

模块化多电平换流器的电容电压平衡方法

薛 畅, 申 科, 纪延超, 江滨浩

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为解决模块化多电平换流器(MMC)在采用载波移相调制时的电容电压平衡问题,提出一种基于载波交换的平衡方法。该方法位于调制层,不改变子模块的调制波,既不影响输出电压波形,也不会产生额外的开关损耗。首先详述了 MMC 的拓扑结构、工作原理以及调制方式;分析了开关状态交换时可能会出现的情况,分别是存在上升沿时桥臂电流大于 0 或小于 0 和存在下降沿时桥臂电流大于 0 或小于 0;给出了具体的电容电压平衡方法及流程图。实验结果表明,所提方法可快速有效地将桥臂的电容电压集中在参考值附近,且各路电压之间无大幅波动,具有很好的平衡效果。

关键词: 模块化多电平换流器; 载波移相调制; 电容电压平衡; 调制层; 载波交换; 电压控制; 换流器

中图分类号: TM 46

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.07.005

0 引言

近年来,多电平技术已逐步取代多重化技术和串联开关技术,成为柔性输电工程的首选^[1-2]。由 Marquardt R 于 2001 年提出的模块化多电平换流器 MMC (Modular Multilevel Converter) 是多电平技术的一大飞跃^[3-11],由于其子模块为半桥式斩波电路,故亦被称为半桥式级联换流器。MMC 独特的模块化结构和可扩展性使其可有效实现高电压等级下的电能变换。与链式逆变器不同,MMC 不仅适用于无功补偿领域,由于具有公共直流侧,更加适用于背靠背和轻型直流输电系统^[8-11]。自从 MMC 被提出后,子模块电容电压的平衡问题一直是研究热点。

目前多电平逆变器的调制方法主要有阶梯波调制、空间矢量调制、载波层叠调制和载波移相调制 CPSPWM (Carrier Phase Shifted PWM) 等。其中

CPSPWM 由于具有谐波特性好、可控性强、易于实现、适用于模块化结构等优点,在多电平逆变器中得到了广泛应用^[12]。当 MMC 采用上述前 3 种调制方法时,往往通过排序法或脉冲轮换法来平衡子模块的电容电压。排序法是根据电容电压对子模块进行排序,再由桥臂电流的方向决定各子模块的开关状态(需保证总的合成电压不变)^[8-9]。排序法会造成额外的开关动作,导致开关损耗增大。脉冲轮换法是一种开环控制方法,其通过触发脉冲的轮换使同一桥臂中各子模块的投入时间基本相同,从而消除由调制方式引起的电压不平衡^[13]。但在实际应用中,每个子模块的运行参数并不相同,所以脉冲轮换法不能从根本上解决问题。当 MMC 采用 CPSPWM 时,目前国内外文献所提出的平衡方法都是调制波增量法^[14-16],即在每个子模块的调制波上叠加若干增量,以实现有功功率的合理分配,使各子模块的电容电压稳定在参考值附近。调制波增量法位于控制层,是宏观的,通常需要一个总控制环和若干针对各子模块的分控制环。当子模块的数目增大时,该方法的

收稿日期:2013-08-13;修回日期:2014-05-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51177020)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177020)

Principle and stability analysis of valley V^2 controlled Boost converter

HE Shengzhong, XU Jianping, ZHOU Guohua, WU Songrong, ZHANG Xi

(Key Laboratory of Magnetic Suspension Technology and Maglev Vehicle, Ministry of Education,

School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The output voltage ripple of Boost converter is analyzed and the valley V^2 control technique is applied to it. The operational principle of valley V^2 controlled Boost converter is analyzed and its system stability is investigated. The influence of slope compensation on its system stability is studied. A simulation model and an experimental platform are constructed based on PSIM software and the simulative and experimental results indicate that, the valley V^2 controlled Boost converter operates stably in the continuous conduction mode when its duty ratio is bigger than 0.5, otherwise, subharmonic oscillation may occur, which can be effectively eliminated by proper slope compensation.

