

MMC电容电压排序优化控制策略研究

马 龙¹, 张子钰², 郭希铮²

(1. 煤科集团沈阳研究院有限公司, 辽宁 抚顺 113122; 2. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 高压直流输电技术在大容量长距离输电和电网互联中起着重要作用, 在实际工程中模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 应用较广, 其中电容电压均衡控制影响着输出电压质量、内部环流等, 在整体系统的控制中显得尤为重要, 然而传统的子模块电容均压算法存在开关频率高、损耗大等问题。从MMC的特性出发, 结合最近电平逼近调制技术, 提出了针对MMC电容的优化排序算法, 同时采用模块变动选择法抑制相间环流, 通过在MATLAB/Simulink仿真环境中搭建MMC系统验证了排序算法的可行性。优化排序算法大大降低了子模块的开关频率, 同时随着子模块数的增加, 电压均衡效果会越来越好, 该方法适用于工程中大规模的MMC。

关键词: 模块化多电平换流器; 优化排序算法; 电容电压均衡控制; 环流抑制

Study on the optimal control strategy of MMC capacitor voltage sorting

MA Long¹, ZHANG Ziyu², GUO Xizheng²

(1. Coal Science Group Shenyang Research Institute Co., Ltd., Fushun 113122, China; 2. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: HVDC technology plays an important role in large-capacity long-distance power transmission and grid interconnection. In practical engineering, modular multilevel converter (MMC) is widely used, among which capacitor voltage equalization control affects the output voltage quality and internal circulating current, it is particularly important in the control of the overall system. However, the traditional sub-module capacitor voltage equalization algorithm has problems such as high switching frequency and large loss. In this paper, based on the characteristics of MMC and combining the nearest level approximation modulation technology, an optimal sorting algorithm for MMC capacitance is proposed. At the same time, module variable selection method is adopted to suppress phase-to-phase circulation. In this paper, the feasibility of the sorting algorithm is verified by building MMC system in MATLAB/Simulink simulation environment. The optimized sorting algorithm in this paper greatly reduces the switching frequency of the sub-modules. At the same time, as the number of sub-modules increases, the voltage balancing effect will become better and better. This method is suitable for large-scale MMC in engineering.

Key words: modular multilevel converter; optimized sorting algorithm; capacitor voltage balance control; circulating current restraining

0 引言

高压直流输电 (High Voltage Direct Current, HVDC) 具有适合长距离大容量输电的特性, 被广泛应用在孤岛供电、分布式发电等

领域。而相比传统的电压源型变换器 (Voltage Source Converter, VSC), 模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC)

是一种采用不同数量子模块级联结构的新型电压源变换器^[1]，方便扩展规模。通过调节子模块的数量，可以灵活改变应用电压的等级，同时MMC具有较低的开关频率，输出谐波含量较低，且三相之间相互独立易于控制。诸多优势使得MMC在国内外被广泛应用和研究。目前，随着MMC的发展，级联的子模块数量越多，电容电压平衡问题也越发重要。其中电容电压平衡策略是MMC控制的基本单元，与输出谐波含量、输电质量等均紧密关联^[2-4]。另外电容电压均衡控制方法与调制策略也密切相关，在直流输电工程领域，MMC一般高达数百电平，由于载波移相调制策略不适用于规模较大的MMC，相应的电容电压均衡控制需要借助额外的硬件电路，在工程中不便实现。实际工程中的MMC大多使用最近电平逼近调制方法^[5]（Nearest Level Modulation, NLM），其中电容电压排序均压算法无须增加额外的硬件控制，而是以算法的形式呈现，便于工程实现。由此可见，基于NLM的电容电压均衡策略具有较高的工程价值，研究意义较大。

然而传统的电容电压排序算法会造成开关频率高、子模块反复投切等问题。针对这一问题许多文献提出了相应的解决方案，文献[6]提出了电容电压的改进均压策略，采用取整修正方法，但这种方法带来了极大的运算量，对处理器的计算能力要求较高，不适用于大规模的MMC。文献[7]在排序算法中设置多类型电容电压阈值，有效地降低了开关频率，但在实际应用中多个阈值不易确定，阈值选取不合适会带来电容电压波动等问题。

