

基于载波相移的 MMC 电磁暂态仿真 模型封装控制器设计

陈卉灿¹, 刘昊宇², 包博¹, 喻建瑜², 徐春华¹, 刘崇茹²

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东省广州市 510000;

2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市昌平区 102206)

Design of Packaged Controllers for Modular Multilevel Converter Electromagnetic Transient Simulation Model Based on CPS-SPWM

CHEN Huican¹, LIU Haoyu², BAO Bo¹, YU Jianyu², XU Chunhua¹, LIU Chongru²

(1. Electric Power Dispatching and Control Center of Guangdong Power Grid Co.Ltd, Guangzhou 510000, Guangdong

Province, China; 2. College of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric

Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

摘要: 模块化多电平换流器 (modular multilevel converter, MMC) 进行电磁暂态仿真时, 面临着控制元件数量庞大、数据信号维数转换复杂等建模方面的问题。针对上述问题, 提出了采用载波相移脉宽调制的 MMC 控制系统的高效建模方法。通过调用子程序实现经典控制器封装, 解决了高维信号交互以及控制元件数量庞大的问题。通过控制模块自身重复调用等效子程序代替了建模过程中需要不断复制控制元件的过程, 大大减少了仿真占用的计算资源。通过数组的形式进行多维数据交互, 进一步简化了 MMC 建模过程。经 PSCAD/EMTDC 的仿真测试, 提出的封装控制模型在降低建模规模的同时, 具备与控制元件搭成的控制模型相同的精度。

关键词: 模块化多电平换流器; 离散算法; 封装控制器; 仿真建模; 载波相移调制

Abstract: As is known that large number of control components and complicated data dimension transformation seriously reduce efficiency for building modular multilevel converter (MMC) model. Targeting at the above problems, a convenient and efficient modelling method for MMC control system based on CPS-SPWM is proposed in this paper. The scheme calls subroutines to package classic controller to deal with large amount of control components and transformation between data with different dimension. Equivalent control subroutines are designed in the packaged controller, which significantly reduces the labor of duplication of large amount of control components

基金项目: 中国南方电网有限公司研究项目 (GDKJXM 20162608)

and saves computational resources. The control signals are designed and processed in array form, which significantly simplifies the complexity of the large amount of signal exchange. Simulations results in PSCAD/EMTDC show that the packaged controllers share same accuracy with model using control components.

Keywords: modular multilevel converter; discrete-time algorithm; packaged controller; simulation and modeling; CPS-SPWM

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0135

0 引言

模块化多电平换流器 (modular multilevel converter, MMC) 是一种新型电压源型换流器 (voltage source converter, VSC) 拓扑结构^[1]。基于子模块级联结构的 MMC 具备很多优点, 如保持较大桥臂等效开关频率的同时降低开关频率和开关损耗^[2], 不涉及直接串联开关元件动作一致性问题^[3], 输出的交流波形具有较高的质量^[4]。因此, MMC 在高电压大容量输送电能和电力驱动应用方面大有前景^[5]。

在 MMC 的调制策略中, 载波相移调制策略 (carrier phase shifted sinusoidal pulse width modulation, CPS-SPWM) 利用直流闭环电压控制器动态实现 MMC 桥臂以及子模块的能量平衡^[6-8]。与最近电平调制策略 (nearest level modulation, NLM)^[9-10]不同, CPS-SPWM 不需要排序^[11], 但

需要为 MMC 的子模块搭建规模庞大的电压控制模块 [6-8]，这给在电磁暂态仿真软件中建立高电平 MMC 系统造成了极大困难。因此，目前采用 CPS-SPWM 方法的 MMC 仿真系统规模都比较小 [6-8]。

此外，大部分 PSCAD/EMTDC 软件的控制元件只能处理一维信号。然而，在 MMC 的快速等效桥臂模型 [12] 中，子模块电容电压测量值和触发脉冲都通过多维信号的模式进行交互和运算。PSCAD/EMTDC 现存的“data merge”和“data extract”只能处理维数很低的多维信号，所以对一次系统和二次系统的大量多维数据进行处理时存在很大困难。

本文提出一种 MMC 封装经典控制器的建模方法，可以方便地将 CPS-SPWM 方法应用于较高电平数的 MMC 仿真模型中。该方法能解决 MMC 建模时由于大量控制元件的存在和大量待处理的高维信号引起的问题。因此，在诸如 PSCAD/EMTDC [13] 或 RTDS [14] 的仿真软件中，使用本文提出的封装控制器可以方便地将 CPS-SPWM 方法应用到包含大量子模块的 MMC 系统。

封装控制器包含 4 个部分，即调制波发生器、平衡控制器、载波发生器和触发脉冲发生器。利用控制元件的离散时域算法 [10] 可以将 PSCAD/EMTDC 已有元件库中的控制元件转换为等效控制子函数，并将这些控制子函数写在外部 Fortran 文件中。这样做可以通过调用自定义子程序来避免重复复制控制元件带来的问题，简化建模过程。同时，外部 Fortran 文件相较于 PSCAD/EMTDC 中的 Fortran Script 对编译和执行的要求更低 [15]，并且可以加密自定义算法。此外，封装控制器的输入输出数据可以是高维的，解决了 MMC 一次系统和控制系统在进行子模块电容电压和触发脉冲传输时需要大量信号进行命名、合并、分开的问题。因此本文提出的封装控制系统在建立基于 CPS-SPWM 的高电平 MMC 的控制系统时十分简便有效。

