

DOI: 10.7667/PSPC180305

柔性直流输电系统 MMC 换流阀闭环充电策略

张浩¹, 刘欣和¹, 王先为¹, 杨美娟¹, 行登江¹, 姚为正², 吴金龙³

(1. 西安许继电力电子有限公司, 陕西 西安 710075; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 3. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 随着柔性直流输电系统的快速发展与广泛应用, 其启动工况愈发具有多样性, MMC 换流阀传统开环充电策略需要综合考虑系统状态变量进行参数配置, 且配置难度大。由此提出了通用性的换流阀闭环充电控制策略, 无需检测系统状态即能将子模块稳态电压控制在额定值, 具有较好的适应性。首先, 分析了柔性直流输电系统的三类充电回路及主动均压充电策略。其次, 基于子模块特性不一致的均压需求分析, 提出了完整的通用性闭环充电策略及对应的柔性直流输电系统的协调启动策略。最后通过 PSCAD/EMTDC 搭建了三端直流电网模型, 仿真验证了闭环充电策略。结果表明闭合充电策略适用于各类换流站的启动充电过程, 且可将子模块电压平稳充电至额定值, 同时不存在桥臂过流及子模块过压等现象。

关键词: 模块化多电平换流器; 柔性直流输电; 直流电网; 闭环充电策略; 子模块均压; 协调启动策略

Closed-loop charging strategy of MMC in flexible DC transmission system

ZHANG Hao¹, LIU Xinhe¹, WANG Xianwei¹, YANG Meijuan¹, XING Dengjiang¹, YAO Weizheng², WU Jinlong³

(1. Xi'an Xuji Power Electronics Technology Corporation, Xi'an 710075, China;

2. XJ Electric Co. Ltd., Xuchang 461000, China; 3. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: With the rapid development and wide application of the flexible DC transmission system, its starting conditions are more and more diverse. Traditional open-loop charging strategy of MMC valve requires comprehensive consideration of the system state variables for parameter configuration, and the configuration is difficult. Therefore, a general-purpose closed-loop charging strategy for the converter valve is proposed, which can control the steady state of the sub-module at a rated voltage without detecting the system state, and has a good adaptability. First of all, three kinds of charging loops and active voltage equalization charging strategies of flexible HVDC transmission systems are analyzed. Secondly, based on the analysis of equalization requirements of submodules with inconsistent characteristics, a complete universal closed-loop charging strategy and the coordination start strategy of multi-terminal flexible DC transmission system are proposed. Finally, a three-terminal DC grid model is built through PSCAD/EMTDC. Simulation results show that the closed-loop charging strategy can be generally applicable to the startup charging process of various converter stations, ensuring the submodules steadily charge to the rated voltage without bridge arm overcurrent and submodules overvoltage.

This work is supported by National Science and Technology Grant Program of China (No. 2015ZX02301003) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. [2017]).

Key words: modular multi-level converter; flexible DC transmission; DC power grid; closed-loop charging strategy; sub-module voltage balance; coordination start strategy

0 引言

随着柔性直流输电系统的发展, 模块化多电平

换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)^[1-5]因其具备模块化设计, 谐波含量低、损耗小等诸多优点^[6-8], 得到国内外学者的广泛关注和大规模的推广应用。目前, 国内已投运了包括南澳三端柔性直流输电工程、舟山五端柔性直流输电工程、厦门双端柔性直流输电工程、鲁西背靠背柔性直流异步联网工程等,

基金项目: 国家科技重大专项(2015ZX02301003); 国家电网公司科技项目资助([2017])

渝鄂背靠背联网工程正在建设中, 张北四端柔性直流输电工程已开工建设^[9-11]。

同时新能源并网的规模化发展及电力输送需求的日益提高, 正促使柔性直流输电系统朝着多端、高压大容量及直流电网的方向发展, 以结合储能技术最大限度地接纳风能、太阳能等新能源。但随着柔性直流输电系统的复杂化, 其 MMC 换流阀启动充电过程受到换流站连接方式、站控方式和交直流电压状态等因素的影响, 其充电策略需要综合考虑系统状态变量进行参数配置, 配置难度逐渐增大。

目前, 国内外学者对柔性直流输电系统 MMC 换流阀启动的研究较多。文献[12-13]给出了 MMC 换流阀在不控充电后直接解锁, 通过双闭环控制继续完成子模块充电的控制策略, 但交流无源换流站直流侧启动过程存在直流电压跌落等问题。文献[14]通过在桥臂中串联限流电阻完成直流侧充电, 文献[15]则通过直流侧软启电阻完成换流站黑启动充电, 两者均可抑制冲击电流, 但会增大一次设备投入。文献[16-17]提出了换流器有源、无源充电回路下半闭锁充电方法, 文献[18]则通过旁通桥臂内部分子模块方法, 均可将子模块充电至额定值, 但工况讨论不够全面, 未对交直流混合充电进行研究。

上述文献均未给出通用性的闭环充电控制策略, 需要针对不同换流站状态进行特定的充电配置。文献[19]中针对多端柔性直流输电系统提出了闭环充电策略, 但该闭环充电策略需基于交直流电压状态判断且并不完善, 在直流充电向交直流混合充电转换等特殊工况下会产生子模块过压故障等风险。

基于现有文献对通用性充电控制策略研究的不足, 本文提出了相对完善的闭环充电控制策略, 对不同充电工况均具有较好的适应性。首先对常规充电策略的三类充电回路及对应主动均压充电策略进行阐述, 其次基于子模块特性不一致的均压需求分析, 提出了柔性直流输电系统的协调启动策略及通用性闭环充电策略。该方案可统一配置在柔性直流输电系统中, 在不受系统因素影响的情况下, 将子模块电压充电至额定电压。本文所述的闭环充电策略适用于各类柔性直流输电系统及柔性直流电网^[20]的不同类型换流站启动过程。

