

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2020.0005.002

# 一种改进均压算法的 MMC 复合调制策略\*

李登魁, 张 东

(安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

**摘 要:**针对最近电平调制策略在电压等级不高且电平数目较少情况下产生的阶梯波在逼近正弦调制波时存在较大拟合误差的问题,提出了一种复合调制策略;首先采集 NLM 产生的阶梯波与调制信号之间的误差作为阶梯调制信号;然后结合载波调制原理,将阶梯调制信号与幅值相等、相位依次偏移的三角载波信号比较,基于面积等效原理产生一组 PWM 脉宽调制信号;最后将其与阶梯波信号叠加,最终形成驱动信号;同时改进了传统均压算法来降低系统的开关频率;通过 Simulink 中搭建的 MMC 仿真验证,复合调制下既保证了输出电压波形质量,也降低了系统开关损耗和电流总畸变率,而且改进的均压算法对子模块电容电压波动情况能够有效抑制,提高了 MMC 系统转化效率。

**关键词:**MMC;复合调制;子模块均压控制算法

**中图分类号:**TM46

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-058X(2020)05-0008-08

## 0 引 言

经济和科技的快速发展,促进了新能源发电技术逐渐成熟,特别是风力发电、太阳能发电和生物质发电的出现推动了采用多电平换流器的柔性直流输电技术的运用和完善。MMC 因成本小、低损耗、低阶跃电压以及优异的故障处理能力在多电平换流器的拓扑结构中脱颖而出,它不需要独立的供电电源,兼具整流和逆变的双向换流,负载侧可实现有源并网以及向无源网络单独供电等特点,在中低压大功率领域中应用广泛。

载波移相(PWM 方式)和最低电平逼近(阶梯波调制)是目前 MMC 主要的两种控制方式。载波移相因为开关频率高而局限于电平数较低的场景;最低电平逼近则广泛适用于电平数较高的场景。

研究发现,中低压情况下,最近电平调制策略在电平数目较少时产生的阶梯波在逼近正弦调制波时会存在较大拟合误差,产生较大的电压谐波分量以及较高的电流畸变率;而载波移相调制在一定程度上能减少谐波含量,但又因其较高的开关频率会增大系统的开关损耗,从而降低系统的功率因数。

为了改善这一问题,文献[5]分析了最近电平调制策略的工作原理,从产生拟合误差的源头入手,通过采集阶梯波与调制波的误差信号,对误差信号进行调制并改进调制算法,通过仿真验证了此方法在电平数目较少时能够有效避免子模块电容电压波动和环流的影响。基于此,文献[8]设计了适用于中低压领域的一种新的 MMC 调制策略,具有较高的协同控制精度以及较好的输出波形质量。

对此,采用一种复合调制策略,在最近电平调

收稿日期:2019-09-22;修回日期:2019-10-25.

\* 基金项目:安徽省自然科学基金项目资助(1908085ME159).

作者简介:李登魁(1995—),男,湖北襄阳人,硕士研究生,从事电力电子技术研究.

制基础上,结合载波调制原理对误差信号二次调制,并改进了传统均压算法。经仿真验证,复合调制下既保证了输出电压波形质量,也降低了系统开关损耗和电流总畸变率,而且改进的均压算法对子模块电容电压波动情况能够有效抑制,提高了 MMC 系统转化效率。

## 1 MMC 拓扑结构及工作原理

图 1 是三相 MMC 的拓扑:SM 子模块采用半桥结构封装,每桥臂的  $N$  个子模块通过电阻、电感对称联通并接入三相电网。 $U_{ao}$ 、 $U_{bo}$  和  $U_{co}$  是各相的相电压,  $U_{dc}$  是输出的直流电压,  $I_{dc}$  是直流侧电流,  $U_{xp}$  和  $U_{xn}$  ( $x=a, b, c$ ) 分别是上、下桥臂在任意时候输入子模块的电压之和,  $I_{xp}$  和  $I_{xn}$  ( $x=a, b, c$ ) 分别是流经上、下桥臂的子模块电流。

