

文章编号: 2095-2163(2022)03-0012-04

中图分类号: TM464

文献标志码: A

基于BP神经网络的MMC电容电压控制研究

李思南, 李泽滔

(贵州大学 电气工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)作为一种新型的电压源换流器,被广泛应用于直流输电领域。电容的电压平衡问题在MMC中非常重要,随着MMC子模块个数的增多,电容电压的平衡变得越来越困难。本文提出了一种基于BP-PID的双闭环控制策略,通过控制调制波来控制子模块的工作状态,用于解决MMC子模块电容电压不平衡的问题。本文在Matlab/Simulink中搭建了MMC仿真模型,仿真结果表明:所提出的双闭环控制策略可以有效解决MMC子模块电容电压不平衡的问题,并且该方法不需要进行电容电压排序,在实际应用中更为简单便捷。

关键词: 模块化多电平; 电压源换流器; BP-PID; 电容电压均衡策略; MMC 仿真

Research on MMC capacitor voltage control based on BP neural network

LI Sinan, LI Zetao

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

[Abstract] Modular Multilevel Converter (MMC) as a new type of voltage source Converter is widely used in the field of DC power transmission. The problem of capacitance voltage balance is very important in MMC. With the increase of the number of MMC sub-modules, the balance of capacitance voltage becomes more and more difficult. In this paper, a double closed-loop control strategy based on BP-PID is proposed to control the working state of the sub-module by controlling the modulated wave, which is used to solve the problem of capacitance voltage imbalance of the sub-module of MMC. Finally, a simulation model of MMC was built in Matlab/Simulink. The simulation results show that the proposed double closed-loop control strategy can effectively solve the problem of capacitor voltage imbalance of MMC sub-modules, and the method does not need to sequence the capacitor voltage, which is simpler and more convenient in practical application.

[Key words] modular multilevel; voltage source converter; BP-PID; capacitance voltage equalization strategy; MMC simulation

0 引言

能源与人们日常生活息息相关,电力电子设备作为能量转换的关键部分备受关注。近年来,随着风力发电和光伏发电的广泛应用,以及分布式发电快速发展的驱动下,电压源换流器被广泛应用在先进的电力电子设备当中。其中模块化多电平换流器,因其具备其他传统电压和换流器所不具备的优势,进而得到众多学者的关注。模块化多电平换流器可以通过切换子模块灵活运行,很容易产生多电平电压配置,既可以降低设备的平均开关频率,又不影响电能质量。目前针对MMC子模块电容电压的平衡问题一直是重点和难点。常用的电容电压均衡策略需要将子模块电压进行排序,然后再决定控制那些子模块投入或切除,这样不仅计算繁琐还给予子模块上的开关器件造成一定的损耗,不利于系统长期稳定运行^[1-3]。

基于上述问题,本文提出了一种新的MMC电容电压平衡策略。通过该控制策略,可以有效保证子模块的电容电压在较小的范围内进行波动。为了验证所提控制策略的有效性和可靠性,本文在Matlab/Simulink中搭建了MMC的仿真模型,用于验证所提策略的有效性。最后,仿真结果表明,笔者所提出的控制策略可以使MMC电容电压均衡,且容易实现。

1 模块化多电平换流器拓扑结构与工作原理

1.1 主电路拓扑结构

MMC的主要功能是实现了三相交流电压和直流电压之间的相互转换。一个MMC包含6个桥臂,每个桥臂有 N 个子模块,通过相应的调制策略可以输出 $N+1$ 电平^[4]。MMC换流阀是由多个子模块串联组成的,每个单独的子模块包含一个电容器和两个互补的绝缘栅双极晶体管,子模块输出电

作者简介: 李思南(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向:控制理论与控制工程;李泽滔(1960-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:计算机控制技术、自适应控制、鲁棒控制等。

通讯作者: 李泽滔 Email: gzulzt@163.com

收稿日期: 2021-10-11

流等于换流阀电流。换流阀电压为各子模块输出电压之和^[5]。模块化多电平换流器的拓扑结构如图1所示。

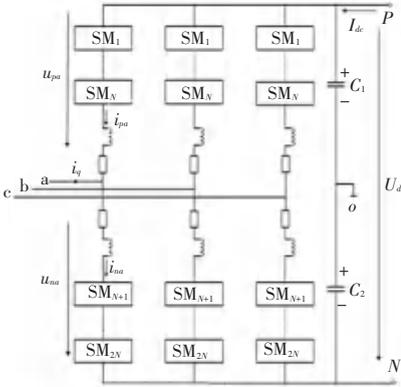
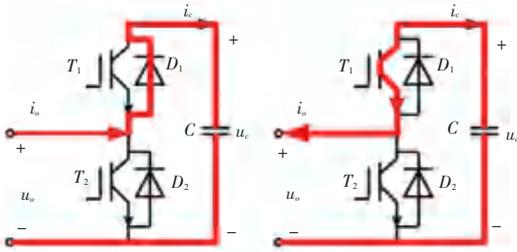