1 常规充电策略

启动充电策略是以单个换流器的充电策略为基础, 结合不同换流站的交直流带电状态, 通过协调配合完成换流站启动过程。下文将梳理不同充电回路下各充电阶段的通用充电策略。

按照换流器所连交流或直流系统的带电状态,

有三种充电回路。对应每种充电回路的充电过程又均可分为两个阶段, 子模块不控充电阶段和主动均压充电阶段。

1.1 交流侧充电过程

交流线电压构成的激励源跨接于两个相单元阀出口处, 与两相上桥臂构成回路, 也同时与两相下桥臂构成回路, 如图 1 所示。

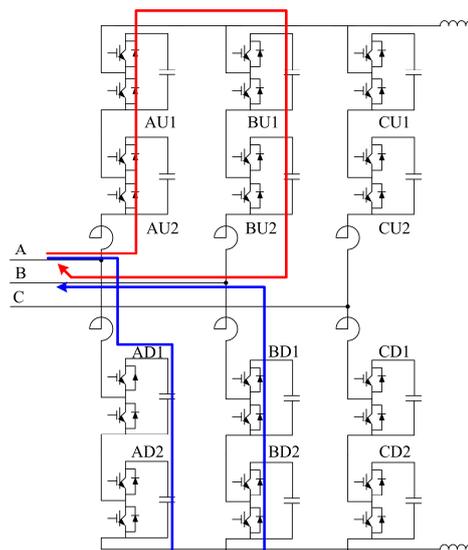


图 1 系统交流启动充电回路

Fig. 1 AC charging circuit

工程实际中, IGBT 器件多采用子模块电容自取电方式。充电初始时段, 子模块电容电压不足以为 IGBT 驱动电路供电, 子模块均处于闭锁状态, 该阶段即为不控充电阶段, 也即自然整流。

以 A、B 相为例说明交流侧充电时的充电回路。假设相电压 $u_A > u_C > u_B$, 且 u_{AB} 大于 B 相上桥臂子模块电容电压和, 则充电电流流过 A 上桥臂子模块下管的反并联二极管与 B 上桥臂子模块上管的反并联二极管、电容器, 为 B 相上桥臂子模块电容充电; 同时, 充电电流也会流经 A 下桥臂子模块上管的反并联二极管、电容器以及 B 下桥臂子模块下管的反并联二极管, 为 A 下桥臂的子模块电容进行充电。其等效的充电回路如图 2 所示。其他相桥臂的子模块电容充电情况类似, 充电桥臂根据线电压的交替三相轮换, 各桥臂充电时间均为 1/3 工频周期。

考虑到不控充电阶段子模块电容电压不能充电至额定值, 若直接解锁换流器将造成较大的冲击电流。另一方面, 随着不控充电的持续进行, 子模块电容电压逐渐上升, 将达到为 IGBT 驱动电路供电的要求, 具备控制条件。因此有必要在上电后, 转入主动均压充电方式, 从而提升子模块电压到额定值, 达到减小冲击电流的目的。

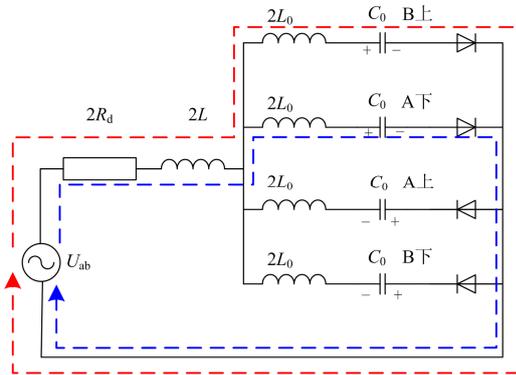


图 2 交流启动等效充电回路 (AB 相)

Fig. 2 AC charging equivalent circuit (phase AB)

其中一种方法是通过切除桥臂内部分子模块来减少串入充电回路中的子模块电容数，可提高单个子模块电容电压。同时考虑到子模块均压问题，需要采取主动均压充电策略，对桥臂内所有子模块进行电压排序，切除桥臂内电压最高的部分子模块，其他子模块保持闭锁状态。由于交流侧充电回路的对称性，各桥臂子模块切除数保持一致，即能保障不同桥臂内的子模块电容电压也基本一致。

通过调节子模块切除数，可以控制该充电回路对应的子模块稳态电压值。桥臂内子模块总数为 \$N\$，则将子模块电压充电至额定电压 \$V_{sm}\$ 的理论子模块切除数为

$$n = \text{round}(N - V_{ac_peak} / V_{sm}) \quad (1)$$

式中，\$V_{ac_peak}\$ 为交流侧线电压峰值。通过对 \$n\$ 的合理取值，使子模块电压充电完成后达到额定电压，进而解决解锁时电流冲击的问题。同时子模块切除数需要在子模块上电后从 0 逐步增加至 \$n\$，避免同时切除过多子模块引起充电回路电压突降而导致电流冲击。

1.2 直流侧充电过程

当 MMC 换流器交流侧无激励源，而直流侧有激励源时，仅通过直流激励源向换流器子模块电容器充电的方式称为直流侧充电。

对于直流侧充电的换流器，直流正负母线电压由直流激励源决定。直流激励源分别与 A、B 和 C 相的上、下桥臂构成充电回路，通过同一相单元中子模块上管反并联二极管对子模块电容器进行充电。图 3 给出了换流器直流启动充电回路示意图。