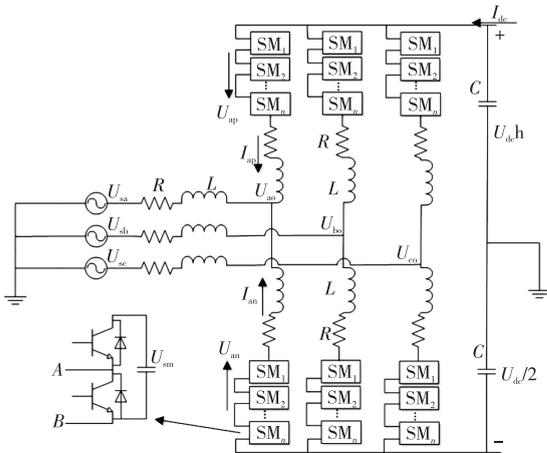


图 1 三相 MMC 拓扑结构

Fig. 1 Three-phase MMC topology

通过分析图 1 子模块结构,可以得出它的几种工作模式,见表 1。

表 1 SM 工作模式

Table 1 SM working mode

$S_1$	$S_2$	电流方向	$U_{sm}$	模式
开	关	A→B	$U_c$	充电
关	开	A→B	0	旁路
开	关	B→A	$U_c$	放电
关	开	B→A	0	旁路

为了保证系统的稳定性, SM 子模块中上下两

组 IGBT 的驱动信号互补,故  $S_1$  和  $S_2$  的开关状态时刻相反,  $U_c$  为子模块并联电容的电压。

在 A 相中,根据 KVL 和 KCL 可得:

$$\begin{cases} U_{ao} = \frac{U_{dc}}{2} - U_{ap} - L \frac{di_{ap}}{dt} \\ U_{ao} = \frac{U_{dc}}{2} + U_{ap} + L \frac{di_{ap}}{dt} \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_{ap} = \frac{i_{dc}}{2} + i_{ao} \\ i_{an} = \frac{i_{dc}}{2} - i_{ao} \end{cases}$$

相电压与上、下臂电压满足:

$$U_{ao} = \frac{U_{an} - U_{ap}}{2}$$

直流母线电压与上、下桥臂电压满足:

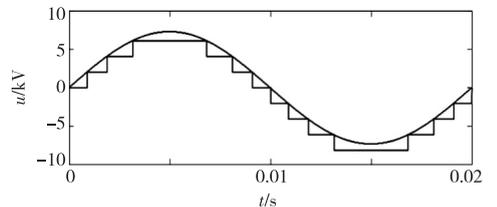
$$U_{dc} = U_{ap} + U_{an} + L \frac{d(i_{ap} + i_{an})}{dt}$$

任何时候,每相输入的 SM 总数为  $N$ ,忽略限流电感上产生的电感电抗,子模块电容电压与直流母线电压满足:

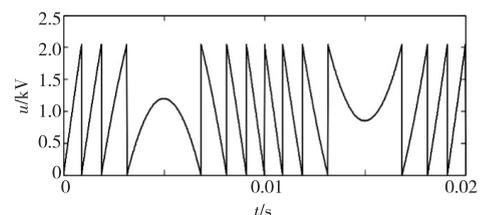
$$U_c = \frac{U_{dc}}{N}$$

## 2 复合调制策略

复合调制汲取 NLM 控制容易、计算简单的优点,又避免了开关频率过高这一困扰载波移相调制的缺点。其原理如图 2 所示。



(a) 阶梯波



(b) 误差信号

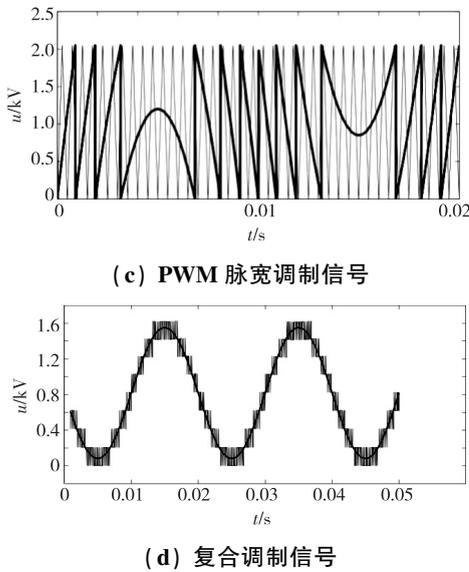


图 2 复合调制控制信号产生过程

Fig. 2 Compound modulation control signal generation process

以 NLM 为基础向下取整,产生一组逼近调制信号的阶梯波,如图 2(a)所示;采集阶梯波与正弦调制信号之间的误差信号,作为阶梯调制信号,如图 2(b)所示;利用载波调制中的面积等效原理将阶梯调制信号与三角载波比较,产生一组 PWM 脉宽调制信号,如图 2(c)所示;最后将 PWM 信号与阶梯波信号叠加,最终形成驱动信号,如图 2(d)所示。

