

DOI: 10.7667/PSPC171777

基于电容电压波动的模块化多电平换流器 电容电压均衡策略

陆羿¹, 李继红¹, 裘鹏¹, 徐雨哲², 肖晃庆², 徐政²

(1. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对模块化多电平换流器(MMC)的子模块电容电压均衡问题, 为了在较低的开关频率下抑制电容电压波动, 提出了一种标记排序电容电压均衡策略。标记排序均衡策略能够根据设定的电容电压波动率边界与每个子模块的投切状态和电容电压, 将同一桥臂内的子模块标记为两种类型, 分别进行排序与投切控制。其中电容电压波动率边界可以根据系统运行的不同条件进行调整。提出了用于评价电容电压均衡控制策略性能的两个通用性指标, 分别为器件平均开关频率和桥臂的电容电压波动率。在 PSCAD/EMTDC 中搭建了一个 21 电平 MMC 的测试系统, 将标记排序均衡策略的控制性能和已有的两种电容电压均衡策略进行了仿真对比, 并计算了不同均衡策略下 MMC 的损耗分布。仿真结果证明了标记排序均衡策略的有效性。最后, 对电容电压波动率边界取不同值时的情况进行了仿真测试, 给出了电容电压波动率边界的选取建议。

关键词: 模块化多电平换流器; 电压波动抑制; 电容电压均衡; 开关频率; 损耗计算

Capacitor voltage balancing algorithm for modular multilevel converters based on voltage fluctuation

LU Yi¹, LI Jihong¹, QIU Peng¹, XU Yuzhe², XIAO Huangqing², XU Zheng²

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., LTD, Hangzhou 310027, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: For the capacitor voltage balancing of Modular Multilevel Converters (MMC), in order to suppress the submodule (SM) capacitor voltage fluctuation with lower switching frequency, this paper proposes a mark sorting voltage balancing algorithm. The Mark Sorting Voltage Balancing Algorithm (MSVBA) marks SMs in one arm with two different labels according to the set fluctuation threshold, current state and capacitor voltage of each SM, and then sorts and switches SMs respectively. The fluctuation threshold can be adjusted artificially according to various conditions of the system. Two parameters are proposed to evaluate the performance of capacitor voltage balancing algorithms in this paper, which are the average switching frequency of power devices and the voltage fluctuation rate of arm. A detailed model of 21-level MMC-HVDC test system is built in PSCAD/EMTDC, and the MSVBA is compared with two previous algorithms in the test system. The loss distribution of the MMC under different capacitor voltage balancing algorithms is also calculated. The result proves the validity and the feasibility of the proposed MSVBA. Finally, the performances of the MSVBA with different fluctuation threshold are investigated and some suggestions on parameter selection are given.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52110417001J).

Key words: modular multilevel converters; voltage fluctuation suppression; capacitor voltage balancing; switching frequency; loss calculation

0 引言

模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 作为一种适用于高压直流输电 (High-

Voltage Direct Current, HVDC) 场合的电压源换流器 (Voltage Source Converter, VSC) 拓扑, 最初在 2001 年被提出^[1]。MMC 避免了电力电子器件的直接串联, 使得电力电子器件的动态均压和一致触发等工业上的难点问题得以解决^[2-4]。同时, MMC 的子模块结构使得电力电子器件的开关频率得到了有效降

基金项目: 国家电网公司科技项目资助 (52110417001J)

低, 从而降低了换流站的运行损耗^[5-10]。

由于 MMC 将换流器的能量分散储存在了各个子模块电容内, 导致在子模块电容为有限值的情况下, MMC 运行状态中的电容电压波动是无法避免的^[4]。而较大的电容电压波动将会增大电力电子器件所承受的电压应力^[10], 因此需要考虑减少电容电压波动的方法。文献[11]中分析了一个工频周期内, MMC 每个桥臂中的子模块电容保持充放电平衡的原理。文献[12]中讨论了子模块电容值与电容电压波动之间的关系, 提出增大子模块电容值可以抑制电容电压波动, 但同时会增大换流站的建设成本与占地面积。文献[13]中提出了通过向桥臂注入二倍环流来抑制电容电压波动的方法, 但是该方法会增大桥臂电流有效值, 从而增加 MMC 的运行损耗。除此之外, 还需要在子模块投切环节采用电容电压均衡控制策略, 使得能量在整个 MMC 中均匀分配。文献[14-15]中介绍了一种基于完全排序与整体投入的电容电压平衡策略, 能够最大程度上将能量均匀分配到每个子模块中, 抑制了电容电压波动, 下文中将其称为完全排序均衡策略。

