

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190540

基于改进冒泡排序的模块化多电平换流器 电容电压均衡策略

张婕¹, 曾国辉¹, 赵晋斌², 黄勃¹, 肖博¹

(1. 上海工程技术大学电子电气工程学院, 上海 201620; 2. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)子模块电容电压均衡是当前 MMC 研究领域的热点问题。当 MMC 的单个桥臂子模块数量较多时, 存在控制器运算时间长、子模块投切频繁和开关损耗大并导致 MMC 故障等缺陷。针对上述缺陷, 提出了一种基于改进冒泡排序算法和平均值法混合控制策略。通过实时监测电容电压, 采用改进冒泡法在初始化时对子模块电容电压进行排序, 减少 MMC 控制器的运算量。在之后的控制周期采用已投入子模块平均值比较法对子模块作投切, 降低开关频率。最后在 Matlab/Simulink 搭建 21 电平 MMC 模型, 仿真结果验证了所提混合控制策略的有效性和正确性。

关键词: 模块化多电平换流器; 改进冒泡原理; 电容电压均衡; 开关频率; 最近电平控制; 平均值比较

Modular multilevel converter capacitor voltage balancing strategy based on improved bubble sorting

ZHANG Jie¹, ZENG Guohui¹, ZHAO Jinbin², HUANG Bo¹, XIAO Bo¹

(1. School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. School of Electrical Engineering, Shanghai Electric Power University, Shanghai 200090, China)

Abstract: Modular Multilevel Converter (MMC) sub-module capacitor voltage balancing is a hot topic in current MMC research. Large number of single bridge arm submodules in MMC usually lead to the defects such as long controller operation time, frequent switching of sub-modules, and large switching loss leading to MMC failure. To solve above problems, this paper proposes a hybrid control strategy based on improved bubble sorting algorithm and voltage average comparison. According to monitor the capacitor voltage in real time, this paper adopts the improved bubble sorting algorithm to rank the capacitor voltage of the sub-modules during system initialization which can reduce operations and simulation time of MMC controller. The sub-module voltage average comparison strategy is adopted in the subsequent control cycle to switch the sub-module which can reduce the switching frequency. Finally, the 21-level MMC model is built on Matlab/Simulink. The simulation results prove the feasibility and effectiveness of the proposed hybrid control strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61603242) and Discipline Construction Project of Mechanical Electronic Engineering (No. 2018xk-A-03).

Key words: modular multilevel converter; improved bubble principle; capacitor voltage balance; switching frequency; nearest level control; voltage average comparison

0 引言

模块化多电平转换器(MMC)是近年来中高压工业应用中最具吸引力的换流器之一, 如在高压直流中应用较广^[1]。MMC 在业界的广泛使用主要归功

于其传输、中压变速电机驱动和静态同步补偿器等方面灵活的可扩展性、无变压器配置、通用直流总线、冗余的高可靠性等特性^[2]。利用容错技术, MMC 甚至可以在故障 SM 中运行, 从而提高 MMC 的鲁棒性^[3-5]。

目前, MMC 子模块电容电压排序算法主要有冒泡法、质因子分解法、希尔排序法以及混合排序法等。电容电压排序优化及控制是为了减少电容电

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61603242); 机械电子工程学科建设项目资助(2018xk-A-03)

压排序所耗费控制系统的计算资源, 提高控制系统的响应速度^[6]。最新投入运行的厦门柔性直流输电工程的单个桥臂子模块数量就高达 216 个^[7]。MMC 在实际工程应用中随着电压和功率等级的要求越来越高, 模块数量逐渐增多, 传统冒泡排序算法的交换次数和时间复杂度倍增, 增加 MMC 控制器的负担。文献[8]采用了冒泡法, 利用冒泡原理简化了电容电压排序过程, 但该方法在电平数较多时排序计算量大, 功率开关管的开关频率较高。文献[9]提出了一种改进快速排序的电容电压均衡方法, 能够以更少的计算量达到和传统排序算法相同的电压均衡效果, 但该方法在 $1/n!$ 概率下的计算量和传统方法相同。文献[10]提出了一种新的快速电容电压均衡控制策略, 该策略基于电容电压平均值比较原理, 无需对电容电压进行排序, 减少了开关器件的开关频率以及换流器损耗, 但该算法的电压均衡效果及稳定性一般。文献[11]采用的是改进快速排序, 能够以更少的计算量达到和传统方法相同的平衡效果, 该方法虽然减少了计算量但开关频率较高, MMC 子模块故障率较高。文献[12]提出一种基于最近电平逼近调制的 MMC 分组控制策略, 对各个桥臂子模块进行平均分组, 在一定程度上减少了控制器的运算量, 但增加了控制部分的复杂程度。