复合调制策略,每时每相中有  $N-1$  个子模块采用阶梯波调制,只有 1 个子模块工作在 PWM 模式。虽然对误差信号进行二次调制,提高了调制精度,但因为采用 PWM 模式,导致整体开关频率相对于 NLM 偏高,因此本文通过改进传统子模块电压排序算法来达到降低开关频率的目的。

### 3 子模块均压控制算法

为了确保在 MMC 系统运行中能够合理地投切满足运行条件的子模块,保证输出电压的质量以及电容电压在充放电周期内的平衡稳定,需要采用均压算法对子模块电容电压加以控制。

#### 3.1 传统的子模块均压控制算法

传统的子模块均压流程如图 3 所示。其算法基于电压排序理论,首先采集每相各桥臂的子模块电容电压值,计算系统需要投切子模块的数量,通过

判断此时桥臂电流方向来决定下一时刻子模块的工作模式,最后投入进行电容电压排序后满足条件的子模块。

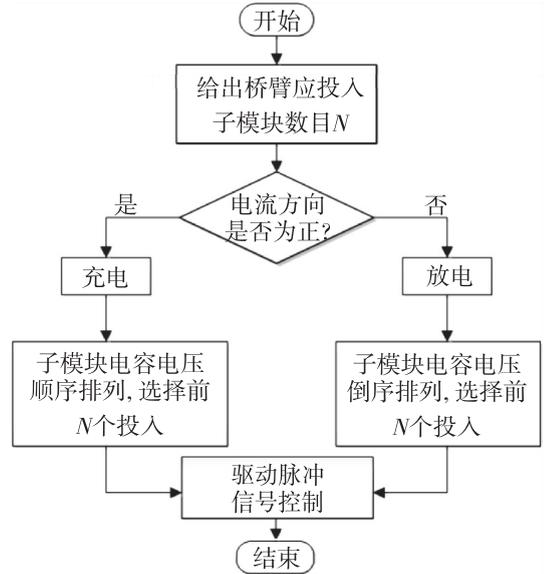


图 3 子模块均压流程图

Fig. 3 Flow chart of sub-module equalization

#### 3.2 改进的子模块均压控制算法

为了解决复合调制下因采用 PWM 模式造成系统整体开关频率相对于 NLM 偏高的问题,需要对传统子模块均压控制算法进行改进,如图 4 所示。

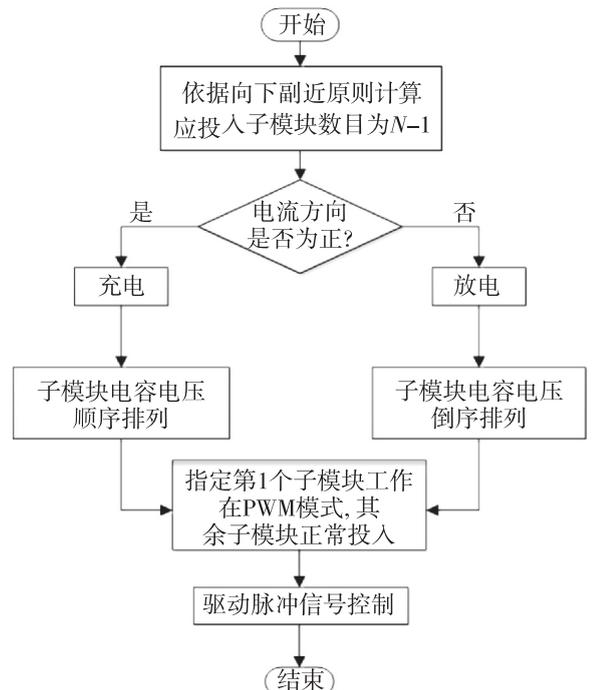


图 4 改进的子模块均压流程图

Fig. 4 An improved submodule balancing flow chart

整个过程与传统算法类似,投切过程如下:第一个子模块工作在 PWM 模式,剩余  $N-1$  个子模块采用阶梯波调制。这样既保证输出电压的质量,也降低了复合调制下的开关频率和系统损耗。

