

DOI: 10.7667/PSPC170479

子模块混合型LCC-MMC混合直流输电系统的启动控制策略

杨洋¹, 王瑶², 李浩涛¹, 罗恩博¹, 贾轩涛³, 郝俊芳², 严兵², 孔令凯², 张群²

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650011; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000;
3. 国网浙江省电力公司检修分公司, 浙江 杭州 310018)

摘要: 为了充分发挥电网换相换流器(LCC)和模块化多电平换流器(MMC)各自的优势, 并使 MMC 具有直流故障穿越能力, 研究了一种新型 LCC-MMC 混合直流输电系统。该系统主要特点是整流侧采用传统 LCC, 逆变侧采用由半桥子模块、全桥子模块和箝位双子模块构成的混合型 MMC, 具有可过调制运行和直流故障穿越的功能。重点分析了此种混合直流输电系统的启动过程, 并给出了 LCC 和 MMC 的启动控制策略。最后, 在物理动模混合直流输电试验系统上进行了验证, 结果表明了该启动策略的可行性和有效性。

关键词: 混合直流输电; 混合子模块; 子模块充电; 启动控制; 动模系统

Start-up control strategies for the cell-hybrid LCC-MMC hybrid HVDC system

YANG Yang¹, WANG Yao², LI Haotao¹, LUO Enbo¹, JIA Xuantao³, HAO Junfang², YAN Bing², KONG Lingkai², ZHANG Qun²
(1. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650011, China; 2. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 3. Maintenance Branch of State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to fully exert the advantages of LCC and MMC and enable the MMC to have DC fault ride through capability, this paper researches a new LCC-MMC hybrid HVDC system. The system uses traditional LCC in the rectifier side and cell-hybrid MMC in the inverter side. The MMC consists of half-bridge sub-module, full-bridge sub-module and clamp-double sub-module, and has the function of over modulation working and DC fault pass through. It emphatically analyzes the start-up process of the hybrid HVDC system, and then offers the start-up control strategies of the LCC and VSC. Finally, the experimental verification on the built 24 kW hybrid HVDC system indicates that this start-up strategies is feasible and available.

This work is supported by National key Research and Development Program of China “key technology research and demonstration of high-voltage large-copality flexiblex DC grid”.

Key words: hybrid HVDC; cell-hybrid; sub-module charging; start-up control; dynamic simulation system

0 引言

基于电网换相换流器(Line Commutated Converter, LCC)的高压直流输电系统具有传输容量大、可靠性高、损耗小和造价低等优点, 目前已广泛应用于远距离架空线输电、海底电缆输电和异步联网等场合。但是, 由于 LCC 采用晶闸管作为换流器件, 需要具有一定强度的交流系统为其提供换相电压, 当逆变侧接入的交流电网较弱时易发生换相失败, 且无法实现向无源网络供电^[1-2]。而基于采用全控型器件的模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)的直流输电系统具有可独

立控制有功功率和无功功率、不存在换相失败和可对无源网络供电等优点, 但相对于 LCC, 其建设成本高、输送容量小^[3]。

为了充分发挥 LCC 和 MMC 各自的优势, 从而获得最大的经济效益和技术效益, 混合直流输电系统的整流侧采用 LCC 结构, 逆变侧采用 MMC 结构, 在降低建设成本的同时解决了逆变侧换相失败与无法向无源网络供电的问题^[4-5]。MMC 常用的子模块拓扑有三种: 半桥子模块(Half Bridge Sub-Module, HBSM)、全桥子模块(Full Bridge Sub-Module, FBSM)和箝位双子模块(Clamp-Double Sub-Module, CDSM)。三种子模块各具特点: HBSM 器件最少, 损耗最低, 但不能实现直流故障穿越; FBSM 可实现直流故障穿越, 且可通过输出负电压以提高直流电压利用率, 从而提高系统容量, 但其器件较多, 损耗较大;

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“高压大容量柔性直流输电系统关键技术与工程示范”

CDSM 可等效为 2 个 HBSM 级联, 增加了 1 个引导 IGBT 和 2 个二极管, 可实现直流故障穿越。因此, 考虑将三种子模块混合使用, 充分发挥各自优势, 形成一种功能性更强、经济性更优的混合型 MMC 拓扑, 在兼顾成本和损耗的同时使 MMC 和 LCC 一样具备直流故障穿越的能力, 使 LCC-MMC 混合结构在远距离架空线输电场合有更好的应用前景^[6-7]。