虽然文献[14-15]中介绍的完全排序均衡策略能够最大程度上抑制电容电压波动, 但由于其没有考虑子模块的状态, 将排序算法无条件地应用于每个控制周期, 导致了子模块不必要的反复投切, 增大了器件的开关频率和换流站的运行损耗。为了解决这个问题, 文献[16-18]中提出了几种基于完全排序均衡策略的优化电容电压均衡策略。文献[16]提出了一种基于子模块能量闭环排序的电容电压均衡策略。该均衡策略可以降低开关频率, 但在选择子模块能量的边界值时有一定难度。文献[17]提出了三种不同的电容电压均衡策略, 分别是基于低排序频率的电容电压均衡策略, 基于电压预测的电容电压均衡策略和基于基频控制的电容电压均衡策略, 并且根据该文献中的结果, 基频控制电容电压均衡策略下所需的排序计算时间最少且开关频率最低。但是基频控制电容电压均衡需要交流侧的电压相位作为输入, 在交流侧发生故障时该平衡策略可靠性将降低。文献[18]提出了一种基于按状态排序与增量投切的电容电压均衡控制策略。该策略为了减少子模块不必要的投切, 降低开关频率, 只对需要投入或切除的增量子模块进行电容电压大小的排序, 下文中将其简称为增量投切均衡策略。该策略可以有效降低电力电子器件的开关频率并一定程度上抑制电容电压的波动。

本文在完全排序策略的基础上, 提出了一种优化的电容电压均衡策略。该策略根据子模块电容电

压大小和桥臂电流方向对子模块进行标记, 再分别对不同标记的子模块进行排序并投切。下文中将该策略简称为标记排序均衡策略。为了验证本文提出的标记排序均衡策略的有效性, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建了 21 电平的 MMC 详细模型, 并从平均开关频率和电容电压波动率两个方面对完全排序均衡策略、增量投切均衡策略和标记排序均衡策略三者的控制效果进行了对比分析。

本文内容主要分为以下四个部分: 第一章介绍了 MMC 的基本结构和工作原理, 并提出了电容电压波动率的计算方法; 第二章介绍了标记排序均衡策略的工作原理和实现方法; 第三章给出了 PSCAD/EMTDC 的仿真结果, 并介绍了标记排序均衡策略的输入参数确定方法; 第四章对本文所做的工作进行了总结。

1 MMC 基本结构与工作原理

图 1 给出了 MMC 的基本结构, 包括三个相单元, 每个相单元由上下两个桥臂组成, 每个桥臂由 N 个子模块和一个桥臂电抗器 L_0 串联构成。其中 $u_{vj}(j=a,b,c)$ 是交流侧的 j 相相电压, i_{pj} 和 $i_{nj}(j=a, b, c)$ 分别是 j 相相单元的上下桥臂电流, U_{dc} 是 MMC 的直流母线电压。

如图 1 所示, MMC 采用半桥子模块结构, 单个子模块由两个 IGBT(T_1, T_2), 两个反向并联二极管(D_1, D_2)和一个电容 C_0 构成。正常工作子模块处于投入状态, 此时子模块输出电压 u_{SM} 等于电容电压 u_c , 电容将根据子模块输出电流 i_{SM} 的方向进行充放电, 使电容电压 u_c 发生波动; 当 T_2 导通 T_1 关断

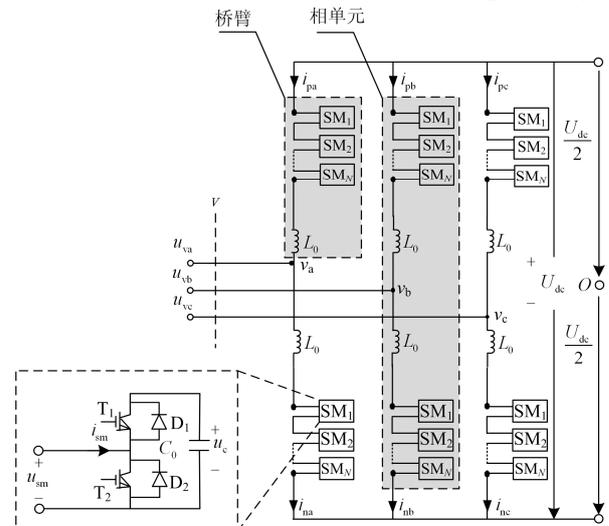


图 1 MMC 的基本结构

Fig. 1 Basic structure of MMC

断时,子模块处于切除状态,此时子模块输出电压 u_{SM} 等于零,电容电压 u_c 将保持不变。

为了维持 U_{dc} 恒定,每个相单元中投入的子模块数量应始终保持 N 不变,即为相单元子模块总数的一半。则 U_{dc} 和子模块电容电压额定值 U_{cn} 之间的关系可表示为

