

DOI: 10.7500/AEPS20140319011

模块化多电平换流器桥臂电流分析及其环流抑制方法

李国庆¹, 辛业春^{1,2}, 吴学光³

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林省吉林市 132012; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 102206;
3. 国网智能电网研究院, 北京市 102211)

摘要: 为了抑制模块化多电平换流器(MMC)内部环流,对 MMC 桥臂电压的波动和环流产生的机理进行了分析,提出了一种抑制环流的补偿控制方法。MMC 在进行功率交换时,由于桥臂电流的作用,导致子模块电容电压发生周期性的变化,采用平均值的方法分析得出子模块电容电压包含直流分量和交流分量。采用最近电平调制法进行换流器电压调制,由于子模块电容电压含有直流分量以及基频分量偏差,导致桥臂电压与期望值间存在基频偏差和二倍频等分量,从而产生环流。通过对桥臂电压与期望值的偏差量进行补偿,能够消除桥臂电压的偏差,从而抑制换流器桥臂间的环流。在 PSCAD/EMTDC 中搭建了 11 电平 MMC 双端直流输电系统,仿真结果验证了所提方法的有效性。

关键词: 柔性直流输电; 变流器; 电压偏差; 环流抑制; 谐波

0 引言

电压源换流器在高电压、大功率变流器和直流输电等电力变换系统中得到快速发展^[1-2]。模块化多电平换流器(MMC)^[3]具有开关频率低、输出电压谐波小、可以级联到较高电压等级、方便模块化结构设计等优点,是最具潜力的电压源换流器,也是目前国内外学者和设备制造商研究的热点。

目前,对 MMC 相关技术的研究主要包括数学模型、元件参数选择、调制策略、运行控制和桥臂环流抑制等方面^[2-25]。MMC 桥臂环流的存在,增加了元件的峰值电流,同时增大了子模块电容电压波动,增加了换流器损耗,对换流器安全经济运行产生了不利影响;消除换流器环流,是提高换流器性能的关键技术之一,国内外研究机构对其进行了大量研究^[4-14],目前采取的环流控制方法可以分为两大类:①通过桥臂电抗器将桥臂间的环流限制在一定水平内^[4-5];②通过附加的环流控制器^[8-14],抑制环流的产生。采用附加控制器,能够在不增加硬件设备的情况下,消除换流器环流,减小子模块电容电压波动,是一种经济有效的方法。

文献[8]通过瞬时能量平衡关系,忽略环流引起的桥臂高次谐波电压以及相应产生的高次谐波电流,对 MMC 内部环流产生机理进行了分析,指出其

为负序的二倍频电流;文献[9]在文献[8]分析的环流产生机理基础上,设计了 MMC 环流抑制控制器,该控制器对二倍频环流采取解耦控制,能够较好地抑制二倍频环流分量,但忽略了其他环流分量。文献[10]通过对 MMC 桥臂电压和电流的交互影响分析,研究了桥臂电流的成分,指出如果不进行环流控制,将在桥臂电流中产生谐波分量。文献[11]提出了三相解耦二次谐波环流抑制算法,采用最近电平调制(NLC)方式,通过交直流侧功率平衡关系计算出电容电压参考值,降低电容电压的不平衡度和抑制环流;但求取桥臂电容器组能量时需要交直流侧电流和相位等参数,精度和可靠性难以保证。文献[12]提出了一种模块数可变动选择的改进阶梯波调制 MMC 环流抑制策略,通过改变桥臂投入的子模块数量,让上、下桥臂投入电压的总和维持在 MMC 直流电压附近;但每相桥臂投入的子模块总数变化增加了系统控制的复杂程度。文献[13]提出了一种以 MMC 分桥臂电流为控制目标的控制策略,用以抑制桥臂间的环流。文献[14]提出了一种基于比例-积分-谐振(PIR)控制的 MMC 新型环流控制器。