LCC-MMC 混合直流输电系统的启动控制是系统稳定运行的前提和基础, 主要分为充电和解锁两个阶段。启动控制的主要目标是通过一定的控制策略, 使直流电压平稳上升至额定值, 使混合直流输电系统处于可输送功率的状态, 并在这一过程中避免过电压和过电流现象^[8], 保证换流器的安全。因此, 混合直流输电系统的启动控制策略需加以研究。文献[9]提出了可应用于有源或无源网络的 MMC 启动控制策略。文献[10]分析了各阶段, 特别是 MMC 解锁瞬间过电流的形成机制, 并通过对多电平调制算法的优化实现了对充电电流的有效控制, 同时提出了一种适用于一端交流电源同时向双站预充电的控制策略。文献[11]针对伪双极 VSC-LCC 型混合直流输电系统进行了启动控制研究, 提出了 3 阶段式启动方案, 实现了从完全停机状态平稳过渡到正常运行状态的过程。文献[12]分析了基于箝位双子模块的 MMC-HVDC 正常自励启动过程。文献[13]对

整流侧采用 LCC, 逆变侧采用半桥子模块与全桥子模块混合的 MMC 的混合型直流输电系统, 并进行了仿真研究。但目前还未有文献对由传统 LCC 和采用 HBSM、FBSM 和 CDSM 的混合型 MMC 构成的混合直流输电系统的启动过程进行详细分析与试验验证。

本文针对子模块混合型 LCC-MMC 混合直流输电系统的启动控制进行研究, 其整流侧采用传统 LCC, 逆变侧采用由 HBSM、FBSM 和 CDSM 构成的子模块混合型 MMC。分析了 LCC 与 MMC 的启动过程, 给出了相应的启动控制策略, 并在所搭建的 24 kW 动模系统上进行了试验验证。

1 LCC-MMC 基本原理

1.1 拓扑结构

本文研究的子模块混合型 LCC-MMC 的主电路拓扑结构如图 1 所示。采用单极金属接地的两端结构, 其中整流侧沿用传统直流输电系统的 6 脉动 LCC 配置, 由换流变压器 T_s 、6 脉动换流器以及相应的平波电抗器 L_d 和直流滤波器 L_1C_1 等构成; 逆变侧为子模块混合型 MMC 结构, 其各桥臂由 4 个 HBSM、10 个 FBSM、3 个 CDSM 和桥臂电抗器 L_{arm} 构成, 并在换流变压器 T_r 的原边设计有软启电阻, 防止 MMC 有源充电瞬间出现过电流现象。