Key words: Boost converters; valley V^2 control; subharmonic oscillation; slope compensation; stability

计算量急剧上升,且由于其改变了子模块的调制波,故会导致输出电压波形的畸变。

现提出一种采用 CPSPWM 的 MMC 的电容电压平衡方法。该方法位于调制层,不改变子模块的调制波,不影响输出电压波形,也不产生额外的开关损耗。

1 拓扑结构及工作原理

图 1 为三相 MMC 及其子模块的拓扑结构。图中 MMC 由 6 个对称桥臂组成,每个桥臂由 n 个子模块和 1 个限流电抗串联而成。 U_{dc} 为 MMC 的直流母线电压。子模块为半桥式斩波电路,其电容电压应被稳定在 U_{dc}/n 附近。一般而言,MMC 的相电压需要有零电平,故 n 通常为偶数。

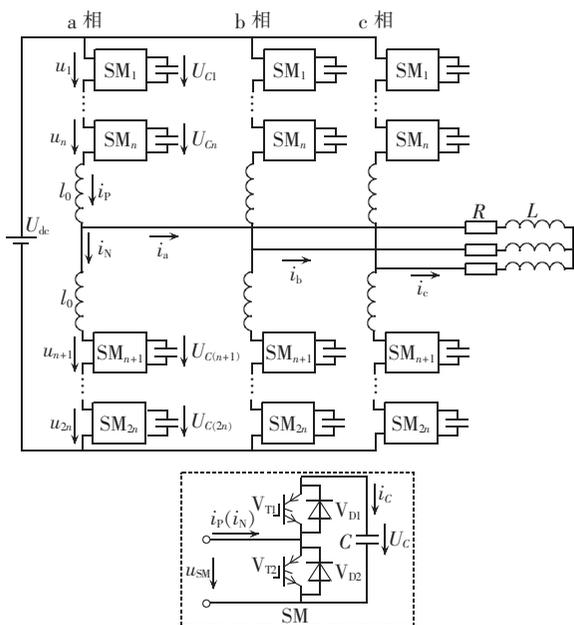


图 1 MMC 及其子模块的拓扑结构

Fig.1 Topology of MMC and its sub-module

子模块有 2 种开关状态(不考虑死区),可由 S 表示,具体如表 1 所示。

表 1 子模块的开关状态

Tab.1 Switching states of sub-module

S	V_{T1}	V_{T2}	u_{SM}	i_C	状态
1	开通	关断	U_C	$i_p(i_N)$	投入
0	关断	开通	0	0	切除

由此可知,当一个子模块处于切除状态时,其电容既不充电也不放电;处于投入状态时,其电容在桥臂电流大于 0 时充电,小于 0 时放电。

以 a 相上桥臂为例,第 i 个子模块的输出电压和电容电流可表示如下:

$$u_i = S_i U_{Ci}, \quad i_C = S_i i_p \quad (1)$$

若忽略限流电抗的分压作用,a 相电压(以直流母线中点为参考点)可表示如下:

$$u_a \approx -\sum_{i=1}^n S_i U_{Ci} + \frac{1}{2} U_{dc} \approx \sum_{i=n+1}^{2n} S_i U_{Ci} - \frac{1}{2} U_{dc} \quad (2)$$

S_i 需始终满足下式:

$$\sum_{i=1}^{2n} S_i = n \quad (3)$$

由式(2)可知, u_a 具有 $n+1$ 个电平,即 $-U_{dc}/2, \dots, -2U_{dc}/n, -U_{dc}/n, 0, U_{dc}/n, 2U_{dc}/n, \dots, U_{dc}/2$ 。

子模块在调制过程中,其开关状态的变化规律如图 2 所示。

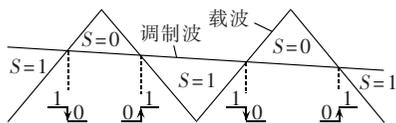


图 2 开关状态的变化规律

Fig.2 Law of switching state change

2 调制方式

CPSPWM 是针对链式逆变器提出的,故适用于同是模块化结构的 MMC。以 a 相为例,设调制波为 u_a^* (即参考电压,范围通常为 $[-U_{dc}/2, U_{dc}/2]$),归一化后上桥臂每个子模块的调制波为 $-u_a^*/U_{dc} + 1/2$ (取负是因为 MMC 具有反向性),下桥臂各子模块的调制波为 $u_a^*/U_{dc} + 1/2$;调制比为 u_a^* 的峰值与 $U_{dc}/2$ 之比;载波为极值是 0 和 1 的三角波;一个子模块对应一个载波,载波之间的相位互差 $360^\circ/(2n)$ 。