此时充电回路同样为 RLC 回路，如图 4 所示。同一相单元所有子模块电容电压之和的稳态值将与直流电压相等。

直流侧不控充电完成后，其子模块电容稳态电压不足额定电压的一半，同样不能直接解锁换流器，

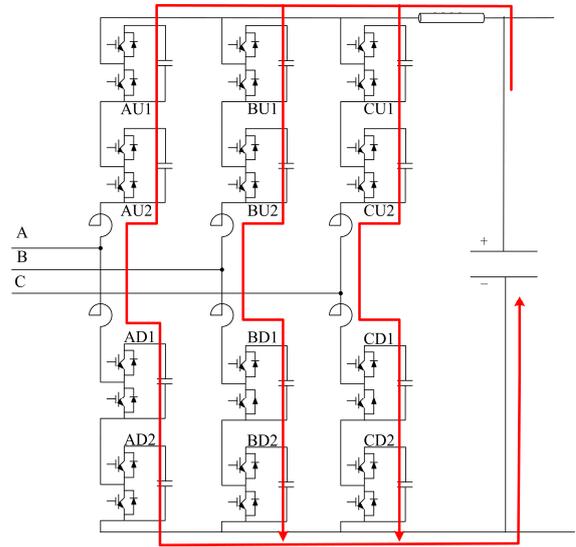


图 3 换流器直流启动充电回路

Fig. 3 DC charging circuit of converter

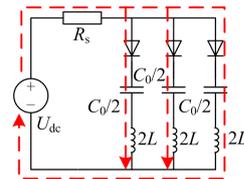


图 4 换流器直流启动等效充电回路

Fig. 4 DC charging equivalent circuit of converter

否则会引起电流冲击。因此，需要在子模块电容电压通过不控充电而达到 IGBT 驱动电路的供电要求后，及时转为主动均压充电方式，将子模块电容电压充电至额定电压。

主动均压充电策略与交流侧充电基本一致，能够保障桥臂内子模块电压均衡。将子模块电压充电至额定电压 \$V_{sm}\$ 的理论子模块切除数为

$$n = \text{round}(2N - V_{dc} / V_{sm}) \quad (2)$$

式中，\$V_{dc}\$ 为额定直流电压。子模块切除数需要逐步增加，令子模块电压最终稳定于额定电压，避免充电过程中的电流冲击。

1.3 交直流混合充电过程

当换流器交流侧有激励源，直流侧也有激励源时，将同时通过交流和直流激励源向换流器子模块电容器充电，此充电方式称为交直流混合充电。

对桥臂充电的最大激励源是由正负直流电压差、阀侧线电压组成，充电回路及其等效电路如图 5、图 6 所示。图中 \$u_B > u_C > u_A\$，也即 B 相电压最高，A 相电压最低，因此电流会流经 B 下桥臂上管的反并联二极管和电容以及 A 上桥臂上管的反并联二极管和电容，为两个桥臂电容充电，其余桥臂无电流。

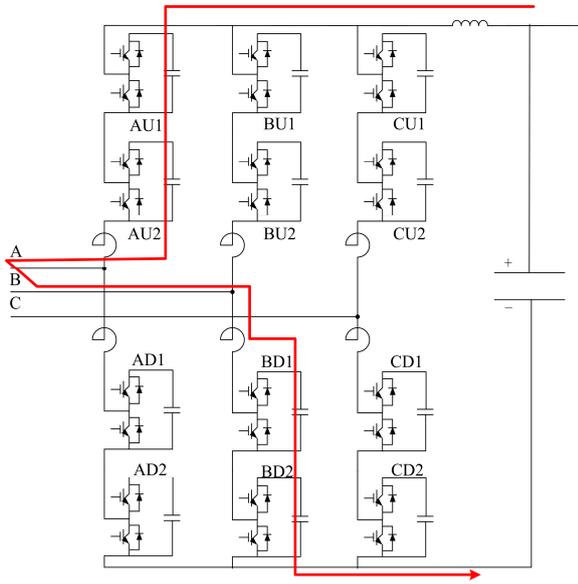


图 5 换流器交直流启动充电回路

Fig. 5 AC/DC charging circuit of converter

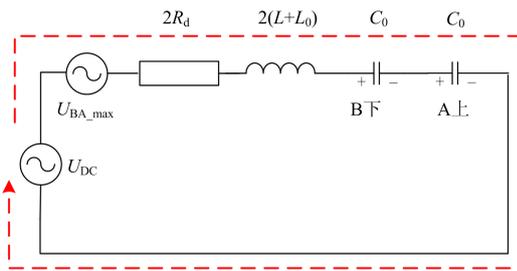


图 6 换流器交直流启动等效充电回路

Fig. 6 AC/DC charging equivalent circuit of converter

其主动均压充电策略与交流侧充电基本一致，能够保障桥臂内子模块电压均衡。将子模块电压充电至额定电压 V_{sm} 的理论子模块切除数为

$$n = \text{round} \left[N - \left(V_{dc} + V_{ac_peak} \right) / 2V_{sm} \right] \quad (3)$$

2 闭环充电策略

随着柔性直流输电系统的发展，换流阀主动均压充电配置方案根据换流站交、直流连接状态等因素的影响进行调整，需要控制保护装置为阀控装置实时传递状态信息。现有工程中大多仅传递交流有源/无源信号，以区别系统是否为直流侧充电，并不能区分交流侧充电和交直流混合充电。而采用常规开环充电策略，通过直接设定子模块切除数，并不能保证在交流侧充电及交直流混合充电两种工况下子模块充电稳态电压均能达到额定电压，在充电电压较低时将导致解锁过程中产生相对较大的电流冲击。