针对上述问题, 本文提出了基于改进冒泡和平均值比较混合控制算法用于模块化多电平换流器的电容电压排序, 缩短排序时间, 达到良好的均压效果。基本的冒泡排序算法是从头到尾进行的相邻两个数的对比, 直到排完所有数列为止。本文所提出的改进冒泡算法的电容电压排序算法是对采集到的电容电压从两边同时进行冒泡排序。相比于传统冒泡排序, 极大地减小了电压均衡控制的计算量。该策略利用改进冒泡算法简化了电容电压的排序过程, 然后再利用已投入子模块的电容电压平均值比较策略进行投切判断, 通过两种控制算法混合控制减少 MMC 电容电压排序时间以及子模块投切频率, 达到桥臂电压均衡的优化效果。最后, 通过 Matlab/Simulink 仿真对本文所提电容电压均衡控制策略的有效性进行验证。

1 MMC 的基本结构与数学模型

MMC 拓扑结构如图 1 所示, 三相 MMC 由三个相单元组成。其中, 每个相单元由上下两个桥臂 (p 表示上桥臂, n 表示下桥臂) 组成, 每个桥臂由桥臂电感 L_0 和 N 个子模块(Submodules, SM) 串联组成^[13]。

MMC 的子模块由一个开关单元 IGBT 半桥和一个直流储能电容构成, 如图 2 所示。图中 I_{arm} 为子模块所在桥臂的电流; U_{sm} 为子模块的输出电

压; U_c 是子模块的电容电压^[14]。

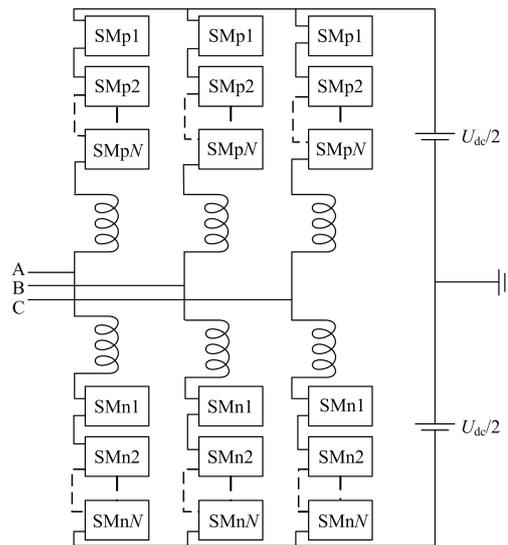


图 1 三相 MMC 拓扑图

Fig. 1 Diagram of three phase MMC topology

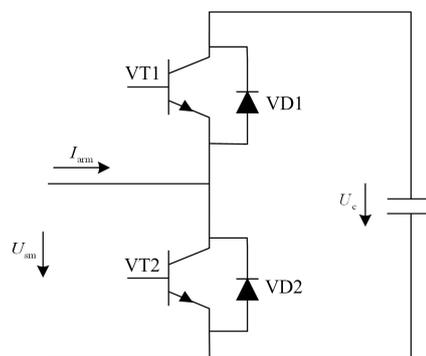


图 2 SM 拓扑图

Fig. 2 Structure of SM

每个子模块通过 2 个开关器件 VT1 和 VT2 作用, U_{sm} 可以同时在这两种电流方向情况下在电容电压 U_c 与 0 之间切换。具体开关状态如表 1 所述。其中, 1 表示导通, 0 表示关断^[15]。

表 1 MMC 子模块工作状态

Table 1 MMC submodule working states

模式	T_1	T_2	I_{arm}	U_{sm}	状态
1	1	0	>0	U_c	投入
2	1	0	<0	U_c	投入
3	0	1	>0	0	切除
4	0	1	<0	0	切除
5	0	0	>0	U_c	闭锁
6	0	0	<0	0	闭锁
7	1	1	>0	0	故障
8	1	1	<0	0	故障

