

基于 MMC 的 STATCOM 直流侧电压均衡控制的研究

于飞¹, 李梅航¹, 陈朋², 王红蛟¹

(1. 青岛科技大学自动化与工程学院, 山东 青岛 266042; 2. 许继集团, 河南 许昌 461000)

摘要: 由于 MMC 特殊的拓扑结构, 基于 MMC 的 STATCOM 有很多的优点, 但这种拓扑也使得电容电压平衡控制成为难点。针对 MMC STATCOM 直流侧电容电压不平衡问题, 通过分析 MMC STATCOM 的数学模型, 基于解耦变换将有功和无功解耦分离, 提出通过系统直流电压控制和基于排序的均压控制来平衡其直流侧电容电压的策略。系统直流电压控制用来确定电容电压稳定基准值和有功功率的交换, 基于排序的均压策略用来平衡每个桥臂上所有子模块的电容电压。通过 Matlab/Simulink 仿真表明, 该方法可以有效地稳定 STATCOM 直流侧电压。

关键词: MMC STATCOM; DWPM; 双环控制; 直流电压控制; 均压控制

DC capacitor voltage balancing control for STATCOM based on MMC

YU Fei¹, LI Mei-hang¹, CHEN Peng², WANG Hong-jiao¹

(1. Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266042, China; 2. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: Due to its unique topology, the STATCOM based on MMC has many advantages, but this unique topology also makes the voltage balancing control of DC side capacitors more difficult. Aiming at the DC side capacitor voltage unbalancing of STATCOM, through the analysis of MMC STATCOM mathematical model, decoupling separation of the active and reactive based on the decoupling transformation, a strategy of DC voltage control and voltage-sharing based on sort algorithm to balance the DC side capacitor voltage is proposed. The steady value of capacitors voltage and active power exchange are determined by the DC voltage control and the capacitor voltage balanced by voltage-sharing based on sort algorithm. Simulation results show that this method can effectively stabilize the DC side's voltage of the MMC STATCOM.

Key words: MMC STATCOM; DPWM; double loop control; DC voltage control; balanced voltage control

中图分类号: TM76

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)11-0130-06

0 引言

模块化多电平换流器 (MMC) 在 2002 年由德国学者 R.Marquart 和 A.Lesnecar 提出后^[1], 便被广泛地应用于可再生能源系统、智能电网、柔性交流输电系统 (FACTS) 和柔性直流输电系统 (HVDC) 中^[2]。在 2010 年, MMC STATCOM 在英国和新西兰已经投入运行, 并且其他相似的工程也在陆陆续续的发展中^[3]。

MMC 是由多个级联的子模块 (SM) 组成, 这些子模块可以是半桥或者全桥 (H 桥)^[4]。本文研究的 MMC STATCOM 采用的是全桥 SM (如图 1 所示), 该拓扑结构相比于其他结构的 STATCOM 有它自己独特的优点, 比如它的交流电压和电流谐波含量少、MMC 桥臂电流连续、直流侧不再需要体积庞大的电容等等^[5-6]。正因为这些优点, 它的控

制器相比于其他拓扑结构的 STATCOM 更复杂。MMC STATCOM 模块之间的一致性较差, 而且实际系统中, 由于 STATCOM 直流侧电容损耗差异、开关损耗差异及驱动脉冲差异等原因, 均会造成 MMC STATCOM 直流侧电容电压不平衡^[7-9]。

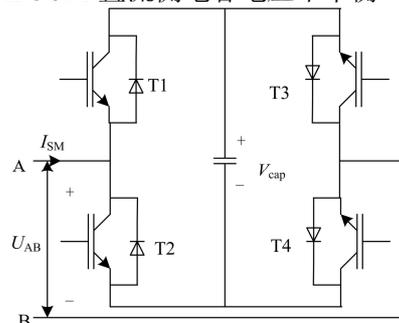


图 1 H 桥子模块的原理图

Fig. 1 Electrical schematic of full-bridge sub-module

目前直流电压平衡的控制方法有两类：一类是通过外部的平衡控制电路来实现，需要额外的硬件电路与控制系统，增加了装置的复杂性与成本，如文献[10]提出了基于交流母线能量交换的直流电压均衡控制方法；另一类是与系统进行有功交换来实现。文献[11]在 H 桥电压参考波中叠加相位修正以均压，但要求模型详细精确以整定合适的 PI 参数。有日本学者在文献[12]中采用整体、相间和独立三级平衡控制，控制思路清晰，实验结果也验证了其可行性，但是控制器参数过多且整定繁琐。本文针对 MMC STATCOM 中子模块 H 桥的特点，与逼近小数点调制方法 (Decimal PWM, DPWM) 相结合，提出了系统直流电压控制和基于排序的均压策略相结合的综合控制策略，实现了直流侧电容电压的平衡。