1 封装控制系统

1.1 基于 CPS-SPWM 的控制系统

MMC 的控制系统和一次系统的信号传递如图 1 所示，下标 $i = A, B, C$ ，代表 ABC 三相； $j = u$ 或 l ，分别表示上桥臂或下桥臂； $k = 1, 2, \dots$ ，

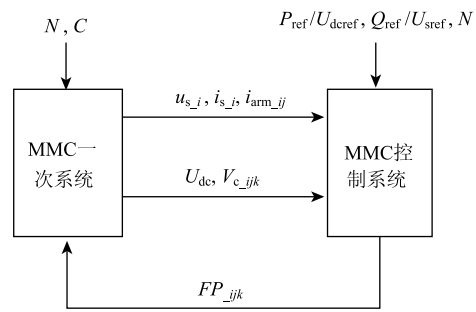


图 1 MMC 信号传输过程

Fig. 1 Transmission process of the measured and control signals for MMC

N ，表示桥臂中子模块编号。后文中下标 i, j 和 k 的含义与此处相同。

MMC 一次系统包括 6 条快速等效桥臂 [12]，每条桥臂有 N 个子模块，每个子模块的电容为 C 。MMC 一次系统需要测量的数据包括交流量和直流量两部分，其中交流量包括：公共连接点母线的交流电压 u_{s_i} 和交流电流 i_{s_i} 以及换流器的桥臂电流 i_{arm_ij} ；直流量包括：子模块电容电压 V_{c_ijk} 和直流侧输出电压 U_{dc} 。

控制系统的输入参考值包括有功功率参考值 P_{ref} 、无功功率参考值 Q_{ref} 、交流电压幅值参考值 U_{sref} 、直流电压参考值 U_{dcref} 以及子模块数目 N 。

MMC 的控制器通过对上述测量值和参考值进行运算生成子模块开关器件的控制信号 FP_{ijk} ，进而将 MMC 控制到目标状态。

如图 2 所示，MMC 控制系统包括 4 个子模块：调制波发生器、平衡控制器、载波发生器和触发脉冲发生器。

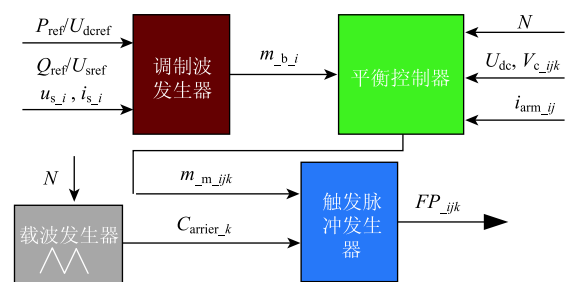


图 2 控制系统的封装模块

Fig. 2 Control blocks of the control system

控制系统先在调制波发生模块中生成三相调制波 m_{b_i} ，在此基础上平衡控制器对各相桥臂进行环流和均压控制生成改进的调制波 m_{m_ijk} ，载波发生模块生成 N 条相移载波 $C_{carrier_k}$ ，触发脉冲

发生模块比较调制波 m_{m_ijk} 和载波 $C_{carrier_k}$ 的大小生成三相六桥臂上所有子模块 IGBT 的触发信号 FP_{ijk} 。

1.2 调制波发生器

1.2.1 旋转坐标下的调制波发生器

MMC 的调制波发生模块大多采用矢量控制，矢量控制器包含外环控制器和内环控制器。外环控制器利用接收的有功和无功类参考值生成内环 dq 轴电流参考值，内环控制器通过调节输出电压跟踪外环生成的电流参考值从而实现整个换流器的功率控制^[3]。矢量控制如图 3 所示。

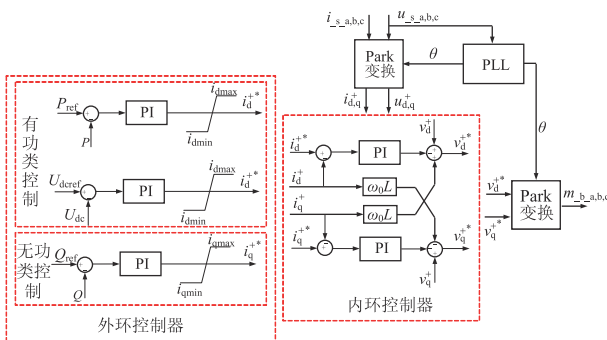


图 3 矢量控制器

Fig. 3 The vector controller

内、外环控制器包括 1 个锁相环 (phase-lock-loop, PLL)、2 个派克变换模型和 4 个 PI 控制器。PSCAD/EMTDC 允许用户根据离散时域算法建立如图 3 所示的封装模型^[13]。本文封装的矢量控制模型的图形外观及参数填写选项见附录附图 1。