2 MMC 的脉冲调制技术

脉冲调制技术是 MMC 换流器的基础, MMC 通过调制产生脉冲来控制功率器件的开关, 脉冲调制技术对于 MMC 系统性能和输出质量起着决定性作用^[16]。

目前文献中最常用的调制方法主要有基于载波的 PWM 调制、阶梯波调制和空间矢量法(SPWM)三种^[17]。基于载波的 PWM 调制, 包括载波层叠脉宽调制(LS-PWM)、载波移相(CPS-PWM)、开关频率优化脉宽调制^[18]。阶梯波调制, 包括特定谐波消除法(SHE-PWM)、最近电平逼近(NLM)等^[18]。本文在 NLM 调制的基础上提出改进排序和已投入子模块平均值比较混合控制算法, 其原理为使用最接近的电压电平瞬时逼近调制波^[16]。如图 3 所示, 是本文采用的 NLM 调制原理图。

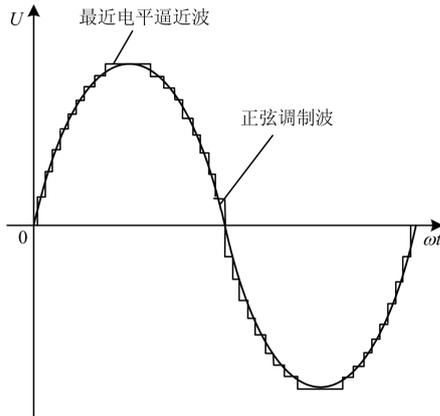


图 3 NLM 调制原理图

Fig. 3 NLM modulation principle diagram

阀基控制器将一个桥臂内的各个子模块电容电压进行排序, 然后根据桥臂电流的方向投入相应的 N_{on} 个子模块^[19]。 N_{on} 表示 MMC 每个桥臂需要投入的子模块个数。子模块的投切原则为: 当桥臂电流的方向是电容充电方向时, 投入电压最低的 N_{on} 个子模块, 使其电压上升; 当桥臂电流的方向是电容放电方向时, 投入电压最高的 N_{on} 个子模块, 使其电压下降^[20]。采用基于 NLM 控制的传统排序算法对电容电压排序时, 上桥臂投入子模块个数 N_{up-on} 和下桥臂投入子模块个数 $N_{down-on}$ 分别表示为

$$N_{up-on} = \frac{N}{2} - \text{round}\left(\frac{U_s}{U_c}\right) \quad (1)$$

$$N_{down-on} = \frac{N}{2} + \text{round}\left(\frac{U_s}{U_c}\right) \quad (2)$$

式中: U_s 为子模块的输出电压; U_c 为子模块电容

电压^[21], 函数 round 为四舍五入函数。

在传统的电容电压排序均压方法中, 首先检测 MMC 每个子模块的电容电压值, 然后利用排序算法对所检测到的电容电压值进行严格排序。如果 MMC 的电平数较多, 会存在系统计算量大和排序时间长等缺陷, 对电压平衡产生影响, 造成电压平衡控制失败。图 4 为冒泡排序算法的电容电压均衡控制流程图。

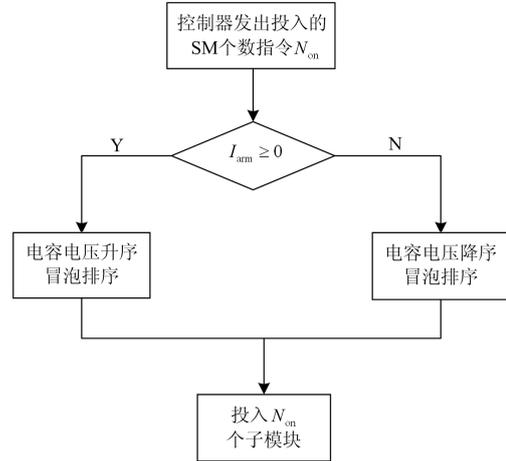


Fig. 4 Flow chart of voltage equalization method for bubble sorting algorithm

3 基于改进冒泡原理的均压控制策略

3.1 改进冒泡算法的原理

采用 NLM 调制方式后, 换流器控制层最终将各桥臂应投入的子模块个数指令 N_{on} 送到阀基控制层。通过子模块的均压控制算法来确定子模块投切。采用 NLM 调制策略的 MMC 都需要对电容电压进行排序, 通过对每个进行投切的子模块电容电压进行排序, 实现维持桥臂整体的电压均衡控制^[22]。

基于冒泡原理的电容电压排序比传统排序速度快且稳定性高。若 MMC 每个相单元有 $2N$ 个子模块, 则 $2N$ 个电容电压均需要排序, 上下桥臂各 N 个子模块, 电平数为 $N+1$ 。若对有 $2N$ 个电容电压进行冒泡排序, 至多需要 $2N-1$ 次, 若在某次排序时未发生元素交换则可提前终止排序过程, 因此冒泡排序一般不需要进行 $2N-1$ 次排序即可完成^[23-24]。本文采用改进冒泡算法在系统初始化时对电容电压从两边同时进行冒泡排序, 与传统冒泡排序相比减少了系统运算量。图 5 为本文所采用的改进冒泡算法原理图, 该方法通过对一组元素同时从两边进行排序, 在每次迭代后改变冒泡的方向, 其最佳时间复杂度为 $O(n)$ 。改进冒泡排序进行顺序排序的时间