假设每个桥臂的子模块数为 $n=4$,则上桥臂在 1 个工频周期内的调制结果如图 3 所示。第 1 个子图中,实线为上桥臂的调制波和载波,虚线为下桥臂的调制波和载波。

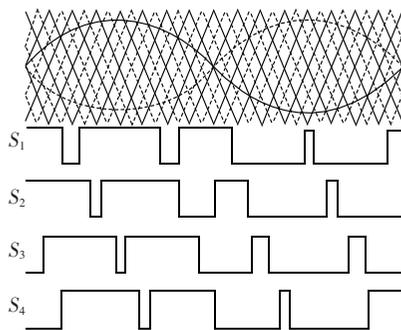


图 3 上桥臂在 1 个工频周期内的调制结果

Fig.3 Modulation results of upper arm within one grid period

3 电容电压的平衡方法

由式(2)可看出,同一桥臂中各子模块的开关状态可以互相交换,对输出电压不会产生影响。而子模块的开关状态是由调制波和载波比较得出的,同一桥臂中各子模块的调制波相同,所以它们的载波亦可互相交换。

本文提出的平衡方法要求所有载波(包括下桥臂)的顶点(对应 1 的点)均为采样点,故采样频率等于 $2n$ 倍的载波频率。同样假设 $n=4$,图 4 为上桥臂在 2

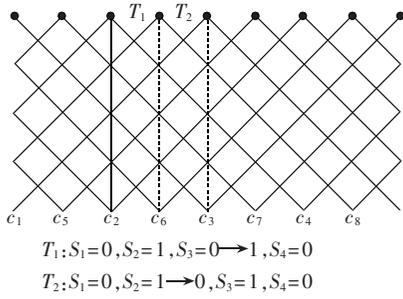
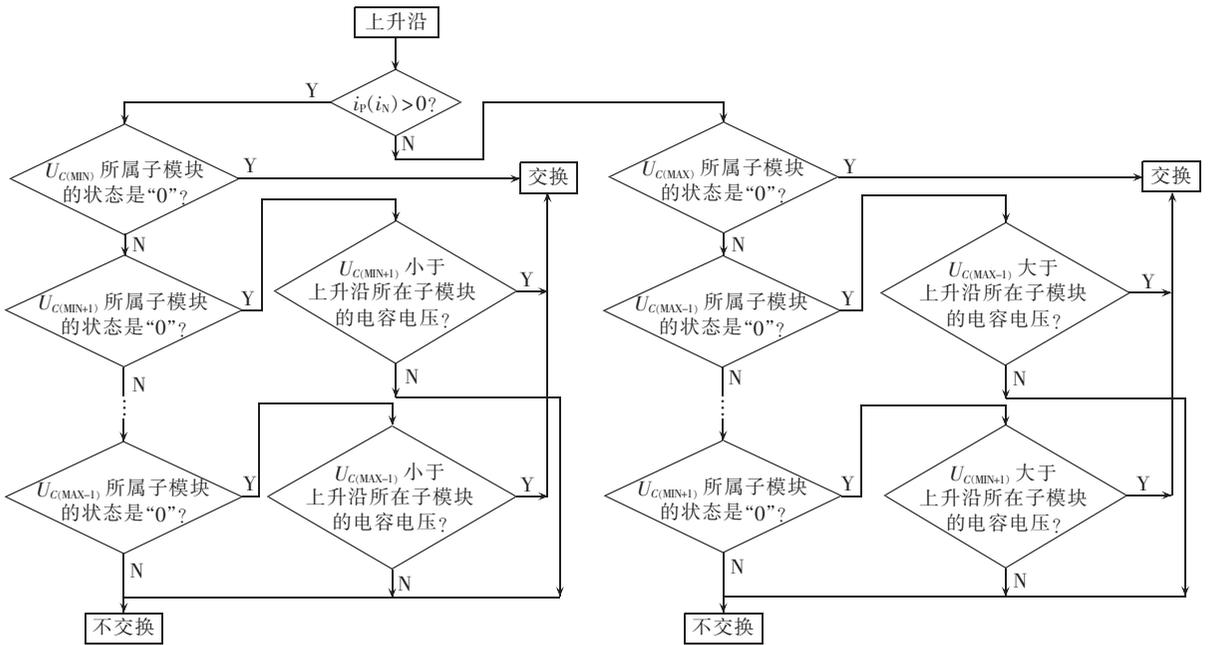