1.2.2 静止坐标系下的调制波发生器

MMC 交流侧输出电压的幅值对无源交流负荷具有重要影响，因此 MMC 为无源交流负荷供电时，可以设计基于静止坐标系下的交流电压幅值-相角 ($M-\delta$) 控制器来动态调节换流器输出的交流电压幅值与相角^[16]，满足无源交流负荷的供电要求，图 4 给出了 $M-\delta$ 控制器的设计方案。DFT

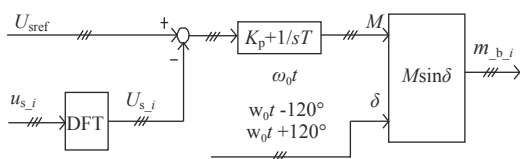


图 4 $M-\delta$ 控制器

Fig. 4 The $M-\delta$ controller

是离散傅里叶变换，可以得到交流电压 u_{s_i} 的幅值 U_{s_i} 。 ω_0 是基频角频率。

将图 4 的 $M-\delta$ 控制器在 PSCAD/EMTDC 中进行封装，封装模型如图 5 所示。 $M-\delta$ 控制器的输入为 MMC 交流侧输出电压，输出为 MMC 的调制波。

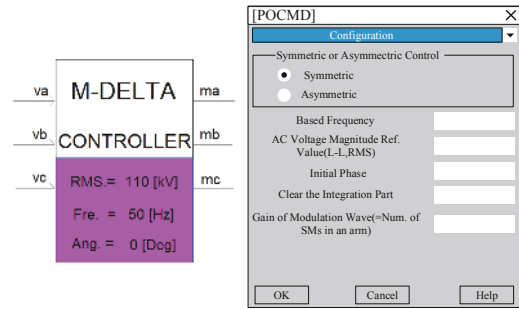


图 5 $M-\delta$ 控制器的封装控制模块

Fig. 5 The control block of $M-\delta$ controller

本文将经典的矢量控制器和 $M-\delta$ 控制器封装来生成 MMC 的基础调制波，前者用于 MMC 的大多数运行场合，后者适用于向无源网络送电并网前期，实现并网后仍采用矢量控制模式。

1.3 平衡控制器

平衡控制器通过进行三相相间环流抑制和每条桥臂的子模块均压控制来实现能量在 MMC 三相六桥臂上的均衡分布。Akagi 等人提出的经典平衡控制^[6]见附录附图 2。

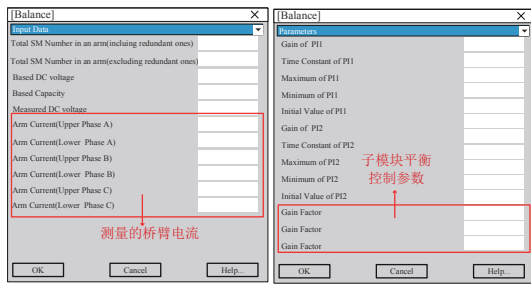
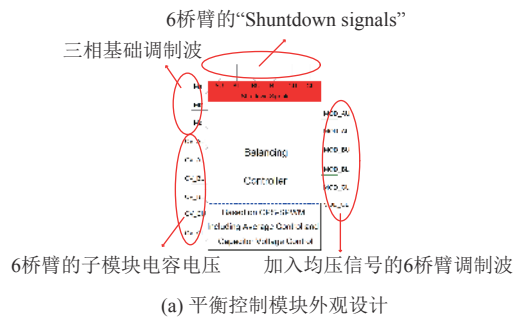
经典平衡控制器包含 2 个 PI 控制器、3 个比例控制器。本文将其封装为图 6 中的平衡控制器。图 6(a) 中，除了三相基础调制波外，其余控制信号都是以多维信号的方式设计的。图 6 中，AU-CL 分别指 ABC 三相的上下桥臂。

1.4 载波与触发脉冲发生器

封装的载波发生器和触发脉冲发生器如图 7 所示。载波发生器生成 N 条相移三角载波，在触发脉冲发生器中与平衡控制器生成的 6 桥臂调制波 (每个桥臂调制波包含 N 个调制波) 相比较，产生 6 条桥臂的触发信号。

1.5 封装模型的可扩展性

本文提出的封装模型将 MMC 控制系统进行了模块化设计，如图 2 所示，将 MMC 的控制系统分成了 4 部分。这种模块化的设计使得对某一个封装控制模块的修改或扩展并不影响其他封装控制模块的功能，从而便于用户扩展新的控制策略。



(b) 平衡控制模块中的参数

图 6 平衡控制模块

Fig. 6 The averaging and balancing control block

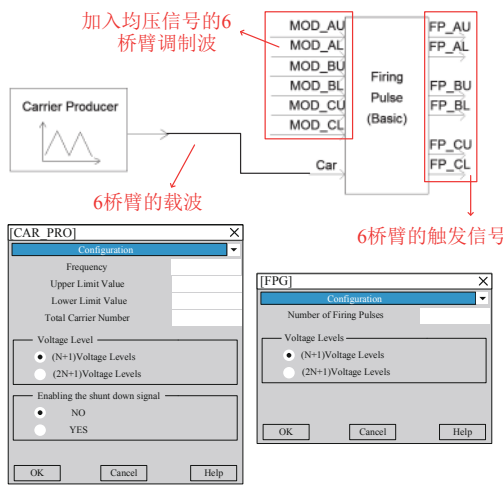


图 7 载波与触发脉冲发生器

Fig. 7 The carrier and firing pulses block

MMC 不同控制策略的差异主要体现在调制波发生器和平衡控制模型上，本文提出的封装控制模型主要封装了经典的矢量控制器和 $M-\delta$ 控制器以及 Akagi 等人提出的平衡控制模型。然而本文提出的封装控制器非常便于拓展兼容现存的各种改进 MMC 控制策略，下面以文献 [8] 中控制策略为例进行说明。