本文基于MMC拓扑结构，结合子模块电压均衡控制，在传统电容电压排序算法的基础上提出了优化方案，该算法有效降低了子模块开关频率。将优化后的电容电压均衡算法应用于MMC拓扑，控制方案采用适用于阶梯波调制的模块变动选择法^[8]，利用MATLAB/Simulink仿真平台搭建模型进行实验，同时针对开关频率与传统均压算法进行对比分析，实验结果验证了本文优化

算法的有效性。

1 MMC运行原理

1.1 基本拓扑结构

MMC可根据输出级别配置不同数量的子模块，电路拓扑如图1所示。其子模块结构主要包含全桥型和半桥型两种^[9]。MMC三相桥臂结构相同且可独立运行，通过相应的调制方式，交流侧输出多阶梯电平可近似等效正弦波。

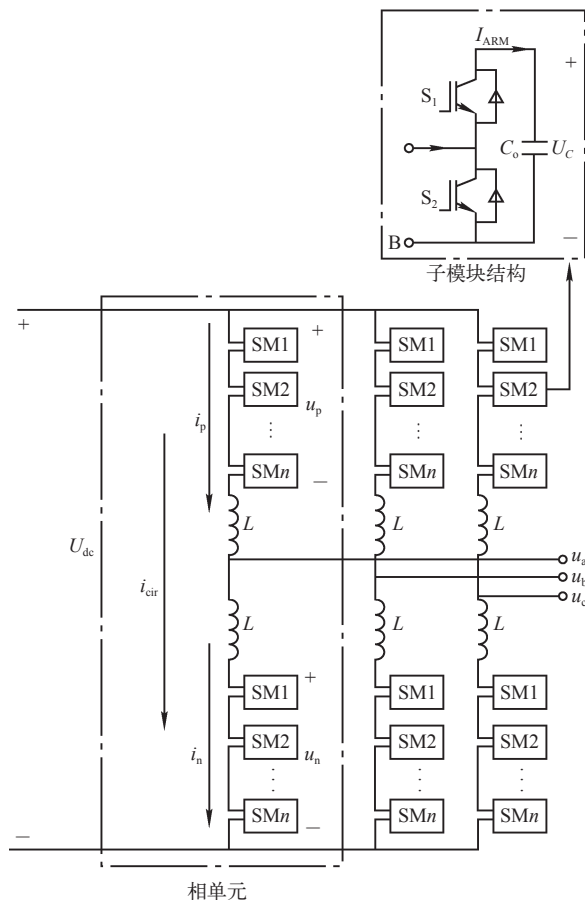


图1 MMC拓扑结构

Fig. 1 The topology of the MMC

工程中MMC-HVDC的基本结构由双端MMC、直流输电线路及变压器组成，如图2所示，其功率可以双向流动，两侧换流站均可作为整流站或逆变站使用，灵活控制潮流^[10]。

1.2 MMC调制策略

MMC常见的调制方式通常分为PWM调制策略与阶梯波调制策略。PWM调制策略包含载

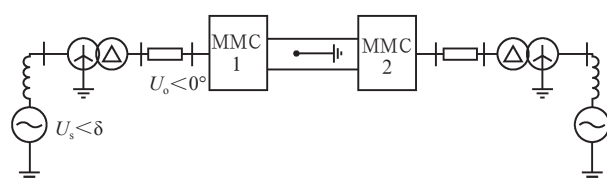


图2 MMC-HVDC 拓扑结构

Fig. 2 The topology of the MMC-HVDC

波移相调制（CPS-PWM）、空间矢量调制和载波层叠调制等^[11-12]。阶梯波调制策略以NLM策略为代表^[13-14]。由于在实际工程应用中，MMC通常高达数百电平，其子模块更是达到了上千数量级，而载波移相调制不适用于子模块较多的情况，且相应的电容电压均衡策略需要借助额外的硬件控制器，不便于工程实现^[15-16]。综合来看，实际工程中大多采用最近电平调制策略，该调制策略以其开关频率小、便于实现等优势迅速成为工程应用中的首选。

NLM原理是根据调制波采样值，确定各个桥臂需投入的子模块数目，结合电容电压均衡控制策略，选择具体投入的子模块并产生脉冲信号，从而在输出端形成相应电平的阶梯波，近似等效为正弦波，原理如图3所示。