2.1 子模块特性不一致的均压需求分析

在实际工程应用中，同一桥臂内的不同子模块特性可能有所区别，给系统充电过程的均压效果带来一定影响。本节对该问题进行分析，得出维持子模块良好均压效果的基本均压需求。

子模块特性不一致主要指换流阀杂散参数对子模块充电过程的影响，以及同一桥臂内子模块损耗不一致导致的充电不均。

杂散参数主要是由阀塔的结构设计差异引起，阀塔之间存在大小不同的杂散接地电容、电阻，导致系统充电过程中，不同阀塔子模块的充电电流略有区别。有可能导致换流阀自然软启充电过程中，子模块电压发散的现象，该问题可以通过主动均压充电策略解决。由于系统杂散元件较小，只需动态切除少量子模块即能维持换流阀子模块电压均衡。

一般子模块的损耗主要包括均压电阻(即为放电电阻)损耗、控制电路损耗两部分，其中均压电阻损耗与子模块电压的平方成正比，而控制电路损耗近似维持恒定。部分子模块因特殊情况为其他子模块供电而产生附加损耗，导致同一桥臂内的子模块损耗不一致。

例如，部分柔性直流输电工程中，通过在换流阀内配置阻尼电阻模块来解决直流故障穿越的问题。在故障发生后投入阻尼电阻，抑制故障电流，便可利用交流断路器开断故障回路。但阻尼电阻模块的控制电路需要通过其他子模块电容进行供电，为阻尼电阻模块供电的子模块将提供附加损耗，其损耗明显大于其他一般子模块。

若保持桥臂内子模块均压效果，需要各子模块保持充、放电功率平衡。当同一桥臂内子模块电压均衡时，每个投入子模块的充电功率完全相同，均为桥臂电流与子模块电压的乘积。但一定时间段内的子模块充电能量还受到投切指令的影响，充电能量与投入时间近似成正比。而放电功率完全由子模块损耗及附加损耗决定，在不同子模块之间存在差异，放电能量与子模块总损耗成正比。

通过换流阀主动均压充电策略，控制子模块的投切状态，可以自动调节子模块的投入时间比例，从而维持子模块间的充放电平衡。但当子模块损耗不一致时，需要达到一定的子模块切除数才能保障子模块电压均衡。

当切除子模块数处于临界值时，附加损耗子模块将始终维持投入状态，由主动均压充电策略在一般子模块中选择切除子模块，且两类子模块的充电能量与放电能量的比值相同。

一般子模块与附加损耗子模块的放电能量及

充电能量的比值如式(4)、式(5)所示,其中子模块均压电阻损耗 P_1 表达式如式(6)所示。

$$\frac{E_{q_disch}}{E_{r_disch}} = \frac{P_{q_disch}}{P_{r_disch}} = \frac{P_1 + P_2}{P_1 + P_2 + P_3} \quad (4)$$

$$\frac{E_{q_ch}}{E_{r_ch}} = \frac{t_q}{t_r} = \frac{N - n - m}{N - m} \quad (5)$$

$$P_1 = U_{sm}^2 / R_{sm} \quad (6)$$

由式(1)、式(2)可得

$$n = \frac{P_3 \times (N - m)}{P_1 + P_2 + P_3} \quad (7)$$

当切除子模块数超出 n 即能保障子模块损耗不一致工况下维持桥臂子模块电压在额定电压 U_{sm} 下。其中, E_{q_disch} 、 E_{q_ch} 、 P_{q_disch} 和 t_q 分别为一般子模块的放电能量、充电能量、放电功率和充电时间, E_{r_disch} 、 E_{r_ch} 、 P_{r_disch} 和 t_r 分别为附加子模块的放电能量、充电能量、放电功率和充电时间。 P_1 、 P_2 和 P_3 分别表示子模块均压电阻损耗、控制电路损耗及附加损耗, n 、 N 及 m 分别表示临界切除子模块数、桥臂子模块总数及承担附加损耗子模块数。

上述分析中,子模块均压电阻损耗 P_1 与子模块电压值平方成正比,即不同子模块电压稳态值有相对应的子模块最小切除数。但考虑到子模块电阻损耗具备一定的自均压能力,即附加损耗子模块电压偏低时,其对应的电阻损耗也较低,从而达到一个相对平衡的状态,随着子模块充电过程中电容电压的提升,从而最终达到了子模块电压均衡的稳定状态。

2.2 柔性直流输电系统协调启动策略

在柔性直流输电系统及柔性直流电网的启动过程中,不同类型的换流站启动过程有所区别。按照启动流程分类,可分为三类充电过程,先启动交流有源换流站(一般为定直流电压换流站)充电、其他交流有源换流站(一般为定有功功率换流站)充电及交流无源换流站充电。

多端柔性直流输电系统的启动流程如图 7 所示,具体如下。

1) 各换流站均满足启动条件后,首先闭合先启动交流有源换流站的交流进线开关进行换流器交流侧充电,此时其余各换流站均进行直流侧充电。

2) 其他交流有源换流站分别闭合各自交流进线开关,充电方式将从直流侧充电转为交直流混合充电。各交流有源换流站充电至稳定后,切除软启电阻。

3) 定直流电压换流站充电完成后,首先解锁,

对直流电压进行控制。此时其余各换流站的子模块电压随直流电压的升高进一步抬升。

4) 其余各换流站充电完成后,依次解锁换流器。

由图 7 可知,在柔性直流输电系统的启动流程中,三类换流站的子模块稳态电压均有所区别,定有功功率换流站和交流无源换流站在换流器交流进线开关闭合和定直流电压站解锁等操作下,其子模块稳态电压均随之发生变化。

