

# 基于子模块电压变化特性的排序均压优化策略

金浩天<sup>1</sup>,李海锋<sup>1</sup>,马凯<sup>2</sup>,谭令其<sup>2</sup>,李佳<sup>1</sup>

(1.华南理工大学 电力学院,广东 广州 510641;

2.广东电网有限责任公司 电力科学研究院,广东 广州 510080)

**摘要:**针对半桥模块化多电平换流器(MMC)桥臂内部在一个控制周期内投入和切除子模块各自电容电压序列前后关系不变的特性,基于上个周期子模块的开关状态和子模块的电容电压排序,提出优化冒泡排序法,减少排序过程中的比较次数;同时,基于子模块电容电压变化规律,提出一种新型均压策略,通过对投切子模块的选取进行优化,降低了子模块开关频率。根据子模块电容电压水平,将子模块分为高、中、低电压三类,进行不同的投切处理,能够有效减少非必要的子模块附加开关动作。经验证,优化后的排序法和均压策略可有效降低排序的时间复杂度和子模块的开关频率。

**关键词:**模块化多电平换流器;冒泡排序;均压策略;开关频率;子模块电容电压

**中图分类号:**TM464 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed26400

## An MMC Sorting Balancing Control Method Based on SMS' Voltage Variation Characteristics

JIN Haotian<sup>1</sup>, LI Haifeng<sup>1</sup>, MA Kai<sup>2</sup>, TAN Lingqi<sup>2</sup>, LI Jia<sup>1</sup>

(1.School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong,

China; 2.Electric Power Research Institute, Guangdong Power Grid Co., Ltd.,

Guangzhou 510080, Guangdong, China)

**Abstract:** For the half-bridge modular multilevel converter (MMC) bridge arm in a control cycle within the input and removal of the submodule of the respective capacitance voltage sequence before and after the relationship of the characteristics of the same, based on the last cycle of the submodule switching state and the submodule capacitance voltage sequencing, the optimize bubble sorting method was put forward to reduce the number of comparisons in the sorting process. At the same time, based on the change rule of the submodule capacitance voltage law, a new type of voltage equalization strategy was proposed, which reduced the submodule switching frequency by optimizing the selection of the cast-cut submodule. According to the sub-module capacitance voltage level, the sub-module was divided into three categories of high, medium and low voltage to carry out different cast-cutting processing, which could effectively reduce the non-essential sub-module additional switching action. It was verified that the optimized sequencing method and voltage equalization strategy can effectively reduce the time complexity of sequencing and the switching frequency of submodules.

**Key words:** modular multilevel converter (MMC); bubbling sort; equalization control method; switching frequency; SMS' capacitance voltage

风电、光伏等纯新能源发电机组经柔性直流输电送出是新能源送出的有效途径<sup>[1]</sup>。其中,模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)由于其特殊的级联拓扑结构,具有开关频率低、波形质量高、故障处理能力强的优势,被广泛应用于现有柔性直流输电工程之中<sup>[9]</sup>。

在柔直输电系统运行过程中,MMC的桥臂电流随开关动作耦合到子模块电容中,会引起子模块电容电压的波动<sup>[10]</sup>。因此,在调制流程中需加入排序均压策略,控制子模块投切以调整子模块电容电压稳定<sup>[11]</sup>。但随着工程中电压等级和容量的提升,桥臂电流增大,导致子模块电容电压变

**基金项目:**国家自然科学基金(52077082)

**作者简介:**金浩天(2000—),男,硕士,主要研究方向为柔性直流输电控制与保护,Email:17857387626@163.com

**通讯作者:**李海锋(1976—),男,博士,教授,主要研究方向为电力系统故障分析与继电保护,Email:lihf@scut.edu.cn

化加快,子模块投切频率提高,从而造成更多的开关损耗<sup>[12]</sup>。开关损耗的增加不仅会导致系统效率降低,还会造成功率器件结温,引起功率器件快速老化、故障率升高<sup>[13-14]</sup>。因此,除了保证电容均压效果,排序均压策略还需要尽可能地降低子模块开关频率,从而降低系统损耗,提高子模块电容使用寿命<sup>[15]</sup>。

传统排序均压策略在每个控制周期都对子模块电容电压进行一次全排序,即使子模块电容电压差异很小,也会导致排序序列变化,因此采用该算法会使得子模块频繁投切,导致开关频率大幅增加。文献[16]通过记录上一控制周期的排序序列进行冒泡排序,减少了计算时间;文献[17]通过双向排序,降低了排序时间复杂度;文献[18]基于快速排序算法和改进插入排序算法,通过逐次降低待排元素的数量来减少系统计算量。

上述方案针对排序算法提出了改进意见,但未考虑MMC运行中子模块电容电压变化特性。文献[19]提出了双重排序法,大幅降低了子模块的开关频率;文献[20]提出在每个周期额外更换固定数量的子模块以维持子模块电容电压平衡;文献[21]在文献[20]的基础上,提出仅当子模块偏差值增大时进行固定数量子模块轮换,进一步降低了开关频率,但受固定轮换模块数和实际工况的影响较大,仍具有改进空间;文献[22-23]以子模块电容电压最大值和最小值之差为限制因素,当未超过阈值时,尽量维持原触发脉冲,当超过阈值时,则按照传统均压排序策略进行投切。该策略能够在一定程度上降低开关频率,但是阈值选择和超过阈值后的子模块选择上仍具有改进空间。