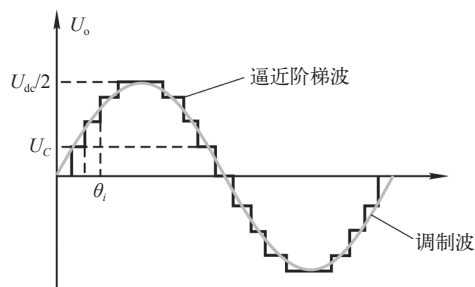


图3 最近电平调制原理

Fig. 3 Principles of nearest level modulation

以A相为例，假设MMC子模块电容电压平衡控制较好，则上下桥臂电压为

$$u_p = N_p U_c = N_p \frac{U_{dc}}{N} \quad (1)$$

$$u_n = N_n U_c = N_n \frac{U_{dc}}{N} \quad (2)$$

式中， N 为每相需要投入的子模块数； N_p 、 N_n 为上下桥臂投入的子模块数； U_{dc} 为直流侧电压。

另外设交流侧电压为 u_j ，则此刻上下桥臂需

投入子模块数目可由式（3）、式（4）计算得到，即

$$N_p = \frac{N}{2} - \text{round}\left(N \frac{u_j}{U_{dc}}\right) \quad (3)$$

$$N_n = \frac{N}{2} + \text{round}\left(N \frac{u_j}{U_{dc}}\right) \quad (4)$$

2 电容电压均衡策略

2.1 传统均压策略

采用NLM策略时，必须考虑电容电压均衡问题。传统均压策略是对电容电压进行采样，在同一周期内进行排序处理，根据桥臂电流方向判断当前时刻电容处在充电或放电状态，根据投切规则选择相应的子模块，该方法可以使交流侧准确输出阶梯波，同时使子模块交替充放电维持电压稳定，实现各个单元电压均衡运行。然而，该方法在每个周期都需对电容电压进行排序处理，以保证结果的精确性，但排序频繁变动会导致子模块频繁投切，开关频率和开关损耗增大。

2.2 快速排序算法

常用的快速排序方法是冒泡排序法，该方法是指在一组数据中，从前到后顺次比较相邻数据的数值大小，根据升序或降序交换二者位置，直至得到严格排序后的数据序列。

定义平均时间复杂度 T ，表示完成一次电容电压排序算法使用比较逻辑的总次数，经分析可得冒泡法的平均时间复杂度如式（5）所示。由此可见，对于工程应用而言，子模块通常有数百个，冒泡法给处理器带来了极大的负担。

$$T(N) = \frac{N^2 - N}{2} = O(N^2) \quad (5)$$

2.3 优化均压排序算法

柔性直流输电工程中所用的MMC通常高达数百电平，若以工频基波进行计算，每个阶梯电平维持时间大概在0.1 ms以内，无须以传统排序算法的方式过度追求电容电压的精确均衡，可结合整体电压均衡度与开关频率进行综合考虑。本文采用优化的均压排序算法，无须时刻根据电压

排序进行投切,而是在检测到输出阶梯电平级数发生变化后,即需要投入的子模块数目发生改变后,根据相应规则重新进行投切。

优化排序算法整体流程如图4所示,首先采用快速排序法对电容电压进行首次排序,按照由小到大的次序记录子模块序号。该方法将数据分为左右两组,分别以不同的方向进行数据的比较换位,其中一组数据均大于另一组,最终得到完整的升序/降序数据排列。该算法的平均时间复杂度为