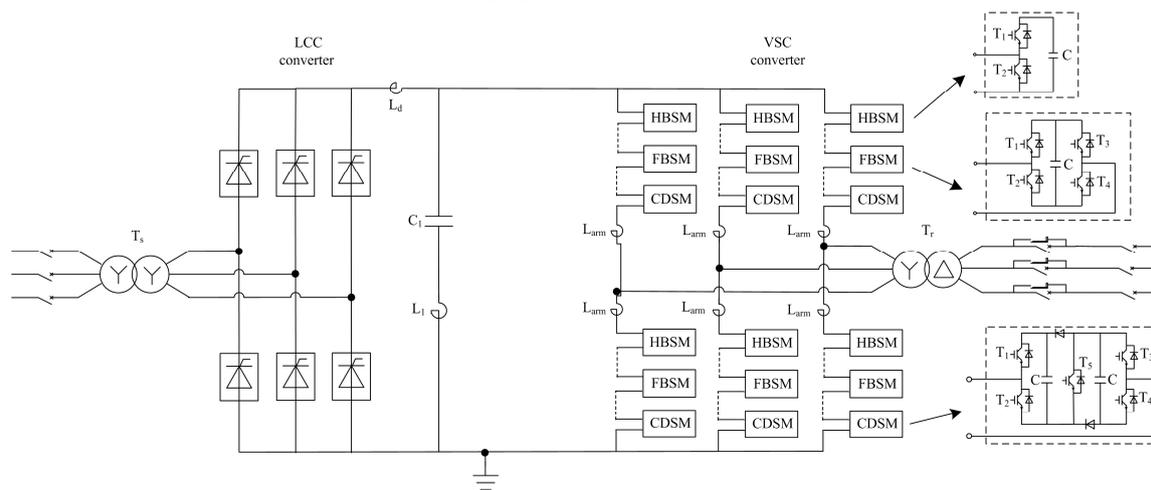


图 1 LCC-MMC 拓扑结构图

Fig. 1 Topology diagram of LCC-MMC

1.2 子模块工作模式

HBSM、FBSM 和 CDSM 三种子模块结构如图 1 中所示, 相应的工作模式分别由表 1、表 2 和表 3 给出。

以上 3 个表格中, 用“0”和“1”表示各 IGBT 的开关状态, “1”表示开通, “0”表示关断; i_{SM}

为桥臂电流, 规定各桥臂由上而下为正方向; u_{SM} 为子模块输出电压; u_C 为子模块电容电压。在不控充电阶段, 三种子模块在不同的桥臂电流方向下输出不同的子模块电压; 在子模块控制器取能后, HBSM 输出电压可控在 u_C 和 0, FBSM 输出电压可控在 $\pm u_C$ 和 0, CDSM 输出电压可控在 $2u_C$ 、 u_C 和 0。

表 1 HBSM 工作模式

Table 1 HBSM working mode

T ₁	T ₂	<i>i</i> _{SM}	<i>u</i> _{SM}
0	0	> 0	<i>u</i> _C
0	0	< 0	0
1	0	—	<i>u</i> _C
0	1	—	0

表 2 FBSM 工作模式

Table 2 FBSM working mode

T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	<i>i</i> _{SM}	<i>u</i> _{SM}
0	0	0	0	> 0	<i>u</i> _C
0	0	0	0	< 0	- <i>u</i> _C
1	0	0	1	—	<i>u</i> _C
0	1	1	0	—	- <i>u</i> _C
1	1	0	0	—	0
0	0	1	1	—	0

表 3 CDSM 工作模式

Table 3 CDSM working mode

T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	<i>i</i> _{SM}	<i>u</i> _{SM}
0	0	0	0	0	> 0	2 <i>u</i> _C
0	0	0	0	0	< 0	- <i>u</i> _C
1	0	0	1	1	—	2 <i>u</i> _C
0	1	1	0	1	—	0
1	0	1	0	1	—	<i>u</i> _C
0	1	0	1	1	—	<i>u</i> _C

1.3 数学模型

整流侧采用 6 脉动 LCC，设触发角为 α ，换相角为 γ ，LCC 侧直流电流为 I_{d1} ，直流电压为 U_{d1} ，换流变压器阀侧线电压有效值为 U_{s1} ，系统单相等效电抗为 X_1 ，输送的有功功率为 P_{d1} ，消耗的无功功率为 Q_{c1} ，则其数学模型如式(1)一式(4)所示^[14]。

$$I_{d1} = \frac{\sqrt{2}U_{s1}}{2X_1} [\cos\alpha - \cos(\alpha + \gamma)] \quad (1)$$

$$U_{d1} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{s1} \cos\alpha - \frac{3}{\pi} X_1 I_{d1} \quad (2)$$

$$P_{d1} = U_{d1} I_{d1} \quad (3)$$

$$Q_{c1} = P_{d1} \tan(\arccos \frac{U_{d1}}{3\sqrt{2}U_{s1}}) \quad (4)$$

逆变侧采用子模块混合型 MMC，设 MMC 阀侧三相电压分别为 u_{sa} 、 u_{sb} 、 u_{sc} ，阀侧三相电流分别为 i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} ，换流阀出口三相电压分别为 v_a 、 v_b 、 v_c ，换流变压器和桥臂电抗器在阀侧的等效电阻与

电感分别为 R 和 L ，则三相静止坐标系下的数学模型如式(5)所示。

$$\begin{cases} L \frac{di_{sa}}{dt} + R \cdot i_{sa} = u_{sa} - v_a \\ L \frac{di_{sb}}{dt} + R \cdot i_{sb} = u_{sb} - v_b \\ L \frac{di_{sc}}{dt} + R \cdot i_{sc} = u_{sc} - v_c \end{cases} \quad (5)$$