1 MMC STATCOM 的主电路结构和 DPWM

MMC STATCOM 的主电路拓扑结构如图 2 所示，其中的 SM 模块如图 1 所示，每个子模块都是两端元件，通过 4 个可控开关单元 T1、T2、T3 和 T4 的作用， U_{AB} 输出电容电压 U_{cap} (正投入) 或者 $-U_{cap}$ (负投入) 或者 0 (切除)，因此通过控制开关单元就可以控制每个桥臂上子模块的投入或者切除，而每个桥臂的输出电压就是这些子模块电压的叠加。

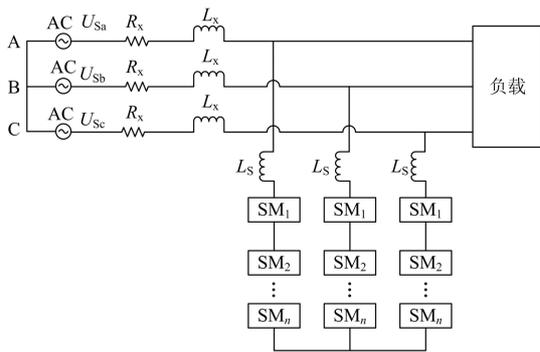


图 2 MMC STATCOM 的主电路拓扑结构

Fig. 2 Main circuit of MMC STATCOM

对于 MMC 的调制方法与传统 VSC 所使用的多电平调制方法有很多相同的地方，例如 SVPWM、NLM、CPS-SPWM 等控制方法都适合于 MMC 的调制，他们各有各的特点和优点。根据 MMC 的拓扑结构，本文选用一种适用于其特点的一种新的多电平调制方法——DPWM^[13]。

DPWM 调制方法的基本原理是对调制波采样，然后在这个采样点后的一个周期 T (两个相邻采样

点的时间间隔) 时间内通过模块投切数的变化来逼近这个采样点的值。之所以被称为 DPWM，是因为控制器将采样点的整数部分与小数部分分开，然后用小数部分与三角载波比较，产生控制信号，而不是像 SPWM 那样用正弦波与载波比较。

图 3 给出了 DPWM 调制的原理图。其中，调制波采样值用黑点标记，在接下来的一个采样间隔里会通过模块的投切来逼近虚线所表示的平均电压。因为连续的调制波是由整数部分和小数部分组成，而投入的模块数只能为整数，所以 DPWM 调制方法首先将采样点的整数部分 (m) 和小数部分 (n) 分开，然后由整数部分确定最少和最多投入模块数 (分别为 m 和 $m+1$)，由小数部分确定 m 个模块与 $m+1$ 个模块各自的投切时间。这样，在一个周期 T 内 ($T=t(k+1)-t(k)$) 投入模块的平均值就等于采样点的值。所以在 DPWM 调制方式下，只要模块数越多，采样频率越高，输出的电压就可以越接近正弦波。

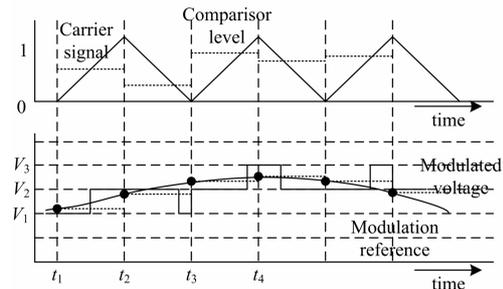


图 3 MMC 的 DPWM 调制原理图

Fig. 3 Schematic diagram of DPWM of MMC

2 MMC STATCOM 的控制策略

MMC STATCOM 稳态数学模型的建立是设计控制系统的基础。设定系统为三相平衡系统，用电阻 R 等效表示 STATCOM 中所有损耗，用电感 L 等效表示并网电感与所有线路分布电感的总和，MMC STATCOM 单相等效电路模型如图 4 所示。

