模块化多电平变换器的子模块电容电压均衡策略综述

模块化多电平变换器具有高度模块化、容易扩展及输出波形谐波含量少等优点，近年来在高压大功率领域得到了广泛的发展。从模块化多电平变换器的拓扑结构入手，分析了其工作原理，并对其关键技术问题之一——子模块电容电压均衡控制进行了详细的分析和总结，最后，对电容电压均衡控制的前景进行了展望。

刘 侠 张 航 王金金 王亚丽/国家知识产权局专利局专利审查协作河南中心

刘 侠/助理研究员

关键词/Keywords

模块化多电平变换器·
子模块·
电容电压·
均衡·

0 引言

近年来，能源短缺、环境污染等问题日益严重，风力发电、太阳能发电等清洁新能源发电技术成为了热门的研究方向，这些清洁能源位置分散，主要分布在西北和沿海地区，但我国的用电负荷中心主要分布在东部，基于电压源变换器（VSC－HVDC）的柔性直流输电系统作为经济灵活、可控性强的输电方式，在我国得到了大力发展[1-4]。高压直流输电对电压源变流器的容量和电压等级提出了更高的要求，而模块化多电平变流器应运而生。

模块化多电平变换器（Modular Multilevel Convert，MMC）最早是由德国学者R. Marquardt在其一篇专利文献中提出[5]，每相桥臂由子模块（Sub－Module，SM）串联级联而成，与常规的多电平电压源型变换器相比，模块化多电平变换器具有模块化程度高、易于扩展以及输出波形谐波含量少的优点，采用多模块串并联的设计能够避免子模块中开关器件的直接串并联，成功解决了器件功率等级与电网功率等级之间差异巨大的矛盾，并且，这种模块化的系统结构也为冗余容错的设计带来了方便[6]。

1 模块化多电平变换器的拓扑与工作原理

图1为三相模块化多电平变换器的拓扑结构[7-9]，每相具有上、下两个桥臂，每个桥臂由n个子模块和桥臂电感级联构成，输出从上、下桥臂电感之间引出。子模块是组成模块化多电平变换器的基本单元，主要有三种基本结构：半桥结构、全桥结构和双钳位结构。

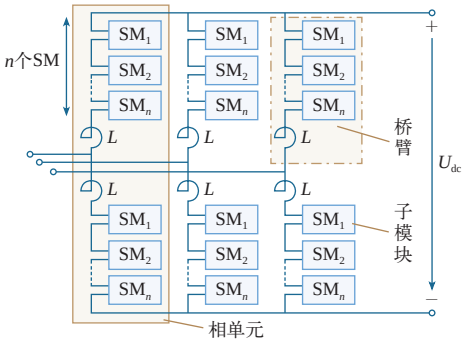

图1 MMC模块化多电平结构

目前，应用最广泛的是如图2所示的半桥结构的子模块，半桥子模块结构一般包括两个IGBT开关和一个电容，并且每个半桥子模块通常具有三种工作状态[10]：①投入状态，此时子模块中的VT_1导通，VT_2关断，子模块输出电压等于电容电压，当电流是按照如图2中i_{SM}所示的方向，则为电容充电，反之，电容进行放电；②切除状态，此时子模块中VT_1关断，VT_2导通，电容被旁路，没有与子模块输出端形成通路，子模块输出电压为零，电容两端电压保持不变；③闭锁状

态，此时子模块中的开关管VT_1、VT_2均关断，一般用于起动或者故障时。

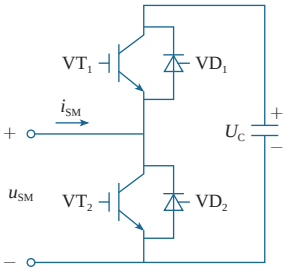

图2 半桥子模块结构图

根据如图1所示的拓扑结构，由基尔霍夫电压定律和基尔霍夫电流定律[11]可知

$$\begin{cases} u_a = -u_U - L\dfrac{di_U}{dt} + \dfrac{u_{dc}}{2} \\ u_a = u_L + L\dfrac{di_L}{dt} - \dfrac{u_{dc}}{2} \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} i_U = i_{diff} + i_a / 2 \\ i_L = i_{diff} + i_a / 2 \end{cases} \tag{2}$$

式中，u_a为模块化多电平变换器的输出电压；u_U、u_L分别为上下桥臂对地电压；L为桥臂电抗器的电感值；u_{dc}为直流母线电压；i_{diff}为同时流过上下桥臂的换流器内部电流。

联立式（1）和式（2）可以求得

$$\begin{cases} u_a = \dfrac{1}{2}(u_L - u_U) + \dfrac{L}{2}\cdot\dfrac{di_a}{dt} \\ L\dfrac{di_{diff}}{dt} = \dfrac{u_{dc}}{2} - \dfrac{u_U - u_L}{2} \end{cases} \tag{3}$$