### 4 两种 MMC 调制策略对比分析

在 Simulink 中搭建仿真,对最近电平调制和复合调制这两种策略进行比较分析。

#### 4.1 最近电平调制策略仿真

A 相上桥臂仿真如图 5 所示。图 5 中  $f()$  是未改进的排序算法,  $m$ 、 $U_{ao}$ 、 $U_{dc}$ 、 $U_c$ 、 $i_{ap}$  和  $U_{cap}$  分别是电压调制比、A 相输出相电压、直流侧电压、子模块平均电压、A 相上桥臂电流以及各子模块电容电压采样值。输出电压波形如图 6 所示。

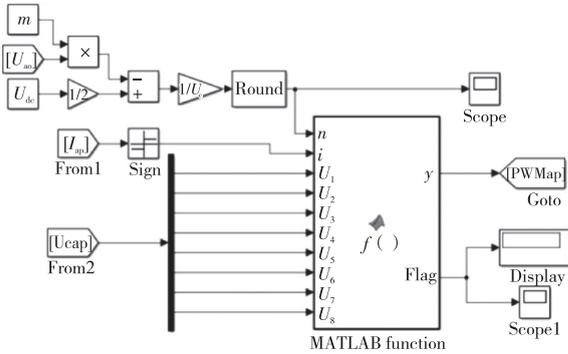


图 5 最近电平调制策略

Fig. 5 Recent level modulation strategy

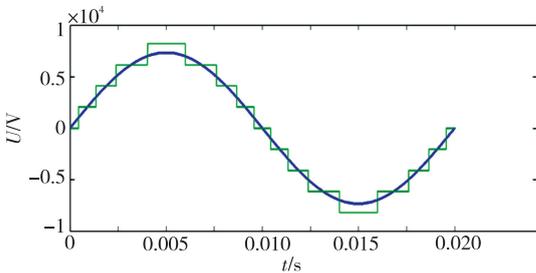


图 6 NLM 调制下输出电压波形图

Fig. 6 Output voltage waveform under NLM modulation

#### 4.2 复合调制策略仿真

复合调制策略的仿真电路如图 7 所示。 $f()$  是改进后的算法,阶梯调制子系统如图 8 所示。输出电压波形如图 9 所示。

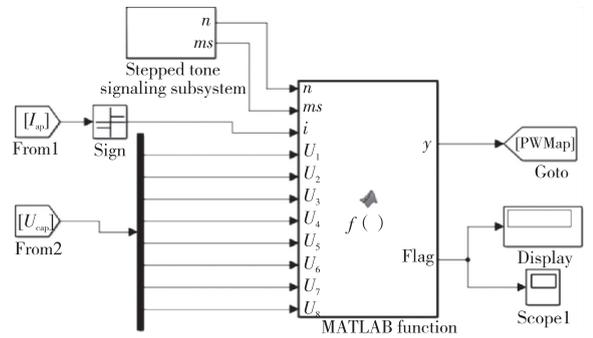


图 7 复合调制策略仿真

Fig. 7 Compound modulation strategy simulation

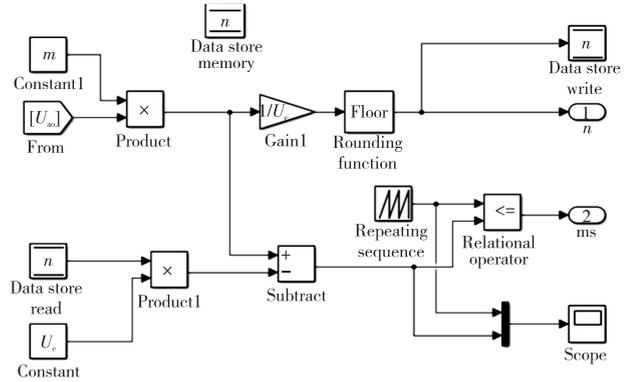


图 8 阶梯调制子系统

Fig. 8 Step modulation subsystem

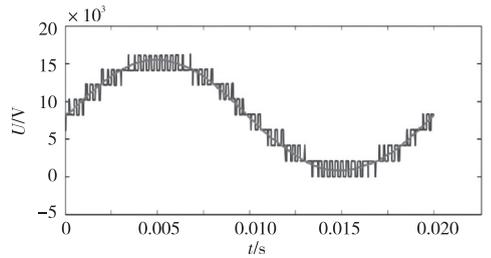


图 9 复合调制下输出电压波形

Fig. 9 Output voltage waveform under compound modulation

图 8 中,用全局变量  $n$  来记录任意时刻需要投入的子模块数目,借此产生阶梯波;将阶梯波与正弦调制信号作差得到阶梯调制信号;并将其与三角载波比较产生一组 PWM 脉宽调制信号;最后将 PWM 信号与阶梯波信号叠加,最终形成驱动信号。