$$T(N) = O[N \cdot \log_2(N)] \quad (6)$$

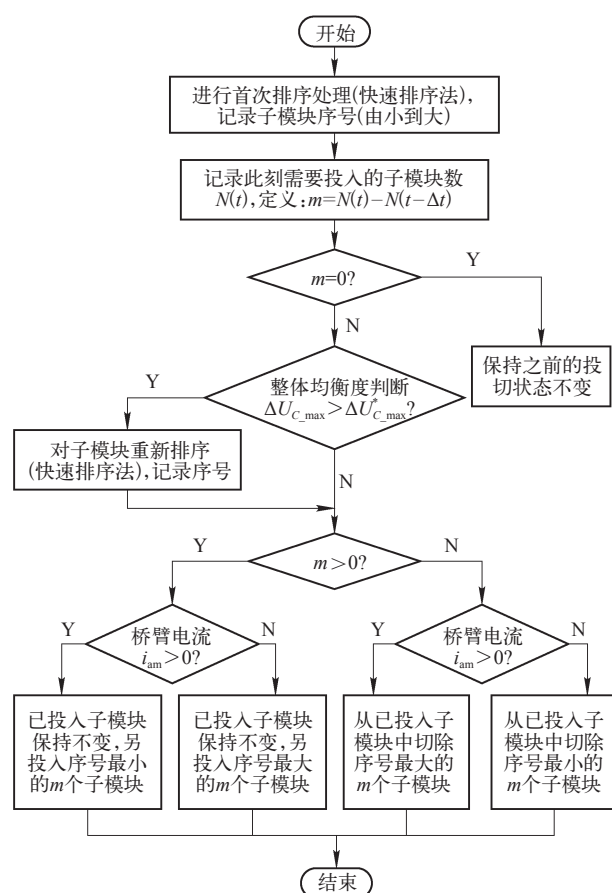


图4 优化均压排序算法

Fig. 4 An optimized sorting algorithm for pressure equalization

根据相应调制规则,设此时需要投入的子模块数为 $N(t)$,为了判断此时上下桥臂需投入子模块数目是否发生变化,引入输出电平变化标志量 m , m 等于此刻与前一时刻投入子模块总数之差。若此时 $m=0$,说明电平数没有发生变化,则保持原投切状态不变,开关无须给予动作信号;

若 m 不为0,即检测到电平数减少或增加,此时需判断电容电压的整体均衡度。

在此之前,需要人为设定均衡度,整体均衡度参考变量设为 $\Delta U_{C_{max}}^*$,表示同一桥臂内电容电压的最大值与最小值之差。当在某一周期检测到 $U_{C_{max}} > \Delta U_{C_{max}}^*$ 时,此刻需要通过快速排序法对相应子模块进行重新排序,更新其顺序编号,以缩小桥臂内电容电压的差距,从而重新达到所期望的均衡程度。若电容最大差值没有超出所设阈值,则进行下一步的判断。

整体均衡度判断完成后,需要执行单个子模块的均衡排序算法。首先判断电平变化标志量 m 的正负性,若 $m>0$,电平数呈上升趋势,所需投入子模块数增加,则已投入子模块保持原状态,同时进一步判断当前时刻桥臂电流方向。若电流流入桥臂,则按照之前排序结果,顺次投入序号最小的 m 个子模块;若电流从桥臂流出,则顺次投入序号最大的 m 个子模块。同理,若 $m<0$,所需投入子模块数减少,此时若电流流入桥臂,则从已投入子模块中选择序号最大的 m 个子模块切除,其余子模块状态保持不变;若电流从桥臂流出,则从已投入子模块中选择序号最小的 m 个子模块切除,其余保持不变。至此完成所有子模块状态的更新。采用本文优化均压算法可有效降低开关频率,同时电容电压可维持较好的均衡度。

3 环流抑制策略

在运行过程中,MMC电容电压不能时刻维持在理想值,而是在理想值附近波动,导致桥臂总电压并不能时刻维持在同一数值,从而在MMC桥臂间产生相间环流,相间环流影响电容电压波动大小、桥臂电流畸变率等,抑制相间环流在MMC控制中尤为重要。

本文采用适用于阶梯波调制的模块变动选择法(Module Changing Selection Algorithm, MCSA),该方法可根据拓扑变化自行调节,无须搭建额外的控制电路,通过编写相应的算法即可抑制相间环流。

图1中,以A相为例,定义相间环流为 i_{cir} ,

上下桥臂电流为 i_p 、 i_n ，交流侧输出电流 i_j ，直流母线电流 I_{dc} 。根据基尔霍夫电流定律，列出桥臂电流方程为

$$\begin{cases} i_p = i_{cir} + \frac{I_{dc}}{3} + \frac{i_j}{2} \\ i_n = i_{cir} + \frac{I_{dc}}{3} - \frac{i_j}{2} \end{cases} \quad (7)$$