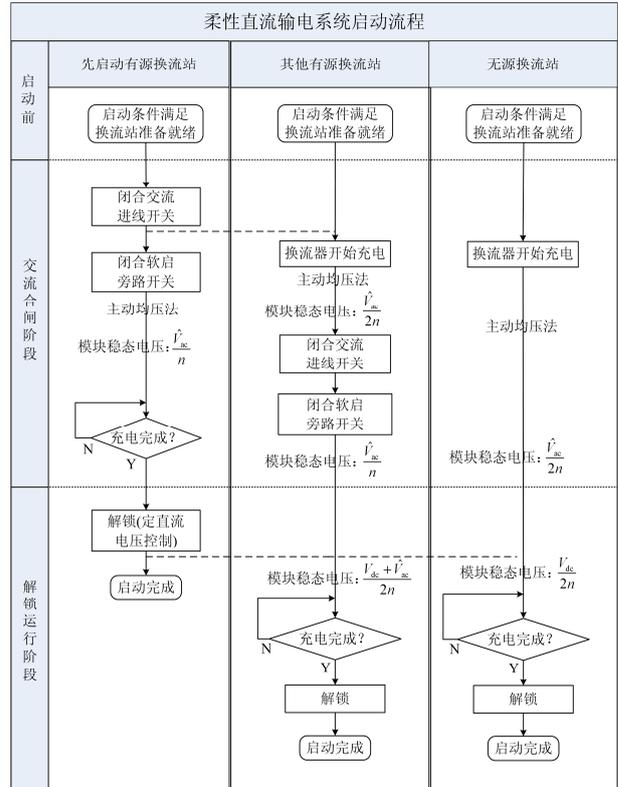


图 7 柔性直流输电系统启动流程

Fig. 7 Flexible DC transmission system startup process

为保障子模块充电至额定电压,控制保护装置需要提供充足的系统信息,由阀控装置针对性地给出主动均压充电策略的子模块稳态切除数。同时受交直流电网波动、交流变压器分接头变动等因素影响,难以将子模块电压精准地控制在额定电压。

2.3 闭环充电策略

闭环充电策略是换流器通过实时监测子模块电压状态,通过调节切除子模块个数,将子模块电压控制在额定电压的新型充电策略。采用该充电策略时,换流阀不需要接收系统信息(如定直流电压站是否解锁,本站交流断路器是否闭合)也具备自动调节能力,在不同启动过程的不同阶段均能够将子模块电压稳定在额定电压,进而降低换流器解锁时的电流冲击,保障柔性直流输电系统安全稳定运行。

设计闭环充电策略需满足下列要求, 子模块切除个数的调节过程中不能出现桥臂过流或子模块过压等故障现象, 应确保换流站启动过程安全平稳。为避免充电过程中出现桥臂过流现象, 在桥臂切除子模块进行主动均压充电过程中, 应逐步提高子模块切除个数。若切除子模块个数变化过快, 容易导致桥臂过流故障, 引起系统保护闭锁。在各启动工况下不同阶段的转换过程中, 可能出现充电电压突增的情况, 此时需要快速降低子模块切除个数, 否则存在子模块过压的风险。综合上述两种情况, 通过 PI 控制器类型的调节器进行闭环控制并不能满足该工况切除数增减速度不一致的需求, 宜针对该工况设定专用的子模块切除数调节方法。

调节方法的基本思路如下: 根据子模块电压实际值与目标值的差, 实时调整切除子模块调节量。同时当子模块电压超出警戒值后, 应将子模块切除数复位至基准值(维持系统正常均压的最低子模块切除数), 待子模块电压下降至正常范围后继续进行调节。

闭环充电控制策略包括以下步骤, 如图 8 所示。

首先, 确定子模块电压控制目标及目标范围。

需考虑到具体工程的特殊情况, 根据该工程的额定直流电压对应的子模块电压, 确定子模块电压控制目标值及目标范围。

其次, 根据子模块平均电压采样值, 实时调整子模块切除个数。

当子模块平均电压处于控制目标范围外时, 将子模块平均电压采样值与控制目标值做差, 按式(8)简易计算子模块切除数调整量, 并进行限幅操作。需根据实际工况进行调整, 针对子模块过压和欠压两种情况, 可以设置两个不同的增益值 A 。当过压时取较大增益值, 加速调节, 当欠压时取较小增益值, 防止桥臂过流。

$$\Delta N = A \times \Delta U \quad (8)$$

当子模块平均电压进入控制目标范围内时, 可以较小的速度继续调节子模块切除数。将子模块电压最终稳定在控制目标值。

最后, 若子模块电压超出安全警戒值时, 应该将子模块切除数复位至基准值, 防止子模块过电压损坏设备。

基准值即为子模块特性不一致的均压需求分析所得的最小子模块切除数。安全警戒值可以根据子模块 IGBT 耐受电压选取, 由于该电压值将通过自然放电缓慢下降, 故不宜过高。

3 仿真验证

基于前文对柔性直流输电系统协调启动策略和闭环充电策略的研究, 本节对其进行全面的仿真验证。

本文基于 PSCAD/EMTDC 搭建了三端直流电网模型, 如图 9 所示。直流电网涵盖前文分析的三类换流器, 分别为定直流电压换流站 MMC1、定有功功率换流站 MMC2 以及定交流电压控制的新能源发电站 MMC3。