本文提出了一种对 MMC 桥臂电压期望值进行补偿的抑制环流控制方法。首先对 MMC 桥臂电压和桥臂电流的关系进行了分析,得出 MMC 在进行功率变换时,桥臂电流与子模块电压相互作用的关系;然后分析采用 NLC 策略,子模块电压周期性变化对调制出的桥臂电压产生的影响及产生环流的原

收稿日期: 2014-03-19; 修回日期: 2014-08-18。

国家自然科学基金资助项目(51377016); 国家电网公司“千人计划”专项支持项目(国家电网科[2013]1111 号文)。

因;最后通过对桥臂电压期望值进行补偿,消除桥臂电压与期望值之间的偏差,从而抑制 MMC 桥臂间的环流。在 PSCAD/EMTDC 中搭建了 11 电平 MMC 双端直流输电系统,仿真结果验证了该方法的有效性。

1 MMC 拓扑结构及数学模型

MMC 主电路及子模块拓扑结构如图 1 所示。图中: U_{dc} 和 I_{dc} 分别为换流器直流侧电压和电流; i_{Pi} 和 i_{Ni} ($i=a,b,c$,下同)分别为换流器各相上、下桥臂电流; i_{si} 为换流器交流侧三相电流; u_{si} 为换流器交流侧三相电压; u_{SM} 和 i_{SM} 分别为子模块电压和电流; u_c 和 i_c 分别为子模块电容电压和电流; C 为子模块电容; l 为桥臂电抗器的电感。

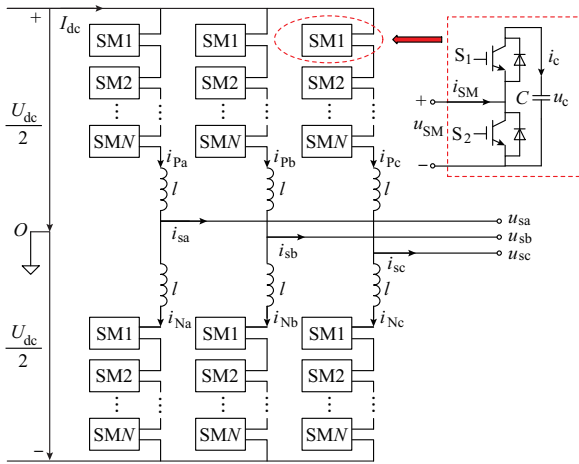


图 1 MMC 主电路及子模块拓扑结构图
Fig.1 Main circuit of MMC and topology structure of submodule

MMC 交流侧电压 u_{si} 、桥臂输出电压 u_{Pi} 和 u_{Ni} 、直流侧电压 U_{dc} ,以及换流器三相上、下桥臂电流 i_{Pi} 和 i_{Ni} 有如下关系:

$$\begin{cases} u_{si} = -l \frac{di_{Pi}}{dt} - u_{Pi} + \frac{1}{2}U_{dc} \\ u_{si} = l \frac{di_{Ni}}{dt} + u_{Ni} - \frac{1}{2}U_{dc} \end{cases} \quad (1)$$

稳态运行时,理想情况下认为上、下桥臂的电容电压总和与直流电压 U_{dc} 相等,在任意时刻,投入的上、下桥臂子模块电容电压总和与换流器直流电压相等,上、下桥臂各自的电压为:

$$\begin{cases} u_{Pi} = \frac{1}{2}(1 - m \cos(\omega t + \varphi_i))U_{dc} \\ u_{Ni} = \frac{1}{2}(1 + m \cos(\omega t + \varphi_i))U_{dc} \end{cases} \quad (2)$$

