

# 一种新型的混合MMC预充电策略

谭伦农, 韩磊

(江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要:**模块化多电平换流器(MMC)的预充电是保证MMC-HVDC系统正常运行的基础,其中同时包含全桥子模块(FBSM)和半桥子模块(HBSM)的混合型MMC拥有较强的直流故障穿越能力而成为研究的热点。由于全桥子模块和半桥子模块的充电特性不同,子模块(SMs)的电容器电压在不受控制的预充电过程结束时可能会有所不同。通过分析指出了混合型MMC常规不控充电策略的缺陷,然后提出了一种三阶段预充电策略。该策略可以消除不同类型子模块的电容器电压不平衡,解决了半桥子模块预充电过程中自取能量不成功的问题。最后,基于所提出的策略对不受控预充电过程进行了仿真和分析。

**关键词:**模块化多电平换流器;全桥子模块;半桥子模块;预充电策略

**中图分类号:**TM721 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed21623

## A New Precharging Strategy for Hybrid MMC

TAN Lunnong, HAN Lei

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China)

**Abstract:** Precharging process of the modular multilevel converter (MMC) is the basis to ensure the normal operation of MMC-HVDC system. The hybrid MMC, which includes both full-bridge sub-modules (FBSM) and half-bridge sub-modules (HBSM), has DC fault ride-through capability and has become a hot research topic. Due to the different charging characteristics of the full-bridge sub-module and the half-bridge sub-module, the sub-modules (SMs) capacitor voltages may be different at the end of the uncontrolled precharging process. Based on analysis, the defects of the conventional uncontrolled charging process of hybrid MMC were pointed out. Then a three-stage precharging strategy was proposed. This strategy can eliminate the capacitor voltages imbalance of different types of SMs and solve the problem of unsuccessful self-taking energy during HBSM precharging process. Finally, simulation and analysis of the uncontrolled precharging process based on the proposed strategy were carried out.

**Key words:** modular multilevel converter (MMC); full-bridge sub-module (FBSM); half-bridge sub-module (HBSM); precharging strategy

模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)由德国学者 R.Marquardt 于 2001 年首次提出,其优越的特性使柔性直流输电成为近年来研究的热点<sup>[1-3]</sup>。在 MMC 柔性直流输电系统运行中,设置预充电可以避免出现较大的冲击电流,因此有必要对其预充电进行研究。目前对半桥型 MMC 预充电策略的研究较为充分<sup>[4-5]</sup>,但对混合子模块的充电研究较少。混合型 MMC 主要沿用半桥型 MMC 的预充电模式,但是由于充电过程中,全桥子模块(full-bridge sub-modules, FBSM)的充电速度是半桥子模块(half-bridge sub-

modules, HBSM)的 2 倍,所以在不控充电结束后两者电压有着很大差异,同时在后续的充电过程中,HBSM 的工作依赖于自取电能,子模块自取能的启动电压一般为额定电压的 25%,HBSM 在此过程结束后可能达不到取能要求,同时两类模块的比例也会影响充电结果,因此需要提出一种通用的策略来对混合子模块进行充电。文献[6]对混合型 MMC 的启动进行了数学上的理论推导,提出令 FBSM 工作在 HBSM 的模式来解决电压不均衡问题,但忽略了初始状态下 FBSM 同样存在自取能不足的问题。文献[7]提出了将两类子模

块分组充电的方式,这种方法增加了充电时间且操作复杂。文献[8]提出了启动过程限流电阻保护策略。

本文对现有策略进行改进,通过FBSM延迟投入的方式消除了FBSM与HBSM电压不均的现象,待两类子模块电压相等时令FBSM工作在HBSM状态,消除了子模块充电速度差异的同时解决了FBSM占比较高时HBSM自取能不足的问题,该方法避免了分组充电且无需多次触发IGBT动作,降低了复杂性,对不同于子模块配置比的混合型MMC有广泛的适应性。

### 1 传统不控充电分析

图1为基于HBSM和FBSM的子模块混合型MMC以及两类子模块拓扑图。每相由上、下两个桥臂组成,每个桥臂有 $N_h$ 个HBSM和 $N_f$ 个FBSM,其中 $L_0$ 为桥臂电抗。