对式(5)进行 Clark 变换与 Park 变换，得到两相旋转坐标系下的数学模型如式(6)所示。式中，阀侧电压的 d 、 q 轴分量分别为 u_{sd} 、 u_{sq} ，阀侧电流的 d 、 q 轴分量分别为 i_{sd} 、 i_{sq} 。

$$\begin{cases} L \frac{di_{sd}}{dt} + R \cdot i_{sd} = u_{sd} - v_d + \omega L i_{sq} \\ L \frac{di_{sq}}{dt} + R \cdot i_{sq} = u_{sq} - v_q - \omega L i_{sd} \end{cases} \quad (6)$$

忽略等效电阻 R 和换流器的损耗，MMC 阀侧有功功率 P_{d2} 和无功功率 Q_{c2} 如式(7)、式(8)所示^[15]。

$$P_{d2} = \frac{3}{2} (u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq}) \quad (7)$$

$$Q_{c2} = \frac{3}{2} (u_{sq} i_{sd} - u_{sd} i_{sq}) \quad (8)$$

式(1)一式(8)即为 LCC-MMC 混合直流输电系统的数学模型，在此基础上设计了 LCC 和 MMC 的控制器。

2 LCC-MMC 启动控制策略

考虑到 LCC-MMC 混合直流输电系统启动过程的平顺性，所设计的启动过程可分为 4 个阶段：① MMC 子模块不控充电阶段；② MMC 子模块可控充电阶段；③ MMC 定直流电压和无功功率解锁；④ LCC 定直流电流解锁。下文依次对各阶段进行具体分析。

2.1 子模块不控充电

由于各子模块控制器采用子模块电容取能，启动初始阶段电容电压较低，不足以提供子模块控制器所需的工作电压，无法实现驱动控制。此阶段各子模块中的 IGBT 均不导通，仅通过二极管进行不控充电，三种子模块在桥臂电流 i_{SM} 不同方向下的等效电路如图 2—图 4 所示，用红色标注充电电流的流通路径。

由图 2 可以看出：当子模块所处桥臂的 i_{SM} 为正时，子模块电容通过 T₁ 的反并联二极管进行充电；当 i_{SM} 为负时，子模块电容处于旁路状态，不再充电。

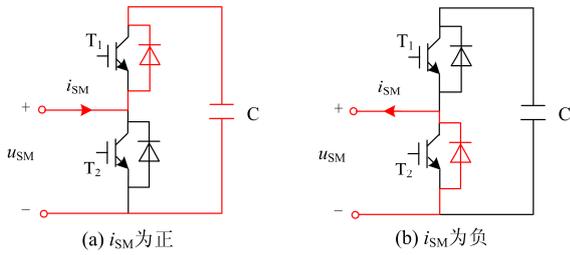


图 2 HBSM 等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of HBSM

由图 3 可以看出：当 i_{SM} 为正时，子模块电容通过 T_1 、 T_4 的反并联二极管进行充电；当 i_{SM} 为负时，子模块电容通过 T_2 、 T_3 的反并联二极管进行充电。