式中: ω 为电网角频率; φ_i 为三相电压初相角; m 为电压调制度,其值为换流器交流侧相电压峰值 U_m

与 $U_{dc}/2$ 的比。

上、下桥臂的电流包括与交流侧进行功率交换的电流、与直流侧进行功率交换的电流和桥臂间的环流,桥臂电流可表示为:

$$\begin{cases} i_{Pi} = \frac{1}{2}i_{si} + i_{cir,i} + i_{dc,i} \\ i_{Ni} = -\frac{1}{2}i_{si} + i_{cir,i} + i_{dc,i} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $i_{cir,i}$ 为桥臂间的环流; $i_{dc,i}$ 为与直流侧功率交换的电流。

2 基于平均值的 MMC 桥臂电压和电流分析

为了简化问题分析,先假定换流器桥臂间没有环流,三相参数相同,且换流器三相传输的功率相同。式(3)对应的换流器上、下桥臂电流可以表示为:

$$\begin{cases} i_{Pi} = \frac{1}{2}I_{sm} \cos(\omega t + \varphi_i) + \frac{1}{3}I_{dc} \\ i_{Ni} = -\frac{1}{2}I_{sm} \cos(\omega t + \varphi_i) + \frac{1}{3}I_{dc} \end{cases} \quad (4)$$

式中: I_{sm} 为交流侧相电流最大值。

调制出式(2)对应的 MMC 桥臂电压,每个桥臂需要投入的子模块数量是实时变化的,处于投入状态的子模块电容电流与桥臂电流相同,处于切出状态的子模块电容电流为 0。

考虑采取子模块电容电压平衡控制^[16-21],各桥臂子模块电容电压差值控制在一定允许范围内,如果忽略子模块电容电压差,认为桥臂各子模块电容电压相等。以 A 相上桥臂为例采用平均值的方法对子模块电容电流进行分析,在 t 起始时刻的时间间隔 Δt 内,该桥臂投入的子模块数量为 $(1 - m \cos(\omega t + \varphi_a))/2$,投入状态的子模块电容电流为 i_{Pa} ;考虑子模块电容电压平衡,可认为所有子模块投入的时间均等,则该桥臂任一子模块在时间间隔 Δt 内处于投入状态的时间为 $(1 - m \cos(\omega t + \varphi_a))\Delta t/2$,子模块电容的电荷变化为 $(1 - m \cos(\omega t + \varphi_a))i_{Pa}\Delta t/2$,其效果与该子模块处于投入状态时间为 Δt ,流过子模块电容的电流为 $(1 - m \cos(\omega t + \varphi_a))i_{Pa}/2$ 相同,所以在该时段 A 相上桥臂子模块等效电容电流为 $(1 - m \cos(\omega t + \varphi_a))i_{Pa}/2$ 。其他各桥臂情况与 A 相上桥臂相同,各相上、下桥臂子模块电容等效电流 i_{Pci} 和 i_{Nci} 为:

$$\begin{cases} i_{Pci} = \frac{1}{2}(1 - m \cos(\omega t + \varphi_i))i_{Pi} \\ i_{Nci} = \frac{1}{2}(1 + m \cos(\omega t + \varphi_i))i_{Ni} \end{cases} \quad (5)$$

上、下桥臂子模块电容电压为：

$$\begin{cases} u_{Pci} = \frac{1}{2C} \int (1 - m \cos(\omega t + \varphi_i)) i_{Pi} dt \\ u_{Nci} = \frac{1}{2C} \int (1 + m \cos(\omega t + \varphi_i)) i_{Ni} dt \end{cases} \quad (6)$$

稳态情况下, MMC 上、下桥臂子模块电容电压总和是电容电压初始值 u_{Pi0} 和 u_{Ni0} 加上流过电容的电流产生的电压值, 其表达式为:

$$\begin{cases} u_{Pai} = u_{Pi0} + N \frac{1}{2C} \int (1 - m \cos(\omega t + \varphi_i)) i_{Pi} dt \\ u_{Nai} = u_{Ni0} + N \frac{1}{2C} \int (1 + m \cos(\omega t + \varphi_i)) i_{Ni} dt \end{cases} \quad (7)$$