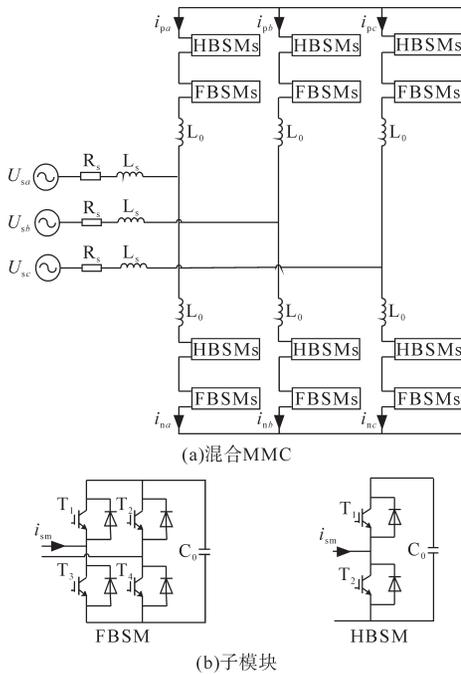


图1 混合MMC与子模块拓扑图

Fig.1 Topology of hybrid MMC and SMs

由于启动时子模块电容达不到IGBT自取能的要求,半桥子模块和全桥子模块全部处于闭锁状态,交流线电压对两桥臂中 $N_h$ 个半桥子模块和 $2N_f$ 个全桥子模块进行充电,以 $U_{ab}$ 为例, $a, b$ 两相上桥臂充电如图2所示。

当不控充电结束时,全桥子模块电压 $U_{cf}$ ,半桥子模块电压 $U_{ch}$ 以及交流线电压峰值 $U_1$ 的关系如下:

$$N_h U_{ch} + 2N_f U_{cf} = U_1 \quad (1)$$

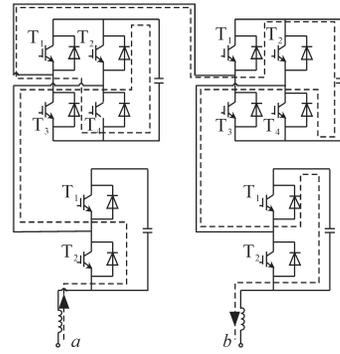


图2  $U_{ab}$ 不控充电回路

Fig.2 Uncontrolled charging circuit of  $U_{ab}$

图2中, $a$ 相上桥臂的全桥子模块通过 $T_2$ 和 $T_3$ 所对应的的反并联二极管进行充电,而 $b$ 相上桥臂的全桥子模块通过 $T_1$ 和 $T_4$ 的反并联二极管进行充电,也就是说无论充电电流 $i_{sm}$ 方向如何,FBSM始终处于充电状态,而HBSM只有在充电电流 $i_{sm}$ 与参考方向相同时才会充电,因此HBSM充电时间只有FBSM的1/2,分析可得,不控充电结束时全桥子模块的电压是半桥子模块的2倍,即

$$U_{cf} = 2U_{ch} \quad (2)$$

MMC正常运行时直流侧电压 $U_{dc}$ 与交流相电压幅值 $U_p$ 满足如下关系:

$$\frac{U_p}{U_{dc}/2} = M \quad (3)$$

式中: $M$ 为调制比,一般取0.85。

MMC正常运行时子模块额定电压记为 $U_{cr}$ ,在不考虑子模块冗余和全桥子模块负电平工作的情况下, $U_{dc}$ 等于某个桥臂所有子模块电压之和,即

$$U_{dc} = (N_f + N_h)U_{cr} \quad (4)$$

结合式(1)~式(4)可得:

$$\frac{U_{ch}}{U_{cr}} = \frac{\sqrt{3}}{2} M \frac{1+k}{1+4k} \quad (5)$$

其中

$$k = N_f / N_h$$

由于HBSM与FBSM充电速度不同,不同比例情况下不控充电结束时HBSM获取的电能不能尽相同,FBSM比例的增加会减少HBSM充电时能量获取,系统不控充电结束时, $U_{ch}/U_{cr}$ 与 $k$ 的关系如图3所示。

由于IGBT的触发依赖于自取能电源,当子模块电容电压较低时,子模块闭锁,自取能的电容电压一般为正常运行的25%。由图3可知,当 $k$ 大于2.5时HBSM的电容电压小于额定值的25%,

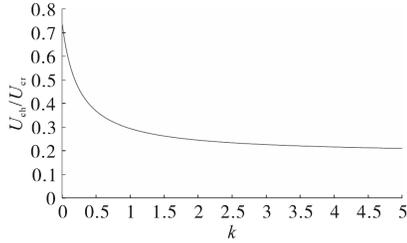


图3 不控充电结束时  $U_{ch}/U_{cr}$  与  $k$  的关系

Fig.3 Relationship between  $U_{ch}/U_{cr}$  and  $k$  at the end of uncontrolled precharging stage

