

# 基于自适应准 PR 控制器的 MMC 环流控制策略研究

汪玉凤<sup>1</sup>, 王济东<sup>1</sup>, 佟丽新<sup>2</sup>, 叶青<sup>2</sup>

(1. 辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105;

2. 国网辽宁省电力有限公司阜新供电公司, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:**模块化多电平变流器(MMC)正常运行时偶数次环流的存在,会增加系统损耗,影响系统的安全运行。针对 MMC 桥臂电流中的二倍频环流,提出一种自适应准 PR 控制的方法,并给出相关参数的调整规则;同时对子模块电容电压的扰动进行前馈补偿,以抑制子模块电容电压的扰动所引起的其他偶数次环流。所提出的控制方法无须进行坐标变换和相间解耦,各相只需一个准 PR 控制器就可以同时抑制 MMC 中的偶数次环流,结构简单,且能适应负载的变化。仿真和实验结果验证了该控制策略的可行性。

**关键词:**模块化多电平变流器;环流;桥臂电流;准 PR 控制器

**DOI:** 10.12067/ATEEE1709008

**文章编号:** 1003-3076(2018)12-0024-08

**中图分类号:** TM464

## 1 引言

近些年,模块化多电平变流器(Modular Multi-level Converter, MMC)在高压直流输电、电能质量治理等中高压领域具有显著的竞争优势<sup>[1-4]</sup>。然而 MMC 结构中的三相桥臂并联在公共直流侧,而储能部分分布在不同的模块单元中,稳态运行时每个桥臂的电压不可能相同,各桥臂除了负载电流还存在一定的环流。尽管环流的存在不会影响输出电流,但会使桥臂电流发生畸变,增加整个变流器的功率损耗,严重影响 MMC 的稳定运行<sup>[5-8]</sup>。因此,如何抑制 MMC 中的相间环流是 MMC 开发应用中的一个关键问题。

针对 MMC 的环流问题诸多文献都进行了研究。文献[9,10]采用适当增加桥臂的电抗来抑制环流,这种方法并不能完全消除环流,而且还会增大系统的体积,提高成本,影响系统的稳定。文献[11]对内部环流机理进行了分析,推导出了环流的二次分量的计算公式,为环流的抑制提供了理论依据。文献[12,13]提出采用比例积分控制器对环流进行抑制,但需要将桥臂环流在旋转坐标系下进行分解,工程实现上较为困难。文献[14]提出了

MMC 的桥臂环流中不仅有二倍频环流分量,还有四次、六次等偶数次环流分量。文献[15,16]设计了基于 PR 控制器对环流进行抑制,PR 控制器可以实现对特定次谐波进行抑制,但由于 PR 控制器的局限性,当电网频率波动时对电网的鲁棒性变差,满足不了控制要求。文献[17,18]设计了基于准 PR 控制器对环流进行抑制,虽然准 PR 控制器弥补了 PR 控制器的不足,但是没有考虑其他偶数次环流。

针对 MMC 的环流问题,提出了一种基于自适应准 PR 控制的方法,设计一种对系统稳定性影响较小的参数调整规则。此外,按扰动补偿的复合校正的方案对子模块电容电压扰动进行前馈补偿,抑制二倍频环流的同时对其他偶数次环流进行抑制。

## 2 MMC 的拓扑结构

MMC 的拓扑结构如图 1 所示。可以看出,MMC 一共有六个桥臂,每个桥臂都由  $N$  个子模块(SM)串联一个电感  $L$  组成,同相的上、下两个桥臂构成一个相单元。每个子模块都由两个带有反并联二极管的 IGBT 串联后再与一个直流储能电容并联构成半 H 桥。