为了保持系统稳定运行, 在一个周期 T 内, MMC 桥臂电流在子模块电容上产生的电压累积为零, 即式(7)等式右侧第 2 项在一个周期内的积分为零, $u_{Pi0} = U_{dc}$, $u_{Ni0} = U_{dc}$ 。由式(7)可以看出, 子模块电容电压存在直流分量和交流分量, 子模块电容电压与直流电压 U_{dc} 存在偏差。以实际的桥臂电压 u_{Pai} 代替式(2)中的电压 U_{dc} , 式(2)对应的调制出来的桥臂电压为:

$$\begin{cases} u_{Pi} = \frac{1}{2} (1 - m \cos(\omega t + \varphi_i)) u_{Pai} \\ u_{Ni} = \frac{1}{2} (1 + m \cos(\omega t + \varphi_i)) u_{Nai} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)调制出来的桥臂电压与式(2)期望的电压值之间存在偏差, 导致各桥臂电压存在差值, 进而产生换流器桥臂间环流。

实际的桥臂电压、电流含有各次谐波分量, 各谐波分量的大小受换流器传输功率、子模块电容和桥臂电感的影响, 其表达式为:

$$\begin{cases} u_{Pi} = U_{Pi0} + \sum_{n=1}^{\infty} U_{Pin} \cos(n\omega t + \varphi_{Pin}') \\ u_{Ni} = U_{Ni0} + \sum_{n=1}^{\infty} U_{Nin} \cos(n\omega t + \varphi_{Nin}') \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} i_{Pi} = \sum_{n=0}^{\infty} I_{Pin} \cos(n\omega t + \varphi_{Pin}) \\ i_{Ni} = \sum_{n=0}^{\infty} I_{Nin} \cos(n\omega t + \varphi_{Nin}) \end{cases} \quad (10)$$

式中: U_{Pi0} 和 U_{Ni0} 分别为上、下桥臂电压的直流分量; U_{Pin} 和 U_{Nin} 分别为上、下桥臂电压的各次谐波分量; φ_{Pin}' 和 φ_{Nin}' 分别为上、下桥臂各次谐波电压初相角; I_{Pin} 和 I_{Nin} 分别为上、下桥臂电流的各次谐波分量; φ_{Pin} 和 φ_{Nin} 分别为上、下桥臂各次谐波电流初相角。

3 MMC 环流抑制方法

3.1 MMC 调制方式

NLC 具有运算量小、逆变器输出侧谐波含量低等优点, 是多电平换流器控制的一种较理想的调制方法, 本文采用该调制方法。

传统 NLC 方式的处理过程如图 2 所示。将控制器得到的桥臂参考电压 u_{ref} 除以单个子模块电容电压额定值 u_c , 然后取整作为最终投入的子模块个数 N_{ref} 。换流器控制层根据 NLC 方法得到各桥臂应投入的子模块数指令值 N_{ref} 后, 将其发送给阀基控制层, 阀基控制层根据检测到的各子模块电容电压和桥臂电流值, 采用文献[26]中子模块电压均衡控制算法, 最终选择合适的 N_{ref} 个子模块投入。



图 2 NLC 方式
Fig.2 NLC method

3.2 环流抑制补偿控制

根据第 2 节分析可知, 在不增加附加控制的情况下, 因 MMC 桥臂子模块电容电压与设定值间存在直流偏差和交流偏差, 使得调制出的桥臂电压含有各次谐波成分, 从而导致桥臂间环流。为了抑制桥臂环流, 需要采取补偿控制, 在桥臂子模块电容电压与设定值存在偏差的情况下, 使调制出的桥臂电压等于期望的基波正弦电压, 这样就可以消除换流器桥臂间的环流。