此时HBSM处于不控状态,因此系统无法进入可控充电阶段。本文对已有充电策略进行改进,在不控充电结束时满足子模块自取能的同时,解决不同类型子模块电压不均衡的问题。

## 2 改进的充电策略

将不控充电分为HBSM充电、FBSM升压和半控充电3个阶段,流程图如图4所示。

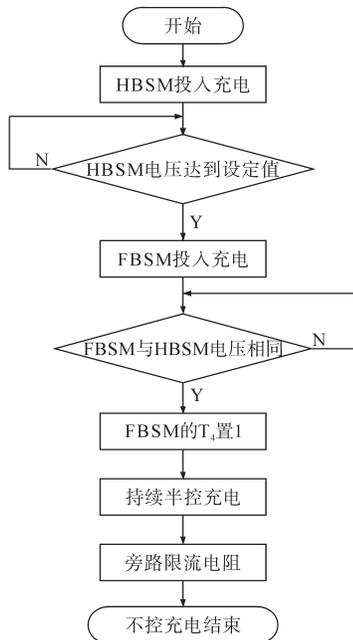


图4 改进的混合MMC充电策略流程图

Fig.4 Flow chart of improved hybrid MMC charging strategy

### 2.1 HBSM 充电阶段

在启动的初期仅投入HBSM进行充电,将FBSM暂时旁路,此时充电模式与半桥型MMC不控充电阶段相同。MMC充电的本质是一个RLC回路,流过子模块的电流  $i_{sm}$  为正时,电容充电,当  $i_{sm}$  为负时,则不充电也不放电。系统启动时各子模块电容电压为0,因此充电回路中的子模块无法提供反向电动势,两相间相当于短路,从而产生较大的冲击电流,为此有必要接入限流电阻。考虑到不控充电过程中电流大小难以精确计算,

可以近似认为交流线电压第一次达到峰值时充电电流为最大值,设充电电流最大值为

$$I_{max} = \frac{2U_1}{\sqrt{(2R_{lim})^2 + (\omega L_0 - \frac{N_h}{\omega C})^2}} \quad (6)$$

式中:  $\omega$  为MMC交流侧角频率;  $C$  为子模块电容。因此,限流电阻应满足以下条件:

$$R_{lim} \geq \sqrt{\frac{U_1^2}{I_{max}^2} - (\omega L_0 - \frac{N_h}{2\omega C})^2} \quad (7)$$

### 2.2 FBSM 升压阶段

HBSM 电容电压达到一定值后,将FBSM投入到充电过程中,利用全桥子模块充电速度是半桥子模块2倍的特点,使其电容电压快速追平半桥子模块,当FBSM与HBSM电容电压相同并满足半控充电阶段的电容电压自取能要求时,进入半控充电阶段。阶段结束时子模块电压取决于FBSM投入的时刻,值得注意的是,如果过早投入FBSM,当FBSM和HBSM电压持平时模块达不到自取能要求,则无法进入半控充电阶段;如果投入时刻过晚,不控充电结束时FBSM达不到HBSM的电容电压,造成电容电压不均衡,因此将FBSM投入的时刻有一定的要求。

以极限情况为例,假设两类子模块电压相等时回路中子模块电压之和恰好等于线电压幅值,此时子模块电压为

$$U_{c1} = \frac{U_1}{N_h + 2N_f} \quad (8)$$

结合式(3)、式(4)可得:

$$\frac{U_{c1}}{U_{cr}} = \frac{\sqrt{3}}{2} M \frac{1+k}{1+2k} \quad (9)$$

当  $k$  取正无穷时,式(9)为最小值,此时  $U_{c1}/U_{cr}$  仍然大于0.25,即满足阶段要求的情况下子模块电容电压始终满足其自取能要求。假设FBSM投入时HBSM的电容电压为  $U_{h1}$ ,FBSM投入到此阶段结束时HBSM电压增量为  $U_{h2}$ ,FBSM的电容电压为  $2U_{h2}$ ,此时应有:

$$U_{h1} + U_{h2} = 2U_{h2} \quad (10)$$

由式(10)可得,阶段结束时所有子模块电压均为  $2U_{h1}$ ,为满足子模块自取能要求阶段结束时FBSM电容电压应大于25%,结合式(9)可得约束条件:

$$\frac{1}{4} U_{cr} \leq 2U_{h1} \leq \frac{\sqrt{3}}{2} M \frac{1+k}{1+2k} U_{cr} \quad (11)$$