### 5 仿真验证

在 Simulink 仿真平台上对上述两种调制策略进

行仿真验证。

## 5.1 MMC 系统仿真模型搭建

系统仿真电路如图 10 所示,具体参数见表 2。

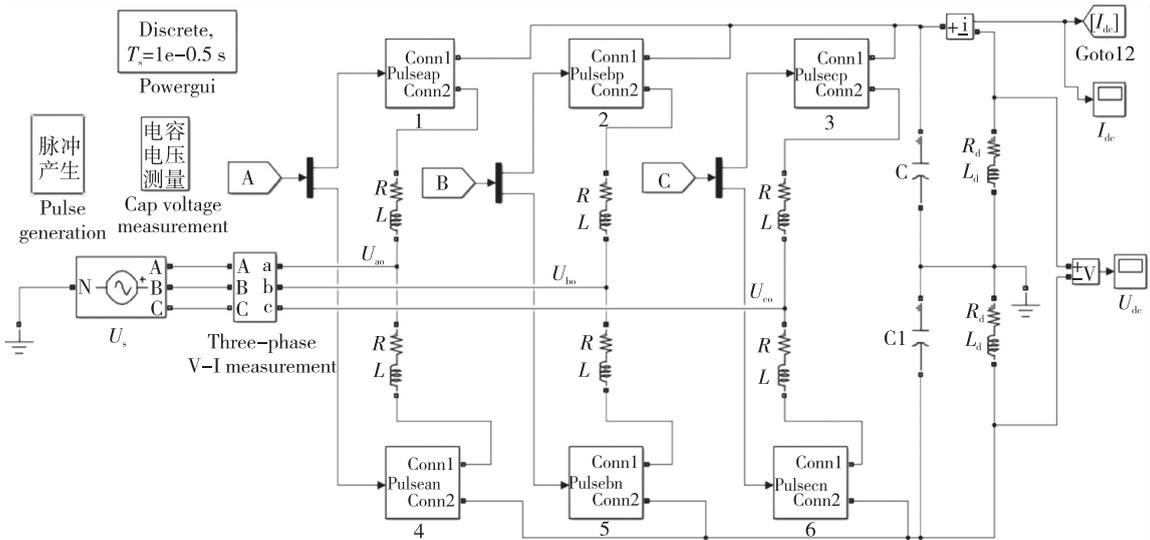


图 10 MMC 仿真电路

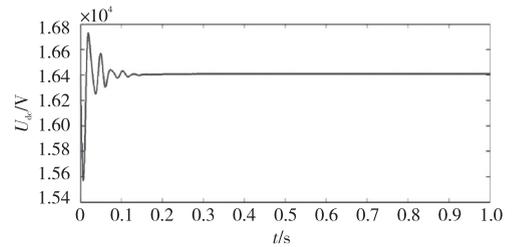
Fig. 10 MMC simulation circuit

表 2 仿真参数

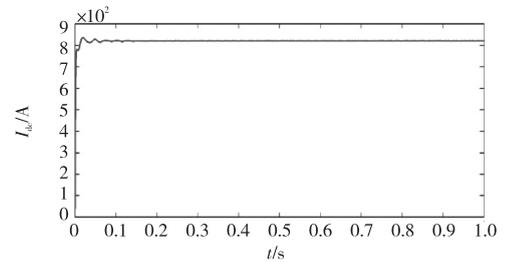
Table 2 Simulation parameters

名称	参数	数值
输出直流电压	$U_{dc}/V$	16 400
子模块电容电压	$U_c/V$	2 050
网侧相电压幅值	$U_s/V$	8 165
交流电压频率	$f_s/Hz$	50
复合调制载波频率	$f_c/Hz$	2 500
SM 的数目	$N$	8
电容	$C/mF$	10
桥臂间电阻	$R/\Omega$	0.5
桥臂间电感	$L/mH$	8
负载电阻	$R_d/\Omega$	10
负载电感	$L_d/mH$	10

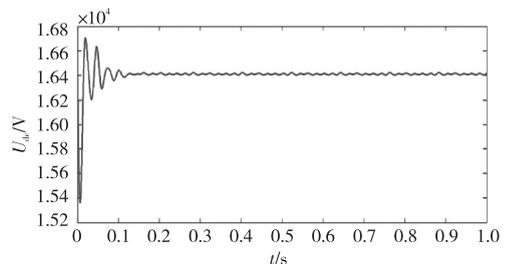
16 410 V 和 822 A。两者均与系统计算值基本一致。



(a) NLM 下 MMC 输出电压



(b) NLM 下 MMC 输出电流

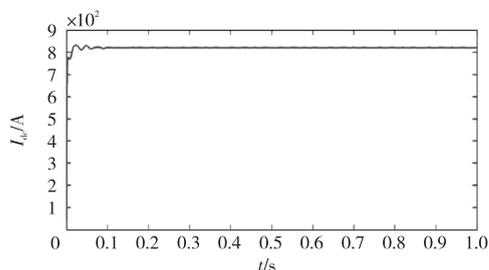