**收稿日期:** 2017-09-04

**作者简介:** 汪玉凤(1962-),女,河北籍,教授,主要研究方向为电网电能质量调节与控制;

王济东(1991-),男,河南籍,硕士研究生,从事谐波抑制和无功补偿方面的研究。

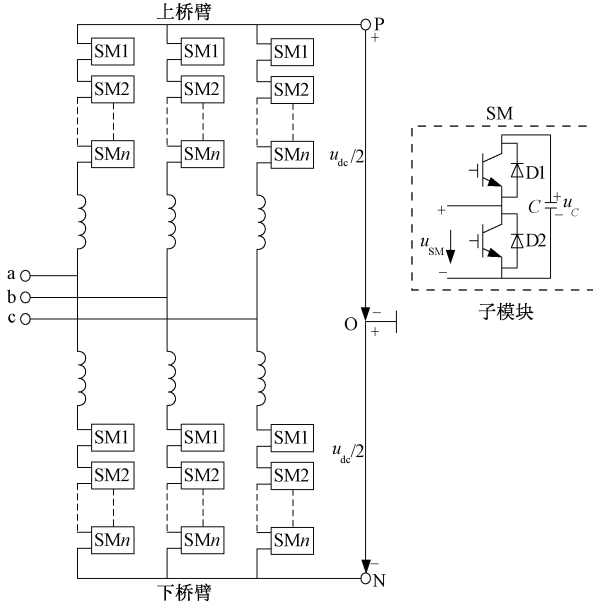


图1 三相 MMC 拓扑结构图

Fig.1 Topology of 3-phase MMC

### 3 MMC 的内部环流分析

图2为 MMC 单相等效电路。上、下桥臂的  $N$  个子模块分别等效为  $u_{kP}$ 、 $u_{kN}$  两个受控电压源,  $R$  为桥臂等效电阻,  $O$  为直流侧等效中性点,  $i_{Zk}$  为  $k$  相的环流。

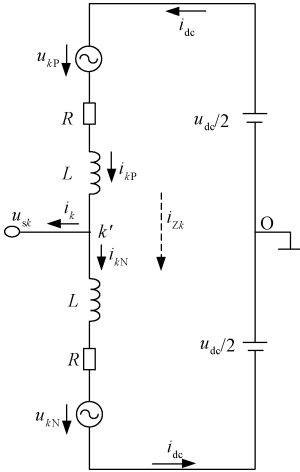


图2 MMC 单相等效电路

Fig.2 Single phase equivalent circuit of MMC

根据基尔霍夫定律可得:

$$\begin{cases} i_{kP} = \frac{1}{2} i_k + i_{Zk} \\ i_{kN} = -\frac{1}{2} i_k + i_{Zk} \end{cases} \quad (1)$$

根据式(1)得:

$$i_{Zk} = \frac{i_{kP} + i_{kN}}{2} \quad (2)$$

MMC 直流侧的公共母线是通过各个桥臂子模块的电容输出有功和无功功率的,其载体是各相的环流  $i_{Zk}$ ,根据能量守恒定律可得:

$$u_{dc} i_{Zk} = \sum_{k=a,b,c} u_{sk} i_k \quad (3)$$

由 A、B、C 三相得:

$$i_{aP} + i_{bP} + i_{cP} = i_{aN} + i_{bN} + i_{cN} = i_{dc} \quad (4)$$

为了简化推导过程假设系统对称,将式(1)代入式(4)可得:

$$i_{Za} + i_{Zb} + i_{Zc} = i_{dc} \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)可得:

$$u_{dc} (i_{Za} + i_{Zb} + i_{Zc}) = \sum_{k=a,b,c} u_{sk} i_k \quad (6)$$

以 A 相为例,假设 A 相电压、电流为:

$$u_{sa} = U_m \sin \omega t \quad (7)$$

$$i_a = I_m \sin(\omega t - \varphi) \quad (8)$$

式中,  $U_m$ 、 $I_m$  分别为输出电压和电流的峰值;  $\omega$  为输出基波角频率;  $\varphi$  为输出的功率因数角。

以 A 相为例,由式(6)可得:

$$u_{dc} i_{Za} = u_{sa} i_a = \frac{U_m I_m}{2} [\cos \varphi + \cos(2\omega t - \varphi)] \quad (9)$$

假设  $u_{dc}$  稳定。定义电压调制比  $F$ ,  $F = 2U_m/u_{dc}$ , 则

$$i_{Za} = \frac{F}{4} I_m [\cos \varphi + \cos(2\omega - \varphi)] \quad (10)$$

根据式(10)可以得出, MMC 各相桥臂的环流由直流分量和二倍频分量组成。其中直流分量是直流侧和交流侧能量交换所引起的,与 MMC 的工作状态有关,当外部的传输功率一定时,没有办法通过控制的手段进行抑制。

以上分析是在假定各相的子模块直流电压恒定的条件下得到的,而在实际的 MMC 桥臂中,环流会与子模块电容电压相互影响。二倍频环流导致子模块三倍频电容电压波动;三倍频的电容电压波动反过来又会引起四倍频环流的产生。以此类推,最终可得到环流中主要包含偶数次环流<sup>[19]</sup>。因此有必要在抑制二倍频环流的同时消除子模块电容电压波动对环流的影响。

### 4 MMC 环流抑制策略

基于第3节的分析可知,桥臂环流可分为自身的二倍频环流和由子模块电容电压扰动所产生的其

他偶数次环流。针对桥臂的二倍频环流,提出一种容易实现的自适应准 PR 控制策略,详细分析控制器中谐振系数对系统的影响,为了能适应负载的变化给出谐振系数的调整规则。同时按扰动补偿的复合控制方法,对子模块电容电压扰动进行前馈补偿以抑制子模块电容电压影响所产生的其他偶数次环流。