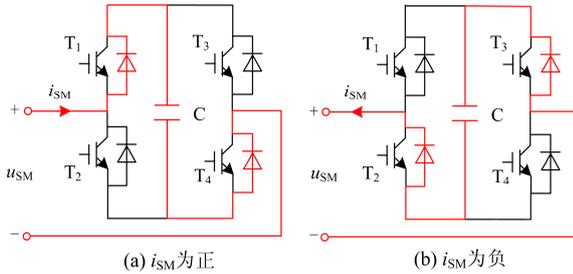


图 3 FBSM 等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of FBSM

由图 4 可以看出：当 i_{SM} 为正时，子模块电容通过 T_1 、 T_5 和 T_4 的反并联二极管进行充电，此时

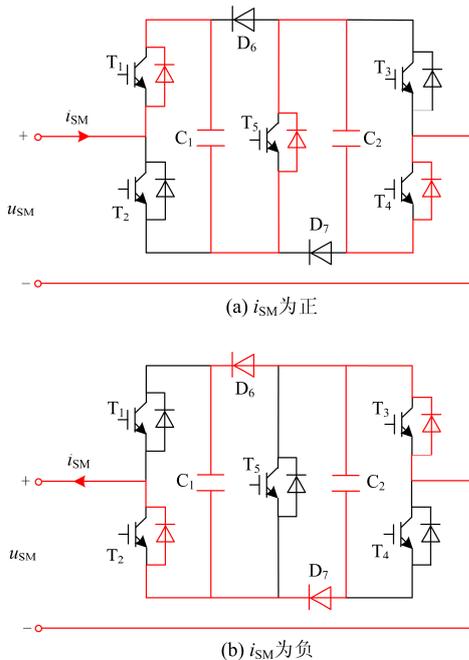


图 4 CDSM 等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of CDSM

电容 C_1 、 C_2 串联在充电支路中；当 i_{SM} 为负时，子模块电容通过 T_3 、 T_2 的反并联二极管和二极管 D_6 、 D_7 进行充电，此时电容 C_1 、 C_2 并联在充电支路中^[16]。

综合以上分析可知：在 i_{SM} 为正的半个周期内，三种子模块电容均以 i_{SM} 进行充电；而在 i_{SM} 为负的半个周期内，HBSM 电容不充电，FBSM 电容仍以 i_{SM} 充电，CDSM 电容以 $i_{SM}/2$ 充电。显然，若忽略各子模块的损耗，在不控充电阶段，HBSM、FBSM 和 CDSM 的电容电压比值一直保持在 1:2:1.5。因此，三种子模块先后进入可控充电阶段，FBSM 最先而 HBSM 最后。

2.2 子模块可控充电

子模块均进入可控状态后，CDSM 中的引导 IGBT T_5 一直导通，箝位二极管 D_6 、 D_7 不再流通电流，单个 CDSM 可等效为 2 个独立的 HBSM。此时，每个桥臂相当于 10 个 HBSM 和 10 个 FBSM 进行可控充电，可沿用 HBSM 型 MMC 的可控充电策略，在不同阶段切除相应固定个数的最高电压子模块，辅以电容电压平衡控制策略，在子模块电容电压提升至额定值附近后切入闭环控制^[17]，具体的控制流程此处不再赘述。

2.3 MMC 解锁

为了使 LCC-MMC 系统稳定运行，在逆变侧 MMC 子模块充电完成后，以定直流电压和无功率模式解锁 MMC。解锁后各桥臂子模块根据调制波进行投切，直流电压以设定斜率升至额定值。MMC 采用基于内环电流环外环电压环的双闭环控制器，控制器逻辑框图如图 5 所示。

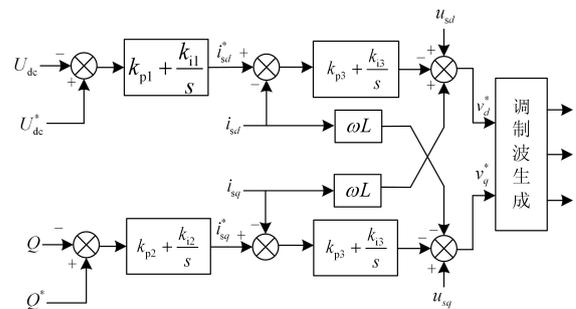


图 5 MMC 控制器逻辑框图

Fig. 5 Logic diagram of MMC controller

图 5 中， U_{dc} 、 U_{dc}^* 为直流电压的实际值和参考值， Q 、 Q^* 为无功功率的实际值和参考值， i_{sd} 、 i_{sd}^* 为阀侧电流 d 轴分量的实际值和参考值， i_{sq} 、 i_{sq}^* 为阀

侧电流 q 轴分量的实际值和参考值; u_{sd} 、 u_{sq} 为阀侧电压 d 轴、 q 轴分量; v_d^* 、 v_q^* 为所生成三相调制波的 d 轴、 q 轴分量。

2.4 LCC 解锁

在 MMC 建立稳定的直流电压后, 以定直流电流模式解锁整流侧 LCC, 并通过移动 α 角实现直流电流的控制, 完成 LCC-MMC 系统的功率传输。LCC 直流电流控制器的逻辑框图如图 6 所示。