$$U_{cn} = \frac{U_{dc}}{N} \quad (1)$$

由于处于投入状态的子模块电容会进行充放电,因此电容电压的瞬时值 u_c 可表示为

$$u_c = U_{cn} + \Delta u_c \quad (2)$$

式中, Δu_c 为电容电压的波动分量。

为了对不同电容电压均衡控制策略的控制效果进行对比分析,需要对电容电压波动大小进行量化,本文采用文献[12]中所定义的电容电压波动率来反映电容电压的波动大小,其表达式为

$$\varepsilon_i = \frac{\max|\Delta u_{c,i}|}{U_{cn}} \quad (3)$$

式中, $\max|\Delta u_{c,i}|$ 为运行过程中第 i 个子模块电容电压的波动分量的最大值。

由于电容电压均衡控制是针对一个桥臂来实施的,因此在式(3)的基础上,定义桥臂的电容电压波动率为该桥臂内所有子模块电容电压波动率的最大值,其表达式为

$$\varepsilon_{arm} = \max(\varepsilon_i) \quad (4)$$

定义单个 IGBT 的开关频率为其在单位时间内开通的次数,那么 MMC 中 IGBT 的平均开关频率 $f_{sw,ave}$,可以针对其中的一个桥臂,采用式(5)进行计算。

$$f_{sw,ave} = \frac{n_{on,total}}{2N} \quad (5)$$

式中, $n_{on,total}$ 为单位时间内统计得到的一个桥臂内所有 IGBT 开通次数总和。

在本文的仿真研究中,桥臂的电容电压波动率和 IGBT 的平均开关频率将作为综合评价电容电压均衡控制策略性能的两个指标。

2 电容电压均衡控制策略工作原理

MMC 的电容电压均衡控制主要以一个桥臂为控制单位,每一个控制周期,通过调制环节计算得到桥臂需要投入的子模块数量 N_{on} 后,需要选取投入的子模块并对 IGBT 的控制信号进行更新。为了减小电容电压波动率以及各个子模块电容电压的不平衡度,需要在选取子模块的过程中应用合适的电容电压均衡控制策略。本章将主要介绍本文所提出的标记排序均衡策略的工作原理和实现方法。在此

之前先简单介绍作为对比对象的完全排序均衡策略和增量投切均衡策略。

2.1 完全排序均衡策略

完全排序均衡策略是一种基于每个子模块电容电压瞬时值和桥臂电流方向的控制策略。它的具体实现方法如文献[15]中所述。

1) 监测桥臂中所有子模块的电容电压值和桥臂电流,并将所有子模块按照电容电压进行排序。

2) 在每个控制周期内,当桥臂电流方向为对电容充电时,投入电压最低的 N_{on} 个子模块并切除剩余的子模块;当桥臂电流方向为对电容放电时,投入电压最高的 N_{on} 个子模块并切除剩余的子模块。

2.2 增量投切均衡策略

增量投切均衡策略在完全排序均衡策略的基础上,考虑了每个子模块的运行状态,通过尽量保持子模块当前的运行状态,避免了不必要的开关动作,有效降低了电力电子器件的开关频率。根据文献[18],它的具体实现方法如下:

1) 当需要投入的子模块数量相比上一个控制周期增加时,保持处于投入状态的子模块状态不变,对处于切除状态的子模块采用完全排序策略,选取需要另外投入的子模块。

2) 当需要投入的子模块数量相比上一个控制周期减少时,保持处于切除状态的子模块状态不变,对处于投入状态的子模块采用完全排序策略,选取需要另外切除的子模块。

2.3 标记排序均衡策略

为了进一步优化电容电压均衡控制,本文提出了如图2所示的标记排序均衡策略。该策略同样以一个桥臂为控制对象,其中 ε_m 为设定的电容电压波动率边界。 N_{mark} 为控制过程中标记为1的子模块的数量。 i_{arm} 为桥臂电流,其正方向为对子模块电容充电。 U_{up} 和 U_{low} 分别为电容电压的上边界和下边界,可由式(6)和式(7)计算得到。

$$U_{up} = U_{cn} (1 + \varepsilon_m) \quad (6)$$

$$U_{low} = U_{cn} (1 - \varepsilon_m) \quad (7)$$

标记排序均衡策略的控制过程可以分为两个环节,分别是标记环节和投切环节。其中标记环节中,根据电容电压和子模块当前的状态将子模块分为两类,其中具有较高优先级投入的子模块被标记为1,而具有较高优先级切除的子模块被标记为0。标记环节的控制原则如下。