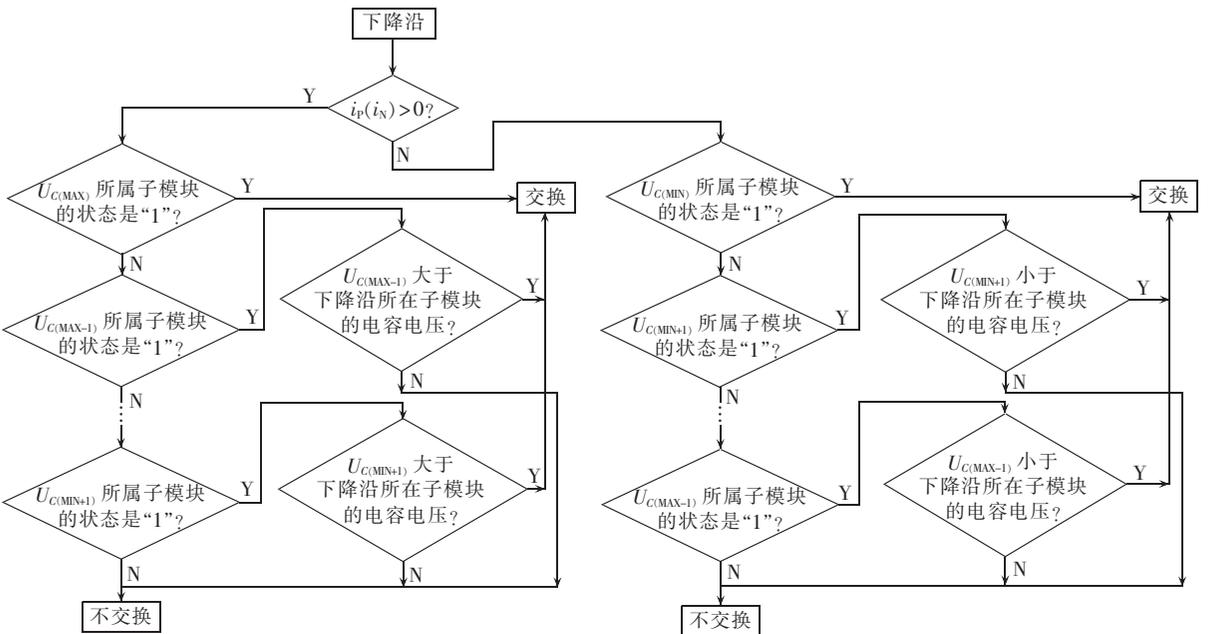
图 4 上桥臂在 2 个采样周期内的调制结果
 Fig.4 Modulation results of upper arm within two sample periods

个采样周期内的调制结果。图中圆点代表采样点; T_1, T_2 代表采样周期;粗实线为采样所得调制波; c_1-c_4, c_5-c_8 分别为上桥臂和下桥臂的载波。

由图 4 可知,在一个采样周期内同一桥臂中各子模块的开关状态共有 4 种,分别是 0、1、由 0 变至 1 (上升沿)和由 1 变至 0 (下降沿)。这 4 种状态中上升沿用于和“0”交换,下降沿用于和“1”交换,这样做可以保证过渡的平滑性,避免产生额外的开关损耗。在交换时,根据桥臂电流的方向,有如下 4 种情况,由此可得出该平衡方法的流程图如图 5 所示。图中,