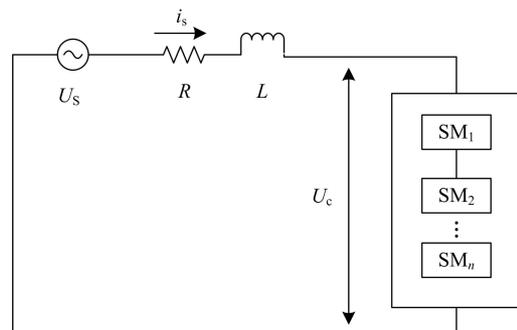


图 4 MMC STATCOM 单相等效电路

Fig. 4 Single-phase equivalent circuit of MMC STATCOM

根据图 4, 可得 MMC STATCOM 的单相等效电路模型的数学表达式为

$$L \frac{di_s}{dt} = U_s - Ri_s - U_c \quad (1)$$

对式 (1) 进行解耦变换^[14-15]可得 U_c 的有功功率和无功功率分量分别为

$$\begin{cases} U_{cd} = -(K_p + \frac{K_l}{s})(i_d^* - i_d) - \omega Li_q + U_{sd} \\ U_{cq} = -(K_p + \frac{K_l}{s})(i_q^* - i_q) + \omega Li_d + U_{sq} \end{cases} \quad (2)$$

式中: i_d^* 、 i_q^* 为电感电流期望的有功、无功分量; U_{sd} 、 U_{sq} 为 U_s 的有功、无功分量。

根据其数学模型, 我们采用了双环控制器, 外环为直流电压控制器 (如图 5) 和无功功率控制器, 可以得到电流内环所需要的有功指令电流 I_{dref} 和无功指令电流 I_{qref} 。而电流内环采用了基于电流解耦的控制器, 实现了有功功率与无功功率的独立控制, 得到的电源电压在 dq 坐标系下的参考值, 经过 dq 反变换, 就得到了所需要的调制波。然后采用 DPWM 调制策略, 就得到了桥臂需要投入的模块数, 均压控制器根据桥臂电流方向和需要投入模块数, 实现了桥臂电容电压的平衡控制, 并且得到 MMC STATCOM 每个子模块的控制信号。

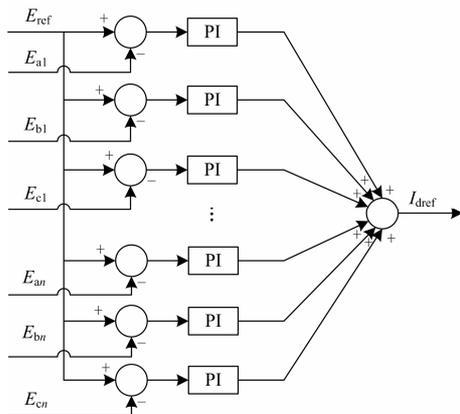


图 5 直流电压控制器

Fig. 5 DC voltage controller

而很多文章中的直流电压控制器是将各电容电压相加取平均值, 然后加入 PI 控制器得到有功电流 I_d 的指令值。但是该方法会使外环控制器响应变慢, 间接造成电容电压波动时间增加, 稳定性不好。本文所采用的直流电压控制器中, E_{a1} 、 E_{b1} 、 E_{c1} 、 \dots 、 E_{an} 、 E_{bn} 、 E_{cn} 分别为每相 n 个子模块电容电压测量值, 给定电压 E_{ref} 分别与这些测量值相减后将差值

送入 PI 调节器, 调节器的输出相加作为有功电流 I_d 的指令值, 该方法同时对各个电容电压进行 PI 控制, 可以使电容电压快速稳定, 动态响应速度很快。该控制器只能控制有功功率的交换, 确定电容电压基准值, 并不能保证所有电容的电压相同, 如果不进行电压均衡控制, 就会出现有的模块过充电, 有的模块过放电, 导致模块之间的电压严重不均衡, 甚至失控, 最终导致系统不能正常工作。因此必须要辅以均压控制器, 共同实现直流侧电容电压的均衡控制。

MMC 电容电压排序均压算法已经比较成熟, 大多是在半桥 MMC 中, 很少被用到 H 桥 MMC 中。由于 H 桥 MMC 需要 4 个驱动信号, 输出信号是三个状态 (0, 1 或 -1), 而半桥 MMC 只需要 2 个驱动信号, 输出信号是两个状态 (0 或 1), 这就决定了半桥 MMC 的电容电压排序算法与 H 桥 MMC 的电容电压排序算法会有所不同。本文借鉴半桥 MMC 中的电容电压均压算法, 根据 H 桥 MMC 拓扑结构的特点, 对这种算法加以改进, 就得到了本文所提到基于排序的均压控制器。