1) 根据控制周期开始时的子模块状态,将桥臂中处于投入状态的子模块全部标记为1,处于切除状态的子模块全部标记为0。

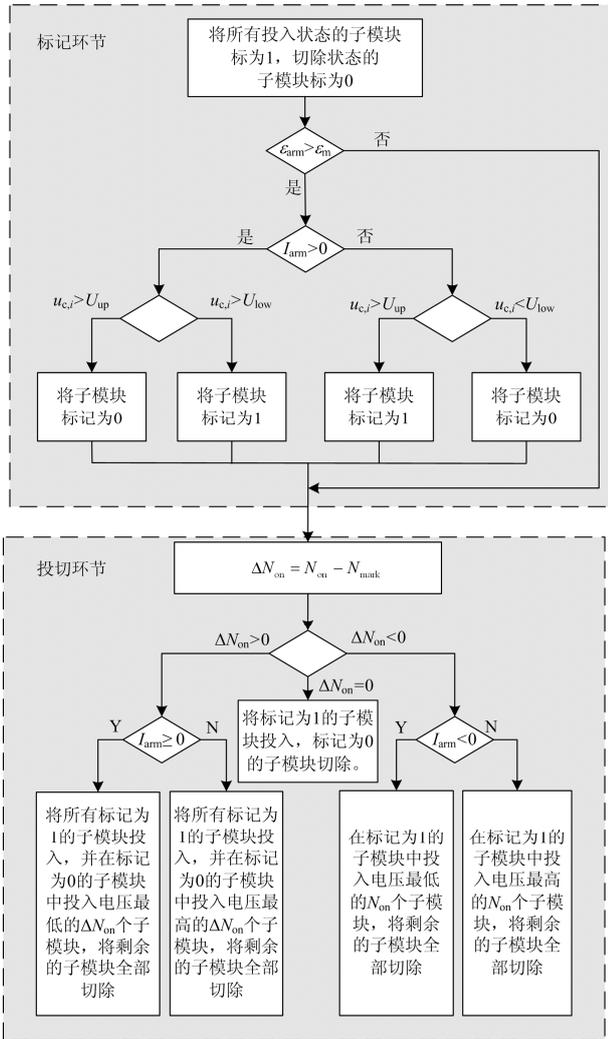


图 2 标记排序均衡策略

Fig. 2 Mark sorting voltage balancing algorithm

2) 根据式(3)和式(4)计算整个桥臂的电容电压波动率 ϵ_{arm} 。

3) 如果 ϵ_{arm} 小于波动率边界 ϵ_m , 那么说明这个周期内不需要更改子模块的标记, 直接进入投切环节; 如果 ϵ_{arm} 大于波动率边界 ϵ_m , 那么需要按照下述原则更新子模块标记。

4) 若桥臂电流对电容充电, 那么将那些电容电压大于上边界的子模块标记为 0, 电容电压小于下边界的子模块标记为 1; 若桥臂电流对电容放电, 那么将那些电容电压大于上边界的子模块标记为 1, 电容电压小于下边界的子模块标记为 0。

5) 更新标记为 1 的子模块数量 N_{mark} 。

投切环节中, 将两种标记的子模块分别排序, 并根据排序结果和需要投入的子模块数量进行投切操作, 具体的投切原则如下。

1) 当需要投入的子模块数量大于等于 N_{mark} 时, 投入所有标记为 1 的子模块, 然后根据桥臂电流方向对标记为 0 的子模块进行投切操作: 桥臂电流对子模块充电时, 投入标记为 0 的子模块中电容电压最低的 ΔN_{on} 个子模块; 桥臂电流对子模块放电时, 投入标记为 0 的子模块中电容电压最高的 ΔN_{on} 个子模块, 然后切除剩余的所有子模块。