(a) 上升沿的交换



(b) 下降沿的交换

图 5 平衡方法的流程图

Fig.5 Flowchart of balancing method

$U_{C(\text{MAX})}$ 、 $U_{C(\text{MAX}-1)}$ 分别是桥臂中最大和第二大的电容电压; $U_{C(\text{MIN})}$ 、 $U_{C(\text{MIN}+1)}$ 分别是桥臂中最小和第二小的电容电压,依此类推。

a. 存在上升沿,桥臂电流大于 0;对处于“0”状态的子模块的电容电压进行排序,选出电压最小的子模块。若该子模块的电容电压小于上升沿所在子模块的电容电压,则与之交换开关状态,即令其电容充电,否则不交换。

b. 存在上升沿,桥臂电流小于 0;对处于“0”状态的子模块的电容电压进行排序,选出电压最大的子模块,若该子模块的电容电压大于上升沿所在子模块的电容电压,则与之交换开关状态,即令其电容放电,否则不交换。

c. 存在下降沿,桥臂电流大于 0;对处于“1”状态的子模块的电容电压进行排序,选出电压最大的子模块。若该子模块的电容电压大于下降沿所在子模块的电容电压,则与之交换开关状态,即终止其电容的充电过程,否则不交换。

d. 存在下降沿,桥臂电流小于 0;对处于“1”状态的子模块的电容电压进行排序,选出电压最小的子模块。若该子模块的电容电压小于下降沿所在子模块的电容电压,则与之交换开关状态,即终止其电容的放电过程,否则不交换。

需要注意的是,上述开关状态的交换实际上是载波的交换,这种交换不是暂时的,当下一个采样周期来临时,将会在此次交换的基础上继续进行交换。

该方法不会造成额外的开关动作,但可能会导致开关频率分布不均匀,这是其唯一缺点。由于 MMC 在中高压领域中应用时效率通常很高(大于 98%),自身损耗可忽略不计,故采用此方法不会对装置产生任何负面影响。另外,子模块的数目越大,可供交换的选择面就越广,平衡效果亦越好。

4 实验结果

为验证此方法的有效性,搭建了一台三相的 MMC 样机,参数如下:直流母线电压为 240 V,桥臂子模块数 n 为 4,子模块电容为 3300 μF ,限流电抗为 2 mH,负载(每相)为 5 Ω + 12.5 mH,载波频率为 1.2 kHz,调制比为 0.9。

图 6 给出样机线电压波形,其为 9 电平 PWM 波。

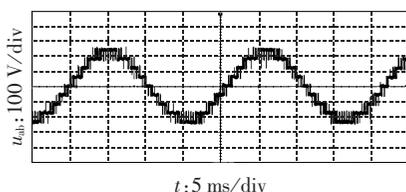


图 6 线电压波形

Fig.6 Waveform of line voltage

图 7 为 a 相上桥臂子模块的电容电压波形。0.6 s 前无平衡控制,故电容电压是分散的;0.6 s 时加入平衡控制,0.2 s 后各路电压均被稳定在 60 V 附近(之间无大幅波动),说明此方法有效可行。

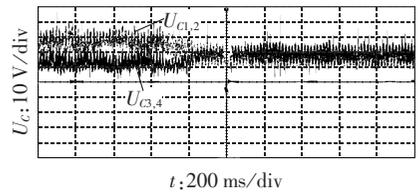


图 7 电容电压波形

Fig.7 Waveforms of capacitor voltages

5 结论

本文提出的基于载波交换的方法可有效解决采用 CPSPWM 时 MMC 的电容电压平衡问题。相对于传统的排序法、脉冲轮换法以及调制波增量法,该方法具有诸多优势,如不改变调制波、不产生额外的开关损耗、计算量少等,且简单有效,可通过 CPLD 或 FPGA 轻松实现。

参考文献:

- [1] LAI J S, PENG F Z. Multilevel converters—a new breed of power converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(3): 509-517.
- [2] RODRIGUEZ J, LAI J S, PENG F Z. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(4): 724-738.
- [3] LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range[C]//Proceedings of Power Tech Conference. Bologna, Italy: IEEE, 2003: 23-26.
- [4] GIINKA M, MARQUARDT R. A new AC/AC multilevel converter family [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(3): 662-669.
- [5] 谢妍, 陈柏超, 陈耀军, 等. 新型模块化多电平换流器串联电抗器的功能与取值分析[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(9): 55-59.
XIE Yan, CHEN Baichao, CHEN Yaojun, et al. Function analysis and parameter selection for series reactor of modular multilevel converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9): 55-59.
- [6] 管敏渊, 徐政. 模块化多电平换流器的快速电磁暂态仿真方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(6): 36-40.
GUAN Minyuan, XU Zheng. Fast electro-magnetic transient simulation method for modular multilevel converter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6): 36-40.
- [7] 何大清, 蔡旭. 模块化多电平变流器的限幅控制和混合调制[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(4): 63-66.
HE Daqing, CAI Xu. Limitation control and hybrid modulation of modularized multilevel converter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(4): 63-66.
- [8] ALLEBROD S, HAMERSKI R, MARQUARDT R. New transformerless, scalable modular multilevel converters for HVDC-trans-

- mission[C]//Power Electronics Specialists Conference. Rhodes, Greece;IEEE,2008;174-179.
- [9] 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.
- [10] 刘栋,汤广福,贺之渊,等. 模块化多电平柔性直流输电数字-模拟混合实时仿真技术[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):68-73.
LIU Dong,TANG Guangfu,HE Zhiyuan,et al. Hybrid real-time simulation technology for MMC-HVDC [J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(2):68-73.
- [11] 蔡新红,赵成勇. 模块化多电平换流器型高压直流输电系统控制保护体系框架[J]. 电力自动化设备,2013,33(9):157-163.
CAI Xinhong,ZHAO Chengyong. Framework of control and protection system for MMC-HVDC transmission system [J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(9):157-163.
- [12] LIANG Y Q,NWANK C O. A new type of STATCOM based on cascading voltage source inverters with phase-shifted unipolar SPWM[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1999,35(5):118-123.
- [13] TOLBERT L M,PENG F Z,CUNNYNGHAM T,et al. Charge balance control schemes for cascade multilevel converter in hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2002,49(5):1058-1064.
- [14] AKAGI H,INOUE S,YOSHII T. Control and performance of a transformerless cascade PWM STATCOM with star configuration [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2007,43(4):1041-1049.
- [15] HAGIWARA M,AKAGI H. Control and experiment of pulse-width-modulated modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2009,24(7):1737-1746.
- [16] 李笑倩,宋强,刘文华,等. 采用载波移相调制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,2012,32(9):49-55.
LI Xiaoqian,SONG Qiang,LIU Wenhua,et al. Capacitor voltage balancing control by using carrier phase-shift modulation of modular multilevel converters [J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(9):49-55.

作者简介:



薛畅

薛畅(1984-),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,研究方向为无功补偿与谐波抑制(E-mail:xuechang1984@163.com);

申科(1984-),男,陕西汉中,人,博士研究生,研究方向为轻型直流输电;

纪延超(1962-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士研究生导师,研究方向为电能质量检测与控制;

江滨浩(1959-),男,辽宁沈阳人,教授,博士研究生导师,研究方向为电磁场理论及应用。

Capacitor voltage balancing of modular multilevel converter

XUE Chang, SHEN Ke, JI Yanchao, JIANG Binhao

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A method based on carrier exchange is proposed to balance the capacitor voltage of MMC (Modular Multilevel Converter) adopting carrier phase-shift PWM method, which, located at the modulation layer and without additional switching loss, neither changes the modulation signal of submodule nor influences the output voltage waveform. The topology, operating principle and modulation strategy of MMC are discussed in detail. Four situations that may happen during the state switchover are analyzed: the bridge arm current is positive or negative and there is a rising or falling edge. The specific capacitor voltage balancing method and its flowchart are given. Experimental results show that, the dispersive capacitor voltages of bridge arms are balanced quickly and effectively around the reference voltage without large fluctuations, verifying the better balancing effect of the proposed method.

Key words: modular multilevel converter; carrier phase-shift PWM; capacitor voltage balancing; modulation layer; carrier exchange; voltage control; electric converters