#### 4.1 自适应准 PR 控制器设计

相比于 PI 控制器,PR 控制器能够无误差地跟踪特定频率的交流信号,因此可以抑制 MMC 桥臂环流中二倍频环流。但是传统的 PR 控制器稳定性差,而且当电网频率发生波动的情况下,系统的鲁棒性会变差。因此选择控制性能更优的准 PR 控制器,在保持常规 PR 控制器高增益的同时,提高了抗电网频率波动的能力。其传递函数为:

$$G_k(s) = k_p + \frac{2k_R\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (11)$$

式中,  $k_p$  为比例系数;  $k_R$  为谐振系数;  $\omega_c$  为截止频率;  $\omega_0$  为谐振频率。其中  $\omega_c$  影响着系统的带宽和开环增益。设电网频率波动为  $\pm 0.5\text{Hz}$ , 准 PR 控制器的带宽为  $\omega_c/\pi = 1\text{Hz}$ , 则  $\omega_c = 3\text{Hz}$ 。由此根据 MMC 的拓扑结构设计基于自适应准 PR 控制器的 MMC 环流抑制结构,如图 3 所示。

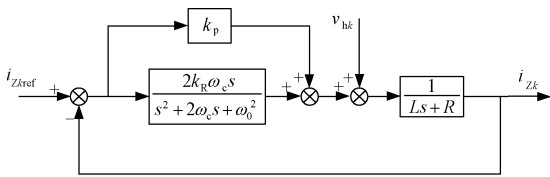


图3 基于准 PR 环流控制器

Fig. 3 Circulation controller based on quasi-PR

图3中,  $L$  和  $R$  为桥臂的等效电抗和电阻,  $v_{hk}$  为桥臂子模块电容电压的扰动干扰。根据图3得出系统开环传递函数为:

$$G(s) = \left( k_p + \frac{2k_R\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \right) \frac{1}{Ls + R} \quad (12)$$

与 PR 控制器不同的是,准 PR 控制在  $\omega_0$  处的增益不再是无穷大,而是有限的,大小为  $k_p + k_R$ , 所以可以通过改变  $k_R$  的值来使系统获得足够大的增益,  $k_R$  的设计对于整个控制器至关重要。图4、图5分别为当  $k_p = 4$  时  $k_R = 60$ 、 $k_R = 200$ 、 $k_R = 400$  对应的开环传递函数的伯德图和根轨迹图。

由图4、图5容易看出,  $k_R$  越大系统对二倍频环流的抑制作用也就越强,但随着  $k_R$  的逐渐增大系统

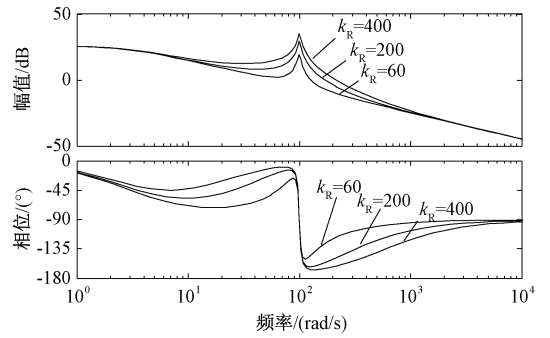


图4 开环传递函数的伯德图

Fig. 4 Bode diagram of open-loop transfer function

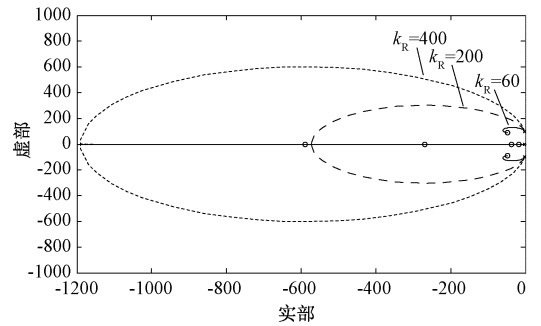


图5 系统根轨迹图

Fig. 5 System root-locus diagram

的闭环极点越接近虚轴,系统的稳定裕度也会随之变小,所以  $k_R$  也不能过大。当 MMC 重载时桥臂电流中的谐波含量较低,因此选取较小的  $k_R$  即可;当系统轻载时桥臂电流中的谐波含量较高,为使环流畸变率不超过规定范围,应选取较大的  $k_R$ 。因此不同功率的负载大小对应不同的  $k_R$ 。在单位功率因数运行的 MMC 中,等效直流侧电流  $i_{dc}$  代表输入功率的大小,因此设定参数调整规则为:

$$k_R = \frac{k_{R0}}{i_{dc}} \quad (13)$$

式中,  $k_{R0}$  为准 PR 控制器谐振基准系数,其值为系统满足控制要求的最小  $k_R$  与  $i_{dc}$  的比值,需要根据不同的情况选择不同的  $k_{R0}$ 。值得注意的是,在实际应用中需要对  $k_R$  进行限幅,一方面因为当  $i_{dc}$  很小时变换器已经接近空载,此时已无必要进行环流抑制,另一方面,此时根据式(13)计算出的  $k_R$  过大,系统可能不稳定。

#### 4.2 环流控制器的前馈补偿

对于 MMC 而言,桥臂环流中除二倍频环流外还有受子模块电容电压影响所产生的其他偶数次环流。为了从源头上抑制其他偶数次环流,本文按扰动补偿的复合控制方法对子模块电容电压的干扰进

行前馈补偿,如图 6 所示。

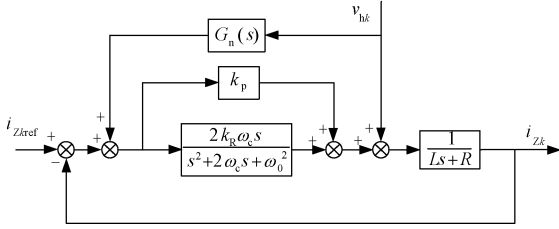


图 6 带前馈补偿的环流控制器

Fig. 6 Circulation controller with feedforward compensation

根据图 6 得出  $v_{hk}$  扰动作用下的输出为:

$$C_n(s) = \frac{G_o(s) [1 + G_{PR}(s) G_n(s)]}{1 + G_{PR}(s) G_o(s)} v_{hk} \quad (14)$$

式中,  $G_o(s) = 1/(Ls + R)$ ;  $G_{PR}(s)$  为准 PR 控制器。

若要消除扰动对输出的影响,则  $C_n(s) = 0$ , 可得:

$$G_n(s) = -\frac{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2}{k_p s^2 + 2(k_p + k_R)\omega_c s + k_p \omega_0^2} \quad (15)$$

则式(15)为桥臂子模块电容电压扰动  $v_{hk}$  的全补偿条件。虽然  $G_n(s)$  在工程上能够实现,但是控制过程较为复杂,因此可以对抗扰动信号进行稳态全补偿,此时取

$$G_n(s) = -\frac{1}{k_p} \quad (16)$$

在稳态时,环流完全不受子模块电容电压的影响。前馈补偿实际上是采用开环系统对抗扰动量进行补偿,因此不会影响控制系统的特性。

## 5 仿真结果

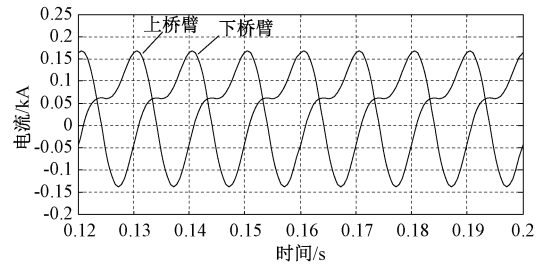
为了验证带前馈补偿的准 PR 控制策略的可行性,在 Matlab/Simulink 平台上搭建三相 MMC 仿真模型,进行仿真验证。准 PR 控制器谐振基准系数  $k_{R0} = 200$ , 谐振系数限幅值  $k_{Rmax} = 1000$ , 比例系数  $k_p = 4$ , 截止频率  $\omega_c = 3\text{Hz}$ , 谐振频率  $\omega_0 = 100\text{Hz}$ 。每个桥臂的子模块数为 4, 其他仿真参数如表 1 所示, 调试方式为载波移相脉宽调制 (Carrier Phase Shifted PWM, CPS-PWM)。

图 7 为没有加环流控制器之前 A 相的波形。从图 7(a) 可以看出, 环流中的高次谐波导致桥臂电流发生畸变, 为非标准的正弦波。从图 7(b) 可以看出, 环流由直流分量和交流分量组成。图 7(c) 通过对环流进行 FFT 分析, 验证了环流中除直流分量外还含有偶数次谐波分量, 尤其是二倍频幅值波动比较大。

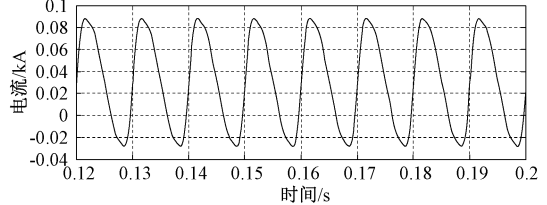
表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