2) 当需要投入的子模块数量小于 N_{mark} 时, 若桥臂电流对子模块充电, 则投入标记为 1 的子模块中电压最低的 N_{on} 个子模块; 若桥臂电流对子模块放电, 则投入标记为 1 的子模块中电压最高的 N_{on} 个子模块, 然后切除剩余的所有子模块。

在标记排序均衡策略的控制原则中, 可以通过调整设定的 ϵ_m 来平衡降低开关频率与抑制电容电压波动这两个控制目标之间的关系: 增大 ϵ_m 可以降低开关器件的平均开关频率, 但会增大子模块电容电压波动; 减小 ϵ_m 则会降低子模块电容电压波动, 增大平均开关频率。

3 仿真分析

3.1 测试系统

为了验证本文所提出的标记排序均衡策略的有效性, 在电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 中搭建了如图 3 所示的 21 电平 MMC 测试系统, 其中 MMC 采用了详细仿真模型, 其拓扑结构如图 1 所示, 测试系统的主要参数在表 1 中给出。

3.2 均衡控制策略控制性能对比

在所搭建的测试系统中, 分别应用第二章中所列出的三种电容电压均衡控制策略, 进行三种策略下 MMC 的运行特性仿真比较。其中标记排序均衡策略的电容电压波动率边界 ϵ_m 设定为 9%。

图 4 中分别给出了三种均衡控制策略下, A 相上桥臂中的第一个子模块的投切状态, 其中 1 代表投入状态, 0 代表切除状态。可以看到, 三种均衡策略中, 完全排序均衡策略下的子模块投切状态变化最频繁, 这说明该策略下子模块的开关器件需要承受很高的开关频率, 增加了整个 MMC 的运行损耗。同时, 通过比较图 4(b)和图 4(c)可以看到,

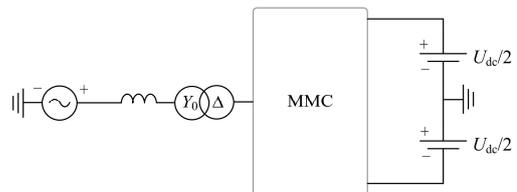


图 3 测试系统示意图

Fig. 3 System structure of simulation model

表 1 仿真系统参数

| Table 1 Main circuit parameters of simulated system | | |
|---|---------------------|------------------|
| 回路 | 参数 | 数值 |
| 直流系统 | 额定直流电压 $U_{dc}/2$ | ± 20 kV |
| | 额定容量 S | 40 MW |
| 换流器内部 | 桥臂子模块数量 N | 20 |
| | 子模块电容 C_0 | 6 666 μ F |
| | 子模块电容电压额定值 U_{cn} | 2 kV |
| | 桥臂电抗 L_0 | 7.6 mH |
| | 控制频率 f_{cr} | 10 kHz |
| | IGBT 型号 | 5SNA 1200E330100 |
| 交流系统 | 交流系统线电压 U_s | 35 kV |
| | 交流系统等效阻抗 L_s | 19.35 mH |
| | 换流变压器变比 | 35 kV/20 kV |
| | 有功功率 P | 40 MW |
| | 无功功率 Q | 4 Mvar |

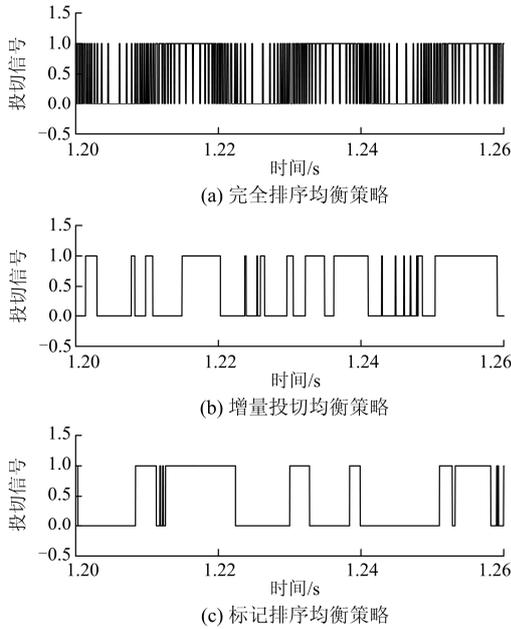


图 4 子模块投切信号对比
Fig. 4 Comparison of switching signals

同样时间长度内，标记排序均衡策略下桥臂子模块的开关次数要少于增量投切均衡策略，这说明本文提出的标记排序均衡策略拥有更小的平均开关频率。

图 5 给出了三种不同的均衡策略下，A 相上桥臂的 20 个子模块的电容电压波形图。可以看到，图 5(a)中的电容电压的波动幅度最小，而图 5(b)和图 5(c)中的电容电压的波动幅度几乎相同。因此可以得出，三种均衡策略中，完全排序策略拥有最好的抑制电容电压波动的性能，而增量投切均衡策略和标记排序均衡策略抑制电容电压波动的能力基本相同。