文献 [8] 提出了一种广义功率控制器来适应故障情况下的 MMC 控制，见附录附图 3 所示。

若搭建模型时使用该广义功率控制器来生成调制波，而不是使用 1.2 节封装的经典调制波发生器，只需要将附图 3 中的调制波发生器替换为广义功率控制器，控制系统整体的信号传输以及控制系统的其余模块仍保持为原来的状态。这种模块化的封装控制器结构，对于其他控制策略体现出了很好的兼容性，无论是调制波发生环节，还是平衡控制环节，都只需要对相应控制环节进行调整，再叠加到整体的控制系统，从而将其他控制策略嵌入到本文的封装控制系统中。

2 仿真分析

2.1 仿真系统

本文在 PSCAD/EMTDC 上分别建立了如图 8 所示的 MMC-HVDC 的封装模型和控制元件模型。MMC 每条桥臂包含 100 个子模块，稳态时的直流电压为 200 kV。直流输电线路的电阻和电感分别为 0.15Ω 和 25 mH。MMC₁ 和 MMC₂ 接入有源交流系统 U_{s1} 和 U_{s2} 中，其中 $U_{s1} = U_{s2} = 110 \text{ kV}$ ， $X_L = j3.14 \Omega$ 。MMC₃ 向无源交流负荷供电，其中 $Z_{Load} = (363.0 + j121.0)\Omega$ 。每个子模块的电感是 3 mF，换流器桥臂电感是 40 mH。MMC₁ 和 MMC₂ 采用附图 1 中的矢量控制模型，而 MMC₃ 采用图 5 中的 $M-\delta$ 控制模型。MMC₁ 采用定有功、无功功率控制，其中 $P_{ref} = 100 \text{ MW}$ ， $Q_{ref} = 30 \text{ Mvar}$ 。MMC₂ 采用定直流电压、无功功率控制，其中 $U_{dcref} = 200 \text{ kV}$ ， $Q_{ref} = 10 \text{ Mvar}$ 。MMC₃ 采用定交流电压幅值控制，其中 $U_{sref} = 89.8 \text{ kV}$ 。

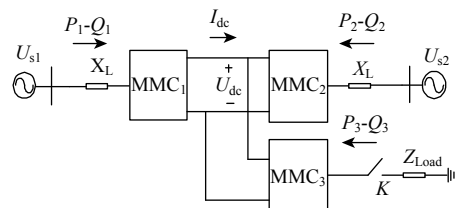


图 8 三端 MMC-HVDC 系统

Fig. 8 Three-terminal MMC-HVDC system

2.2 仿真模型建模规模

本文以 MMC₁ 为例来说明封装模型在降低建模规模和减少数据转换次数方面的优越性。附录附图 4 为采用控制元件搭建 MMC 控制系统时的建模规模。附图 4(a) 是调制波发生器，每个 MMC 需要搭建 1 个；附图 4(b) 是载波发生器，MMC 的

三相桥臂各需要搭建1个；附图4(c)是平衡控制器，MMC的6条桥臂各需要搭建1个；附图4(d)是子模块触发脉冲发生器，每个子模块需要搭建1个，共需 $6N$ 个。

附录附图5为采用控制元件搭建MMC控制系统时需要进行的数据传输和转换工作。附图5(a)是公共连接点采集的交流系统电压、电流信号，传递到调制波发生器来控制MMC传输的功率，每个MMC需要搭建1个；附图5(b)是子模块接收和发出的信号，每个子模块需搭建1个，共需 $6N$ 个；附图5(c)是平衡控制器接收的子模块电压信号，每个MMC需搭建1个；附图5(d)是平衡控制器计算的子模块电压平均值，每个MMC需要搭建1个。

而采用封装控制系统搭建的MMC模型，只需要搭建附图1、图6、图7中的封装子模块各1个。将搭建图8中的三端MMC的两种模型的工作进行汇总，结果见表1。

表1 建立101电平MMC控制系统建模工作对比
Table 1 The comparison of modeling a control system of a 101-level MMC

	主要控制元件 个数	主要控制信号 个数	信号维数转换 次数
原有控制元件	1 810	2 400	8
封装控制系统	4	19	0

表1中，主要控制元件指PI控制器、PLL、比例控制器、PARK变换、载波发生器和触发器；主要控制信号指子模块电容电压、载波、经过平衡控制的调制波和触发脉冲；信号维数转换是将一维数据转化为维数更高的数组或者将数组转化为单独的数据。通过表1中对采用PSCAD/EMTDC原有控制元件和采用封装控制系统建立101电平MMC模型时所需要的工作量的对比，可以明显看到采用本文的封装模型可以极大地简化MMC建模过程。尤其是建立多端高电平的柔直系统时，本文提出的封装控制系统在建模过程中的优势将会更为凸显。