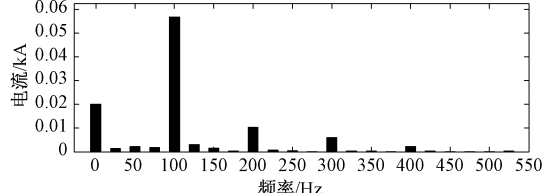
参数	数值
系统电压/V	6000
额定直流电压/V	8000
额定频率/Hz	50
子模块额定电容电压/V	2000
子模块电容/ $\mu\text{F}$	9000
桥臂电感/mH	68
载波频率/kHz	5
调制度	0.9



(a) A相桥臂电流



(b) A相环流

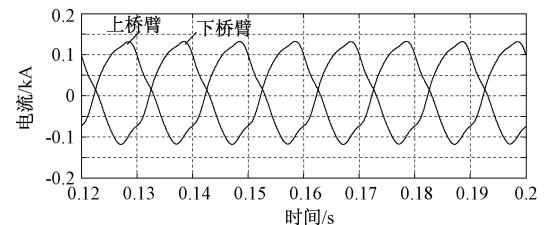


(c) A相环流的FFT分析

图 7 环流抑制前波形

Fig. 7 Waveforms before circulation inhibition

图 8 为加入不带前馈补偿的自适应准 PR 控制器之后 A 相波形。从图 8(a) 中可以看出, 桥臂电流波形得到一定程度的改善。结合图 8(b) 和图 8(c) 可以看出, 桥臂环流中的二倍频分量得到很好的抑制, 但是单个的准 PR 控制器不能对其他偶数次环流进行抑制, 其他偶数次环流依然存在。



(a) A相桥臂电流

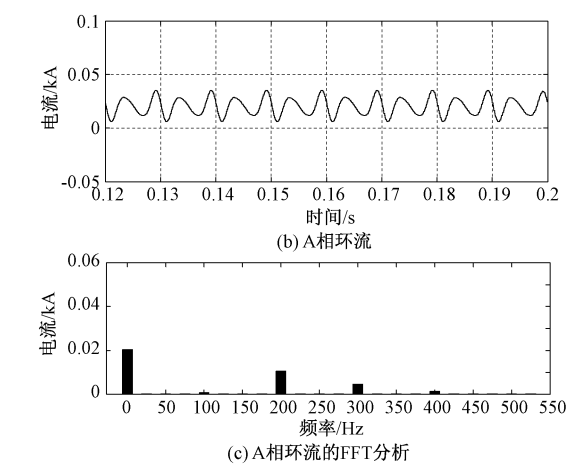


图 8 自适应准 PR 控制的波形  
Fig. 8 Waveforms of adaptive quasi-PR control

图 9 为在图 8 的基础上加入前馈补偿之后 A 相波形。从图 9(a)可以看出,相对于图 8(a),桥臂电流波形得到更好的改善,基本上趋于正弦。从图 9(b)和图 9(c)图可以看出,其他偶数次环流也得到很好的抑制,环流的波动成分很小,基本只含直流分量。由此可以证明所提出的带前馈补偿的自适应准 PR 控制器只需要一个控制器可以同时抑制 MMC 桥臂电流中的各偶数次谐波。

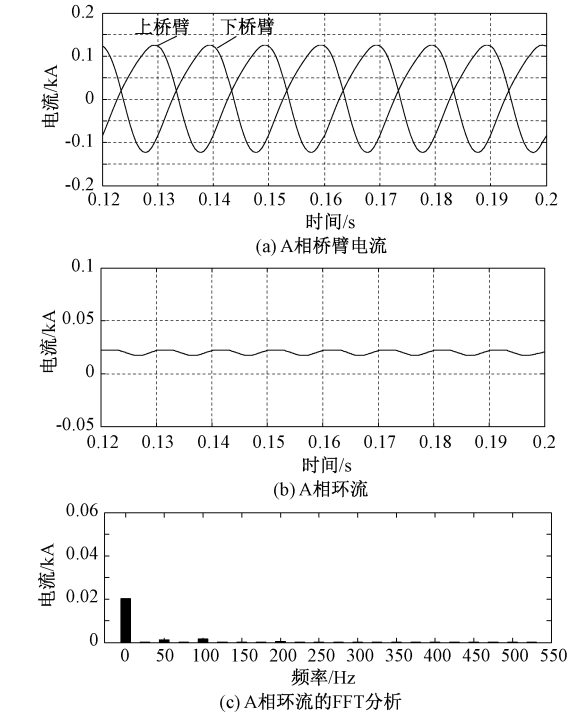


图 9 带前馈补偿的自适应准 PR 控制的波形  
Fig. 9 Waveforms of adaptive quasi-PR control with feedforward compensation