复杂度为 $O(n)$ ；逆排序的时间复杂度为 $O(n^2)$ ，因此改进冒泡排序的平均时间复杂度为 $O(n^2)$ [25]。因此采用改进冒泡法对电容电压进行排序，极大地减少了排序时间和系统运算量，其电压均衡控制流程如图 6 所示。

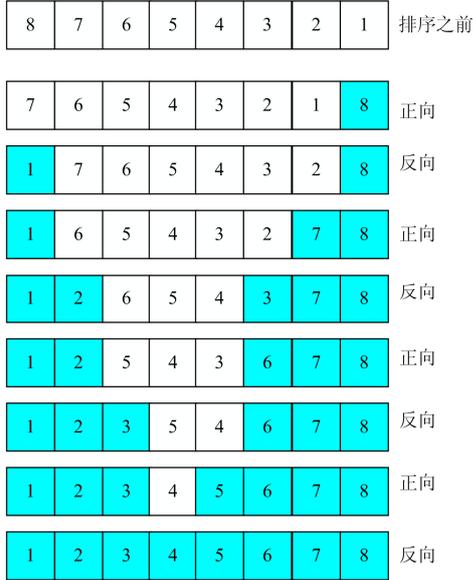


图 5 改进冒泡算法原理图

Fig. 5 Schematic diagram of improved bubbling algorithm

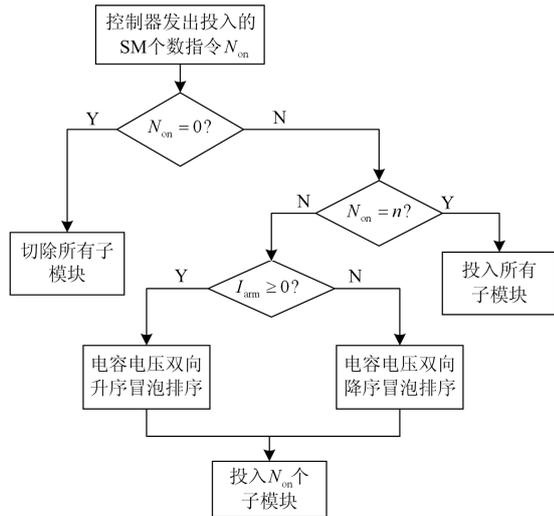


图 6 基于改进冒泡原理的电压均衡控制策略流程图

Fig. 6 Flow chart of voltage equalization control strategy based on improved bubble principle

3.2 平均值比较法的均压策略

本文提出的平均值比较策略是在初始化完成之后，对已投入的子模块电容电压求其平均值，然后在下一个控制周期开始时，接收控制器发出的投入

子模块指令 N_{ref} ，通过判断 $N_{ref} - N_{old}$ 的大小来决定本次投切的数量。通过将平均值 U_{c-ave} 与剩余子模块电容电压值 U_{cm} 对比，决定需要投切的子模块。当 $N_{ref} - N_{old} > 0$ 时，优先投入电容电压较高的子模块；当 $N_{ref} - N_{old} < 0$ 时，优先切除电容电压较低子模块。图 7 为本文所提出的已投入子模块电容电压平均值比较策略流程图。 N_{ref} 表示控制器发出的投入子模块个数； N_{old} 是前一控制周期投入的子模块个数； U_{c-ave} 是投入子模块电容电压平均值。通过平均值比较的方法对 MMC 系统初始化之后的下一周期子模块进行有效投切，降低子模块的频繁投切，进而降低 MMC 的故障率。

投入的 n 个子模块的电容电压平均值计算如式 (3) 所示。

$$U_{c-ave} = \frac{U_{c-1} + U_{c-2} + \dots + U_{c-n}}{N_{old}} \quad (3)$$

式中： $U_{c-1}, U_{c-2}, \dots, U_{c-n}$ 依次为每次排序得到的子模块电容电压值； N_{old} 为已投入的子模块数； U_{c-ave} 为已投入的子模块电容电压平均值。

