J].现代电力,2015,32(2):9-14.
WU Bo, LI Huimin, BIE Rui, et al. Current development and research prospect of VSC-MTDC[J]. Modern Electric Power, 2015, 32(2): 9-14.
- [12] KOURO S, MALINOWSKI M, GOPAKUMAR K, et al. Recent advances and industrial applications of multilevel converters[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2010, 57(8): 2553-2580.
- [13] RODRIGUEZ J, LAI J S, PENG F Z. Multilevel inverters: a survey of topologies, control, and applications[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2002, 49(4): 724-738.
- [14] 徐政,薛英林,张哲任.大容量架空线柔性直流输电关键技术及前景展望[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5051-5062.
XU Zheng, XUE Yinglin, ZHANG Zheren. VSC-HVDC technology suitable for bulk power overhead line transmission [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5051-5062.
- [15] 徐政.柔性直流输电系统[M].北京:机械工业出版社,2014.
- [16] MARQUARDT R. Modular multilevel converter topologies with DC-short circuit current limitation [C]// IEEE 8th International Conference on Power Electronic and ECCE Asia, May 30-June 3, 2011, Jeju, Korea: 7p.
- [17] SCHMITT D, WANG Y, WEYH T, et al. DC-side fault current management in extended multiterminal-HVDC-grids [C]// International Multi-Conference on System, Signals and Devices, March 20-23, 2013, Chemnitz, German: 5p.
- [18] 刘剑,邵能灵,范春菊,等.柔性直流输电线路故障处理与保护技术评述[J].电力系统自动化,2015,39(20):158-167. DOI: 10.7500/AEPS20150125002.
LIU Jian, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Comments on fault handling and protection technology for VSC HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 158-167. DOI: 10.7500/AEPS20150125002.

林雪华(1988—),女,通信作者,硕士,工程师,主要研究方向:柔性直流输电系统实时仿真建模与控制保护分析。
E-mail: linxh@csg.cn

郭琦(1979—),男,博士,教授级高级工程师,主要研究方向:高压直流控制保护技术和电力系统实时仿真等。
E-mail: guoqi@csg.cn

郭海平(1986—),男,硕士,工程师,主要研究方向:柔性直流、高压直流实时仿真及控制保护技术。E-mail: guohp@csg.cn

(编辑 孔丽蓓)

FPGA Based Real-time Simulation Technology and Test System of Flexible DC

LIN Xuehua^{1,2}, GUO Qi^{1,2}, GUO Hai ping^{1,2}, WANG Yu³, LIU Chongru³

1. Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid Company Limited, Guangzhou 510663, China;
2. CSG Key Laboratory for Power System Simulation, Guangzhou 510663, China;
3. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: With the developing trend towards large capacity, high voltage and long distance for flexible DC technology, challenge and higher requirements are put forward for the existing flexible DC real-time simulation technology. In order to meet the control and protection testing requirement for the large capacity, high voltage and long distance flexible DC system, a new simulation method is proposed. Firstly, the equivalent modeling method of modular multilevel converter (MMC) suitable for variable sub-module topology and module level fault is developed. Then the modeling algorithm is realized based on the field programmable gate array (FPGA). The FPGA carries on communication with Thevenin equivalent circuit in real-time digital simulator (RTDS) through GTFPGA. Thus, a flexible and user defined flexible DC model is built in RTDS. The model developed using FPGA technology provides an effective way to research control and protection characteristics for the large capacity, high voltage and long distance flexible DC system. And it provides an effective real-time simulation test system and important simulation technology support.

This work is supported by China Southern Power Grid Company Limited (No. CSGTRC-K142031).

Key words: flexible DC transmission; field programmable gate array (FPGA); real-time simulation; test system