为了进一步验证所提出控制策略的动态稳定性,对交流侧的输出功率的改变进行仿真验证,结果如图 10 所示。从图 10(a)可以看出,MMC 稳定运行后,在负载突然增大和突然减小时,A 相桥臂电流波形经过短暂的波动后很快处于稳定状态,且电流波动不大。从图 10(b)可以看出,在负载发生突变时经过短暂的震荡后,偶数次环流依然得到很好抑制。由此可见,在动态条件下,所提出的的控制策略仍然有很好的抑制效果。

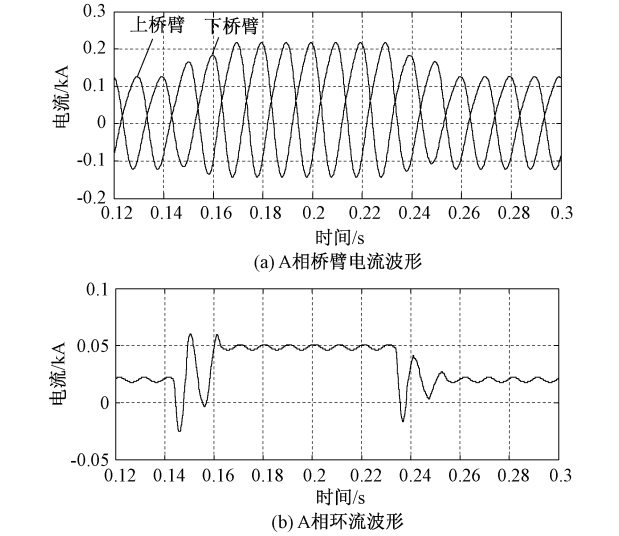


图 10 MMC 功率发生突变时的仿真波形  
Fig. 10 Simulation waveforms of MMC when power changes

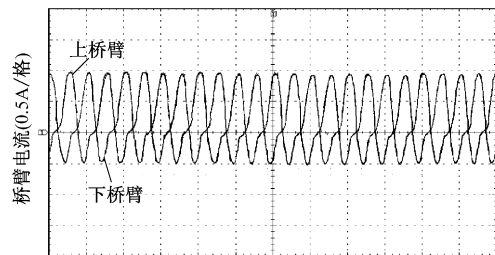
## 6 实验验证

考虑到实验室电压等级与容量的限制,搭建的实验样机的参数如表 2 所示,控制器参数和仿真参数相同。主电路控制核心为数字信号处理器 TMS320F2812,选用型号为 EP2C8Q208C6 的 FPGA 作为 TMS320F2812 与各模块之间的接口。

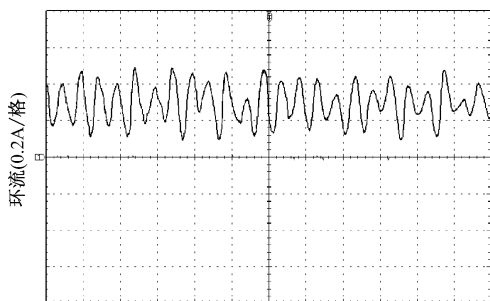
表 2 实验参数

Tab. 2 Experimental parameters	
参数	数值
系统电压/V	100
额定直流电压/V	8000
额定频率/Hz	50
子模块额定电容电压/V	2000
子模块电容/mF	1.88
桥臂电感/mH	5
负载电阻/ $\Omega$	25
负载电感/mH	15
载波频率/kHz	5
调制度	0.9

图 11 为未加环流控制器前 A 相桥臂电流和环流的实验波形,可以明显看出桥臂电流由于含有偶数次环流发生严重的畸变。图 12 为加入环流控制器后的 A 相桥臂电流和环流的实验波形,可以看出桥臂电流得到明显的改善,环流得到了很好的抑制。