(c) 复合调制下 MMC 输出电压

## 5.2 仿真结果分析

### 5.2.1 输出直流电压及电流波形分析

图 11(a)、图 11(b)是 NLM 的输出电压、电流波形。稳态下电流、电压的直流分量分别为 821.6 A 和 16 412 V;图 11(c)、图 11(d)是复合调制下 MMC 输出电压、电流波形。稳态下电压、电流的直流分量分别为



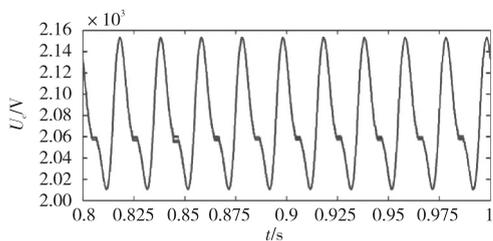
(d) 复合调制下 MMC 输出电流

图 11 MMC 输出侧电压、电流波形

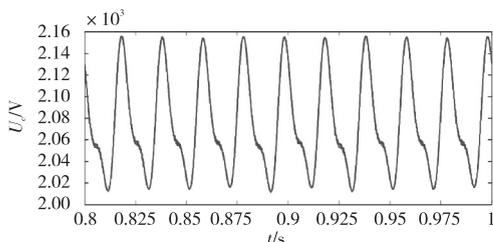
Fig. 11 Voltage and current waveforms of MMC output side

5.2.2 子模块电容电压波动分析

子模块电压波形如图 12 所示。综合分析,稳态下两种调制策略表现都很好,但复合调制策略下的子模块电压波动更小。



(a) NLM 下子模块电容电压波形



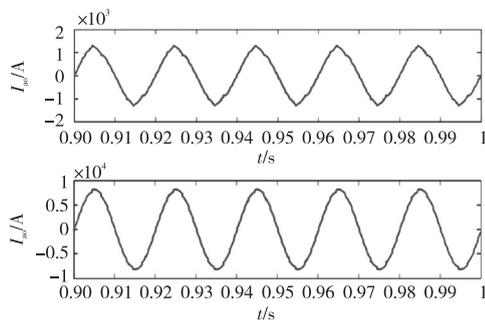
(b) 复合调制下子模块电容电压波形

图 12 两种调制策略下子模块电容电压波动情况

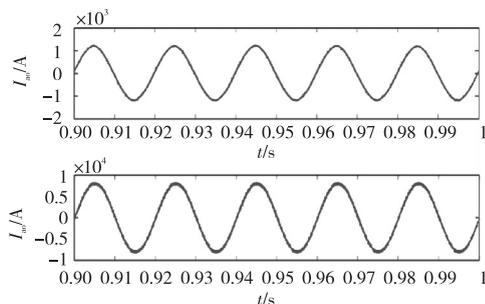
Fig. 12 Capacitor voltage fluctuation of submodule under two modulation strategies