从 DPWM 的原理可知, 其最终产生的信号是 MMC 三相桥臂投入的模块数, 而不是每个子模块的控制信号, 所以与之对应的均压控制器除了平衡各个子模块中的电容电压外还需要产生各个子模块的控制信号。

MMC 某一时刻桥臂投入的模块数是确定的, 但是桥臂中各个模块的投切状态是不确定的。就是说, MMC 每个桥臂的任意一种开关状态可以存在多种模式开关方式的组合。利用这种冗余模式, 采用模块电容电压平衡策略。这种平衡策略以各桥臂为单位, 平衡其内部各模块的电容电压, 并根据各桥臂中每个模块电容电压大小的排序以及桥臂电流的方向来判断各个模块的投切状态。具体来说就是: 当桥臂电流方向为正, 即电流对电容充电时, 若所需要投入的模块数为 n , 此时根据电容电压的排序结果选择电容电压最低的 n 个子模块触发导通, 而桥臂剩余 $N-n$ 个子模块关断, 此时电流对 n 个子模块充电, 电容电压上升。同理当桥臂电流为负, 即电流对电容放电时, 则根据电容电压的排序结果选择电容电压最高 n 个子模块触发导通, 剩余 $N-n$ 个子模块关断, 此时电流对 n 个子模块放电, 电容电压下降。通过对各自模块充放电的合理控制, 可实现桥臂内部的各子模块电容电压的均衡。该算法流程图如图 6 所示。

(相比阶跃前) 主要原因是无功电流对于电容充放电造成的。

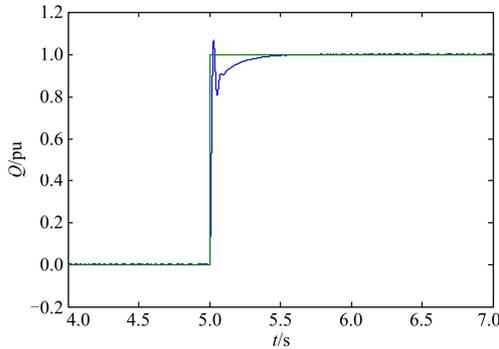


图 8 STATCOM 无功功率响应

Fig. 8 STATCOM reactive power response

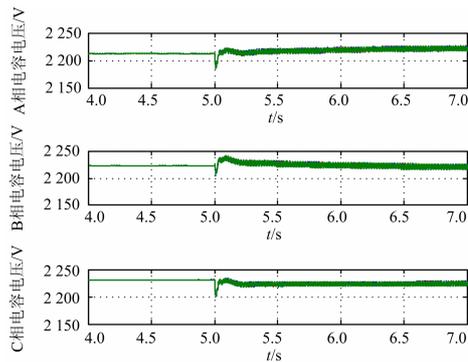


图 9 三相电容电压波形

Fig. 9 Three-phase capacitor voltages of STATCOM

为再次验证本文采用的电容电压平衡控制策略, 假设三相电容电压初始值偏离设定值, 分别为 2 000 V(0.9 pu)、2 444 V(1.1 pu)、2 200 V(0.99 pu), 相间最大偏差为 20%, 经均压控制后, 三相电容电压在 2.5 s 后达到稳定, 且均在 2 222 V 上下波动, 波动范围在 ±2% 以内, 仿真波形如图 10 所示。

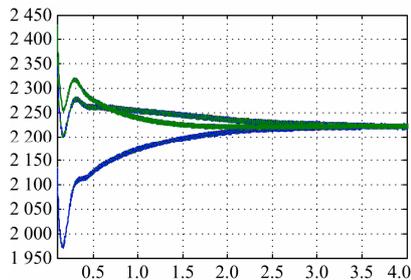


图 10 三相电容电压波形

Fig. 10 Three-phase capacitor voltages of STATCOM

4 结论

(1) 采用的适用于 MMC 拓扑结构的 DPWM

调制策略, 当模块数越多, 采样频率越高, 其输出电压就越接近正弦波, 且具有良好的谐波特性。

(2) 系统直流电压控制采用的是同时控制各个电容的电压的方法, 该控制策略响应速度快, 平衡效果好, 并且在无功功率阶跃时仍有很好的动态性能, 稳定性好。

(3) 而辅以基于排序的电容电压均压控制策略, 对其进行改进应用于 H 桥 MMC 的电容电压控制中, 各个 H 桥 MMC 子模块之间电容电压趋于一致, 电容电压趋于稳定时间很快, 电压波动也非常小。