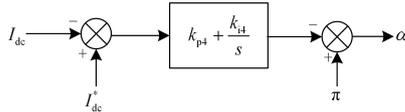


图 6 LCC 控制器逻辑框图

Fig. 6 Logic diagram of LCC controller

图 6 中, I_{dc} 、 I_{dc}^* 为直流电流的实际值和参考值, α 为触发角。

以上是 LCC-MMC 系统的启动过程和控制策略, 下文中的动模试验是在此控制策略基础上进行的。

3 动模试验及分析

3.1 动模平台介绍

在厂内搭建了 24 kW LCC-MMC 混合直流输电系统动模平台, LCC 侧为 1 个 6 脉动的晶闸管换流阀, 每个单阀包括 1 个晶闸管, 配置 LCC 控制保护装置和相应的阀控装置, MMC 侧为 1 个 6 桥臂柔直换流阀, 每个桥臂包括 4 个 HBSM、10 个 FBSM 和 3 个 CDSM, 配置 MMC 控制保护装置和相应的阀控装置。LCC 和 MMC 控制保护装置通过交换机与监控系统进行数据交互。具体的系统接口框图如图 7 所示, 系统主要参数如表 4 所示。

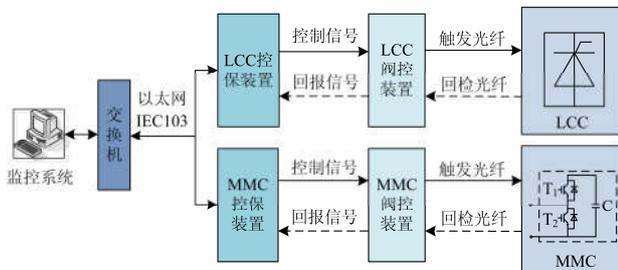


图 7 LCC-MMC 系统接口框图

Fig. 7 Interface diagram of LCC-MMC system

3.2 试验结果与分析

为了验证所设计启动控制策略的有效性, 分别进行了如下试验: ① MMC 子模块充电试验; ② MMC 解锁试验; ③ LCC 解锁试验。

表 4 LCC-MMC 系统主要参数

Table 4 Main parameters of LCC-MMC system

项目	LCC	MMC
换流单元额定容量	24 kW	24 kW
额定直流电压	2400 V	2400 V
额定网侧电压	380 V ± 10%	380 V ± 10%
换流变压器	380/2000(Yy0)	380/1400(Ynd1)
电抗器	14 mH(直流平波)	50 mH/0.000612 p.u.(桥臂)
直流滤波器	350 μF、0.8 mH	—
软启电阻	—	10 Ω
子模块电容	—	3.4 mF

试验初始阶段, 未闭合交流断路器, 子模块电压均为 0, 直流电压亦为 0。通过监控系统选择顺控模式为“自动”, 即当 MMC 6 个桥臂的子模块电压和均大于某一设定值并经过合适的延时后自动闭合交流断路器。

下发“充电”命令后, 在 t_1 时刻, 交流断路器闭合, MMC 子模块开始不控充电, 由于充电回路中串入的软启电阻的作用, 有效抑制了过电流现象。充电瞬间阀侧电流峰值达到 8.1 A, 为 0.58 p.u.。在 t_2 时刻, 子模块进入可控充电阶段, 以桥臂为单位, 各子模块按照电压大小排序后根据阀控策略进行有序地投切, 子模块电压逐渐增大, 反应到直流侧的直流电压逐渐升高。在 t_3 时刻, 自动切除软启电阻, 子模块得到进一步充电, 直至各子模块均充电至 1 p.u.左右, 充电过程结束, MMC 的充电试验波形如图 8 所示。

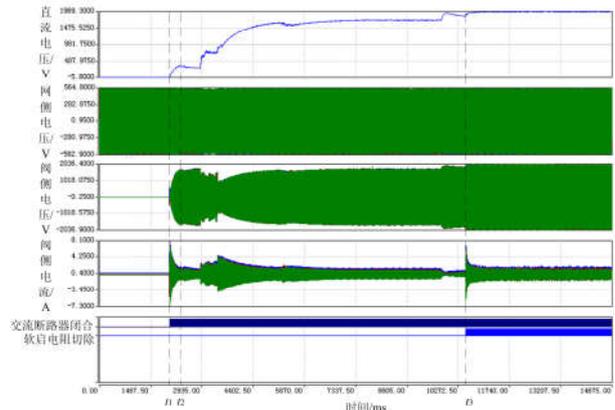


图 8 MMC 充电试验波形

Fig. 8 Test waveforms of MMC charged

充电完成后, MMC 阀控向 MMC 控保装置回报“充电完成”信号, 此时方可进行 MMC 解锁操作。MMC 有功类控制模式选择“直流电压控制”,

无功类控制模式选择“无功功率控制”, 在 t_4 时刻, 下发“解锁 MMC”命令, 直流电压以设定斜率快速上升, 直流电压最高超调至 2 487 V, 经过大约 400 ms 的调整后进入稳态, 将直流电压控制在 2 400 V 左右, 解锁过程结束。MMC 的解锁试验波形如图 9 所示。