5.2.3 MMC 网侧输入相电压、电流波形分析

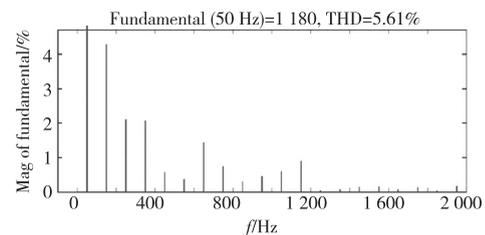
由图 13(a)、图 13(b)可知,最近电平调制策略下相电流的波形失真较严重,复合调制策略下相电压波形基本稳定。傅里叶分析如图 13(c)、图 13(d),最近电平调制下相电流总畸变率为 5.61%;复合调制策略下相电流总畸变率为 1.83%。综合分析,复合调制策略效果更好。



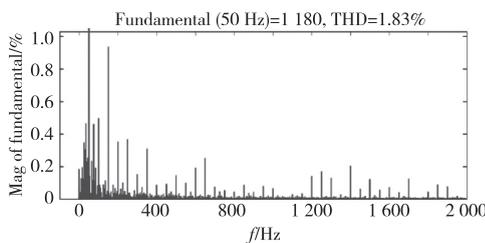
(a) NLM 下 MMC 输入相电压、电流



(b) 复合调制下 MMC 输入相电压、电流



(c) NLM 下 MMC 输入相电流分析



(d) 复合调制下 MMC 输入相电流分析

图 13 MMC 网侧输入电压、电流分析

Fig. 13 Analysis of input voltage and current on MMC network side

5.2.4 系统转化效率分析

系统转化效率指输出有功功率与输入侧视在功率的比值。计算可得:最近电平调制下 MMC 的系统转化效率为 93.2%;复合调制下系统转化效率为 93.3%。

## 6 结束语

复合调制下,MMC 直流侧输出均与额定值基本一致,说明该调制策略有效可行;两种调制策略下的子模块电压波动都相对较小,但在复合调制策略下更加稳定;根据两种调制策略下相电流的谐波总畸变率分析可知,复合调制策略下具有更好的相电流波形和更低的谐波总畸变率;计算可知,复合调制策略下 MMC 系统转化效率相对更高。

综上所述,基于改进均压算法的复合调制策略在中低压 MMC 上相比于 NLM 而言具有更好的控制效果,系统转化效率更高、子模块电压波动更小、输入相电流谐波总畸变率更低。