同时列写桥臂的基尔霍夫电压方程，并进行相应的公式推导可得

$$u_j = \frac{u_n - u_p}{2} - \frac{L_r}{2} \frac{di_j}{dt} \quad (8)$$

$$U_{dc} - u_p - u_n = 2L_r \frac{di_{cir}}{dt} \quad (9)$$

式中， u_p 、 u_n 为上下桥臂电压； L_r 为桥臂滤波电感。

由式(8)、式(9)可知，当上下桥臂同时增/减同等数量的子模块时，并不会影响输出电压，却影响相间环流的变化，若上下桥臂同时增/减合适数量的子模块，将桥臂总电压维持在 U_{dc} 附近，则可有效抑制环流。

在这之前需对传统的NLM方法作一些改进。根据上文可知，传统NLM方法通过舍入计算，最终投入的子模块数一定为偶数，结合所用环流抑制方法可对传统NLM作出改进，即每相投入子模块数允许出现奇数，电平数较之前有所增加，可使电流谐波含量进一步降低，采用改进调制法后，式(3)、式(4)可改写为

$$N'_p = \frac{N}{2} - \frac{\text{round}(2Nu_j/U_{dc})}{2} \quad (10)$$

$$N'_n = \frac{N}{2} + \frac{\text{round}(2Nu_j/U_{dc})}{2} \quad (11)$$

模块变动选择法具体流程如图5所示。利用改进调制法计算此刻需投入的子模块数，并判断 N_p 、 N_n 是否为整数。根据图5中相应规则选取合适的 ΔN ， ΔN 为额外抑制环流的子模块数。结合改进后的NLM方法，最终投入子模块数如式(12)、式(13)所示，此时投入子模块数不再保持不变，通过数值计算规则可知 N_p 、 N_n 均为整数，相比传统NLM算法而言，模块变动选择法

既改善了输出波形，同时达到了抑制环流的目的。

$$N_p = \frac{N}{2} - \frac{\text{round}(2Nu_j/U_{dc})}{2} + \frac{N}{2} \quad (12)$$

$$N_n = \frac{N}{2} + \frac{\text{round}(2Nu_j/U_{dc})}{2} + \frac{N}{2} \quad (13)$$

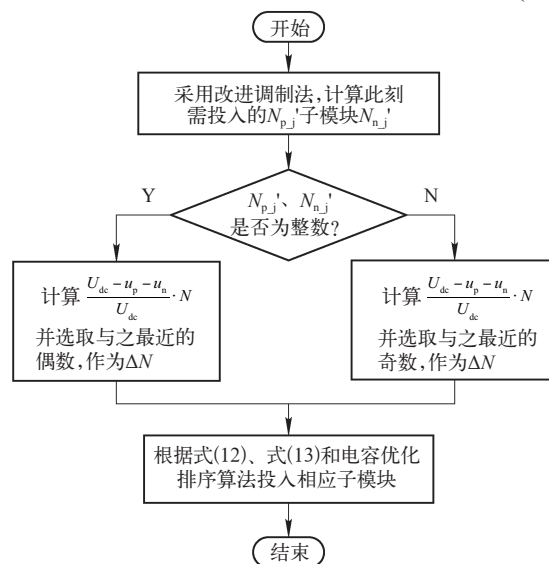


图5 模块变动选择法

Fig. 5 Module changing selection algorithm

4 仿真实验

为了验证本文优化均压算法的正确性，在MATLAB/Simulink仿真环境中搭建MMC模型，子模块数目 N 为40，相应拓扑参数如下表所示。

表 MMC具体参数

Tab. Specific parameters of MMC

参数	数值
桥臂子模块个数 N /个	40
交流侧基波电压峰值/kV	20
基波频率 f_0 /Hz	50
子模块电容 C /mF	15
桥臂电感 L_r /mH	12
电容电压额定值/kV	1
直流母线额定电压/kV	40
仿真步长/ μ s	1