基于上述目标, 设计了 MMC 换流器控制策略。换流器控制方式采用内外环控制, 在阀基控制的子模块电容投切控制前增加补偿控制, 补偿控制通过计算期望的桥臂电压值与实际的桥臂电压值之间的差, 给出桥臂参考电压修正量, 从而消除桥臂电压与期望值之间的偏差, 使得桥臂输出的电压为基波正弦量。总体控制系统结构图如图 3 所示, 在控制器设计中, 为了便于统一的参数设计, 各变量采用以额定值为基准进行标度变换的值。

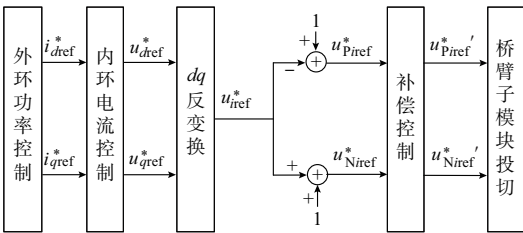


图 3 含环流抑制补偿控制的 MMC 总体控制系统结构图

Fig.3 Block diagram of MMC overall control system with circulating current suppressing control

图中: i_{dref}^* 和 i_{qref}^* 分别为采用定功率控制或定直流电压控制下外环功率控制器的 d 轴、 q 轴电流输出量参考值; u_{iref}^* 为内环电流控制器输出量 u_{dref}^* 和 u_{qref}^* 经坐标变换后的三相交流侧电压期望值; u_{piref}^* 和 u_{niref}^* 分别为换流器各相上、下桥臂电压期望值; $u_{piref}^{*'}$ 和 $u_{niref}^{*'}$ 分别为换流器各相上、下桥臂电压经补偿控制后的参考值。

内环电流控制采取电流解耦控制,电流解耦控制系统结构图如图 4 所示。图中, L 为换流器桥臂电抗和等效阻抗之和。

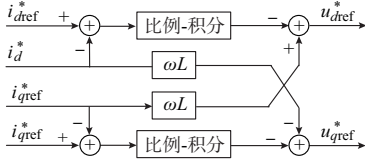


图 4 内环电流解耦控制

Fig.4 Inner ring current decoupling control

补偿控制单元结构图如图 5 所示。

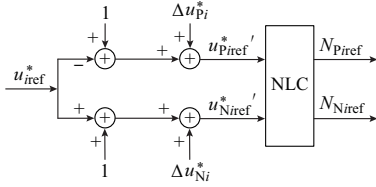


图 5 补偿控制及子模块投切

Fig.5 Compensation control and pulse modulation

图 5 中, Δu_{pi}^* 和 Δu_{Ni}^* 分别为上、下桥臂电压控制补偿量经过标度变换的值(以额定直流电压 U_{dc} 为基准值),由当前桥臂电压的大小和桥臂电压期望值决定,分别为:

$$\begin{cases} \Delta u_{pi}^* = \frac{u_{piref}^* U_{dc} - u_{pi}}{U_{dc}} \\ \Delta u_{Ni}^* = \frac{u_{niref}^* U_{dc} - u_{Ni}}{U_{dc}} \end{cases} \quad (11)$$

4 仿真分析

为验证本文所提方法的有效性,本文利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建了 11 电平 MMC 直流输电系统,两侧换流站结构相同,如图 1 所示,一端换流站采取定直流电压控制,另一端换流站采取定功率控制,在额定容量下运行。仿真系统主要参数如下:系统容量为 7.5 MVA;交流侧系统电压 U_s 为 10 kV;直流侧电压 U_{dc} 为 18 kV;系统频率为 50 Hz;桥臂电抗为 14 mH;子模块电容值为 5 600 μ F。

仿真时,控制系统首先按传统的外环功率控制、内环电流控制,采用 NLC 方式进行调制;在 8 s 时启动环流补偿控制器,所得到的仿真结果如图 6 所示。由图 6(a)可以看出,环流补偿控制器启动后,交流侧电流波形有一定改善,这是由于两个方面的原因引起的,一方面是环流补偿控制启动后,子模块电容电压波动减小,另一方面是该控制等效于在 NLC 的基础上,在每级电平的基础上又增加了脉宽调制调节。