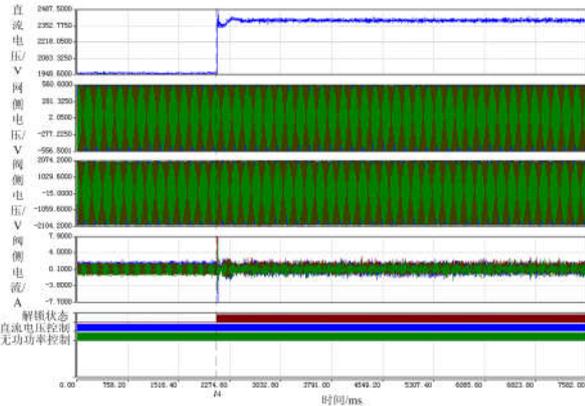


图 9 MMC 解锁试验波形

Fig. 9 Test waveforms of MMC deblocked

MMC 的 6 个桥臂各子模块电压实时上传至运行人员监控系统。MMC 解锁后, C 相上桥臂子模块电压数据如图 10 所示。其中, 各子模块最高电压值为 119.04 V, 最低电压值为 117.91 V, 平均电压为 118.77 V, 电压不平衡度为 0.73%, 子模块均压效果优良, 并未因因子模块类型不同而受到影响。



图 10 MMC 解锁子模块电压

Fig. 10 Sub-modules voltage of MMC deblocked

MMC 解锁为 LCC 提供了稳定的直流电压, LCC 控制模式选择“直流电流控制”, 在 t_5 时刻, 下发“解锁 LCC”命令, 触发角 α 由 160° 向 5° 方向快速移动, 将直流电流控制在 0.1 p.u.(即 1 A)左右, 防止流过晶闸管的电流断续。LCC 的解锁试验波形如图 11 所示。

至此, 便实现了由 LCC 向 MMC 的功率输送, 进一步的, 再通过下发 LCC 的直流电流参考值即可实时控制输送功率的大小。

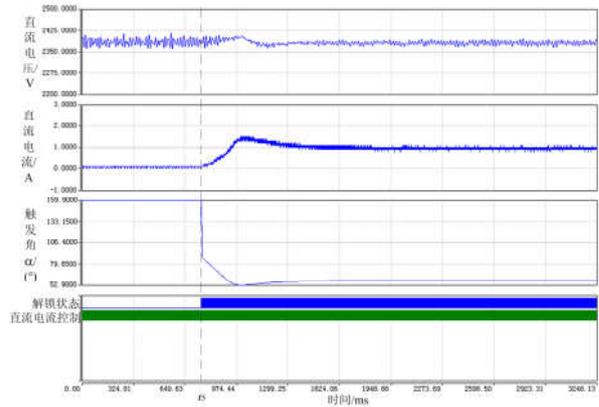


图 11 LCC 解锁试验波形

Fig. 11 Test waveforms of LCC deblocked

4 结论

本文给出了 LCC-MMC 混合系统中三种混合子模块的工作模式, 且分别对 LCC 和 MMC 建立了数学模型, 并在此基础上重点分析了系统的启动过程和控制策略。最后在所搭建的 24 kW 动模平台上进行了试验验证, 整个启动过程平滑稳定, 表明了所设计控制策略的有效性和稳定性。本拓扑适用于受端交流电网较弱的场合, 具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 唐庚, 徐政, 薛英林. LCC-MMC 混合高压直流输电系统[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 301-310.
TANG Geng, XU Zheng, XUE Yinglin. A LCC-MMC hybrid HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 301-310.
- [2] 王永平, 赵文强, 杨建明, 等. 混合直流输电技术及发展分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 156-167.
WANG Yongping, ZHAO Wenqiang, YANG Jianming, et al. Hybrid high-voltage direct current transmission technology and its development analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 156-167.
- [3] 薛英林, 徐政, 潘武略, 等. 电流源型混合直流输电系统建模与仿真[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(9): 98-103.
XUE Yinglin, XU Zheng, PAN Wulüe, et al. Modeling and simulation for a hybrid current source converter high voltage direct current transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9): 98-103.
- [4] 郭春义, 赵成勇, 彭茂兰, 等. 一种具有直流故障穿越能力的混合直流输电系统[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4345-4352.
GUO Chunyi, ZHAO Chengyong, PENG Maolan, et al. A hybrid HVDC system with DC fault ride-through capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17):