针对目前存在的问题,本文针对MMC运行过程中的电容电压变化特性,仅对上个控制周期处于不同投切状态的子模块进行比较,提出了排序算法的优化方案,降低算法的时间复杂度;同时在已有的改进型均压排序控制策略的基础上,当子模块电容电压超过阈值时,将子模块分为三类,并采取不同的投切方案,降低了子模块的开关频率和开关损耗。最后,通过Matlab/Simulink构建了相关MMC模型,对不同策略性能进行比较分析,验证了所提优化策略的正确性和有效性。

## 1 MMC工作原理

### 1.1 MMC拓扑结构

MMC换流器由三相共6个桥臂组成,每相

上、下桥臂由 $N_s$ 个子模块串联组成。

正常工作时,上、下桥臂共计投入 $N$ 个子模块来维持直流电压的稳定,同时根据上、下桥臂投入子模块数量的差值来控制交流电压的输出,一般情况下, $N_s \geq 2N$ 。

### 1.2 MMC工作原理

通过接收上层控制系统输出的相电压参考信号 $U_{ref}$ ,根据最近电平逼近策略,即可得到上、下桥臂需要投入的子模块数量:

$$\begin{cases} n_p = \text{round}\left(\frac{N}{2} - \frac{NU_{ref}}{U_{dc}}\right) \\ n_n = \text{round}\left(\frac{N}{2} + \frac{NU_{ref}}{U_{dc}}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\text{round}()$ 为取整函数; $n_p$ 为上桥臂应该要投入的子模块数量; $n_n$ 为下桥臂应该要投入的子模块数量; $U_{dc}$ 为直流电压。

得到桥臂需要的子模块投入数量后,根据均压排序策略,确定选取的子模块进行投入。当控制周期足够短,且子模块开关频率足够高时,可以使桥臂内子模块电容电压波动很小,但也会导致极高的开关频率损耗。一般情况下,开关频率和电容电压波动系数呈负相关关系。均压策略的改进方案目的在于保持合理电容电压波动的前提下,尽可能地降低开关频率。

## 2 排序均压策略评价指标

排序均压策略可以分为排序算法和均压策略两个部分,首先通过排序算法对子模块电容电压进行排序,然后通过均压策略决定选择哪些子模块进行投切。其中,均压策略决定了桥臂子模块的运行特性,其优劣可通过子模块损耗、开关频率、子模块电容电压波动等性能进行分析。

### 2.1 子模块损耗

在运行过程中,MMC损耗主要考虑IGBT和二极管产生的损耗<sup>[25]</sup>。其中,IGBT器件的功率损耗主要考虑开通损耗 $P_{on}$ 、关断损耗 $P_{off}$ 和通态损耗 $P_{cont}$ ;二极管的损耗主要有反向恢复损耗 $P_{rec}$ 和通态损耗 $P_{cond}$ 。其中,通态损耗主要受通态电流影响,而开关损耗主要受开关频率影响,其大小可根据厂家所提供的数据配合仿真电压以及电流计算得出。

### 2.2 功率器件开关频率

子模块的开关动作可分为两类,第一类是必

要的开关动作,由MMC这一控制周期与上一控制周期需要输出的电压差决定,在一个工频周期内,每个子模块必要的开关频率为 $50N/N_s$  Hz;第二类投切动作由采取的子模块电容均压排序策略决定,可称为附加排序动作,通过采取不同的排序均压策略,可降低附加排序动作,达到减少开关损耗的目的<sup>[26]</sup>。

IGBT的开关频率可以表示为

$$f_{\text{switch}} = \frac{1}{2N_s} \text{num}_{\text{tram}}(T_s)/T_s \quad (2)$$

式中: $T_s$ 为一个周期的时间; $\text{num}_{\text{tram}}(T_s)$ 为一个周期内桥臂子模块开关状态切换的总次数。

### 2.3 电容电压均衡效果

电容电压均衡效果也是电容电压排序均压策略的重要评判指标,一般采用电容电压波动系数和电容不平衡度作为电容均压效果的量化标准<sup>[27]</sup>。其中电容电压波动系数 $\varepsilon$ 代表子模块电容电压和额定值的最大偏差,工程中一般要求不超过10%;电容不平衡度 $\delta$ 代表子模块电容电压的最大值和最小值两者之差除以两者之和,分别计算如下:

$$\varepsilon = \frac{\max|v_{ci} - v_{cn}|}{v_{cn}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\delta = \frac{v_{\text{cmax}} - v_{\text{cmin}}}{v_{\text{cmax}} + v_{\text{cmin}}} \quad (4)$$

式中: $v_{ci}$ 为序列号为 $i$ 的子模块电容电压; $v_{cn}$ 为子模块额定电容电压; $v_{\text{cmax}}, v_{\text{cmin}}$ 分别为子模块电容最大电压和最小电压。

### 2.4 时间复杂度

时间复杂度可以通过在一个控制周期中两个子模块电容电压的比较次数来估算,如全排序法的时间复杂度可表示为

$$\begin{aligned} N_{\text{all}} &= (N_s - 1) + (N_s - 2) + \dots + 1 \\ &= N_s(N_s - 1)/2 \end{aligned} \quad (5)$$

根据式(5)可知,当桥臂子模块数量 $N_s$ 较大时,全排序法的计算量将大幅上升,因此需要优化算法以降低计算量。

## 3 排序均压优化策略

### 3.1 排序算法优化

冒泡排序法最大时间复杂度为 $N_s(N_s - 1)/2$ ,最小时间复杂度为 $N_s - 1$ 。根据子模块参数的统一性,针对MMC运行过程中的子模块电容电压变化特征,提出了一种改进型冒泡排序算法,可