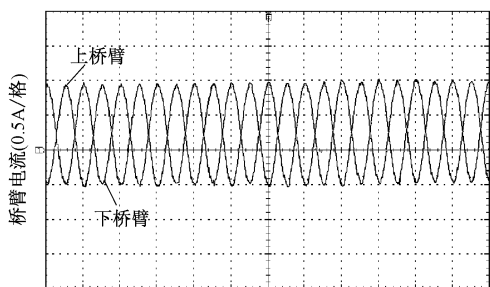
(a) 环流抑制前A相的桥臂电流



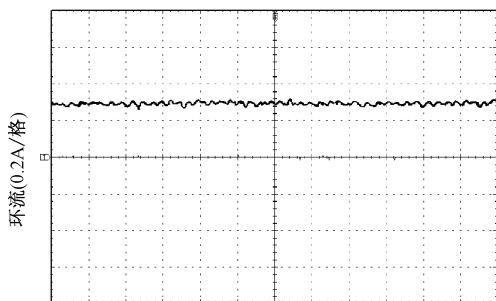
(b) 环流抑制前A相的环流

图 11 环流抑制前实验波形

Fig. 11 Experimental waveforms before circulation inhibition



(a) 环流抑制后A相的桥臂电流



(b) 环流抑制后A相的环流

图 12 环流抑制后实验波形

Fig. 12 Experimental waveforms after circulation inhibition

图 13 为动态条件下 A 相环流的实验波形,可以看出当负载发生突变时环流经过短暂的调整后又能重新回到稳态。实验结果进一步验证了所提的控制策略的可行性。

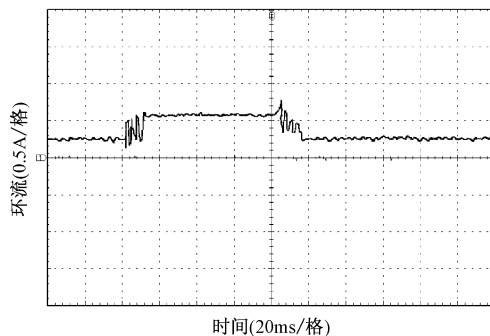


图 13 负载发生突变时环流的实验波形

Fig. 13 Experimental waveform of circulation with abrupt load

## 7 结论

根据 MMC 的拓扑结构,详细分析了其内部环流特性,证明了桥臂中二倍频环流的存在,并说明了子模块电容电压波动会影响环流产生其他偶数次波动。为了抑制 MMC 桥臂环流中的二倍频环流,提出了一种自适应准 PR 控制的方法,并且给出了相关参数的调整规则;同时选择合适的前馈补偿控制器以抑制子模块电容电压的波动所产生的其他偶数次环流。仿真和实验的结果验证了此方案能够有效地抑制桥臂环流的交流部分。该方法只需要一个谐振控制器就能同时抑制全部的偶数次环流,且能适应不同大小的负载,结构简单,在工程中易于实现,有很高的实用价值。

## 参考文献 (References):

- [1] 马文忠,孙迎新,武琳,等 (Ma Wenzhong, Sun Yingxin, Wu Lin, et al.). MMC 子模块电容电压改进控制方法的研究 (Research on improved balance control for sub-module capacitor voltage of modular multilevel converter (MMC)) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (11): 53-58.
- [2] 周廷冬,徐永海 (Zhou Tingdong, Xu Yonghai). 基于 MMC 的配电网电力电子变压器故障特性分析 (Fault characteristic analysis of power electronic transformer based on MMC in distribution network) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (5): 34-41.
- [3] Lives K, Antonopoulos A, Norrga S, et al. Steady-state