定义

$$e_a = \frac{1}{2}(u_L - u_U) \tag{4}$$

得到

$$\begin{cases} u_U = \dfrac{u_{dc}}{2} - e_a - L\dfrac{di_{diff}}{dt} \\ u_L = \dfrac{u_{dc}}{2} + e_a - L\dfrac{di_{diff}}{dt} \end{cases} \tag{5}$$

$$e_a = m\frac{u_{dc}}{2}\sin(\omega t) \tag{6}$$

式中，m为模块化多电平变换器输出电压调制比。

忽略$L\mathrm{d}i_{diff}/\mathrm{d}t$的影响，则可以得到

$$\begin{cases} u_U = \dfrac{u_{dc}}{2}[1 - m\sin(\omega t)] \\ u_L = \dfrac{u_{dc}}{2}[1 + m\sin(\omega t)] \end{cases} \tag{7}$$

在模块化多电平变换器正常工作时，在一个周期内会将n个子模块设置为投入状态，可以得到每个投入状态子模块电容电压平均值u_d为

$$u_d = \frac{u_{dc}}{n} \tag{8}$$

子模块电容动态电压u_d与电容电压初始值u_0、电容电流i_d关系可以表示为

$$u_d = u_0 + C\int_0^t i_d\,dt \tag{9}$$

当导通子模块时，电容电流i_d等效为桥臂电流，当其为正向流入时，子模块电容动态电压增加，正向流出时，动态电压则减小；当断开子模块时，子模块电容动态电压保持不变。

2 子模块电容均压策略

模块化多电平变换器（MMC）通过投入或切出子模块，利用各个子模块的电容电压能够获得所期望的多电平输出波形。如何实现子模块电容电压的均衡是模块化多电平变换器所研究的关键技术之一[12]，子模块电容电压是否均衡对模块化多电平变换器系统的稳定性和输出电压波形质量产生重大影响。目前常用的子模块电容均压方法主要有以下几种。

（1）硬件钳位法[13-14]

该方法利用二极管将所有电容电压钳位在最顶层子模块和最底子模块的电容电压之间，并另外设置隔离电路，然后通过隔离电路实现能量由最顶层的子模块传输到最底层的子模块，从而使最顶层和最底层的子模块电容电压保持平衡，即可实现所有子模块电容电压的平衡。该方法虽然控制简单，但是为了使最底层和最顶层的子模块电容电压保持均衡，额外设置的隔离电路需能承受较高的绝缘电压，不仅硬件成本较高，也会带来绝缘安全问题。

（2）闭环控制法[15-17]

该方法以分散控制为基础，各子模块分别独

立执行调制过程，根据电压反馈在原有的每个调制波中叠加一项用于单个子模块之间电压均衡的分量、一项用于维持单个桥臂整体电压均衡的分量，以及一项用于维持单相上下桥臂整体电压平衡的分量，该方法简化了系统控制架构，但由于闭环控制器较多，因而，子模块数越多，系统稳定性越差。

（3）脉冲轮换法[18-19]

该方法针对工频斩波的模块化多电平变换器，在稳态时以工频频率将驱动脉冲轮流分配给各个子模块单元，通过开关管触发脉冲的轮换，各个子模块单元的有功功率达到了较好的均衡，降低了各子模块单元之间电容电压的不平衡，该方法不需要检测电容电压，成本低，但是在动态过程中往往无法达到电容电压保持平衡的效果。

（4）电容电压排序法[20]

该方法首先监测各个子模块的电容电压值，并对电容电压值进行排序，然后监测各桥臂的电流方向，如果电流方向为正，子模块电容充电，则投入n个电容电压最低的子模块，反之如果电流方向为负，子模块电容放电，则投入n个电容电压最高的子模块。该方法没有考虑子模块的初始状态，投切随意性大，并且子模块频繁地随机投切增加了额外的开关动作，造成较大的开关损耗，再者，需要监测子模块电容电压值并进行排序，占用时间较多，在触发控制中会产生延迟，降低变流器的跟踪速度。

（5）电容电压排序法的优化

1）文献[21]中提出了一种均压控制方法，首先监测桥臂电流方向并进行判断，然后找出输出子模块中电容电压幅值最高的、以及旁路子模块中电容电压幅值最低的子模块，从而判断是否投入或旁路子模块。该方法避免了随意投切子模块，减少了开关频率，对子模块数量较多的高压变流领域更适用。