有效降低时间复杂度。

#### 3.1.1 控制间隔子模块电容电压变化分析

在一个控制间隔内,对于投入的子模块来说,子模块电容电压一个控制周期的变化 $U_{\text{sm\_delta}}$ 可计算如下:

$$U_{\text{sm\_delta}} = \int_{t_{\text{st}}}^{t_{\text{en}}} i_{\text{arm}} dt / C_{\text{sm}} \quad (6)$$

式中: $t_{\text{st}}, t_{\text{en}}$ 分别为此控制间隔的开始、结束时间; $C_{\text{sm}}$ 为子模块电容。

其主要受桥臂电流影响,投入子模块流过电流一致且电容值相同,因此投入子模块内部排序在一个控制周期内无变化。

对于切除的子模块来说,电压变化由旁路电流 $i_{\text{RC}}$ 引起,根据RC回路计算,可以得到子模块电容电压的表达式为

$$U_{\text{sm\_en}} = U_{\text{sm\_st}} e^{-(t_{\text{en}} - t_{\text{st}})/RC_{\text{sm}}} \quad (7)$$

式中: $U_{\text{sm\_en}}, U_{\text{sm\_st}}$ 分别为控制间隔的开始、结束子模块电容电压; $R$ 为旁路电阻。

由于各子模块旁路电阻值和电容值相同,即控制间隔结束时子模块电压均为开始时刻子模块电压乘以一个常数,因此切除子模块内部排序也无变化。且由于 $R$ 取值较大,一个控制间隔时间很短,故也可认为控制间隔结束时刻的子模块电压等于开始时刻的子模块电压。

#### 3.1.2 排序优化算法原理

排序优化算法流程如图1所示。根据3.1.1节分析,当上个周期相邻子模块同时为投入或者切除时,大小关系不会发生变化,仅当相邻子模块分别为投入和切除时,才会出现大小关系改变。因此在冒泡排序法的基础上避开同状态的子模块电容电压比较运算,可以极大降低算法的时间复杂度。故在排序算法中,加入需要进行比较条件:仅当相邻子模块状态不同时进行比较。当在一次完整的遍历时,无子模块排序编号交换时,或已完成 $N_s - 1$ 轮排序时,终止排序。

#### 3.1.3 优化算法时间复杂度分析

对于算法的时间复杂度,比较运算可能涉及到寄存器间的比较以及标志寄存器的设置,相对于赋值、逻辑运算等基本操作在处理器上的运行时间长,因此通过对比较次数对时间复杂度进行量化分析。时间复杂度最大的排序流程图如图2所示。

假设上个周期投入子模块电容电压均小于

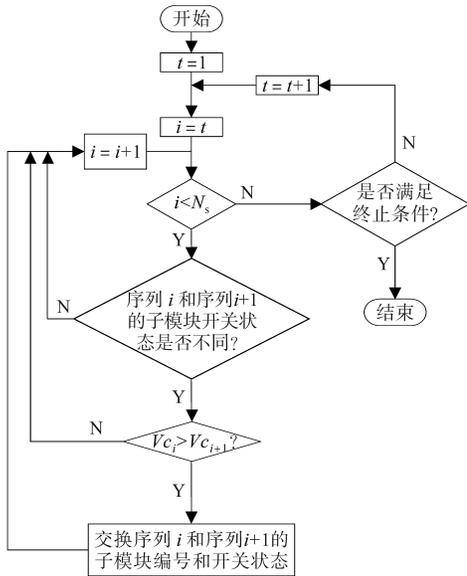


图1 排序优化算法流程图

Fig.1 Flowchart of sorting optimisation algorithm



图2 时间复杂度最大的排序流程

Fig.2 Sorting process with maximum time complexity

切除的子模块,经过电流充电后均大于切除子模块后,此时子模块电容电压比较次数取最大值,对于优化冒泡排序法,比较次数  $n_{cc}$  为

$$\max(n_{cc}) = N_{on\_old} \cdot N_{off\_old} \leq N_s^2 / 4 \quad (8)$$

式中:  $N_{on\_old}$ ,  $N_{off\_old}$  分别为上个控制周期投入和切除的子模块数量。

对于传统冒泡排序法,比较次数  $n_{tr}$  为

$$\begin{aligned} \max(n_{tr}) &= (N_s - 1 + N_{on\_old} - 1) \cdot (N_{off\_old} + 1) / 2 \\ &= \max(n_{cc}) + (N_{off\_old}^2 - N_{off\_old}) / 2 + \\ &N_{on\_old} - 1 \end{aligned} \quad (9)$$

排序优化算法就是在冒泡排序法的基础上,避免了上一控制周期相同状态子模块的电容电压比较,从而降低了比较次数。且在运行过程中,随子模块数量增多,优化算法的优势会更加明显。

### 3.2 均压策略优化

传统排序均压策略具有良好的电压平衡性,电容电压稳定性较高。但是由于当子模块电容电压发生微小变化时,也会导致子模块电压排序发生位次改变,从而使得开关状态发生变化,极大地增加了开关损耗。

因此,需要对排序策略提出优化方案,确保子模块电容电压波动处于正常运行范围内的同时,降低子模块开关频率和损耗。

#### 3.2.1 传统排序均压策略

传统的子模块排序均压策略的原理是:对子模块电容电压进行全排序,根据电流方向和阀控指令选取  $N_{on}$  个子模块进行投入,  $N_{on}$  为需投入子模块数量。当桥臂电流为正向时,选取  $N_{on}$  个电容电压较低子模块投入,使其电压升高,同时切除子模块电容电压较高的子模块;当桥臂电流为反向时,选取  $N_{on}$  个电容电压较高的子模块投入,使其电压降低,同时切除子模块电容电压较低子模块。