2.3 仿真结果

对搭建的图8中的MMC模型进行仿真来验证封装控制模型相对于控制元件模型的准确性。图9给出了MMC₃从并网至稳态这一过程中三端柔直系统的动态过程。图9(a)、(b)、(c)、(d)依次

表示3个MMC传输的有功功率、无功功率、直流电流和相间环流。

根据1.2节的分析，MMC传输的有功功率、无功功率、直流电流受到调制波发生器的控制。从图9(a)、(b)、(c)可以明显看出，封装的调制波发生模块和控制元件搭成的调制波发生模块对应的仿真波形吻合得非常好，两者都具备很好的动态特性，MMC过渡时未发生较大波动。根据1.3节的分析，MMC的相间环流受到平衡控制器的影响。从图9(d)可以看出封装的平衡控制模块和控制元件搭成的平衡控制模块取得了完全一致的仿真结果，两者都使得MMC的相间环流基本被消除，子模块电容电压一致性较高。

通过上述的仿真验证，充分说明了封装的控制系统能够在大幅度减轻MMC建模工作量的同时取得和控制元件搭建的MMC模型相同的精度。

3 结论

本文采用Fortran语言在PSCAD/EMTDC中封装了基于CPS-SPWM的MMC经典控制系统模型，并搭建了三端MMC模型来说明封装模型具有以下优越性：

1) 本文的封装控制模型包含4部分，即调制波发生模型、平衡控制模型、载波发生模型和触发脉冲发生模型。封装模型采用离散时域算法将控制元件离散化，并建立相应的子程序实现控制元件功能，从而将元件的重复复制转化为封装模型对子程序的多次调用。同时，MMC一次系统和控制系统的参数都通过高维信号的模式进行交互，进一步简化了MMC控制系统的建模工作。此外控制参数集中在4个封装模块的填写，而不是分散在大量的控制元件中，更利于模型调试。

2) 本文的封装控制系统，可以在PSCAD/EMTDC环境下实现基于CPS-SPWM调制方法的上百电平的MMC系统的仿真，并能取得和控制元件搭建的MMC模型相同的精度。

3) 本文的封装控制系统使用价值高，对其他控制策略具有良好的兼容性。利用封装控制器的接口可以将其他附加控制策略加入已有的控制系统中。

(本刊附录请见网络版，印刷版略)