2）文献[22]中提出了一种优化均压控制方法，该方法先设定一组电压上、下限，电容电压越限的子模块成为均压控制重点，结合桥臂电流充放电情况对电容电压未越限的子模块引入保持因子，使未越限的子模块在一定程度上具有保持原来投切状态的能力，该方法在子模块电容电压波动不明显增加的前提下，实现了子模块投切频率和器件开关频率的显著降低。同时，对子模块电容电压的排序和触发控制采用的是分频率工作，因而，所引入均压控制并不会造成触发控制的工作频率和换流器跟踪速度的降低。

3）文献[23]中提出了一种均衡方法，该方法采样各桥臂子模块电容电压的当前值，并通过与上一采样时刻的电容电压值作差获得工频周期内各桥臂子模块的电容电压增量；对电容电压增量进行排序，得到驱动信号队列，对子模块电容电压的当前值进行排序，得到子模块队列；建立驱动信号队列与子模块队列之间的映射关系；按照新的映射关系，重新给子模块分配驱动信号。该方法实时性要求不高，极大地节省控制器的计算资源，更大规模的MMC系统也能够处理；无须检测桥臂电流，控制器间的通信复杂度得到了简化，降低了电流传感器的成本，且无须增加额外的硬件电路，系统成本低；在该均衡方法控制下，所有桥臂子模块的开关频率相同且较低，并且具有相同的开关应力，增强了系统可靠性。

4）文献[24-25]中提出了一种基于分组的均压方法，该方法对同一桥臂上的子模块进行分组；对各个组内子模块电容电压进行排序，并计算出各个组内子模块电容电压的平均值；对所有组的子模块电容电压的平均值进行排序；按照控制算法计算出需要投入/退出的子模块数量，并根据桥臂电流的方向来选择需要投入/退出的组；根据各个组内需要投入/退出的子模块数量以及桥臂电流方向来选择需要投入/退出工作的子模块。该方法控制下，排序时间得到了极大的减少，并且不需要额外的控制，程序复杂度低。

3 结束语

本文从模块化多电平变换器的拓扑结构入手，分析了其工作原理，并对其关键技术问题之一——电容电压均衡控制进行了详细的分析和总结，基于目前的研究可知，现阶段的均压控制方

法主要集中在对电容电压排序法的优化上，但排序法需要占用大量的计算资源，降低控制系统的动态特性。当模块化多电平变换器应用于高频领域时，基于排序算法的电容电压均衡控制由于计算延时往往不能满足控制系统要求。因而，研究重点势必转移到如何提高控制系统的动态响应速度上，即减少因电容电压排序造成的控制系统计算资源的耗费上。基于此，新的无须对电容电压进行排序的均衡控制方法会成为国内外学者的研究热点。

参考文献

[1] 班明飞．模块化多电平变流器控制策略的研究 [D]．哈尔滨：哈尔滨工业大学，2013．

[2] 杨晓峰．模块组合多电平变换器 (MMC) 研究 [D]．北京：北京交通大学，2011．

[3] 李小强，戴鹏，朱荣伍，等．基于FPGA的模块化多电平变换器控制策略研究 [J]．电气传动，2012，42 (11)：65-70．

[4] Vassilios G Agelidi，Georgios D Demetriades，Nikolas Flourentzou et al，Recent advances in high-voltage direct-current power transmission systems [C]．IEEE International Conference on Industrial Technology，2006：206-213．

[5] Marquardt R．Stromrichterschaltungen mit verteilten Energiespeichern：German，DE10103031A1 [P]．2001-01-24．

[6] 魏晨华，杨岩，谢阳，等．模块化多电平变换器关键问题研究综述 [J]．电子设计工程，2014，22 (6)：182-186．

[7] Peng F Z，Mckeever J W，Adams D J．A power line conditioner using cascade multilevel inverters for distribution systems [J]．IEEE Transactions on Industrial Applications，2002，34 (6)：1293-1298．

[8] Mohammadi P H，Bina M T．A transformerless medium-voltages STATCOM topology based on extended modular multilevel converters [J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2011，26 (5)：1534-1545．

[9] Akagi H．Classification，terminology，and application of the Modular Multilevel Cascade Converter (MMCC) [J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2011，26 (11)：3119-3130．

[10] 刘华东，张志学，张定华，等．模块化多电平变换器的控制研究 [C]．第三届全国电能质量学术会议，2013：261-272．

[11] 肖浩，高桂革，曾宪文，等．改进的MMC子模块电压均衡策略 [J]．自动化仪表，2015，36 (8)：15-18．

[12] 谢瑞，胡列翔，徐建国，等．模块化多电平变换器研究综述 [J]．机电工程，2014，31 (12)：1615-1622．

[13] 姜新建，高聪哲．一种带辅助二极管模块化多电平变换器：中国，CN102832841A [P]．2012-08-27．

[14] Gao C，Jiang X，Li Y，et al，A DC-DC link voltage self-balance method for a diode-clamped modular multilevel converter with minimum number of voltage sensors [J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2012，28 (5)：2125-2139．