(4) 采用系统直流电压控制, 并辅以适用于 DPWM 调制策略的基于排序的电容均压控制, 从有功功率和 H 桥 MMC 子模块之间的电容电压平衡两个方面很好地控制了直流侧的电容电压, 保证了电容电压的平衡和稳定。理论分析和仿真结果表明: 该方法可以有效解决 STATCOM 中直流侧电容电压的平衡问题, 控制效果比较好, 具有较高的工程实用价值。

参考文献

- [1] LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range[C] // IEEE Power Tech Conference Proceedings, Bologna, Italy: IEEE, 2003: 6.
- [2] 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.
- [3] PEREIRA M, RETZMANN D V, LOTTES J C, et al. SVC PLUS: an MMC STATCOM for network and grid access applications[C] // IEEE Power Tech, IEEE, Trondheim, Norway, 2011: 6.
- [4] MARQUARDT R. Modular multilevel converter topologies with DC-short circuit current limitation[C] // IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE&ECCE). IEEE, Jeju, Korea, 2011: 5-6.
- [5] 张振华, 江道灼. 基于 MMC 拓扑的 UPFC 控制策略仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 73-77. ZHANG Zhen-hua, JIANG Dao-zhuo. Control strategy simulation of UPFC based on modular multilevel converters[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 73-77.
- [6] 薛英林, 徐政. 基于箝位双子模块的 MMC-HVDC 起动作控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11):

- 1-7.
XUE Ying-lin, XU Zheng. Start control for the MMC-HVDC system based on clamp double submodule[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 1-7.
- [7] 杨晓峰, 范文宝, 王晓鹏, 等. 基于模块组合多电平变换器的 STATCOM 及其控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(8): 7-13.
YANG Xiao-feng, FAN Wen-bao, WANG Xiao-peng, et al. Static Synchronous compensator based on modular multilevel converter based STATCOM and its control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(8): 7-13.
- [8] 朱劲松, 李磊. 基于模块化多电平换流器的 STATCOM 分析与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 113-117.
ZHU Jing-song, LI Lei. Analysis and control of STATCOM based on modular multilevel converters[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 113-117.
- [9] 宫力, 康勇, 陈晶晶, 等. 链式 STATCOM 直流电容电压分布式控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 217-223.
GONG Li, KANG Yong, CHEN Jing-jing, et al. DC capacitor voltage distributed control system for cascaded multilevel STATCOM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 217-223.
- [10] WOODHOUSE M L, DONOGHUE M W, OSBOME M M. Type testing of the GTO valves for a novel STATCOM converter[C] // 7th International Conference on AC-DC Power Transmission, London, United Kingdom, 2011.
- [11] YANG Xing-wu, JIANG Jian-guo, LIU Shi-chao. A novel design approach of DC voltage balancing controller for cascaded H-bridge converter-based STATCOM[C] // Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC 2009), IEEE, Wuhan, China, 2009: 5.
- [12] AKAGI H, INOUE S, YOSHII Y. Control and performance of a transformerless cascade PWM STATCOM with star configuration[J]. IEEE Trans on Industry Application, 2007, 43(4): 1041-1049.
- [13] ANTONOPOULOS A, ANGQUIST L, NEE H P. On dynamics and voltage control of the modular multilevel converter[C] // EPE'09. 13th European Conference on Power Electronics and Applications, IEEE, Barcelona, Spain, 2009: 9.
- [14] 李圣清, 徐文祥, 栗伟周, 等. 风电场中级联 STATCOM 直流侧电压控制方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 248-253.
LI Sheng-qing, XU Wen-xiang, LI Wei-zhou, et al. DC capacitor voltage balancing control for cascade STATCOM in wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 248-253.
- [15] 江道灼, 张振华. 三相 H 桥级联静止同步补偿器的控制策略[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 2024-2031.
JIANG Dao-zhuo, ZHANG Zhen-hua. Control scheme of three-phase H-bridge cascaded STATCOM[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(8): 2024-2031.

收稿日期: 2013-08-26; 修回日期: 2013-12-19

作者简介:

于飞(1961-), 男, 教授, 研究生导师, 研究方向为智能控制;

李梅航(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能控制; E-mail: 632884326@qq.com

陈朋(1986-), 男, 工程师, 从事柔性输电直流控制的研究。