- analysis of interaction between harmonic components of arm and line quantities of modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27 (1): 57-68.
- [4] 杨晓峰, 林智钦, 周楚尧, 等 (Yang Xiaofeng, Lin Zhiqin, Zhou Chuyao, et al.). 模块化多电平换流器 MMC 的环流抑制技术综述 (Survey of circulating current suppressing technologies in MMC) [J]. 电源学报 (Journal of Power Supply), 2015, 13 (6): 59-67.
- [5] Hagiwara M, Akagi H, Nishimura K. A medium-voltage motor drive with a modular multilevel PWM inverter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25 (7): 1786-1799.
- [6] 赵聪, 李耀华, 李子欣, 等 (Zhao Cong, Li Yaohua, Li Zixin, et al.). 模块化多电平变流器开环环流抑制策略的渐进稳定性分析 (Asymptotic stability analysis of open-loop circulating current suppression of modular multilevel converter) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (10): 1-8.
- [7] 周月宾, 江道灼, 郭捷, 等 (Zhou Yuebin, Jiang Daozhuo, Guo Jie, et al.). 模块化多电平换流器子模块电容电压波动与内部环流分析 (Analysis of submodule capacitor voltage ripples and circulating currents in modular multilevel converters) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2012, 32 (24): 8-14.
- [8] 梁寰宇, 苏建徽, 秦喆, 等 (Liang Huanyu, Su Jianhui, Qin Zhe, et al.). 基于 MMC 模块化多电平 STATCOM 的环流抑制均压控制策略研究 (Circulating current suppression and capacitance voltage balancing strategy for modular multilevel converter based STATCOM) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2014, 50 (12): 60-65.
- [9] 谢妍, 陈柏超, 陈耀军, 等 (Xie Yan, Chen Baichao, Chen Yaojun, et al.). 新型模块化多电平换流器串联电抗器的功能与取值分析 (Function analysis and parameter selection for series reactor of modular multilevel converter) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2012, 32 (9): 55-59.
- [10] Hagiwara M, Maeda R, Akagi H. Theoretical analysis and control of the modular multilevel cascade converter based on double-star chopper-cells (MMCC-DSCC) [A]. IEEE International Power Electronics Conference [C]. 2010. 2029-2036.
- [11] 屠卿瑞, 徐政, 郑翔, 等 (Tu Qingrui, Xu Zheng, Zheng Xiang, et al.). 模块化多电平换流器型直流输电内部环流机理分析 (Mechanism analysis on the circulating current in modular multilevel converter based HVDC) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2010, 36 (2): 547-552.
- [12] Hagiwara M, Maeda R, Akagi H. Control and analysis of the modular multilevel cascade converter based on double-star chopper-cells (MMCC-DSCC) [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26 (6): 1649-1658.
- [13] 屠卿瑞, 徐政, 管敏渊, 等 (Tu Qingrui, Xu Zheng, Guan Minyuan, et al.). 模块化多电平换流器环流抑制控制器设计 (Design of circulating current suppressing controllers for modular multilevel converter) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2010, 34 (18): 57-61.
- [14] Ilves K, Antonopoulos A, Norrga S, et al. Steady-state analysis of interaction between harmonic components of arm and line quantities of modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27 (1): 57-68.
- [15] 张建坡, 赵成勇 (Zhang Jianpo, Zhao Chengyong). 模块化多电平换流器环流及抑制策略研究 (Research on circulation current and suppressing strategy of modular multilevel converter) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (10): 328-336.
- [16] 苑宾, 许建中, 赵成勇, 等 (Yuan Bin, Xu Jianzhong, Zhao Chengyong, et al.). 模块化多电平换流器 PR 环流抑制器优化设计 (Optimal design of PR circulating current suppressing controllers for modular multilevel converters) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2015, 35 (10): 2567-2575.
- [17] 班明飞, 申科, 王建曌, 等 (Ban Mingfei, Shen Ke, Wang Jianze, et al.). 基于准比例谐振控制的 MMC 新型环流抑制器 (A novel circulating current suppressor for modular multilevel converters based on quasi-proportional-resonant control) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2014, 38 (11): 85-89, 129.
- [18] 白建成, 王华锋, 林志光, 等 (Bai Jiancheng, Wang Huafeng, Lin Zhiguang, et al.). 基于 PR 调节器的 MMC-HVDC 内部环流抑制策略研究 (Research on inner circulating current suppressing strategy of MMC-HVDC based on PR regulator) [J]. 智能电网 (Smart Grid), 2015, 3 (6): 570-575.
- [19] 牛得存, 孙中尉, 李楠, 等 (Niu Decun, Sun Zhongwei, Li Nan, et al.). 基于准 PR 控制器的 MMC-HVDC 新型环流抑制策略研究 (Study on MMC-HVDC new type loop current control strategy based on quasi-PR controller) [J]. 电力电容器与无功补偿 (Power Capacitor & Reactive Power Compensation), 2016, 37 (4): 87-94.

# Research on MMC circulation control strategy based on adaptive quasi-PR controller

WANG Yu-feng<sup>1</sup>, WANG Ji-dong<sup>1</sup>, TONG Li-xin<sup>2</sup>, YE Qing<sup>2</sup>

(1. Faculty of Electrical and Engineering Control, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;

2. Fuxin Power Supply Company of Liaoning Electric Power Co. Ltd., Fuxin 123000, China)

**Abstract:** Modular multi-level converter (MMC) in the normal operation of the occasional circulation will increase the system loss and affects the safe operation of the system. In this paper, an adaptive quasi-PR control method is proposed for the doubling loop in the current of MMC bridge arm, and the adjustment rules of relevant parameters are given. At the same time, the sub-module capacitance voltage of the disturbance is feed forward compensated to suppress other even circulation current caused by sub-module capacitor voltage. The control method proposed in this paper does not need coordinate transformation and phase decoupling. Each phase requires only one quasi-PR controller to suppress the even circulation in MMC, and it can adapte the change of load. The simulation and experimental results verify the feasibility of the control strategy.

**Key words:** modular multilevel converter; circulation; bridge arm current; quasi-PR controller