#### 3.2.2 现有改进型均压策略

已有的改进型排序均压策略将子模块电容电压最大偏差  $vc_{\Delta} = v_{c_{max}} - v_{c_{min}}$  作为判据,当子模块电容电压未超过阈值  $vc_{\Delta\_lim}$  时,采用改进触发方案;当子模块电容电压超过阈值  $vc_{\Delta\_lim}$  时,采用传统触发方案。两种触发方案如图3、图4所示。

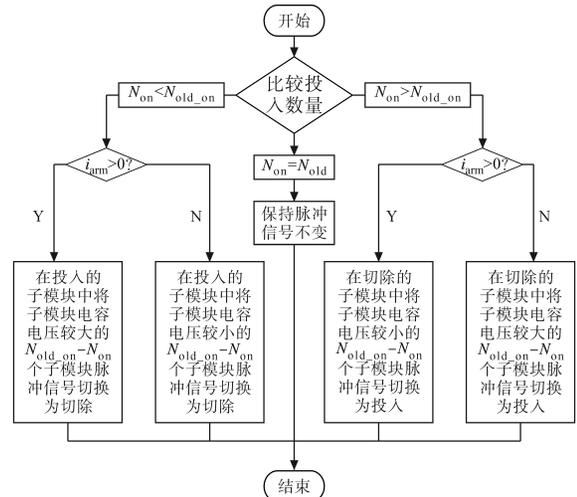


图3 改进触发方案

Fig.3 Improvement trigger plan

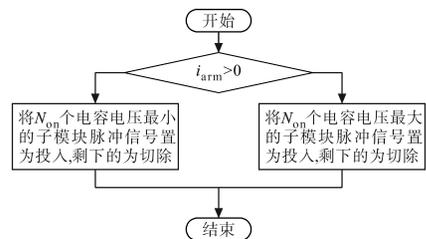


图4 传统触发方案

Fig.4 Traditional trigger schemes

改进触发方案以尽量维持子模块状态为目的,仅根据此周期与上一周期投入子模块数量选择投入  $N_{on} - N_{old\_on}$  个子模块或者切除  $N_{old\_on} - N_{on}$

个子模块,投切的子模块数量均为必要的投切数量。

### 3.2.3 改进均压策略的优化方案

改进均压策略相比传统策略已有较好的优化效果,能够有效降低子模块的开关频率。但是当子模块电容偏差超过阈值时,除了超出电容电压阈值的子模块,剩余子模块的投切选择仍具有优化空间,可进一步降低开关损耗。

根据判据可以对子模块设置上、下限,即

$$\begin{cases} v_{c_{max\_lim}} = v_{c_{min}} + v_{c\_delta} \\ v_{c_{min\_lim}} = v_{c_{max}} - v_{c\_delta} \end{cases} \quad (10)$$

以  $v_{c_{max\_lim}}$ ,  $v_{c_{min\_lim}}$  作为界限可以将子模块分为三类:低电压类、中间电压类和高电压类,如图5所示。低电压类子模块为电容电压低于  $v_{c_{min\_lim}}$  的子模块,中间电压类子模块为电容电压介于  $v_{c_{min\_lim}}$  和  $v_{c_{max\_lim}}$  之间的子模块,高电压类子模块为电容电压高于  $v_{c_{max\_lim}}$  的子模块。

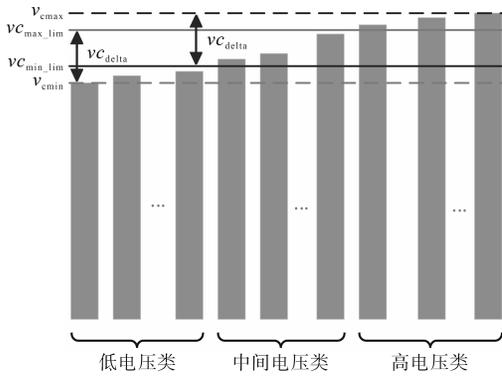


图5 子模块电容电压分类

Fig.5 SMs' capacitance voltage classification

优化后的均压策略流程原则可以表示为:1)若电容电压最大偏差未超过阈值,沿用未优化的改进型策略。2)若电容电压最大偏差超过阈值,首先进行一次改进触发方案,当电流正向时,确保高电压类子模块全部切换为切除状态,低电压类子模块全部切换为投入状态;当电流反向时,确保高电压类子模块全部切换为投入状态,低电压类子模块全部切换为切除状态。改进的均压策略优化方案如图6所示。

### 3.2.4 优化方案的优越性分析

当  $v_{c\_delta} \leq v_{c\_delta\_lim}$  时,此时所有子模块都属于中间电压类,此时仍遵循未优化的改进型排序均压策略选择子模块投切,优化前、后状态切换数量并无差异。

当  $v_{c\_delta} > v_{c\_delta\_lim}$  时,此时至少存在一个高电压类子模块和一个低电压类子模块。设  $n_{low}$ ,  $n_{mid}$ ,