搭建的MMC模型采用本文优化均衡控制算法以及模块变动选择法，通过与传统均压算法对比，统计各个子模块在一个基波周期内导通的次数，二者结果对比如图6所示。

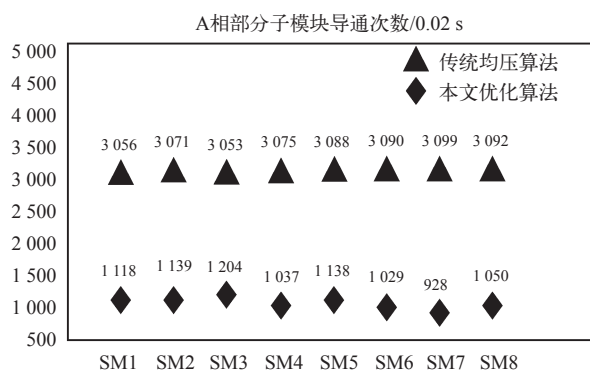
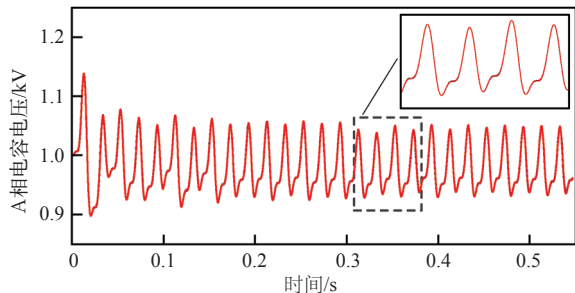


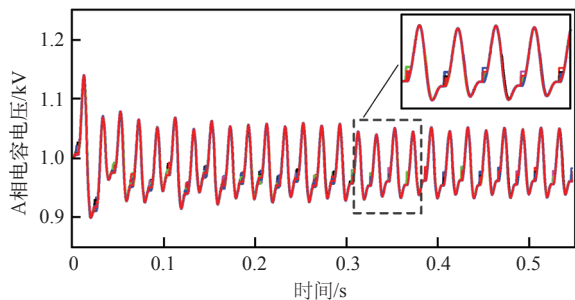
图6 优化均压算法与传统排序算法的开关频率

Fig. 6 The switching frequency comparison between the optimized equalizing algorithm and the traditional sorting algorithm

由此可见, 本文优化均压排序算法可大幅降低子模块的开关频率, A相电容电压的实验波形如图7所示。其中, 图7a为使用传统均压算法的结果, 图7b为使用优化均压算法后的结果, 可以看到此时虽牺牲了小部分均衡度, 但在整个MMC的系统内仍可满足需求, 且开关频率大幅度降低, 更加适用于实际工程应用。