即FBSM投入充电时,HBSM的电容电压应在

$[\frac{1}{8}U_{cr}, \frac{\sqrt{3}}{4}M\frac{1+k}{1+2k}U_{cr}]$ 范围内。

### 2.3 半控充电阶段

上个阶段结束时FBSM与HBSM电压相等且满足自取能要求,将IGBT4常置1,此时FBSM只能通过IGBT1对应的反并联二极管进行充电,当 $i_{sm}$ 为负时,子模块电容被 $T_3$ 和 $T_4$ 的反并联二极管短路,进而无法充电,该模式下两类子模块充电速度相同,即只在电流 $i_{sm}$ 为正时才进行充电。同时,该阶段子模块电容已具备一定的电压水平,参与充电的子模块在充电回路中提供一定的反向电动势,即便将限流电阻旁路,充电电流也远远小于系统启动时的电流水平,此时旁路限流电阻可以减少损耗,加快子模块充电速度。当子模块电容电压趋于平稳时阶段结束,结束时子模块电压为

$$U_{c2} = \frac{U_1}{N_h + N_f} \quad (12)$$

## 3 仿真结果

为了验证文中所提出的充电策略,在PSCAD/EMTDC中搭建了混合MMC系统,系统交流线电压有效值为300 kV,全桥子模块与半桥子模块个数均为12个,即 $k=1$ ,子模块电容 $C=5\ 000\ \mu\text{F}$ ,桥臂电抗 $L_0=5\ \text{mH}$ ,限流电阻 $R_{lim}=500\ \Omega$ ,额定直流电压 $U_{dc}=560\ \text{kV}$ 。预充电阶段两类子模块电压波形、直流电压及桥臂电流波形如图5~图8所示。

由图5~图8可以看出,系统启动瞬间桥臂冲击电流 $i_{pa}$ 达到最大值,由于FBSM被旁路,当HBSM电容开始充电的同时FBSM电容电压始终保持为0,HBSM只能在 $i_{sm}$ 为正时进行充电,因此其电压呈阶梯状上升。由于限流电阻的存在,启动电流被限制在一个较小的值,避免冲击电流过大对子模块的影响,同时限流电阻不宜过大,否则充电时间会随之增加。0.15 s时,FBSM投入充电,由于FBSM特殊的充电特性,其电容电压迅速上升,速度大约为HBSM的2倍,因此FBSM可以快速追平HBSM的电压水平。0.45 s时,FBSM与HBSM电容电压相同,约为8.2 kV,正常运行时子模块电容电压为24 kV,此时子模块电压大于正常运行时25%,即满足自取能要求,随后将FBSM的IGBT4置1使其工作在HBSM模式,进而使两类子模块获得完全相同的充电速度。混合MMC

在不控充电阶段,直流电压由上、下两桥臂参与充电的HBSM和FBSM决定,不控充电时上、下桥臂的FBSM电压方向相反而抵消,此时的直流电压等于单桥臂HBSM子模块电压之和,当FBSM工作在HBSM模式时,直流电压为单桥臂FBSM与HBSM子模块电压总和,因此0.45 s时直流电压发生了跃升。同时,由于充电回路中的子模块数量减少了 $N_f$ 个,0.45 s时充电电流再次升高。3 s时两类子模块电压约为17 kV,不控充电阶段结束。