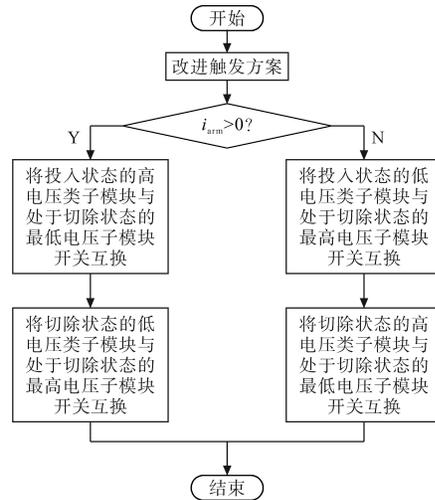


图6 改进均压策略优化方案

Fig.6 Improved pressure equalization strategy optimization scheme

$n_{high}$  分别为低电压类、中间电压类、高电压类子模块数量;同时设  $n_{low\_on}$ ,  $n_{low\_off}$ ,  $n_{mid\_on}$ ,  $n_{mid\_off}$ ,  $n_{high\_on}$ ,  $n_{high\_off}$  分别为低电压类、中间电压类、高电压类子模块中在上一个周期处于投入状态和切除状态的子模块数量。

以桥臂电流方向为正向为例进行分析。以  $N_{on}$  为当前控制周期需投入的子模块数量,  $N_{off}$  为需切除的子模块数量,若  $N_{on} \leq n_{low}$  (即  $N_{off} \geq N_s - n_{low}$ ),则投入子模块均为最低电容电压子模块;若  $N_{on} \geq N_s - n_{high}$  (即  $N_{off} < n_{high}$ ),切除子模块均为最高电容电压子模块,这两种情况下,优化前和优化后状态切换数量相同;若  $n_{low} < N_{on} < N_s - n_{high}$  (即  $n_{high} < N_{off} < N_s - n_{low}$ ),其中低电压类子模块均调整至投入状态,高电压类子模块均调整至切除状态,对于这两部分子模块,优化前、后的状态切换数量均为  $n_{low\_off} + n_{high\_on}$ ,两者的差异主要在于占子模块数量主体的中间类子模块的状态切换数量。当采用优化后策略时,尽量保持中间电压类子模块状态不变,因此状态变化的子模块数量  $n_{af}$  可用下式表示:

$$n_{af} = |N_{mid\_on} - n_{mid\_on}| = |N_{mid\_off} - n_{mid\_off}| \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned} N_{mid\_on} &= N_{on} - N_{low} \\ N_{mid\_off} &= N_{off} - N_{high} \end{aligned}$$

式中:  $N_{mid\_on}$ ,  $N_{mid\_off}$  分别为本周期间中类子模块的投入、切除数量。

若考虑最理想情况,即中间电压类子模块中已投入子模块均为电压较低子模块,已切除子模块均为电压较高的子模块,此时子模块状态变

化数量  $n_{be\_min}$  可用下式表示:

$$n_{be\_min} = |N_{mid\_on} - n_{mid\_on}| = |N_{mid\_off} - n_{mid\_off}| \quad (12)$$

若考虑最不理想情况,即中间电压类子模块中已投入子模块均为电容电压较高的子模块,已切除子模块均为电容电压较低子模块,当需投入量小于已切除量时,  $n_{be\_max}$  可用下式计算得到:

$$n_{be\_max} = N_{mid\_on} + n_{mid\_on} \quad (13)$$

当需投入量大于已切除量时,  $n_{be\_max}$  可用下式计算得到:

$$n_{be\_max} = N_{mid\_off} + n_{mid\_off} \quad (14)$$

因此,优化前策略的中间电压类子模块状态变化数  $n_{be}$  处于  $n_{be\_min}$  和  $n_{be\_max}$  之间。

通过将优化前策略的中间电压类子模块状态变化数与优化后策略的中间电压类子模块状态变化数作对比,可以发现取最小值时,  $n_{be\_min} = n_{af}$ , 取最大值时,两者之差为  $2\min(N_{mid\_on}, n_{mid\_on})$  或  $2\min(N_{mid\_off}, n_{mid\_off})$ 。当  $i_{arm} < 0$  时,经过分析,也可得到相同结论。在策略经过优化后,当子模块电容偏差超过阈值时,可以有效降低子模块状态变化的数量。

根据上述推导,可以得出以下结论:

1) 当  $N_{on} \leq n_{low}$  或  $N_{off} < n_{high}$  时,优化前、后的子模块状态切换数量一致。

2) 当  $n_{low} < N_{on} < N_s - n_{high}$  时,优化后策略子模块状态切换数量相比优化前降低,降低范围为 0 到  $2\min(N_{mid\_on}, n_{mid\_on})$  或  $2\min(N_{mid\_off}, n_{mid\_off})$ 。

### 3.2.5 优化均压策略时间复杂度分析

相比原均压策略,增加的时间复杂度主要体现在子模块电容电压和上、下阈值的比较之中,即增加了 2 倍的子模块数量的比较操作,相比于排序算法降低的时间复杂度很小。同时,由于相比原策略开关频率的降低,也相当于减少了赋值操作量,在一定程度上也减小了算法的时间复杂度。因此,在相同的硬件设备下,本文所提策略运算时间应小于原均压策略,而原均压策略已被应用于实际工程之中,故本文所提策略也存在其工程可行性。

## 4 仿真实验

### 4.1 仿真建模

为验证本文所提出排序均压策略的有效性和动态性能,在 Matlab/Simulink 仿真平台搭建了 MMC 仿真模型,仿真参数如表 1 所示。令仿真模

型参数保持一致,对三种方案的开关频率、通态损耗、开关损耗、电容电压波动、不平衡度等指标进行了分析。

表 1 MMC 仿真参数

仿真参数	数值	仿真参数	数值
交流侧额定电压/kV	367	子模块额定电压/kV	2.097 9
直流母线电压/kV	$\pm 300$	桥臂电感/mH	60
桥臂子模块数量	286(302)	控制周期/ $\mu s$	50
子模块电容/ $\mu F$	15 000	额定功率/MW	1 500