- 4345-4352.
- [5] 蔡新红, 赵成勇, 庞辉, 等. 向无源网络供电的 MMC-HVDC 系统控制与保护策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 405-414.
CAI Xinhong, ZHAO Chengyong, PANG Hui, et al. Control and protection strategies for MMC-HVDC supplying passive networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 405-414.
- [6] 李红梅, 行登江, 高扬, 等. 子模块混联 MMC-HVDC 系统直流侧短路故障电流抑制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 57-64.
LI Hongmei, XING Dengjiang, GAO Yang, et al. A DC pole-to-pole fault current suppression strategy of the half- and full-bridge based cell-hybrid modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 57-64.
- [7] 王振浩, 宋金泊, 韩子娇, 等. 基于混合子模块的 MMC 故障阻断及谐波特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 73-79.
WANG Zhenhao, SONG Jinbo, HAN Zijiao, et al. Fault blocking and harmonic characteristic analysis based on hybrid sub-module of MMC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 73-79.
- [8] 华文, 赵晓明, 黄晓明, 等. 模块化多电平柔性直流输电系统的启动策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 51-57.
HUA Wen, ZHAO Xiaoming, HUANG Xiaoming, et al. A startup strategy for modular multilevel converter based HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 51-57.
- [9] 杨晓楠, 陈红坤, 石晶, 等. 模块化多电平换流器启停控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 156-162.
YANG Xiaonan, CHEN Hongkun, SHI Jing, et al. Start/shutdown control strategy of modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 156-162.
- [10] 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.
- [11] 余瑜, 刘开培, 陈灏泽, 等. 伪双极 VSC-LCC 型混合直流输电系统启动方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2572-2578.
YU Yu, LIU Kaipei, CHEN Haoze, et al. Startup procedure for VSC-LCC based hybrid pseudo bipolar HVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2572-2578.
- [12] 薛英林, 徐政. 基于箝位双子模块的 MMC-HVDC 起动控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 1-7.
XUE Yinglin, 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.
- [13] 许烽, 徐政. 基于 LCC 和 FHMMC 的混合型直流输电系统[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2520-2530.
XU Feng, XU Zheng. Hybrid HVDC system based on LCC and FHMMC[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2520-2530.
- [14] 王磊, 李兴源, 李宽, 等. 伪双极 LCC-VSC 型混合高压直流输电系统向无源网络供电的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 27-33.
WANG Lei, LI Xingyuan, LI Kuan, et al. Research of pseudo bipolar LCC-VSC hybrid HVDC system supplying passive network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 27-33.
- [15] 姚为正, 邓祥纯, 易映萍, 等. 基于 dq0 同步坐标的柔性直流输电控制策略及仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 71-76.
YAO Weizheng, DENG Xiangchun, YI Yingping, et al. Research on modeling and simulation of VSC-HVDC based on dq0 synchronous coordinate[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(22): 71-76.
- [16] XUE Y, XU Z, TANG G. Self-Start control with grouping sequentially precharge for the C-MMC-based HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 187-198.
- [17] 范彩云, 韩坤, 甄帅, 等. 全桥型 MMC 充电特性分析及软启动优化策略[J]. 电气传动, 2017, 47(1): 36-41.
FAN Caiyun, HAN Kun, ZHEN Shuai, et al. Charging characteristics analysis and soft-start optimized strategies of MMC based on full-bridge sub-modules[J]. Electric Drive, 2017, 47(1): 36-41.

收稿日期: 2017-04-05; 修回日期: 2017-10-29

作者简介:

杨洋(1987—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为直流输电调试、运维, 微网控制; E-mail: yangyang.267@qq.com

王瑶(1989—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为柔性直流输电控制保护系统; E-mail: 673540339@qq.com

李浩涛(1987—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为直流输电控制、调试、运维。E-mail: 526898470@qq.com

(编辑 姜新丽)