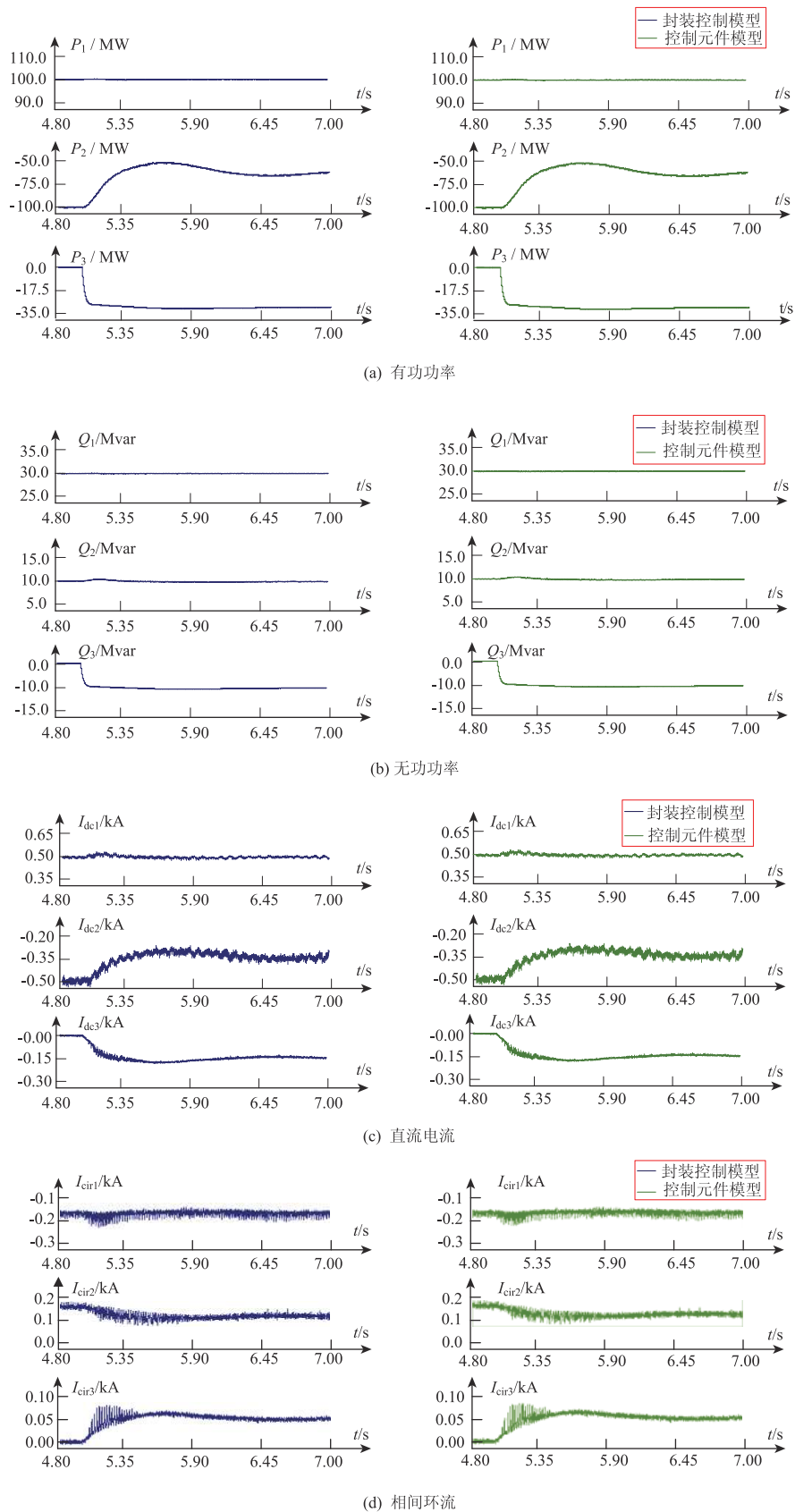


图 9 控制元件和封装模型搭建的 MMC 仿真结果对比

Fig. 9 The simulation result comparison for MMC using control components and packaged models

现代电力, 2020, 37(1) <http://xddl.ncepu.edu.cn> E-mail:xddl@vip.163.com

参考文献

- [1] GLINKA M, MARQUARDT R. A new AC/AC multi-level converter family [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2005, 52(3): 662 – 669.
- [2] 宋平岗, 李云丰, 王立娜, 等. 基于微分平坦理论的模块化多电平换流器控制器设计 [J]. *电网技术*, 2013, 37(12): 3475 – 3481.
SONG Pinggang, LI Yunfeng, WANG Lina, et al. Differential flatness based design of controller for modular multilevel converter [J]. *Power System Technology*, 2013, 37(12): 3475 – 3481 (in Chinese).
- [3] 汤广福, 贺之渊, 滕乐天, 等. 电压源换流器高压直流输电技术最新研究进展 [J]. *电网技术*, 2008, 32(22): 39 – 45.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, TENG Letian, et al. New progress on HVDC technology based on voltage source converter [J]. *Power System Technology*, 2008, 32(22): 39 – 45 (in Chinese).
- [4] 赵静, 赵成勇, 孙一莹, 等. 模块化多电平直流输电联网风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 Yiyang, 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 (in Chinese).
- [5] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平HVDC输电系统子模块电容值的选取和计算 [J]. *电网技术*, 2011, 35(1): 26 – 32.
WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Selection and calculation for sub-module capacitors in modular multilevel converter HVDC power transmission system [J]. *Power System Technology*, 2011, 35(1): 26 – 32 (in Chinese).
- [6] MAKOTO H, HIROFUMI A. Control and experiment of pulse width modulated modular multilevel converters [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, 24(7): 1737 – 1746.
- [7] MAKOTO H, RYO M, HIROFUMI A. Control and analysis of the modular multilevel cascade converter based on double-star chopper-cells [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 26(6): 1649 – 1658.
- [8] WANG Fei, DUARTE J L, HENDRIX M A M. Pliant active and reactive power control for grid-interactive converters under unbalanced voltage dips [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 26(5): 1511 – 1521.
- [9] MARYAM S, REZA I. Dynamic performance of a modular multilevel back-to-back HVDC system [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, 25(4): 2903 – 2912.
- [10] TU Qingrui, XU Zheng. Impact of sampling frequency on harmonic distortion for modular multilevel converter [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, 26(1): 298 – 306.
- [11] LI Zixin, WANG Ping, ZHU Haibin, et al. An improved pulse width modulation method for chopper-cell-based modular multilevel converters [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27(8): 3472 – 3481.
- [12] 王鹏伍, 崔翔. 模块化多电平换流器的时域等效模型及其快速算法 [J]. *电网技术*, 2013, 37(8): 2180 – 2186.
WANG Pengwu, CUI Xiang. A time-domain equivalent model of modular multilevel converter and its fast algorithm [J]. *Power System Technology*, 2013, 37(8): 2180 – 2186 (in Chinese).
- [13] Manitoba Research Centre. PSCAD/EMTDC User's Guide [R]. Winnipeg: Manitoba Research Centre, 2005.
- [14] RTDS Technologies Inc. The RTDS Power System User's Manual [R]. Winnipeg: RTDS Technologies Inc, 2014.
- [15] Manitoba Research Centre. EMTDC User's Guide [R]. Winnipeg: Manitoba Research Centre, 2005.
- [16] LI Haifeng, LIU Chongru, LI Gengyin, et al. A start strategy for synchronized connection of MMCs to an AC system [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2015, 69: 380 – 390.