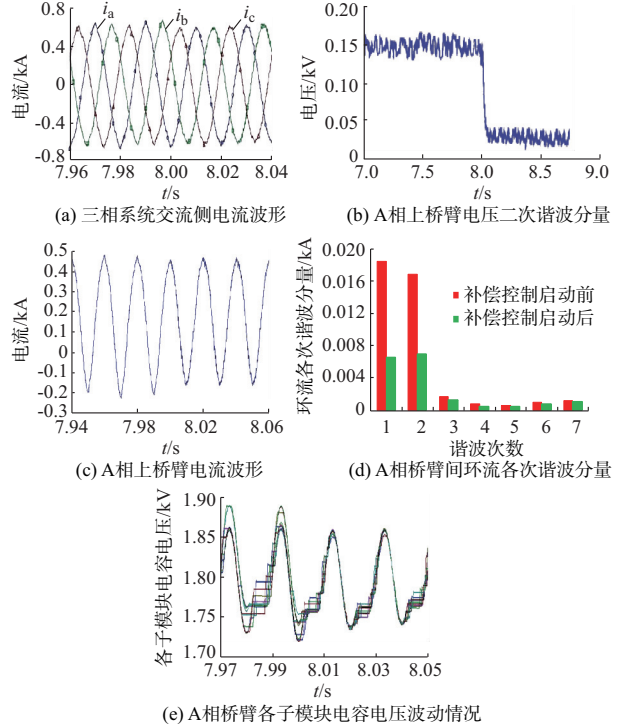


图 6 仿真结果

Fig.6 Simulation results

在补偿控制器启动之前,桥臂电压中含有各次谐波成分,其中二次谐波电压所占比重最大,占到总电压的 2.84%;从图 6(b)可以看出,补偿控制后二次谐波得到抑制,谐波分量减少为总电压的 0.355%。从图 6(c)可以看出,补偿控制器启动之前,由于桥臂中谐波电压的存在,导致桥臂电流中含有谐波分量,电流波形发生畸变。补偿控制器启动后,桥臂中谐波电压被消除,上下桥臂基频电压分量不一致被消除,桥臂电流中的谐波分量减少,桥臂电流波形得到改善。由图 6(d)可以看出,补偿控制器启动前,桥臂中存在较大的环流,其中基频分量和二倍频分量占主要成分;补偿控制器启动后,环流得到明显抑制。由图 6(e)可以看出,补偿控制器启动后子模块电容电压波动明显减少,这将有利于子模块电容的选取。

5 结语

本文提出了一种抑制 MMC 桥臂间环流的补偿控制方法。采用平均值方法对 MMC 桥臂电压、电流进行分析可知,桥臂电压和电流交互影响,在采用传统 NLC 的 MMC 系统中,桥臂电压和电流中含有谐波分量。由于子模块电容电压包含直流分量和交流分量,调制出来的桥臂电压与期望值之间存在偏差,从而产生环流,其中基频和二倍频偏差占主要成分;采用功率外环和电流内环的 MMC 控制系统,在阀基控制的子模块电容投切控制前增加对桥臂电压与期望值偏差量进行补偿,能够消除桥臂电压的偏差,从而消除换流器桥臂间环流,提高换流器性能。仿真结果验证了所提方法的有效性。