[15] 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．

[16] Hagiwara M，Akagi H．Control and experiment of pulsewidth-modulated modular multilevel converters [J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2009，24 (7)：1737-1746

[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．

[18] Ilves K，Antonopoulos A，Norrga S，et al．A new modulation method for the modular multilevel converter allowing fundamental switching frequency [J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2012，27 (8)：3482-3494．

[19] 杨晓峰，林智钦，郑琼林，等．模块组合多电平变换器的方波脉冲循环调制策略 [J]．中国电机工程学报，2013，33 (9)：42-47．

(下转第82页)

参考文献

[1] 赵文清，朱永利，姜波，等．基于贝叶斯网络的电力变压器状态评估 [J]．高电压技术，2008，34 (5)：1032-1039．

[2] Liao R，Zheng H，Grzybowski S，et al．An integrated decision-making model for condition assessment of power transformers using fuzzy approach and evidential reasoning [J]．IEEE Transactions on Power Delivery，2011，26 (2)：1111-1118．

[3] 阮羚，谢齐家，高胜友，等．人工神经网络和信息融合技术在变压器状态评估中的应用 [J]．高电压技术，2014，40 (3)．

[4] 龙鹏，盛戈皞，刘亚东，等．基于可拓理论的变压器在线监测状态综合评估 [J]．华东电力，2011 (9)：1390-1394．

[5] 廖瑞金，王谦，骆思佳，等．基于模糊综合评判的电力变压器运行状态评估模型 [J]．电力系统自动化，2008，32 (3)：70-75．

[6] 廖瑞金，孟繁津，周年荣，等．基于集对分析和证据理论融合的变压器内绝缘状态评估方法 [J]．高电压技术，2014，40 (2)：474-481．

[7] 刘有为，李光范，高克利，等．制订《电气设备状态维修导则》的原则框架 [J]．电网技术，2003，27 (6)：64-67．

[8] 郝建，廖瑞金，杨丽君，等．应用频域介电谱法的变压器油纸绝缘老化状态评估 [J]．电网技术，2011，35 (7)：187-193．

[9] 王吕长，李福祺，高胜友．电力设备的在线监测与故障诊断 [M]．北京：清华大学出版社，2006．

[10] 沈阳武，彭晓涛，施通勤，等．基于最优组合权重的电能质量灰色综合评价方法 [J]．电力系统自动化，2012，36 (10)：67-73．

[11] 熊以旺，程浩忠，王海群，等．基于改进AHP和概率统计的电能质量综合评估 [J]．电力系统保护与控制，2009，37 (13)：48-52．

[12] 贾正源，赵亮．基于熵权未确知测度模型的电能质量综合评价 [J]．电力系统保护与控制，2010，38 (15)：33-37．

[13] Chen W J，Jing Z R，Zhu A F，et al．Application of amendatory mathematical model of D-S evidence theory to data fusion [J]．American Fern Journal，2009，99 (2)：61-77．

[14] 杨风暴，王肖霞．D-S证据理论的冲突证据合成方法 [M]．北京：国防工业出版社，2010．

[15] Jousselme A L，Grenier D，Éloi Bossé．A new distance between two bodies of evidence [J]．Information Fusion，2001，2 (2)：91-101．

[16] Jousselme A L，Maupin P．Distances in evidence theory：Comprehensive survey and generalizations [J]．International Journal of Approximate Reasoning，2012，53 (2)：118-145．

（收稿日期：2017－01－10）EA

(上接第75页)

[20] Martin Glinka，Rainer Marquardt．A new AC/AC multilevel converter family [J]．IEEE Transactions on Industrial Applications，2005，52 (3)：662-669．

[21] 庞辉，贺之渊，赵岩，等．一种模块化多电平变流器的均压控制方法：中国，CN102130619A [P]．2011-07-20．

[22] 徐政，管敏渊．模块化多电平换流器型直流输电系统的优化均压控制方法：中国，CN101860203A [P]．2010-10-13．

[23] 邓焰，彭浩，王昆，等．一种模块化多电平变换器电容电压的均衡方法：中国，CN104158419A [P]．2014-11-19．

[24] 王平，楚遵方，李子欣，等．一种模块化多电平变流器功率模块电容电压均压方法：中国，CN102969922A [P]．2013-03-13．

[25] 陆翌，王朝亮，彭茂兰，等．一种模块化多电平换流器的子模块优化均压方法 [J]．电力系统自动化，2014，38 (3)：52-58．

（收稿日期：2016－12－24）EA