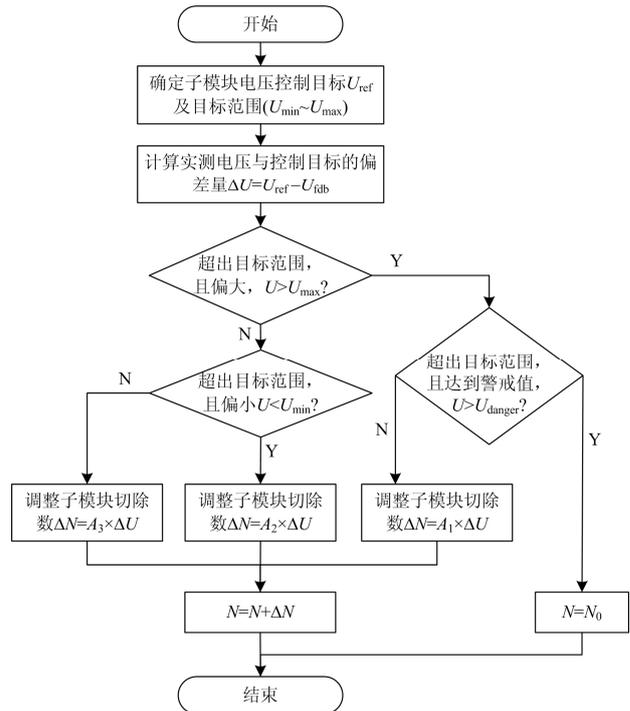


图 8 闭环充电策略流程图

Fig. 8 Closed-loop charging flow chart

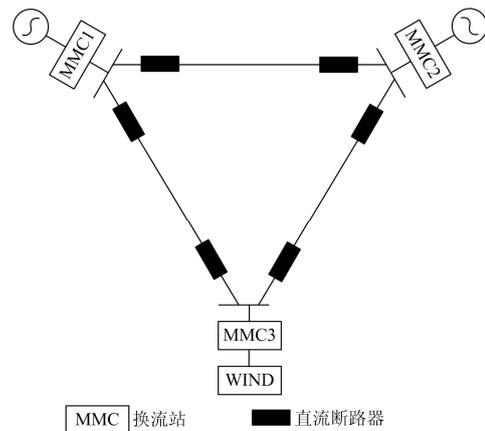


图 9 仿真系统结构图

Fig. 9 Diagram of simulation system

各端换流站采用对称单极主接线型式，三端换流站的容量均为 1 000 MW，直流电网各线路两端配置混合式直流断路器。各换流站的相关参数如表 1 所示。

表 1 仿真系统主要参数

Table 1 Main parameters of simulation system

系统参数	MMC
直流母线电压/kV	±250
额定有功功率/MW	1 000
额定无功功率/Mvar	300
桥臂电抗器/H	0.065
子模块电容器/F	0.010
子模块额定电压/V	2 050
桥臂子模块数(额定+冗余)	244+20
连接变压器/kV	525/290.88
软启电阻/Ω	120
子模块均压电阻/kΩ	42
驱动电路损耗/W	20
附加损耗子模块个数	24
仿真步长/μs	50

基于此闭环充电策略的子模块电压目标值可设定为额定电压 2 050 V，目标范围适当扩展设置为 1 950~2 150 V。子模块切除数调节参数 A_1 、 A_2 、 A_3 可分别设置为 $2.5 \times 10^{-4} (\text{kV}^{-1})$ 、 $3.3 \times 10^{-6} (\text{kV}^{-1})$ 及 $3.3 \times 10^{-7} (\text{kV}^{-1})$ 。考虑子模块电压正常波动，安全警戒值设置为 2 400 V。按照式(7)可以计算得到维持子模块均压效果的最小子模块切除数为 45。

仿真时序如下：

- 1) 初始时刻，站 1 闭合交流进线开关，站 1 交流侧充电，同时从直流侧为站 2、站 3 充电；
- 2) 5.8 s 时刻，站 1 闭合软启旁路开关；
- 3) 6.5 s 时刻，站 2 闭合交流进线开关，站 2 由直流侧充电转为交直流混合充电；
- 4) 7.0 s 时刻，站 2 闭合软启旁路开关；
- 5) 10.5 s 时刻，站 1 解锁定直流电压控制，直流电网电压抬升，进一步对各换流站进行充电；
- 6) 13.0 s 时刻，站 2 解锁，定有功功率控制；
- 7) 14.0 s 时刻，站 3 解锁，定交流电压控制。