图1 模块化多电平换流器拓扑结构

Fig. 1 Topology of modular multilevel converter

在正常运行过程中,各子模块有两种工作模式,如图2和图3所示。

模式一:当 T_1 (上IGBT)打开、 T_2 (下IGBT)关闭时,子模块处于投入状态。在这种工作模式下,如果 i_o 流入子模块(如图2(a)), i_o 通过 D_1 给电容充电;如果 i_o 流出子模块(如图2(b)), i_o 将通过 T_1 从电容放电。无论电流流向哪个方向,子模块两端的输出电压 u_o 均与电容电压 u_c 相同。



(a) 子模块电容充电 (b) 子模块电容放电

图2 子模块处于投入状态

Fig. 2 The sub-module is in the input state

模式二:当 T_1 (上IGBT)关闭、 T_2 (下IGBT)打开,子模块处于切除状态,这时子模块两端的输出电压 $u_o = 0$,如图3所示。

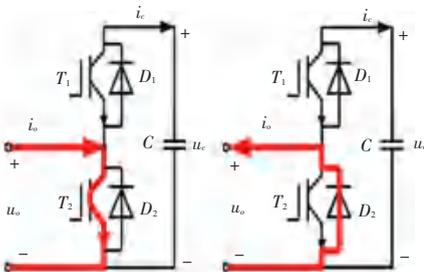


图3 子模块处于切除状态

Fig. 3 The sub-module is in the excised state

1.2 MMC 数学模型

由于模块化多电平换流器三相对称,为了讨论的方便,以a相为例,对MMC的a相建立等效的数学模型。电路如图4所示。

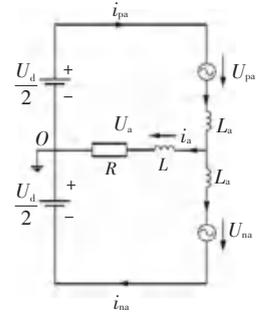


图4 MMC a相数学模型

Fig. 4 MMC a phase mathematical model

其中, U_d 为直流侧的电压; U_{pa} 为上桥臂各个子模块输出电压之和; U_{na} 为下桥臂各个子模块输出电压之和; i_{pa} 为流过上桥臂的电流; i_{na} 为流过下桥臂的电流; U_a 、 i_a 分别为a相输出的电压和电流; R 、 L 分别为阻性负载和感性负载^[6]。

模块化多电平换流器在正常工作状态下,上下桥臂投入子模块数之和为 N ,即

$$N = N_{pa} + N_{na} \quad (1)$$

式中, N_{pa} 为上桥臂处于投入状态的子模块数, N_{na} 为下桥臂处于投入状态的子模块数。其中每个子模块的电容电压 U_c 为:

$$U_c = \frac{U_d}{N} \quad (2)$$

根据基尔霍夫电流定律,可知输出电流与上下桥臂电流之间的关系为:

$$i_a = i_{pa} - i_{na} \quad (3)$$

假设流过a相的环流为 i_{za} ,则有如下关系:

$$\begin{cases} \uparrow i_{pa} = i_{za} + \frac{i_a}{2} \\ \downarrow i_{na} = i_{za} - \frac{i_a}{2} \end{cases} \quad (4)$$

可以推出环流 i_{za} 的值为:

$$i_{za} = \frac{i_{pa} + i_{na}}{2} \quad (5)$$

根据霍尔基夫电压定律,可以得出如下关系:

$$\begin{cases} \uparrow -\frac{U_d}{2} + U_{pa} + L_a \frac{di_{pa}}{dt} + U_a = 0 \\ \downarrow -\frac{U_d}{2} + U_{na} + L_a \frac{di_{na}}{dt} - U_a = 0 \end{cases} \quad (6)$$

则推出 a 相的输出电压 U_a 为:

$$U_a = \frac{U_{na} - U_{pa}}{2} - \frac{L_a}{2} \frac{di_a}{dt} \quad (7)$$

1.3 MMC 调制策略

1.3.1 常用的两种调制策略

MMC 通过相应的调制策略控制功率模块上开关器件的通断,进而实现控制功率模块的投入或切除,使得每个功率模块所输出的电压波形叠加后与调制波保持一致。目前常见的调制策略主要有载波移相调制(CPS-PWM)和最近电平调制(NLM)两种。其中,CPS-PWM 一般运用于子模块数量较少的小功率场合。由于本文搭建的仿真模型电平数较低,故采用的调制策略为 CPS-PWM^[7-9]。