参考文献

- [1] 丁冠军,丁明,汤广福,等.新型多电平 VSC 子模块电容参数与均压策略[J].中国电机工程学报,2009,29(30):1-6.
DING Guanjun, DING Ming, TANG Guangfu, et al. Submodule capacitance parameter and voltage balancing scheme of a new multilevel VSC modular[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 1-6.
- [2] 管敏渊,徐政,MMC 型 VSC-HVDC 系统电容电压的优化平衡控制[J].中国电机工程学报,2011,31(12):9-14.
GUAN Minyuan, XU Zheng. Optimized capacitor voltage balancing control for modular multilevel converter based VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(12): 9-14.
- [3] 吴亚楠,汤广福,查鲲鹏,等.模块化多电平 HVDC 换流阀运行试验主回路数学模型及参数设计[J].电网技术,2013,37(1):65-70.
WU Yanan, TANG Guangfu, ZHA Kunpeng, et al. Mathematical model and parameter design of main circuit for operational test of modular multi-level HVDC converter valves[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 65-70.
- [4] 赵成勇,胡静,翟晓萌,等.模块化多电平换流器桥臂电抗器参数设计方法[J].电力系统自动化,2013,37(15):89-94.
ZHAO Chengyong, HU Jing, ZHAI Xiaomeng, et al. A parameter design method of bridge arm reactor in modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 89-94.
- [5] KOURO S, MALINOWSKI M, GOPAKUMAR K, et al. Recent advances and industrial applications of multilevel converters[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2010, 57(8): 2553-2580.
- [6] 王广柱.模块化多电平换流器桥臂电流直接控制方案[J].电力系统自动化,2013,37(15):35-40.
WANG Guangzhu. An arm current direct control scheme for modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 35-40.
- [7] 郭捷,江道灼,周月宾,等.交直流侧电流分别可控的模块化多电平换流器控制方法[J].电力系统自动化,2011,35(7):42-47.
GUO Jie, JIANG Daozhuo, ZHOU Yuebin, et al. AC and DC current hybrid control strategy for modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(7): 42-47.
- [8] 屠卿瑞,徐政,郑翔,等.模块化多电平换流器型直流输电内部环流机理分析[J].高电压技术,2010,36(2):547-555.
TU Qingrui, XU Zheng, ZHENG Xiang, et al. Mechanism analysis on the circulating current in modular multilevel converter based HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 547-555.
- [9] 屠卿瑞,徐政,管敏渊,等.模块化多电平换流器环流抑制控制器设计[J].电力系统自动化,2010,34(18):57-63.
TU Qingrui, XU Zheng, GUAN Minyuan, et al. Design of circulating current suppressing controllers for modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 57-63.
- [10] 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 Trans on Power Electronics, 2012, 27(1): 57-68.
- [11] 王鹏伍,崔翔.MMC-HVDC 三相解耦二次谐波环流抑制算法[J].电力系统自动化,2013,37(15):47-53.
WANG Pengwu, CUI Xiang. Three phases decoupled second harmonic circulation current suppression algorithm for MMC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 47-53.
- [12] 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):1012-1019.
SONG Pinggang, LI Yunfeng, WANG Lina, et al. A modified ladder wave modulation-based circulating current suppressing strategy for modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1012-1019.
- [13] 郑博文,武守远,戴朝波,等.模块化多电平换流器分桥臂电流控制策略[J].电网技术,2013,37(6):1726-1732.
ZHENG Bowen, WU Shouyuan, DAI Chaobo, et al. An individual bridge-arm current control strategy for modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1726-1732.
- [14] 阎发友,汤广福,贺之渊,等.一种适用于模块化多电平换流器的新型环流控制器[J].电力系统自动化,2014,38(1):104-108.
YAN Fayou, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. A novel circulating current controller for modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 104-108.
- [15] GONG Wenming, HU Shuju, SHAN Martin, et al. Robust current control design of a three phase voltage source converter[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(1): 16-22.
- [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):49-56.
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): 49-56.