仿真波形如图 10—图 13 所示，图中横坐标单位为 s。

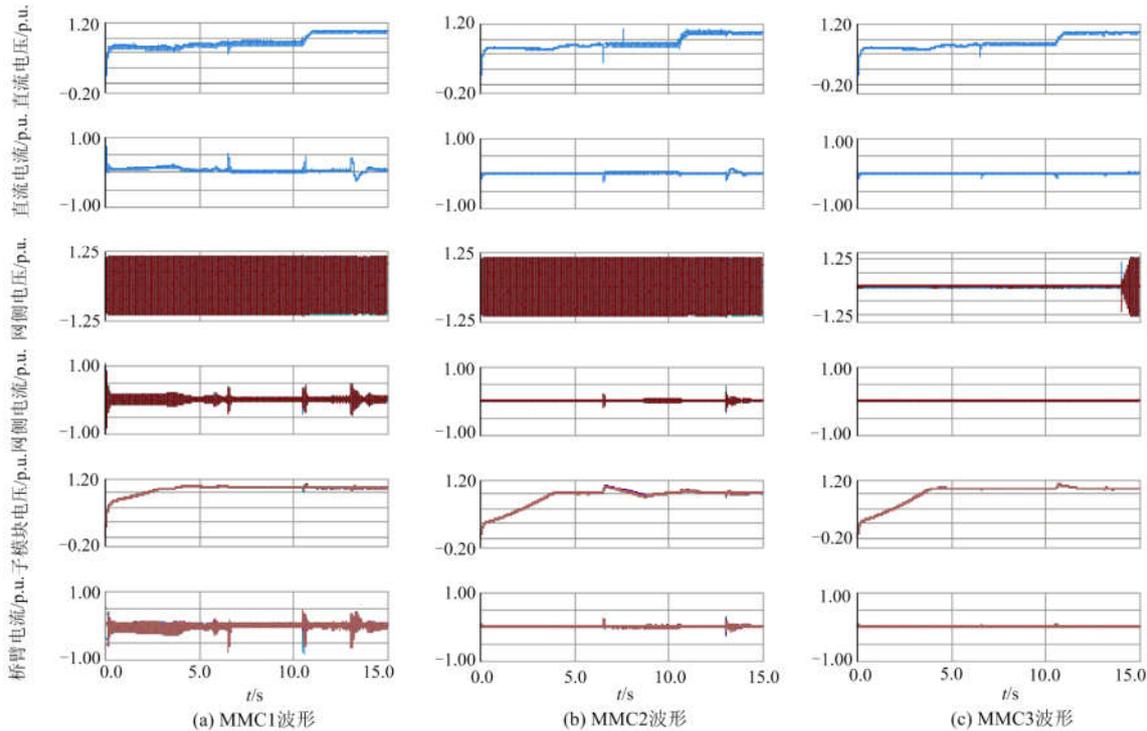


图 10 三端直流电网协调启动仿真波形

Fig. 10 Simulation graphs of three terminal DC power grid coordinated start-up strategy

图 10 给出了三端直流电网协调启动仿真波形，纵坐标为各变量标幺值，由波形可知整个协调启动过程中，三端换流站均未发生桥臂过流、子模块过压等故障工况，整个启动过程安全稳定。

图 11—图 13 为 3 个换流站切除子模块个数随子模块电压调节的波形图。

图 11 为定直流电压换流站(即先启动交流有源换流站)，首先闭合交流进线开关进行交流侧充电，

切除子模块个数从零逐渐增加, 达到目标运行范围后经过短暂调节在 5.4 s 达到稳定, 闭合软启旁路开关后继续进行调节, 子模块电压再次稳定于额定电压。

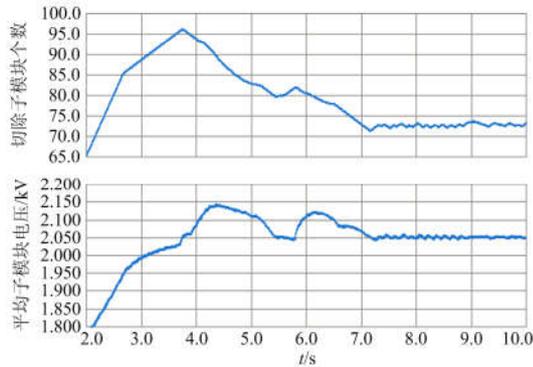


图 11 定直流电压站切除子模块数及子模块电压波形
Fig. 11 Numbers of submodules shedding and submodules voltage waveform of DC voltage control station

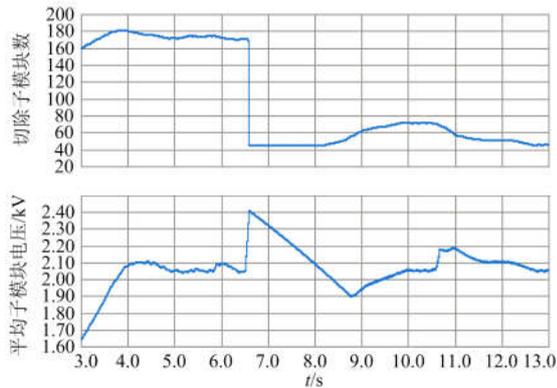


图 12 定有功功率站切除子模块数及子模块电压波形
Fig. 12 Numbers of submodules shedding and submodules voltage waveform of active power control station

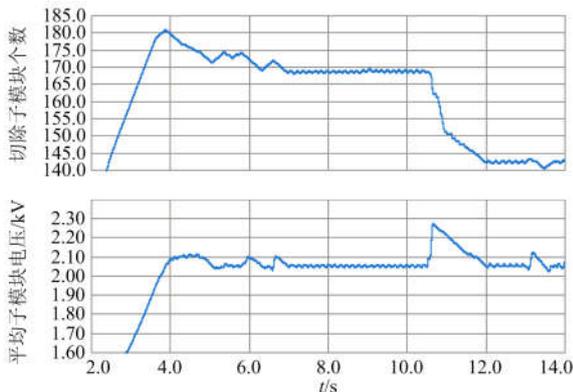


图 13 定交流电压站切除子模块数及子模块电压波形
Fig. 13 Numbers of submodules shedding and submodules voltage waveform of AC voltage control station

图 12 为定有功功率换流站, 初始为直流侧充电方式, 在 5 s 后子模块稳定于额定电压, 6.5 s 闭合交流进线开关转为交直流混合充电方式, 充电电源电压突增令子模块电压触发安全警戒值, 子模块切除数立即复位至基准值。待子模块放电至额定电压后, 于 10 s 继续调节至稳定。(放电过程仿真增加了子模块损耗以加速子模块放电过程。)10.5 s 定直流电压站解锁后再次进行调节, 子模块电压于 12.7 s 再次稳定于额定电压。

图 13 为定交流电压换流站, 始终为直流侧充电方式。在 5.4 s 进入稳定状态, 并随另外两站闭合软启旁路开关、交流进线开关、解锁等操作进行实时调节, 子模块电压均能够稳定于额定电压。