(a) 使用传统均压算法得结果



(b) 使用优化均压算法得结果

图7 A相子模块电容电压

Fig. 7 The submodule capacitance voltage of phase A

在0.3 s处开启MCSA抑制环流, 相应的实验波形如图8~图10所示, 可以看到开启环流抑制后桥臂电流畸变率下降, 相间环流减小, 同时交

流侧电流电压并未受到影响。由于受实验条件限制, 仿真中搭建的MMC为40级, 而实际工程中MMC子模块高达数百级, 且在实际工程中的电容电压会更加均衡。

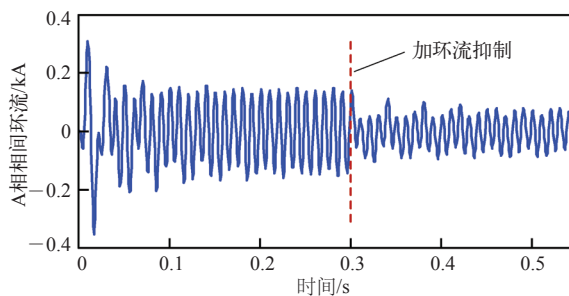


图8 A相的相间环流

Fig. 8 The phase circulation of phase A

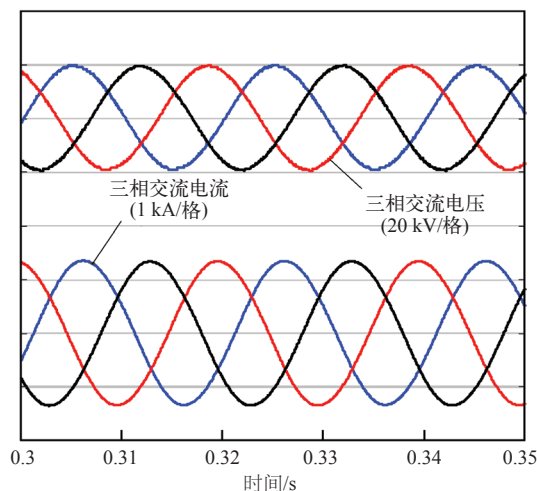


图9 三相交流电压及电流

Fig. 9 Three phase voltage and current

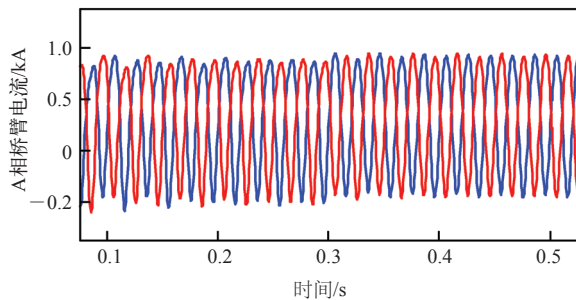


图10 A相桥臂电流

Fig. 10 The bridge arm current of phase A

4 结束语

本文从MMC的结构和特性出发, 结合工程中常用的最近电平逼近调制技术, 对传统的电容

电压均衡控制提出了一种新的优化方案,在输出电压电平级数较高的情况下,不刻意追求电容电压绝对平衡,而是综合考虑开关频率与开关损耗,在电平数不发生改变时维持之前的投切状态,电平数发生变化时进一步采用优化排序算法,子模块根据算法规则进行相应的投切,同时结合模块变动选择法对相间环流进行抑制,并在MATLAB/Simulink仿真环境中搭建相应模型进行验证。结果表明,本文优化均压算法相比传统均压算法而言,电容电压均衡程度可满足整体系统要求,且开关频率降低了近2/3,证明了该方法的有效性。

综上所述,本文优化均压排序算法在保证电容电压均衡的前提下,有效降低了开关频率,该方法可适用于工程中大规模的MMC。

参考文献

- [1] 韦延方,卫志农,孙国强,等.一种新型的高压直流输电技术——MMC-HVDC[J].电力自动化设备,2012,32(7):5-13.
- [2] 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.
- [3] MESHRAH P M, BORGHATE V B. A voltage balancing method applied to direct control strategy of MMC-VSC-HVDC[C]. International Conference on Electrical Engineering/electronics, IEEE, 2012.
- [4] 孟新涵,李可军,王卓迪,等.混合型MMC拓扑及应用于MTDC直流故障穿越能力分析[J].电力系统自动化,2015,39(24):72-79.
- [5] 王蕊,王斌,万杰星.模块化多电平换流器(MMC)调制方法综述[J].电器与能效管理技术,2017(8):43-47.
- [6] 郭高朋,姚良忠,温家良.模块化多电平变流器的子模块分组调制及均压控制[J].中国电机工程学报,2016,36(1):145-153.
- [7] 宋平岗,江浪,李云丰,等.MMC电容电压排序优化算法研究[J].工矿自动化,2014,40(6):68-71.
- [8] 宋平岗,李云丰,王立娜,等.基于改进阶梯波调制的模块化多电平换流器环流抑制策略[J].电网技术,2013,37(4):140-146.
- [9] 关明旭.模块化多电平变频器输入整流技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [10] SAEEDIFARD M, IRAVANI R. Dynamic performance of a modular multilevel back-to-back HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2903-2912.
- [11] 何梨梨,帅智康,单佳佳.MMC的多载波调制策略对比分析[J].电源学报,2019,17(5):56-64.
- [12] 李要乾.模块组合多电平变换器(MMC)的调制策略研究[D].北京:北京交通大学,2015.
- [13] WANG Yi, HU Can, DING Ruoyu, et al. A nearest level PWM method for the MMC in DC distribution grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9209-9218.
- [14] 李鹏鹏,郭家虎,梁克靖.基于MMC的最近电平逼近调制谐波特性分析[J].电源技术,2014,38(4):759-763.
- [15] 赵昕,赵成勇,李广凯,等.采用载波移相技术的模块化多电平换流器电容电压平衡控制[J].中国电机工程学报,2011,31(21):48-55.
- [16] 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.

作者简介



马 龙

马龙(1982—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力电子控制、安全检测标准化研究等。

(收稿日期:2020-03-05)EA