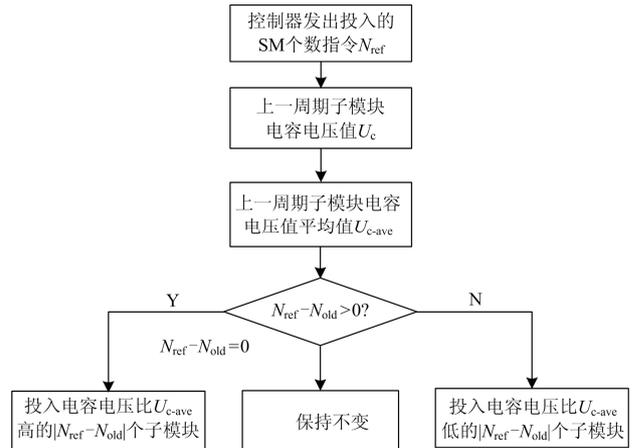


图 7 投入子模块电容电压平均值比较均衡控制

Fig. 7 Equilibrium control of comparison of capacitor voltage averages of input submodules

3.3 基于改进冒泡法和平均值比较法的 MMC 均压混合控制策略

具体步骤如下：

1) MMC 电容电压均衡的初始化过程。首先采集 MMC 的电容电压，控制器发出指令，需要投入的子模块数为 N_{on} ，上桥臂子模块数为 N_{up-on} ，下桥臂子模块数为 $N_{down-on}$ 。

2) 判断桥臂电流的方向。若桥臂电流的方向是电容充电方向，即 $I > 0$ ，利用改进冒泡法对电容电

压进行升序排序,投入电容电压 U_c 最低的 N_{on} 个子模块;若桥臂电流的方向是电容放电的方向,即 $I < 0$,利用改进冒泡法对电容电压进行降序排序,投入电容电压 U_c 最高的 N_{on} 个子模块;然后存储电容电压排序结果,为下一控制周期作准备。在降低MMC控制器运算量的同时还要达到降低开关频率的效果。

3) 在第二个控制周期时,接收控制器发出的指令,需要投入的子模块数为 N_{ref} 。上一个控制周期投入的子模块数为 N_{old} 。然后比较 $N_{ref} - N_{old}$ 的大小决定第二次需要投入的个数。当 $N_{ref} - N_{old} > 0$ 时,需要投入 $|N_{ref} - N_{old}|$ 个子模块;当 $N_{ref} - N_{old} < 0$ 时,需要切除 $|N_{ref} - N_{old}|$ 个子模块。

4) 根据第一个控制周期完成后所存储的电容电压值计算出上一周期所投入的子模块电容电压的平均值 U_{c-ave} 。比较 U_{c-ave} 和剩余子模块电容电压 U_c 的大小。当 $N_{ref} - N_{old} > 0$ 时,则需要投入子模块,优先投入电容电压较高的子模块;当 $N_{ref} - N_{old} < 0$ 时,优先切除电容电压较低子模块。若 $N_{ref} - N_{old} > 0$ 且 $|N_{ref} - N_{old}| = 1$,如果存在两个或以上的电容电压 U_c 大于 U_{c-ave} 时,优先选择电容电压值 U_c 最大的子模块投入。如果存在两个及多个子模块电容电压值相同且大于 U_{c-ave} 时,则根据上一周期得到的子模块 U_c 排列顺序投入排序靠前的子模块。按照此策略避免了子模块的频繁投切,降低开关管导通关断的切换次数,降低子模块电容电压排序运算量。该方法在降低开关管损耗和系统运算量的同时,保证了良好的电容电压均衡效果。

5) 之后每个控制周期重复步骤3)和4)。

4 仿真验证

为了验证本文所提出的改进冒泡排序算法和所投入子模块电容电压平均值比较混合控制算法,并将本文所提算法与传统的排序方法对比,分析其所具有的优势,利用Matlab软件进行了仿真分析。仿真步长是 $5e-5$,设定单个子模块数为20个,系统具体仿真参数如表2所示,直流电源电压值为2000V,子模块电容电压额定值为100V。

表2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

仿真参数	数值	仿真参数	数值
子模块个数/个	20	子模块电容电压额定/V	100
直流电源电压值/V	2000	子模块电容容值/ μF	1000
桥臂电感/mH	10	控制周期/s	0.0001