收稿日期: 2019-03-01

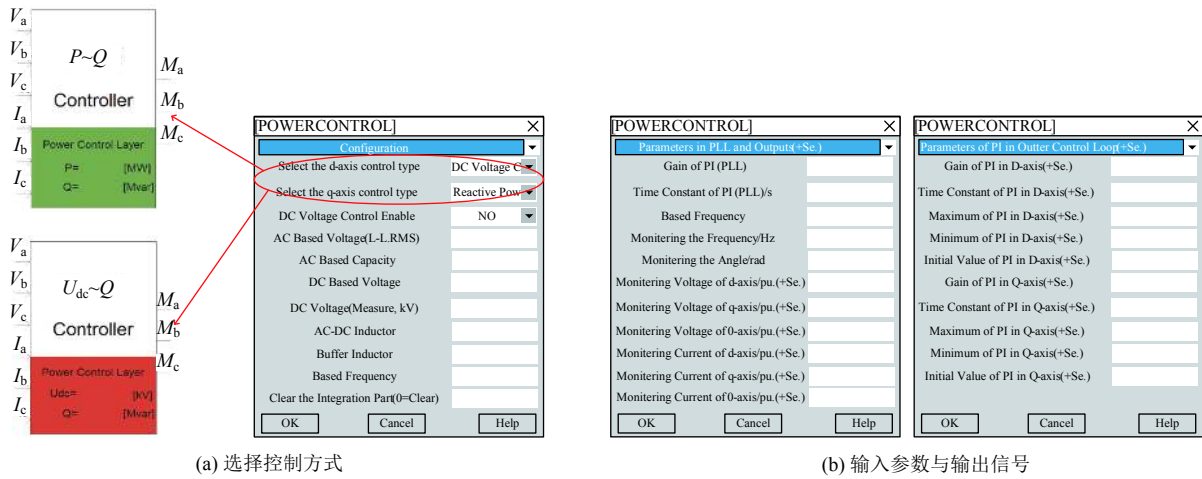
作者简介:

陈卉灿(1989), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统分析、控制与运行, E-mail: chenhuican@gddd.csg.cn;

刘昊宇(1994), 男, 博士研究生, 研究方向为柔性直流输电, E-mail: haoyu_1@126.com;

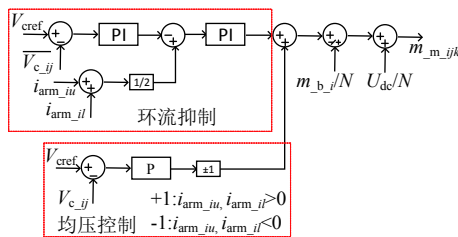
包博(1988), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析、控制与运行, E-mail: hunter0104@126.com.