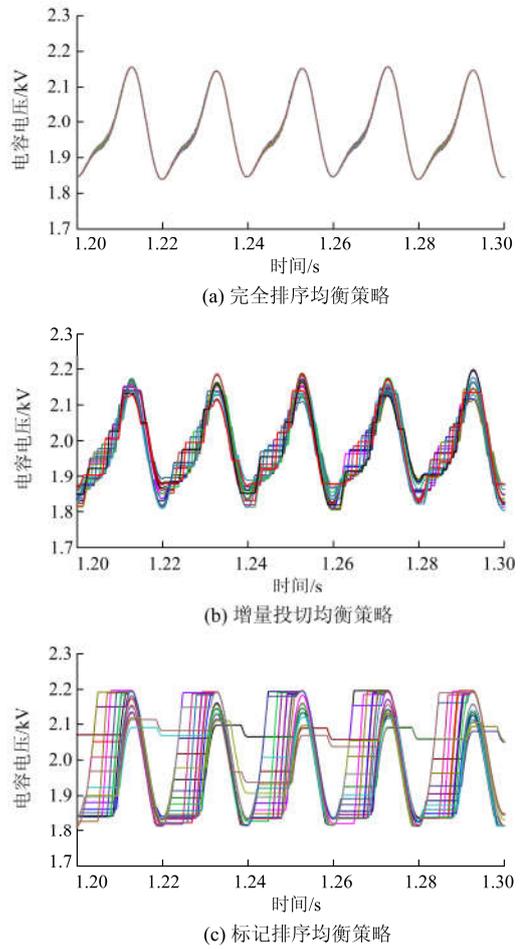


图 5 子模块电容电压对比
Fig. 5 Comparisons of SM capacitor voltages

为了更直观地对比三种均衡策略的控制效果，本文对测试系统中的 MMC 进行了简单的损耗计算。其中 IGBT 与二极管的通态损耗和开关损耗通过文献[19]中的方法进行计算。子模块中使用的 IGBT 的具体参数来自于 ABB 的产品参数表[20]。为了简化计算过程，假设 MMC 运行过程中开关器件温度始终保持在 125 $^{\circ}$ C。图 6 给出了三种均衡策略下 IGBT 和二极管的损耗分布。其中， P_{con} 代表了 IGBT 与二极管的通态损耗和， P_{sw} 代表了 IGBT 的开关损耗与二极管的反向恢复损耗之和， P_{total} 为所有开关器件的总损耗。

表 2 给出了三种均衡策略控制性能的比较结果，表中选择了桥臂电容电压波动率 ε_{arm} ，平均开关频率 $f_{sw,ave}$ 和损耗分布三者作为评价电容电压均衡控制策略性能的指标。其中损耗分布均表示为测试系统中 MMC 额定容量的百分比。从表中可以看到，完全排序均衡策略有着最低的桥臂电容电压波动率，但同时也拥有最高的平均开关频率和器件损

耗。进一步比较增量投切均衡策略和标记排序均衡策略, 可以发现两种策略下的 ϵ_{arm} 基本相同, 但是增量投切均衡策略的 $f_{sw,ave}$ 为 262 Hz, 而标记排序均衡策略的 $f_{sw,ave}$ 仅为 153 Hz。