### 参考文献(References):

- [1] 李邱. 模块化多电平变换器环流抑制和调制策略研究 [D]. 重庆:重庆大学,2016  
LI Q. Research on Circulating Current Suppression and Modulation Strategy of Modular Multilevel Converter [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016 (in Chinese)
- [2] 王楚,宋平岗,李云丰. 模块化多电平变流器的最近电平逼近调制策略[J]. 大功率变流技术,2012(4):20—22,34  
WANG C, SONG P G, LI Y F. Recent Level Approximation Modulation Strategy for Modular Multilevel Converters [J]. High Power Converter Technology, 2012(4):20—22,34(in Chinese)
- [3] 康润生,张锐,位锋威,等. 基于 NLM 策略的模块化多电平换流器研究[J]. 测控技术,2016,35(9):70—74,79  
KANG R S, ZHANG R, WEI F W, et al. Research on Modular Multilevel Converter Based on NLM Strategy [J]. Measurement and Control Technology, 2016, 35(9):70—74,79(in Chinese)
- [4] 肖浩,高桂革,曾宪文,等. 改进的最近电平逼近调制策略在模块化多电平变流器中的应用[J]. 上海电机学院学报,2015,18(2):70—76  
XIAO H, GAO G G, ZENG X W, et al. Application of Improved Recent Level Approximation Modulation Strategy in Modular Multilevel Converters [J]. Journal of Shanghai Institute of Electrical Technology, 2015, 18(2):70—76(in Chinese)
- [5] 王柯岩,江伟,王渝红,等. 一种模块化多电平的改进最近电平调制策略[J]. 科学技术与工程,2017,17(30):63—68  
WANG K Y, JIANG W, WANG Y H, et al. A Modular Multilevel Improvement Recent Level Modulation Strategy [J]. Science and Technology and Engineering, 2017, 17(30):63—68(in Chinese)
- [6] 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):1012—1018  
SONG P G, LI Y F, WANG L N, et al. Circulation Suppression Strategy of Modular Multi-level Converter Based on Improved Step Wave Modulation [J]. Power Grid Technology, 2013, 37(4):1012—1018(in Chinese)
- [7] 何大清. 模块化多电平变流器的混合调制策略[J]. 电气自动化,2015,37(6):14—17  
HE D Q. The Mixed Modulation Strategy for Modular Multilevel Converters [J]. Automation, 2015, 37(6):14—17(in Chinese)
- [8] 杨喆明,付超,王彦旭,等. 一种应用于中压领域的 MMC 混合调制策略[J]. 电力电子技术,2016,50(7):10—11,56  
YANG Z M, FU C, WANG Y X, et al. A Hybrid Modulation Strategy for MMC in the Medium Voltage Field [J]. Power Electronics Technology, 2016, 50(7):10—11,56(in Chinese)
- [9] 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 D Q, CAI X. Amplitude Limiting Control and Hybrid Modulation of Modular Multilevel Converters [J]. Power Automation Equipment, 2012, 32(4):63—66(in Chinese)
- [10] 张天,姜斌,龚雁峰. 一种改进的模块化多电平换流器电压均衡控制策略[J]. 电力建设,2018,39(5):

38—45

ZHANG T, JIANG B, GONG Y F. An Improved Voltage Balancing Control Strategy for Modular Multi-level Converters [J]. Power Construction, 2018, 39 (5) : 38—45 (in Chinese)

[11] 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 F, WANG X T, LIN W X, et al. A Fast Modular

Voltage Balance Control Strategy for Multilevel Converters [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2015, 35 (4) : 929—934 (in Chinese)

[12] 郭家虎,顾先明,李鹏鹏.大功率MMC换流站最近电平调制策略研究[J].电气应用, 2015, 34(3) : 44—47

GUO J H, GU X M, LI P P. Recent Level Modulation Strategy for High Power MMC Converter Station [J]. Electrical Applications, 2015, 34 (3) : 44—47 (in Chinese)

## A MMC Compound Modulation Strategy Based on Improved Voltage Balancing Algorithms

LI Deng-kui, ZHANG Dong

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Anhui Huainan 232001, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the stepped wave generated by the recent level modulation strategy has a large fitting error when approaching the sinusoidal modulation wave when the voltage level is not high and the number of levels is small, a compound modulation strategy is proposed. Firstly, the error between the stepped wave generated by NLM and the modulation signal is collected as the stepped modulation signal. Based on the principle of carrier modulation, a set of PWM pulse width modulation signals is generated by comparing the step modulation signals with triangular carrier signals whose amplitude is equal and phase is shifted sequentially. Finally, the step modulation signals are superimposed on the step modulation signals to form the driving signals. At the same time, the traditional voltage equalization algorithm is improved to reduce the switching frequency of the system. The simulation results of MMC built in Simulink show that the quality of output voltage waveform is guaranteed, the switching loss and total current distortion are reduced, and the improved voltage equalization algorithm can effectively suppress the voltage fluctuation of sub-module capacitors and improve the conversion efficiency of MMC system.

**Key words:** MMC; compound modulation; sub-module voltage equalization control algorithm

责任编辑:罗姗姗

引用本文/Cite this paper:

李登魁,张东.一种改进均压算法的MMC复合调制策略[J].重庆工商大学学报(自然科学版), 2020, 37(5) : 8—15

LI D K, ZHANG D. A MMC Compound Modulation Strategy Based on Improved Voltage Balancing Algorithms [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2020, 37(5) : 8—15