1.3.2 载波移相调制策略

如前所述,在载波移相调制策略下的 MMC 交流侧,所输出的电压波形具有谐波含量较低等优点。图 5 为 CPS-PWM 工作原理的示意图。每一个功率模块都会对应一个三角载波,用这些三角载波分别与正弦调制波进行比较,然后产生 IGBT 所需要的控制脉冲信号。具体的规则是:当调制波的幅值大于三角载波幅值时,所对应的功率模块处于投入状态,反之模块处于切除状态。

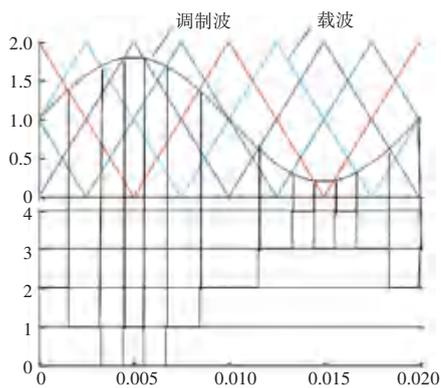


图 5 CPS-PWM 工作原理的示意图

Fig. 5 Schematic diagram of how CPS-PWM work

2 电容电压均衡策略

2.1 传统电容电压平衡策略

传统最近电平逼近调制框架如图 6 所示。其中,输入 U_{arm_ref} 为桥臂电压参考值。通过计算可以得到每相需要处于投入状态子模块的总数 N , 根据电流方向对子模块电容电压进行排序。充电时,电容电压从小到大进行排列,控制前 N 个子模块处于投入状态;放电时,电容电压按从大到小排列,控制

前 N 个子模块处于投入状态。这种传统的电容电压平衡策略,需要对所有子模块的电容电压进行排序,其计算量大、效率低,且不便操作。

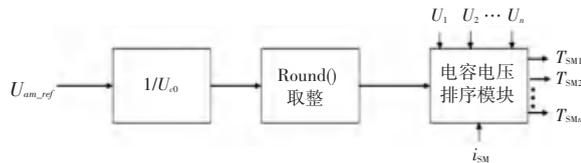


图 6 传统电容电压排序法框图

Fig. 6 Block diagram of traditional capacitor voltage sorting method

2.2 新型电容电压平衡策略

本文根据文献中有关电容电压平衡策略做了相应改进。改进后电容电压均衡策略框架如图 7 所示。电压外环采用 PB-PID 控制器,确保相单元中所有子模块电容电压的平均值能够跟踪给定的参考值。两者作差之后,通过 PB-PID 控制器得到环流电流的参考值,电流内环也采用 PB-PID 控制器,控制实际的环流值能够跟踪给定的环流参考值,最后输出的 U_{Aaref} 为电容电压平均控制调节量。将输出的补偿量与调制波进行叠加得到最终的调制波的值。通过改变调制波大小,可控制 IGBT 开通与关断的时间,相当于改变子模块的电容电压,进而可以实现控制 MMC 电容电压平衡的目的。补偿量 U' 可表示为:

$$U' = K_p (i_{cir} - i_{cir}^*) + K_i \int (i_{cir} - i_{cir}^*) dt + K_d \frac{d(i_{cir} - i_{cir}^*)}{dt} \quad (8)$$

其中,比例、积分和微分系数可通过 BP 神经网络训练得到。相比于传统的调试,试凑得到的系数更加准确和可靠。

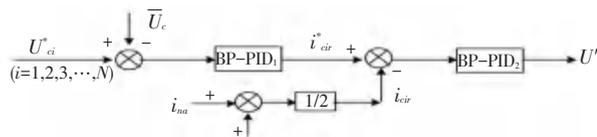


图 7 改进后电容电压均衡策略框图

Fig. 7 Improved block diagram of capacitor voltage equalization strategy

3 仿真实验分析

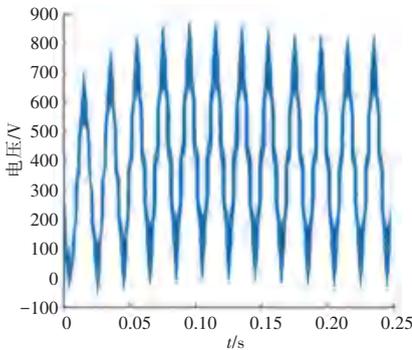
为了验证本文所提出的 MMC 电容电压控制策略的有效性、正确性以及可靠性。利用 Matlab/Simulink 软件仿真环境,搭建了基于载波移相调制的 5 电平 MMC 逆变器模型。实验数据见表 1。