- [17] 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.
ZHAO Xin, ZHAO Chengyong, LI Guangkai, et al. Submodule capacitance voltage balancing of modular multilevel converter based on carrier phase shifted SPWM technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(21): 48-55.
- [18] QIN J C, SAEEDIFARD M. Reduced switching-frequency voltage-balancing strategies for modular multilevel HVDC converters[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(4): 2903-2912.
- [19] 赵岩,胡学浩,汤广福,等.模块化多电平变流器 HVDC 输电系统控制策略[J].中国电机工程学报,2011,31(25):35-42.
ZHAO Yan, HU Xuehao, TANG Guangfu, et al. Control strategy of modular multilevel converters based HVDC transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 35-42.
- [20] HAGIWARA M, AKAGI H. Control and experiment of pulse width-modulated modular multilevel converters [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 24(7): 1737-1746.
- [21] 许建中,赵成勇.模块化多电平换流器电容电压优化平衡控制算法[J].电网技术,2012,36(6):256-261.
XU Jianzhong, ZHAO Chengyong. An optimized capacitance voltage balancing algorithm for modularized multilevel converter[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 256-261.
- [22] DENG Fujin, CHEN Zhe. A control method for voltage balancing in modular multilevel converters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2014, 29(1): 66-76.
- [23] 蔡新红,赵成勇,庞辉,等.基于 MMC 离散数学模型的 MMC-HVDC 系统直流电压控制[J].电网技术,2013,37(9):2403-2409.
CAI Xinhong, ZHAO Chengyong, PANG Hui, et al. A novel DC voltage control of MMC-HVDC power transmission system based on discrete mathematical model of MMC [J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2403-2409.
- [24] 宋强,刘文华,李笑倩,等.模块化多电平换流器稳态运行特性的解析分析[J].电网技术,2012,36(11):118-124.
SONG Qiang, LIU Wenhua, LI Xiaoqian, et al. An analytical method for analysis on steady-state operating characteristics of modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 118-124.
- [25] GNANARATHNA U N, GOLE A M, JAYASINGHE R P. Efficient modeling of modular multilevel HVDC converters (MMC) on electromagnetic transient simulation programs[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(1): 316-324.
- [26] 辛业春,王朝斌,李国庆,等.模块化多电平换流器子模块电容电压平衡改进控制方法[J].电网技术,2014,38(5):1291-1296.
XIN Yechun, WANG Chaobin, LI Guoqing, et al. An improved balance control for sub-module capacitor voltage of modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1291-1296.

李国庆(1963—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统安全性分析与控制、电力系统继电保护和配电系统自动化。

辛业春(1982—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:电力电子技术在电力系统中的应用。E-mail: xinyechun@mail.nedu.edu.cn

吴学光(1966—),男,教授,国家“千人计划”特聘专家,主要研究方向:大规模新能源发电和并网、超高压直流输电技术。

(编辑 万志超)

Arm Current Analysis of Modular Multilevel Converter and Its Circulating Current Suppressing Method

LI Guoqing¹, XIN Yechun^{1,2}, WU Xueguang³

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

3. State Grid Smart Grid Research Institute, Beijing 102211, China)

Abstract: In order to prevent the modular multilevel converter (MMC) internal circulation, an analysis is made of the voltage fluctuation and circulation generating mechanism of the MMC bridge arm, and a kind of compensation control method for circulation inhibition is proposed. When the MMC power exchange is in progress, the effect of bridge arm current causes the periodic change in the submodule capacitor voltage. It has found that submodule capacitor voltage contains DC component and AC component using the average value analysis method. For converter voltage modulation using the nearest level modulation method, it has been found that, as the submodule capacitor voltage contains DC component and fundamental component deviation, there exists fundamental frequency deviation and double frequency component between bridge arm voltage and the expected value, resulting in the circulation. By compensating for the bridge arm voltage and expected value deviation, it will be possible to eliminate bridge arm voltage deviation, thereby suppressing the circulation among the converter bridge arms. The 11-level MMC DC transmission system is set up in PSCAD/EMTDC, with the effectiveness of the method proposed verified by simulation results.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377016) and “Thousands of People Plan” Special Support Project of State Grid Corporation of China (No. (2013)1111).

Key words: voltage source converter based high voltage direct current (VSC-HVDC); converter; voltage deviation; circulating current suppressing; harmonic