### 4.2 开关频率分析

设定 1(标么值)(1 500 MW)运行,子模块最大电容电压差和最小电容电压差的阈值为 120 V,分别采用传统均压策略、改进均压策略和本文所提均压策略进行仿真分析。

子模块脉冲信号如图 7 所示,采用传统均压策略控制时,开关频率显著大于另外两种策略。根据仿真计算结果可知,当采用传统均压控制策略时,子模块开关频率达到了 1 772.72 Hz,其中必要投切频率为  $50 \times 286/302 = 47.35$  Hz;采用改进均压控制策略时,开关频率降低到 165.59 Hz,其中附加排序动作达到了 118.24 Hz,开关次数明显降低;当采用本文所提均压策略时,开关频率为 146.34 Hz,相比未经优化的改进均压控制策略降低了 11.63%,附加排序动作为 98.99 Hz,相比未经优化的改进均压控制策略降低了 16.28%,说明本文所提均压策略能够有效降低开关频率值。

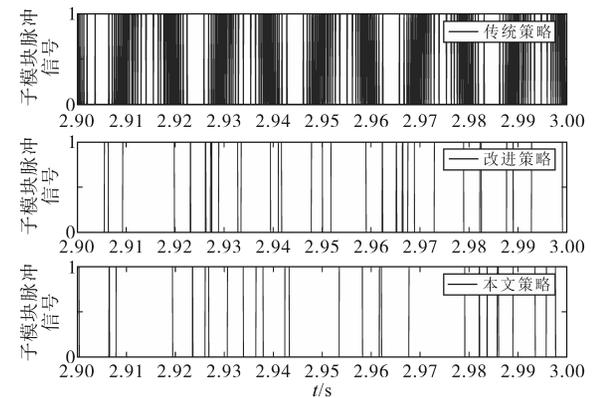


图 7 子模块脉冲信号

Fig.7 SMs' pulse signal

均压策略设定的子模块电容电压偏差阈值不同,也会对系统的开关频率产生影响,阈值越小,排序方案就越接近于传统排序均压策略,开关频率就越高,同时电容电压波动就相对越小。

在仿真中分别设置子模块电容电压偏差阈值为 80~140 V,对未优化方案、优化方案和固定

子模块数量投切方案进行测试。其中,固定子模块数量投切方案为:当电容电压偏差超过阈值、桥臂电流为正向时,将投入子模块中电容电压最高的8个子模块和切除子模块中电容电压最低的8个子模块交换开关状态,桥臂电流反向则相反。

开关频率和阈值关系如图8所示,可以看出,随着阈值增大,开关频率减小;当阈值较小时,优化方案相比较未优化方案降频效果更加显著;同时相比于固定子模块数量投切方案,本文所提方案也能在一定程度上减少开关频率。

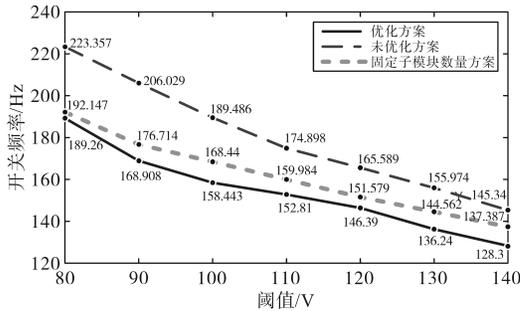


图8 开关频率和阈值关系  
Fig.8 Relationship of switching frequency and threshold

### 4.3 子模块损耗分析

为对三种调制策略进行损耗的比较分析,本文参考了型号为TG3000SW45ZC-P200的子模块数据,根据厂家提供数据以及仿真数据计算得到通态损耗和开关损耗。根据计算,三种均压方案的通态损耗基本一致,均为0.785 MW左右。开关损耗相差较大,采用传统均压策略时,开关损耗达到了2.630 MW;而采用改进均压策略时,开关损耗被降低到0.445 MW,共计降低了开关损耗的80.76%;采用本文所提均压策略时,开关损耗被进一步降低至0.391 MW,相比于未优化方案,开关损耗降低了12.13%。

### 4.4 子模块均压性能分析

所有子模块的电容电压如图9所示。其中,  $v_{c0}$ 代表采用传统均压策略时的子模块电容电压,  $v_{c1}$ 代表采用改进均压策略时的子模块电容电压,  $v_{c2}$ 代表采用本文所提均压策略时的子模块电容电压。三种均压策略下的子模块电容电压波动系数如图10所示。

采用传统均压策略时,电容电压波动系数为5.69%,电容不平衡度仅为0.398%,子模块电容电压波动很小;当采用改进均压策略时,电容电压波动系数为8.67%,电容不平衡度为3.181%;当采用本文所提均压策略时,电容电压波动系数为