表 1 MMC 逆变器仿真数据

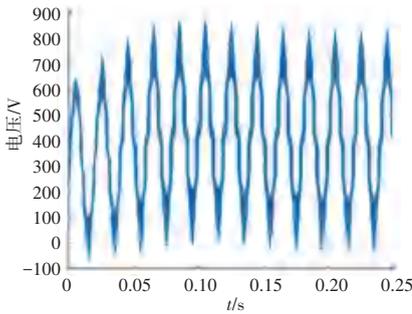
Tab. 1 Simulation data of MMC inverter

参数	数值
直流侧给定电压/V	800
交流侧线电压/V	380
桥臂子模块数/N	4
载波频率/kHz	1
额定频率/Hz	50
子模块电容容值/mF	2
桥臂电感/mH	5
电容电压给定初始值/V	200
直流侧负载电阻/ Ω	80

通过调制策略控制 MMC 子模块电容电压进行充放电, 可以实现将交流电转换为直流电。图 8 为 a 相上下桥臂电压的输出波形。



(a) a 相上桥臂输出电压仿真波形

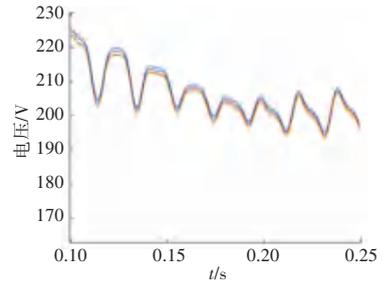


(b) a 相下桥臂输出电压仿真波形

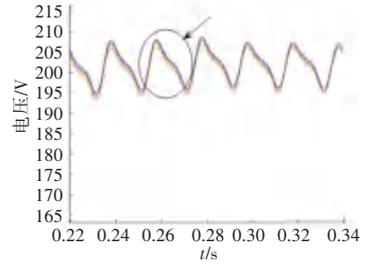
图 8 a 相上下桥臂电压的输出波形

Fig. 8 Output waveform of a-phase upper and lower bridge arm voltage

为了验证所提出的子模块电容电压均衡策略的可靠性, 在仿真过程中对子模块电容电压采取电压均衡控制, 每个子模块电容电压的初始值为 200 V。通过仿真可以得到如图 9 所示的仿真波形。其中, 图 9(a) 为未加入电容电压控制前子模块电容电压, 其电压波动幅度为 196~225 V 之间; 而加入子模块电容电压控制一段时间后, 子模块电容电压开始平衡, 电压波动幅度为 197~207 V 之间(图 9(b))。波动幅度有显著的减小, 由此说明 MMC 子模块的电容电压得到了一定的改善, 验证了电容电压控制策略的有效性。



(a) 未加电容电压均衡策略时子模块电容电压仿真波形



(b) 加入电容电压均衡策略时子模块电容电压仿真波形

图 9 子模块电容电压仿真波形

Fig. 9 Simulation Waveform of Capacitor Voltage of Sub-Module

4 结束语

本文对 MMC 工作原理作了详细的分析和研究, 推导出子模块工作的状态空间表达式, 分析了传统的 MMC 电容电压平衡控制的不足, 提出了一种基于 BP 神经网络的 MMC 电容电压均衡策略。利用 Matlab/Simulink 软件搭建仿真模型进行验证, 实验结果表明: 本文所提出的 MMC 电容电压均衡策略, 可以有效改善子模块电容电压稳定性, 且相对于传统方法, 不需要对子模块电容电压进行排序, 减少了计算量, 提高了工作效率, 应用性更强。

参考文献

- [1] 林强, 厉伟, 徐建源, 等. MMC 子模块电压均衡及环流抑制方法研究[J]. 电工电气, 2021(1): 5-10.
- [2] 马龙, 张子钰, 郭希铮. MMC 电容电压排序优化控制策略研究[J]. 电气应用, 2020, 39(10): 68-74.
- [3] 刘建华, 琚云鹏, 吕承阳, 等. MMC 优化均压控制方法的研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(19): 99-104.
- [4] 陈波, 杨帆, 黄凯成, 等. MMC 均压控制参数优化研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(12): 19-24.
- [5] 粟咏梅, 粟时平, 李琳, 等. 模块化多电平换流器电容电压优化均衡法研究[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2): 76-83.
- [6] 姚蜀军, 屈秋梦, 蔡焱蒙, 等. 基于多频段动态相量法的 MMC 换流器建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5932-5942.
- [7] 刘建华, 琚云鹏, 吕承阳, 等. MMC 优化均压控制方法的研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(19): 99-104.
- [8] 赵, 李耀华, 李子欣, 等. 模块化多电平变流器开环环流抑制策略的新进稳定性分析[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(10): 1-8.
- [9] 金洪涛. 模块化多电平换流器改进载波移相及电压均衡控制策略研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.