4.1 算法时间复杂度仿真验证

为验证改进冒泡排序算法电压均衡策略的有效性和准确性,在Matlab中对冒泡排序算法和改进冒泡排序算法进行随机实验。排序元素个数分别取100、200、300、400,测量4000次,取其平均值得出实验结果,并对实验结果进行对比分析,如图8所示。可以很明显地发现随着排序元素的增加,两种排序算法的比较次数差值越来越大,由此得出结论,电容电压的排序算法在MMC电容电压均衡控制中也有很大的影响。实际工程中MMC桥臂子模块数已经高达200多,此时改进冒泡排序算法的比较次数明显比冒泡算法比较次数有优势。

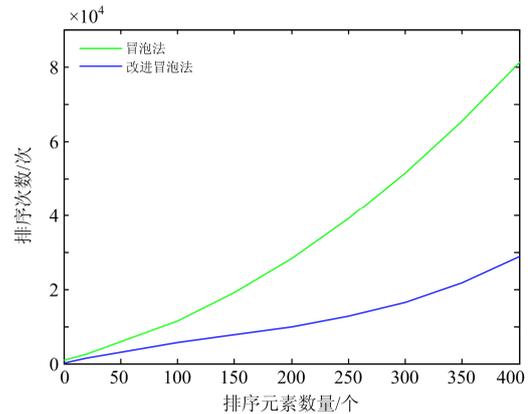


图8 冒泡法和改进冒泡法排序的比较分析

Fig. 8 Comparative analysis of the bubble sorting method and improved bubble method

冒泡算法在最佳情况下的比较次数 C 和移动次数 M 分别为^[25]

$$C_{\min} = n - 1 \quad (4)$$

$$M_{\min} = 0 \quad (5)$$

因此,冒泡排序的最坏时间复杂度为 $O(n)$ 。

冒泡算法在最坏的情况下比较次数 C 和移动次数 M 分别为^[25]

$$C_{\max} = \frac{n(n-1)}{2} = O(n^2) \quad (6)$$

$$M_{\max} = \frac{3n(n-1)}{2} = O(n^2) \quad (7)$$

因此,冒泡排序的最坏时间复杂度为 $O(n^2)$,平均时间复杂度为 $O(n^2)$ 。

同理,双向冒泡排序的平均时间复杂度为 $O(n^2)$ 。排序数据较少时,双向冒泡法和冒泡法排序具有相同的计算量,但在数据较多的情况下,双向冒泡法比冒泡法更具优势。

4.2 均压控制效果对比分析

在Matlab/Simulink中搭建21电平的MMC进

行仿真验证。通过对冒泡排序和本文提出的双向冒泡排序和平均值比较混合控制算法进行仿真分析。本文以 MMC 的 A 相上桥臂为例, 分析并对比冒泡排序算法的排序时间和本文所提改进冒泡排序和平均值比较混合控制算法排序时间的优化效果。

图 9 为传统冒泡排序的触发脉冲, 图 10 为本文所提的改进冒泡排序和平均值比较法混合控制算法的触发脉冲。根据仿真结果可看出本文所提的控制算法触发脉冲比传统算法有显著的优化效果, 每个控制周期内, 本文所提出的控制策略相比于传统冒泡排序计算量明显减少。对降低开关频率有显著效果, 而且随着电平数的增加, 本文所提出的控制算法优化效果更加显著。如图 11 和图 12 所示, 采用本文所提的控制算法所采集到的电容电压的均衡效果和普通冒泡法所得到的电容电压均衡效果达到一致稳定, MMC 的 A 相上桥臂电容电压均衡控制动态过程稳定, 如图 13 所示。说明采用本文所提的控制算法在保证电容电压均衡稳定性不变的情况下实现了减少计算量和降低开关频率的优化效果。

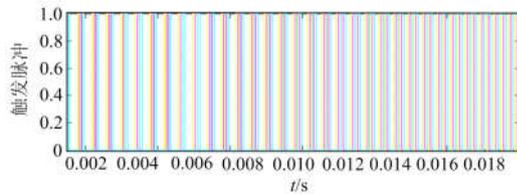


图 9 冒泡排序法的触发脉冲

Fig. 9 Trigger pulse of bubble sorting method

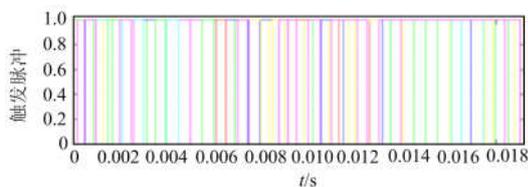


图 10 改进冒泡排序和平均值比较混合控制算法触发脉冲
Fig. 10 Trigger pulse of improve bubble sorting and average comparison hybrid control algorithm