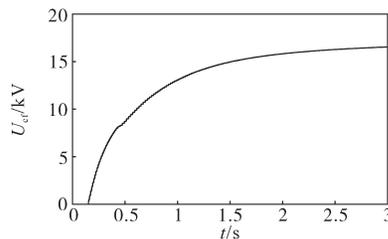


图5 a相上桥臂FBSM电容电压

Fig.5 FBSM capacitor voltage of upper arm in phase a

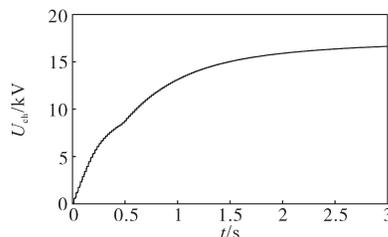


图6 a相上桥臂HBSM电容电压

Fig.6 HBSM capacitor voltage of upper arm in phase a

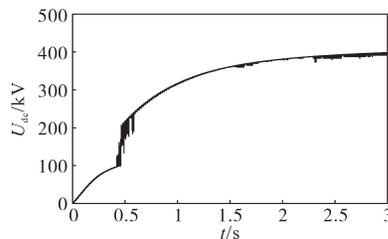


图7 直流电压波形

Fig.7 Waveform of DC side voltage

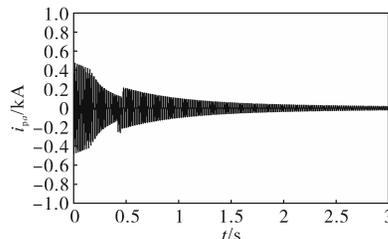


图8 a相上桥臂电流波形

Fig.8 Waveform of upper arm current in phase a

## 4 结论

本文分析了混合MMC传统的充电策略,指  
(下转第43页)

- [8] 魏剑啸,粟忠来,杨波,等. 配电台区无功功率及三相不平衡电容调节的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 71-79.
- [9] 胡翔,邵叶晨,雷超,等. 计及电压不可行节点的配电网低电压治理方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 102-109.
- [10] 肖宏,何森,董伟,等. 基于宽幅调压器与电容器组合的农网低电压治理方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37(6): 156-159.
- [11] 孟晓芳,王俊,王英男,等. 计及分布式电源局部调压能力的10 kV 配电网低电压治理方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 65-72.
- [12] 杨伟奇,高晓阳,朴在林. 中压配电网低电压补偿调控技术及实现[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S1): 198-202.
- [13] 马保慧,程盛,史书怀,等. 基于混合子模块MMC结构的直流变压器控制策略[J]. 电气传动, 2019, 49(10): 75-79.
- [14] 孟凡刚,满忠诚,高蕾. 基于电力电子移相变压器的12脉波整流技术[J]. 电工技术学报, 2019, 34(18): 3865-3872.
- [15] 辛业春,张弛,于温方,等. 配网末端低电压串联补偿控制方法及装置设计[J]. 电测与仪表, 2020, 57(7): 126-133.
- [16] Dargahi M, Ghosh A. Controlling current and voltage type interfaces in power-hardware-in-the-loop simulations[J]. IET Power Electronics, 2014, 7(10): 2618-2627.
- [17] 辛业春,王威儒,李国庆,等. 多端柔性直流输电系统数字物理混合仿真技术[J]. 电网技术, 2018, 42(12): 3903-3909.
- [18] Dallago E, Danioni A, Marchesi M, *et al.* An autonomous power supply system supporting low-power wireless sensors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(10): 4272-4280.
- [19] 赵泽生,张向前,赵磊,等. 基于MSP430单片机的制动单元设计[J]. 电气传动, 2014, 44(11): 65-68.

收稿日期:2020-03-10

修改稿日期:2020-03-18

(上接第37页)

出了在全桥子模块占比较高时,不控充电结束时HBSM存在自取能不足的问题,为解决该问题,提出了一种将FBSM延迟投入的策略,在保证HBSM自取能的情况下平衡了不控充电结束时两类子模块电压不均的问题。同时,考虑到半控充电结束时FBSM与HBSM子模块电压和为线电压幅值,为了保证两类子模块电压均衡,对FBSM延迟投入的时间提出了要求,同时该方法对于不同子模块比例的混合MMC广泛适用。

#### 参考文献

- [1] 赵成勇,陈晓芳,曹春刚,等. 模块化多电平换流器HVDC直流侧故障控制保护策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 82-87.
- [2] Solas E, Abad G, Barrena J A, *et al.* Modular multilevel converter with different submodule concepts—part I: capacitor voltage balancing method[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(10): 4525 - 4535.
- [3] 董云龙,凌卫家,田杰,等. 舟山多端柔性直流输电控制保护系统[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 169-175.
- [4] 孔明,邱宇峰,贺之渊,等. 模块化多电平式柔性直流输电换流器的预充电控制策略[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 67-73.
- [5] 周月宾,江道灼,郭捷,等. 模块化多电平换流器型直流输电系统的启停控制[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 204-209.
- [6] 赵文强,高得力,马云龙,等. 基于混合式MMC的混合高压直流输电系统启动策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 62-70.
- [7] Zeng R, Xu L, Yao L, *et al.* Precharging and DC fault ride-through of hybrid MMC-based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1298-1306.
- [8] 李超,李钢,董云龙,等. MMC-HVDC启动过程用限流电阻保护策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 39-45.

收稿日期:2020-03-13

修改稿日期:2020-03-24