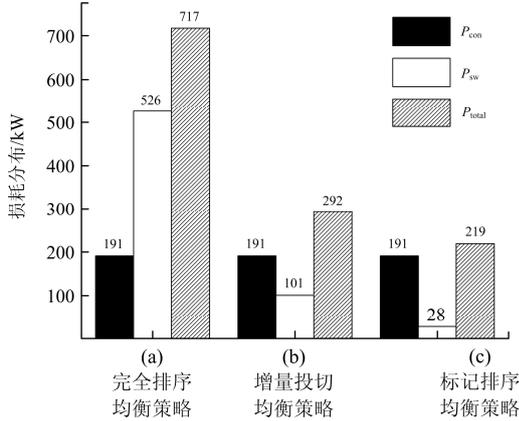


图 6 IGBT 和二极管损耗分布

Fig. 6 Loss distribution of all IGBTs and diodes

表 2 均衡策略控制性能比较

Table 2 Comparison of control performance

| 均衡策略 | $\epsilon_{arm}/\%$ | $f_{sw,ave}/\text{Hz}$ | $P_{con}/\%$ | $P_{sw}/\%$ | $P_{total}/\%$ |
|----------|---------------------|------------------------|--------------|-------------|----------------|
| 完全排序均衡策略 | 8.3 | 2 021 | 0.48 | 1.32 | 1.80 |
| 增量投切均衡策略 | 10.3 | 262 | 0.48 | 0.25 | 0.73 |
| 标记排序均衡策略 | 10.1 | 153 | 0.48 | 0.07 | 0.55 |

在损耗分布方面, 可以看到三种均衡策略下的器件态损耗基本相同, 三种策略下总器件损耗的差距主要来自于开关损耗。而相比增量投切均衡策略, 标记排序均衡策略的总器件损耗从 0.73% 降低到了 0.55%, 同时电容电压波动率基本保持不变。这说明本文所提出的标记排序均衡策略相比已有的电容电压均衡策略, 能够在有效抑制子模块电容电压波动的基础上, 进一步降低 MMC 换流器的平均开关频率和损耗。

3.3 电容电压波动率边界的选取

标记排序均衡策略还可以根据系统运行的要求调整电容电压波动率边界 ϵ_m , 从而改变控制目标。表 3 给出了不同 ϵ_m 时, 标记排序均衡策略的控制性能, 其中当 ϵ_m 等于 0 时, 其控制方式与完全排序均衡策略完全相同。

从表 3 中可以看到, 在 ϵ_m 从 0% 增加到 8% 的过程中, 平均开关频率和总器件损耗快速减小, 而桥臂电容电压波动率仅上升了 1%。而当 ϵ_m 大于 8% 之后, 随着电容电压波动率的上升, 器件总损耗的减小效果逐渐下降。因此对于本文中的测试系统来说, 在综合考虑电容电压波动率和器件总损耗之后, 将 ϵ_m 设定为 8% 是比较合理的。

表 3 不同电容电压波动率边界时的控制性能

Table 3 Control performance under different fluctuation threshold

| $\epsilon_m/\%$ | $\epsilon_{arm}/\%$ | $f_{sw,ave}/\text{Hz}$ | $P_{total}/\%$ |
|-----------------|---------------------|------------------------|----------------|
| 0 | 8.3 | 2 021 | 1.80 |
| 1 | 8.5 | 1 820 | 1.61 |
| 2 | 8.6 | 1 654 | 1.41 |
| 3 | 8.9 | 1 529 | 1.27 |
| 4 | 9.0 | 1 365 | 1.12 |
| 5 | 9.2 | 1 165 | 0.97 |
| 6 | 9.2 | 921 | 0.82 |
| 7 | 9.3 | 633 | 0.69 |
| 8 | 9.3 | 380 | 0.59 |
| 9 | 10.1 | 153 | 0.55 |
| 10 | 11.1 | 134 | 0.54 |
| 11 | 12.1 | 112 | 0.53 |
| 12 | 13.0 | 89 | 0.52 |
| 13 | 14.1 | 73 | 0.52 |

对于实际工程中的应用, ϵ_m 可以在 5%~10% 之间先取值进行仿真实验, 在综合考虑平均开关频率和电容电压波动的控制需求之后, 选取一个合适的值作为实际工程中使用的 ϵ_m 。

4 结论

本文以抑制电容电压波动和降低平均开关频率为目标, 针对 MMC 的电容电压均衡控制策略进行了优化, 提出了以桥臂电容电压波动率 ϵ_{arm} 为判断依据的标记排序均衡策略。在保证电容电压波动较小的基础上, 极大程度降低了开关器件的平均开关频率。

在 PSCAD/EMTDC 中搭建了一个 21 电平 MMC 测试系统, 对已有的两种均衡策略和所提均衡策略下 MMC 的运行特性进行了仿真分析, 比较了三种策略下的平均开关频率和电容电压波动率, 并对 MMC 的损耗进行了简单计算。仿真结果验证了所提均衡策略在抑制电容电压波动和降低开关损耗方面的有效性。