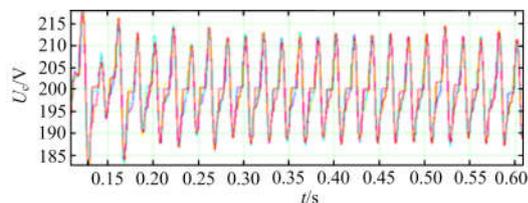


图 11 冒泡排序法 A 相上桥臂子模块电容电压
Fig. 11 Sub-module capacitor voltage of bubble sorting method in phase A

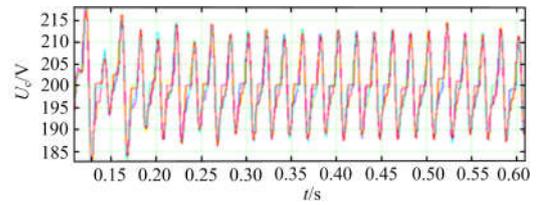


图 12 改进冒泡排序和平均值比较混合控制算法的 A 相上桥臂子模块电容电压

Fig. 12 Sub-module capacitor voltage of improved bubble sorting and average comparison hybrid control algorithm in phase A

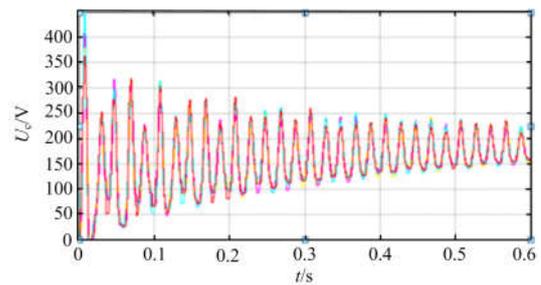


图 13 MMC A 相上桥臂电容电压均衡仿真过程

Fig. 13 MMC upper arm capacitor voltage balancing simulation process in A phase

5 结论

本文通过研究 MMC 传统电容电压排序算法并对其进行改进, 提出了一种电容电压双向冒泡排序算法和已投入的子模块电容电压平均值比较混合控制策略。在初始化时采用改进冒泡排序算法实现快速模块电压排序, 算法时间复杂度为 $O(n^2)$, 减少了排序时间。初始化之后的控制周期采用投入子模块电容电压平均值比较策略, 降低了子模块的开关频率, 进而降低 MMC 故障率。本文提出的混合均压控制算法有效减少了排序次数, 提高排序效率, 降低 MMC 运行损耗, 适用于电平数较多的 MMC。

参考文献

- [1] ZHOU Dehong, YANG Shunfeng, TANG Yi. Model-predictive current control of modular multilevel converters with phase-shifted pulse width modulation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(6): 4368-4378.
- [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 Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1): 316-324.
- [3] YANG Q, QIN J, SAEEDIFARD M. A postfault strategy