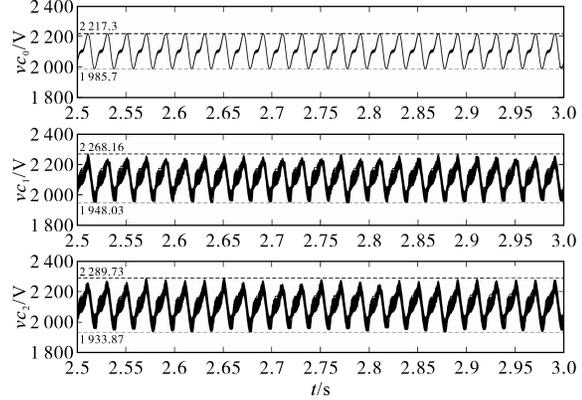


图9 子模块电容电压

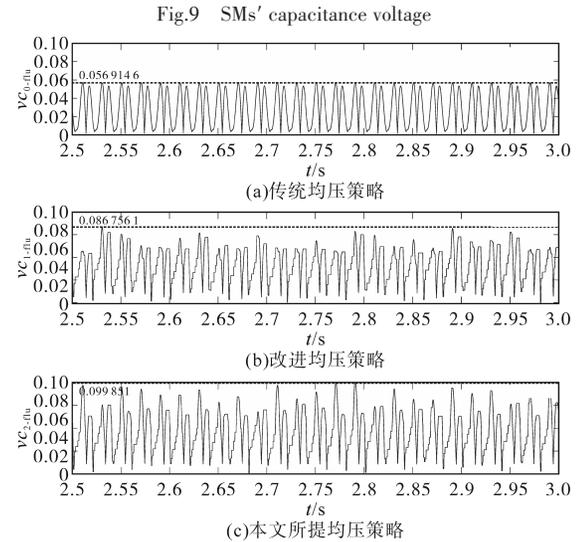


图10 电容电压波动系数

Fig.10 Capacitor voltage fluctuation factor

9.98%,电容不平衡度分别为3.19%,子模块电容电压波动相较传统均压策略和改进均压策略有所上升,但仍处于子模块电容电压正常波动范围内,可维持系统正常运行。

根据以上分析结果,在表2之中进行了汇总,可以看出优化后的控制策略相较于原控制策略,在开关频率的降低效果上有较好的优化效果。

表2 控制策略比较

指标(阈 值120 V)	开关 频率/Hz	通态损 耗/MW	开关损 耗/MW	电容电压 波动系数/%	电容不平 衡度/%
原策略	1 773	0.785	2.630	5.69	0.398
改进型	166	0.785	0.445	8.67	3.181
优化后	146	0.784	0.391	9.98	3.195

### 4.5 时间复杂度分析

验证排序优化算法的性能,设定1(标么值)(1 500 MW)运行,采用本文所提均压方案,分别采用冒泡排序法和优化排序算法进行仿真分析。

根据仿真计算,采用冒泡排序法时,在一个

周期内共进行了 5 494.06 次比较运算;采用优化排序算法时,共进行了 626.93 次比较运算,叠加上优化后均压策略的比较次数为 1 228.93 次。根据比较运算次数可以得出优化排序算法能有效降低时间复杂度。

## 5 结论

本文针对子模块的排序方法和均压方法,对国内外子模块电容电压排序均压策略的研究现状进行了分类梳理与总结;利用 MMC 子模块电容电压的变化特性和子模块投切优先级分类,提出了优化后的排序算法和均压策略;在 Matlab/Simulink 中搭建了相应的 MMC 模型,对仿真结果进行了数据分析。通过比较分析,可以得出如下结论:

1)在冒泡排序法的基础上,利用一个控制周期内投入的子模块同时充放电、切除的子模块电容电压基本不变的特性,提出了优化方案。该方法能有效降低算法的时间复杂度,相比原方案在同等设备条件下能够降低相应计算时间,证明了该方法在工程中的可行性。

2)利用子模块电容电压对子模块进行分类,提出了优化均压策略,在限制电容电压波动仍处于工程允许范围的情况下,能有效降低子模块的开关频率。

3)改进型均压排序算法的阈值设定会影响子模块开关频率和电容电压波动,且阈值较小,本文提出的方案相较于未优化方案的降频性能更好。

### 参考文献

- [1] 苏寅生,赵利刚,姚海成,等. 100% 新能源电源经柔性直流送出系统的机电暂态建模仿真研究[J]. 广东电力,2023,36(10):57-65.  
SU Yinsheng, ZHAO Ligang, YAO Haicheng, et al. Research on electromechanical transient modeling and simulation of 100% new energy power source connected by MMC-HVDC[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(10): 57-65.
- [2] 张红颖,陈宁,刘刚,等. 考虑多场景参数灵敏度的光伏有功优化方法[J]. 西安工程大学学报,2022,36(5):102-110,118.  
ZHANG Hongying, CHEN Ning, LIU Gang, et al. Photovoltaic active power parameters optimization method considering multi-scenario and parameter sensitivity[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2022, 36(5): 102-110, 118.
- [3] 陈晴,薛源,王克,等. 用于海上风电并网的柔性直流系统过