本文最后对所提控制策略在不同 ϵ_m 下的控制性能进行了仿真分析, 证明了增大 ϵ_m 可以降低开关器件的平均开关频率, 但会增大子模块电容电压波动, 减小 ϵ_m 则会降低子模块电容电压波动, 增大平均开关频率。最后根据仿真结果和实际工程需求, 给出了实际工程中选取 ϵ_m 的方法。

参考文献

- [1] MARQUARDT R. Stromrichterschaltungen mit verteilten Energiespeichern: DE, DE20122923[P]. 2010.
- [2] TU Q, XU Z. Power losses evaluation for modular multilevel converter with junction temperature feedback[C] // 2011 IEEE Power and Energy Society

- General Meeting, July 24-29, 2011, Detroit, USA: 1-7.
- [3] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2016: 142-152.
- [4] TU Q, XU Z, CHANG Y, et al. Suppressing DC voltage ripples of MMC-HVDC under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1332-1338.
- [5] 管敏渊, 徐政, 屠卿瑞, 等. 模块化多电平换流器型直流输电的调制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 48-52.
GUAN Minyuan, XU Zheng, TU Qingrui, et al. Nearest level modulation for modular multilevel converters in HVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 48-52.
- [6] ROHNER S, BERNET S, HILLER M, et al. Modulation, losses, and semiconductor requirements of modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(8): 2633-2642.
- [7] GUAN M, XU Z. Modeling and control of a modular multilevel converter-based HVDC system under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(12): 4858-4867.
- [8] 付艳, 黄金海, 吴庆范, 等. 基于 MMC 多端柔性直流输电保护关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 133-139.
FU Yan, HUANG Jinhai, WU Qingfan, et al. Key technologies research based on multi-terminal MMC-HVDC protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 133-139.
- [9] 周阳, 常非. MMC 电磁暂态快速仿真模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 1-8.
ZHOU Yang, CHANG Fei. Quick model of MMC in electromagnetic transient simulations[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 1-8.
- [10] LIU G, XU Z, XUE Y, et al. Optimized control strategy based on dynamic redundancy for the modular multilevel converter[J]. High Voltage Engineering, 2014, 30(1): 339-348.
- [11] 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.
- [12] XU Z, XIAO H, ZHANG Z. Selection methods of main circuit parameters for modular multilevel converters[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(6): 788-797.
- [13] 蔡永梁, 任成林, 周竞宇, 等. 基于 MMC 的柔性直流输电电容电压波动抑制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 45-50.
CAI Yongliang, REN Chenglin, ZHOU Jingyu, et al. Control strategy for suppressing capacitor voltage ripple of MMC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 45-50.
- [14] GLINKA M, MARQUARDT R. A new AC/AC multilevel converter family[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(3): 662-669.
- [15] 刘钟洪, 宋强, 刘文华. 基于模块化多电平变流器的轻型直流输电系统[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 53-58.
LIU Zhongqi, SONG Qiang, LIU Wenhua. VSC-HVDC system based on modular multilevel converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 53-58.
- [16] DOMMASCHK M, DORN J, EULER I, et al. Drive for a phase module branch of a multilevel converter: EP, WO/2008/086760[P]. 2008.
- [17] QIN J, SAEEDIFARD M. Reduced switching-frequency voltage-balancing strategies for modular multilevel HVDC converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2403-2410.
- [18] 屠卿瑞, 徐政, 郑翔, 等. 一种优化的模块化多电平换流器电压均衡控制方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 15-20.
TU Qingrui, XU Zheng, ZHENG Xiang, et al. An optimized voltage balancing method for modular multilevel converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 15-20.
- [19] 薛英林, 徐政, 张哲任, 等. 采用不同子模块的 MMC-HVDC 阀损耗通用计算方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 20-29.
XUE Yinglin, XU Zheng, ZHANG Zheren, et al. General method of valve loss calculation for MMC-HVDC with different submodules[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 20-29.
- [20] ABB. HiPak IGBT and diode modules with SPT and SPT+ chips, Nov. 2013[DB/OL]. [http:// search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=5SYA1556-05&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=L aunch](http://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=5SYA1556-05&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch).

收稿日期: 2017-12-06; 修回日期: 2018-01-30

作者简介:

陆 翌(1979—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为高压直流输电和柔性直流输电及大功率电力电子技术;

李继红(1964—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电网调度运行、电力系统运行与分析;

袁 鹏(1985—), 男, 工程师, 主要研究方向为直流输电和柔性直流输电。

(编辑 葛艳娜)