- to control the modular multilevel converter under submodule failure[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(6): 2453-2463.
- [4] ZHOU D, YANG S, TANG Y. A voltage-based open-circuit fault detection and isolation approach for modular multilevel converters with model predictive control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9866-9874.
- [5] YANG Limin, LI Yaohua, LI Zixin. A simplified analytical calculation model of average power loss for modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3): 2313-2322.
- [6] 何智鹏, 许建中, 苑宾, 等. 采用质因子分解法与希尔排序算法的 MMC 电容电压均压策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 2980-2988.
- HE Zhipeng, XU Jianzhong, YUAN Bin, et al. A capacitor voltage balancing strategy adopting prime factorization method and shell sorting algorithm for modular multilevel converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 2980-2988.
- [7] MATTIA R, LASZLO M, MANEL H. Fast voltage balancing approach based on mapping strategy for MMC applications[J]. Electronics, 2019, 8: 1-17.
- [8] 喻锋, 王西田. 基于冒泡原理的模块化多电平换流器快速电压均衡控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 81-86.
- YU Feng, WANG Xitian. Fast voltage balancing control based on bubbling principle for modular multilevel converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 81-86.
- [9] 喻锋, 王西田, 林卫星, 等. 一种快速的模块化多电平换流器电压均衡控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 929-934.
- YU Feng, WANG Xitian, LIN Weixing, et al. A fast voltage balancing control method for modular multilevel converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 929-934.
- [10] 栗时平, 魏新伟, 牛鼎, 等. 模块化多电平换流器电容电压改进排序平衡方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3874-3882.
- SU Shiping, WEI Xinwei, NIU Ding, et al. Improved sorting balance method for modular multilevel converter capacitor voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3874-3882.
- [11] 焦晓鹏, 刘青. 基于改进快速排序算法的 MMC 均压控制策略[J]. 电力建设, 2017, 38(7): 146-152.
- JIAO Xiaopeng, LIU Qing. Voltage balancing control strategy for modular multilevel converter based on improved quick sort algorithm[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(7): 146-152.
- [12] 李国庆, 王威儒, 辛业春, 等. 模块化多电平换流器子模块分组排序调制策略[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2107-2114.
- LI Guoqing, WANG Weiru, XIN Yechun, et al. Sub-modular grouping modulation of modular converter[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2107-2114.
- [13] 曹帅, 向往, 林卫星, 等. 含风电的真双极混合型 MMC-MTDC 系统故障穿越及能量耗散控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 39-48.
- CAO Shuai, XIANG Wang, LIN Weixing, et al. Fault ride-through and energy dissipation control of bipolar hybrid MMC-MTDC integrating wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 39-48.
- [14] 杨超颖, 王金浩, 杨赟磊, 等. 不对称故障条件下并网光伏逆变器峰值电流抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 103-111.
- YANG Chaoying, WANG Jinhao, YANG Yunlei, et al. Peak current suppression strategy for grid-connected PV inverters under asymmetric fault conditions[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 103-111.
- [15] XU Zigao, LI Binbin, WANG Shengbo, et al. Generalized single-phase harmonic state space modeling of the modular multilevel converter with zero-sequence voltage compensation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 6416-6426.
- [16] 管敏渊, 徐政, 潘伟勇. 最近电平逼近调制的基波谐波特性解析计算[J]. 高电压技术, 2010, 36(5): 1327-1332.
- GUAN Minyuan, XU Zheng, PAN Weiyong. Analytical cz of nearest level modulation[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(5): 1327-1332.
- [17] 陈宁, 齐磊, 包萌, 等. 模块化多电平换流器的桥臂平均值模型[J]. 中国电力, 2019, 52(8): 8-15.
- CHEN Ning, QI Lei, BAO Meng, et al. Bridge average value model of modular multilevel converter[J]. Electric Power, 2019, 52(8): 8-15.
- [18] 李强, 贺之渊, 汤广福, 等. 新型模块化多电平换流器空间矢量脉宽调制方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(22): 75-79.
- LI Qiang, HE Zhiyuan, TANG Guangfu, et al. A space-vector PWM method for a new type of modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(22): 75-79.
- [19] LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. A review of the protection for the multi-terminal VSC-HVDC grid[J]. Protection

- and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 239-249. DOI: 10.1186/s41601-019-0136-2.
- [20] 尹太元, 王跃, 段国朝, 等. 基于零直流电压控制的混合型 MMC-HVDC 直流短路故障穿越策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(1): 343-351.
- YIN Taiyuan, WANG Yue, DUAN Guochao, et al. Zero DC voltage control based DC fault ride-through strategy for hybrid modular multilevel converter in HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(1): 343-351.
- [21] SELEME I S J, LUC-ANDRE G, MARC C. Modular control with carrier auto-interleaving and capacitor-voltage balancing for MMCs[J]. IET Power Electronic, 2019, 12(4): 817-828.
- [22] 熊岩, 赵成勇, 许建中. 模块化多电平换流器电容电压均衡排序算法综述[J]. 电力工程技术, 2017, 1(2): 1-8.
- XIONG Yan, ZHAO Chengyong, XU Jianzhong. A review of ranking algorithms for MMC capacitor voltages balancing[J]. Electrical Engineering Technology, 2017, 1(2): 1-8.
- [23] KARWATZKI D, MERTENS A. Generalized control approach for a class of modular multilevel converter topologies[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(4): 2888-2900.
- [24] 屠卿瑞, 徐征, 郑翔, 等. 一种优化的模块化多电平换流器电压均衡控制方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 15-20.
- TU Qingrui, XU Zheng, ZHENG Xiang, et al. An optimized voltage balancing method for multi-level converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 15-20.
- [25] 宋美英. 基于 C 语言的冒泡排序算法探讨[J]. 现代计算机: 专业版, 2011(29): 48-49, 55.
- SONG Meiyong. Discussion on bubble sorting algorithm based on C language[J]. Modern Computer: Professional Edition, 2011(29): 48-49, 55.

收稿日期: 2019-05-14; 修回日期: 2019-12-24

作者简介:

张 婕(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子变流技术; E-mail: 18227889323@163.com

曾国辉(1975—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 硕士生导师, 从事电力电子技术、电机拖动与控制研究。E-mail: zenggh@sues.edu.cn

(编辑 周金梅)