附录



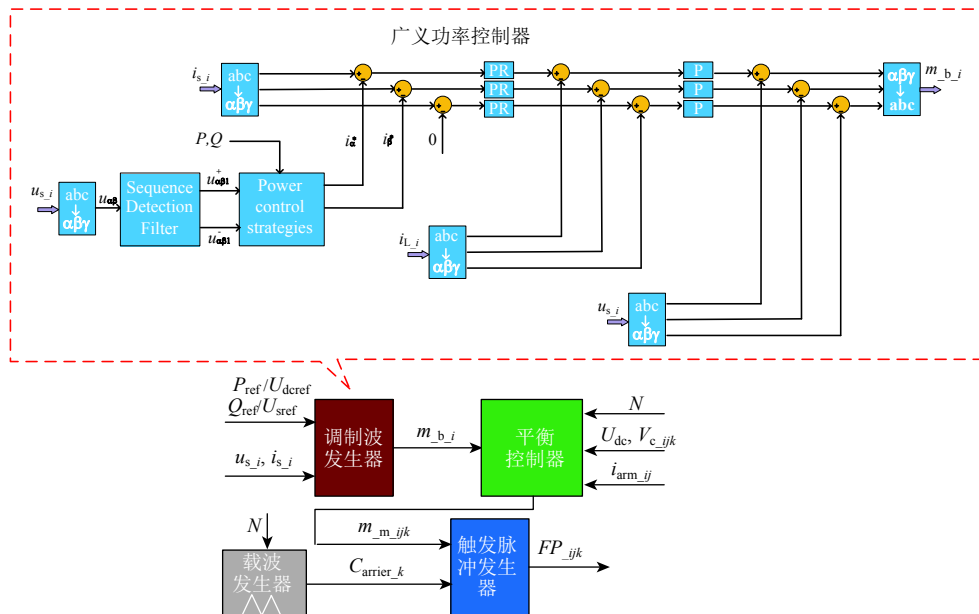
附图 1 矢量控制器的封装模型

Fig. 1 The control block of vector controller



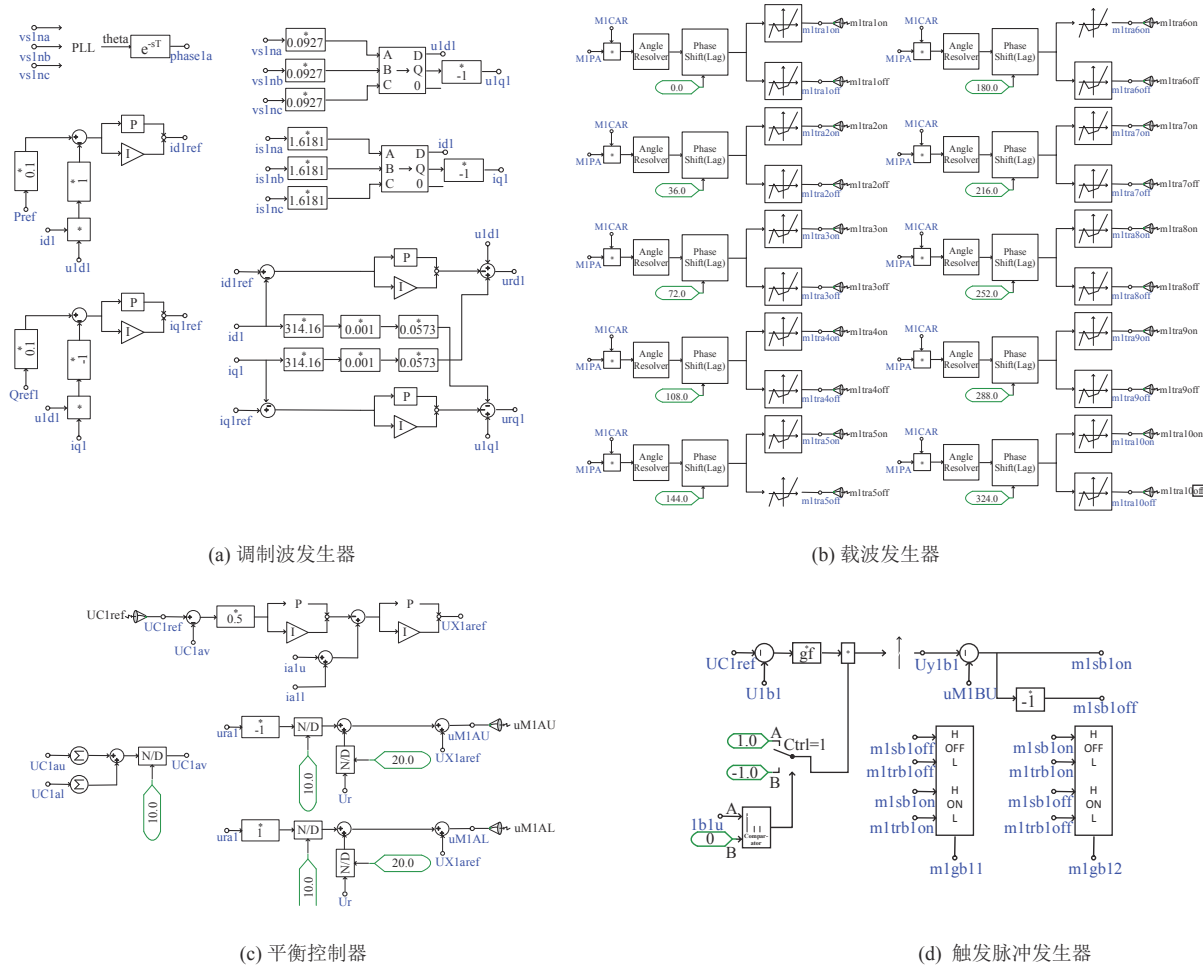
附图 2 经典平衡控制器

Fig. 2 The classic average and balancing controller



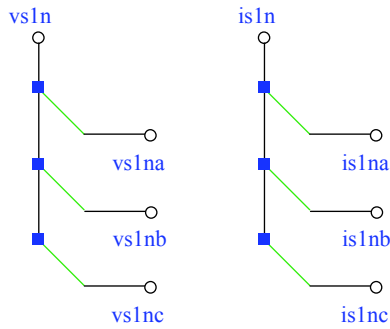
附图 3 封装模型拓展示例

Fig. 3 An example for expanding packaged control model

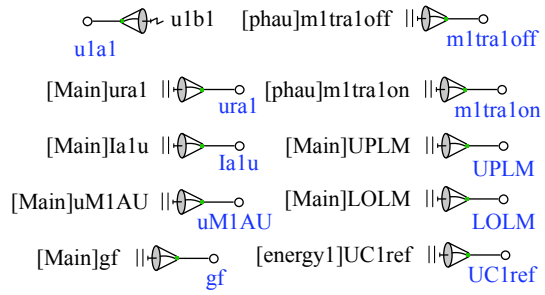


附图4 使用控制元件搭建 MMC 的控制系统规模

Fig. 4 The scale of MMC control model using control Components



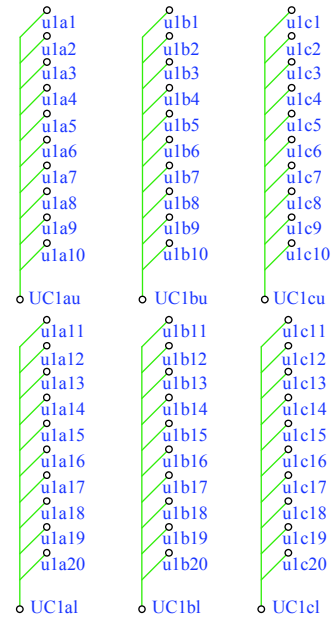
(a) 公共连接点的电压、电流



(a) 子模块发出和接收的信号



(c) 平衡控制器接收的子模块电压信号



(d) 平衡控制器计算的子模块电压平均值

附图 5 使用控制元件搭建 MMC 的数据转换规模

Fig. 5 The scale of MMC data exchange using control components