由波形图 11—图 13 可知, 通用性充电策略适用于柔性直流输电系统及柔性直流电网的各类型换流站, 在启动过程中的任意阶段均能将子模块电压稳定控制在额定电压。

4 结论

本文基于柔性直流输电系统常规充电策略及子模块特性不一致的均压需求分析, 提出了一种通用性闭环充电控制策略和应用用于柔性直流输电系统及柔性直流电网的协调启动策略。并通过仿真验证了通用性闭环充电控制策略和协调启动策略的实用性。该策略可统一配置于各类柔性直流输电系统及柔性直流电网, 适用于各类换流站的启动充电过程, 不存在桥臂过流及子模块过压等故障现象, 且不受系统因素及启动顺控操作的影响, 可以将子模块稳态电压控制在额定电压下, 从而减小解锁过程的电流冲击。

参考文献

- [1] DORN J, RETZMANN D, SOERANGR D. Prospects of multilevel VSC technologies for power transmission[C] // IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, April 21-24, 2008, Chicago, IL, USA: 1-16.
- [2] LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range[C] // 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, June 23-26, 2003, Bologna, Italy: 23-26.
- [3] ALLEBROD S, HAMERSKI R, MARQUARDT R. New transformerless scalable modular multilevel converters for HVDC-transmission[C] // Proceedings of Power Electronics Specialists Conference, June 15-19, 2008, Rhodes, Greece: 174-179.
- [4] YAO Zhiqing, ZHANG Qun, CHEN Peng, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 71-77.

DOI: 10.1186/s41601-016-0022-0.

[5] 汤广福, 贺之渊, 滕乐天, 等. 电压源换流器高压直流输电技术最新研究进展[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 39-44.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, TENG Letian, et al. New progress on HVDC technology based on voltage source converter[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 39-44.

[6] 陈燕红, 李世军, 李延平, 等. 基于内模控制的 MMC-HVDC 海上风电场不对称电网下的保护策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 95-103.
CHEN Yanhong, LI Shijun, LI Yanping, et al. Internal model control based protection strategy for MMC-HVDC offshore wind farm under unbalanced grid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 95-103.

[7] 高淑萍, 胡振宇, 张保会, 等. 一种适用于 MMC-HVDC 直流输电线路的保护新原理[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 13-20.
GAO Shuping, HU Zhenyu, ZHANG Baohui, et al. A new relay protection principle of MMC-HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 13-20.

[8] 张磊, 范彩云, 韩坤, 等. 电网电压不对称时 MMC-HVDC 精确环流抑制控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 42-49.
ZHANG Lei, FAN Caiyun, HAN Kun, et al. MMC-HVDC precise circulation suppression control under asymmetrical network voltage[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 42-49.

[9] 刘隽, 贺之渊, 何维国, 等. 基于模块化多电平变流器的柔性直流输电技术[J]. 电力与能源, 2011, 1(1): 33-38.
LIU Jun, HE Zhiyuan, HE Weiguo, et al. The introduction of technology of HVDC based on modular multi-level converter[J]. Power & Energy, 2011, 1(1): 33-38.

[10] 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.

[11] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过电流分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 1-7.
WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Analysis of submodule overcurrent caused by DC pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 1-7.

[12] 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.
KONG Ming, QIU Yufeng, HE Zhiyuan, et al. Pre-charging control strategies of modular multilevel converter for VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 67-73.

[13] 宋平岗, 李云丰, 王立娜, 等. MMC-HVDC 电容协同预充电控制策略[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2471-2477.
SONG Pinggang, LI Yunfeng, WANG Lina, et al. Capacitor coordinating pre-charging control strategy of MMC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2471-2477.

[14] DAS A, NADEMI H, NORUMM L. A method for charging and discharging capacitors in modular multilevel converter[C] // IECON 2011-37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, November 7-10, 2011, Melbourne, Australia: 1058-1062.

[15] 李探, 赵成勇, 王朝亮, 等. 用于电网黑启动的 MMC-HVDC 系统换流站启动策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(9): 117-122.
LI Tan, ZHAO Chengyong, WANG Chaoliang, et al. Startup schemes for converter station of MMC-HVDC system applied in grid black start[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 27(9): 117-122.

[16] 郭高朋, 胡学浩, 温家良, 等. 模块化多电平变流器的预充电控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2624-2630.
GUO Gaopeng, HU Xuehao, WEN Jialiang, et al. Precharge control strategies for modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2624-2630.

[17] 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.
BAN Mingfei. Research on control strategy of modular multilevel converter[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.

[18] 肖晃庆, 徐政, 薛英林, 等. 多端柔性直流输电系统的启动控制策略[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2550-2557.
XIAO Huangqing, XU Zheng, XUE Yinglin, et al. Start control strategy of MMC-MTDC system[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2550-2557.

[19] 裘鹏, 杨美娟, 章姝俊, 等. MMC-MTDC 系统协调启动控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1800-1807.
QIU Peng, YANG Meijuan, ZHANG Shujun, et al. Coordinated start-up strategy for MMC-MTDC system[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1800-1807.

[20] 刘欣和, 张浩, 李道洋, 等. 柔性直流电网协调控制策略[J]. 南方电网技术, 2017, 11(9): 1-7.
LIU Xinhe, ZHANG Hao, LI Daoyang, et al. Coordinated control strategy for VSC-HVDC power grid[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(9): 1-7.

收稿日期: 2018-03-11; 修回日期: 2018-05-24

作者简介:

张浩(1987—), 男, 工学硕士, 研究方向为柔性直流输电; E-mail: fff_hao@126.com

刘欣和(1985—), 男, 工学硕士, 研究方向为柔性直流输电;

王先为(1985—), 男, 工学博士, 研究方向为柔性直流输电。

(编辑 许威)