- 电压和绝缘配合研究[J]. 高压电器,2019,55(4):178-184.  
CHEN Qing, XUE Yuan, WANG Ke, et al. Research on over-voltage and insulation coordination of flexible DC system for offshore wind farm integration[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4): 178-184.
- [4] 卓振宇,张宁,谢小荣,等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化,2021,45(9):171-191.  
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [5] 饶宏,周月宾,陈煜坤,等. 高压大容量柔性直流换流阀关键设计和发展趋势[J]. 电源学报,2024,22(3):1-14.  
RAO Hong, ZHOU Yuebin, CHEN Yukun, et al. Key design and development trend of high-voltage large-capacity VSC valves for HVDC[J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(3): 1-14.
- [6] LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range[C]// IEEE Bologna Power Tech Conference, 2003.
- [7] ALLEBROD S, HAMERSKI R, MARQUARDT R. New transformerless, scalable modular multilevel converters for HVDC-transmission[C]//IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2008.
- [8] MARQUARDT R. Modular multilevel converter: an universal concept for HVDC-networks and extended bus-applications[C]// International Power Electronics Conference, 2010.
- [9] 张绮轩,李海锋,梁远升,等. 基于行波解析分析的柔性直流输电线路故障智能检测方法[J]. 广东电力,2024,37(5):84-96.  
ZHANG Qixuan, LI Haifeng, LIANG Yuansheng, et al. Intelligent fault detection method for flexible DC transmission lines based on prior experience and of travelling wave expression[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(5): 84-96.
- [10] 杨文博,宋强,刘文华,等. 降低模块化多电平换流器子模块电容值的控制方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(16):86-94.  
YANG Wenbo, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. A control strategy for reducing submodule capacitance value of modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 86-94.
- [11] HU P, TEODORESCU R, WANG S, et al. A currentless sorting and selection-based capacitor-voltage-balancing method for modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(2): 1022-1025.
- [12] DENG Fujin, HENG Qian, LIU Chengkai, et al. Power losses control for modular multilevel converters under capacitor deterioration[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(4): 4318-4332.
- [13] 宋勇辉,熊小伏. MMC 低开关频率的自适应降损控制策略[J]. 电工电能新技术,2024,43(7):1-11.  
SONG Yonghui, XIONG Xiaofu. An adaptive loss reduction

- control strategy for MMC with low switching frequency[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2024, 43(7):1-11.
- [14] 刘官,杨勇,高仕龙,等.柔直换流阀冷却系统动设备故障诊断图形化规则推理系统研究与开发[J].*高压电器*,2024,60(10):191-197.  
LIU Guan, YANG Yong, GAO Shilong, et al. Research and development of a graphical rule-based reasoning system for fault diagnosis of dynamic equipment in the cooling system of VSC-HVDC[J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(10):191-197.
- [15] 常立国,苟锐锋,杨晓平,等.适用于MMC-HVDC的优化均压策略[J].*高电压技术*,2020,46(5):1719-1728.  
CHANG Liguó, GOU Ruifeng, YANG Xiaoping, et al. Optimized voltage balancing strategy for MMC-HVDC[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(5):1719-1728.
- [16] 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.
- [17] 张婕,曾国辉,赵晋斌,等.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[J].*电力系统保护与控制*,2020,48(6):92-99.  
ZHANG Jie, ZENG Guohui, ZHAO Jinbin, et al. Modular multilevel converter capacitor voltage balancing strategy based on improved bubble sorting[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(6):92-99.
- [18] 岳有军,樊亚振,赵辉,等.基于改进排序算法的模块化多电平换流器子模块电容电压均衡控制策略研究[J].*电测与仪表*,2023,60(8):81-84.  
YUE Youjun, FAN Yazhen, ZHAO Hui, et al. Research on the capacitor voltage balancing control strategy of MMC sub-module based on improved sorting algorithm[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(8):81-84.
- [19] SON G T. Design and control of a modular multilevel HVDC converter with redundant power modules for non interruptible energy transfer[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, 27(3):1611-1619.
- [20] 蒲羿,罗永捷,熊小伏,等.基于电压收敛性预测的MMC低开关频率均压控制策略[J].*电网技术*,2020,44(11):4347-4358.  
PU Yi, LUO Yongjie, XIONG Xiaofu, et al. Reduced switching frequency voltage balancing control strategy based on voltage convergence prediction for modular multilevel converters[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(11):4347-4358.
- [21] 肖强,朱晟毅,蒲羿,等.一种模块化多电平换流器电压均衡改进策略[J].*电源学报*,2021,19(5):59-66.  
XIAO Qiang, ZHU Shengyi, PU Yi, et al. Improved voltage balancing strategy for modular multilevel converter[J]. *Journal of Power Supply*, 2021, 19(5):59-66.
- [22] 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.  
LIU Jianhua, JU Yunpeng, LÜ Chengyang, et al. Research on MMC optimized equalization control method[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(19):99-104.
- [23] 屠卿瑞,徐政,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 modular multilevel converter[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2011, 26(5):15-20.
- [24] 周怿源,秦亮,杨诗琦,等.模块化多电平变流器电容电压均衡策略研究进展[J].*电网技术*,2023,47(1):322-338.  
ZHOU Yiyuan, QIN Liang, YANG Shiqi, et al. Research progress of capacitor voltage balancing strategies for modular multilevel converters[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(1):322-338.
- [25] 孙正东,郝全睿.基于MMC平均值仿真模型的损耗快速评估方法[J].*中国电机工程学报*,2024,44(19):7739-7751.  
SUN Zhengdong, HAO Quanrui. Fast loss evaluation method based on MMC average simulation model[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(19):7739-7751.
- [26] 罗永捷,宋勇辉,熊小伏,等.高压大容量MMC换流阀损耗精确计算[J].*中国电机工程学报*,2020,40(23):7730-7742.  
LUO Yongjie, SONG Yonghui, XIONG Xiaofu, et al. Accurate loss calculation method for bulk-power MMCs[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(23):7730-7742.
- [27] 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*,2017,36(2):1-8.  
XIONG Yan, ZHAO Chengyong, XU Jianzhong, et al. A review of ranking algorithms for mmc capacitor voltages balancing[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2017, 36(2):1-8.

收稿日期:2025-01-06

修改稿日期:2025-02-04