

LCC-MMC 混合级联型直流输电系统启动控制策略研究

何平港, 牟大林, 林圣

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756)

摘要: 为实现逆变侧采用电网换相换流器(line commutated converter, LCC)和多个并联模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)阀组串联的混合级联直流输电系统的安全、可靠启动, 提出了一种按照不可控充电和系统控制解锁两阶段划分的启动控制策略。首先建立该类混合结构下直流系统的数学模型。在对低压端 MMC 不可控充电阶段暂态特性分析的基础上, 推导了 MMC 最大启动冲击电流和预充电时间的等效计算公式, 并根据最大冲击电流和预充电时间为 MMC 启动过程中限流电阻的选取提供依据。其次, 在系统级控制器解锁至系统稳态运行阶段, 针对 MMC 并联组在控制器解锁时产生的不平衡启动电流问题进行了分析, 提出一种基于不同换流器间控制时序配合与自适应 MMC 功率参考值的启动优化策略。最后, 通过 PSCAD/EMTDC 仿真结果表明, 所提启动方案可以有效实现混合级联型直流输电系统的平稳启动。

关键词: 混合级联型直流输电系统; 限流电阻; 不平衡电流; 启动优化策略

Start-up control strategy for an LCC-MMC hybrid cascade HVDC system

HE Pinggang, MU Dalin, LIN Sheng

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: To realize safe and reliable start-up of a hybrid cascaded DC transmission system in series with line commutated converter (LCC) and parallel modular multilevel converter (MMC) valves on the inverter side, a start-up control strategy based on the two stages division of uncontrollable charging and control unlocking is proposed. First, the mathematical model of the hybrid DC transmission system is established. Based on the analysis of the transient characteristics of the uncontrollable charging stage of the MMC at the low-voltage end, the equivalent calculation formulas of the MMC maximum start-up impulse current and pre-charge time are deduced. Then the selection basis of current limit resistance in the MMC start-up process is provided according to the maximum impulse current and pre-charge time. Second, from the unlocking of the system controller to the steady-state operation stage, the unbalanced start-up current problems between MMC parallel groups when the controller is unlocked are analyzed. Then an optimized cooperation strategy based on the control sequence coordination of different converters and adaptive MMC power reference valve is proposed. Finally, PSCAD/EMTDC simulation results show that the proposed start-up scheme can effectively realize the smooth start-up of a hybrid cascaded DC system.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51977183).

Key words: hybrid cascade DC transmission system; limit resistance; unbalanced current; start-up optimization strategy

0 引言

能源资源和负荷需求在我国呈现逆向分布状态, 采用直流输电技术是实现远距离大容量输电、优化资源配置的必然选择^[1-2]。但是仅采用单一的基于电网换相换流器(line commutated converter, LCC)的常规直流输电技术或者基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔性直流输电

技术难以兼顾经济性和技术性的要求, 因此, 选择将两种直流输电方式优势集成互补的混合直流输电技术作为当前理论研究和工程应用的热点^[3-6]。

对于混合直流输电系统而言, 各换流器的平稳启动是系统进入后续正常运行阶段的前提条件^[7-8]。在不同的混合直流输电结构下, 如何抑制系统在启动过程中对换流器和电网带来的过电流冲击, 以及实现不同类型换流器间的启动配合是工程设计中的重点^[9]。从现有研究来看, 按照时间尺度进行分阶段启动是混合直流输电系统的基本启动策略^[10-15]。

文献[10]针对整流侧采用 LCC、逆变侧采用 MMC 结构的混合直流系统,在系统整体的准稳态数学模型基础上提出利用直流系统为受端 MMC 电容器进行充电的启动策略。文献[11-12]分别针对 LCC-FBMMC 串联型混合直流系统和伪双极 VSC-LCC 型混合直流输电系统,采用了相似的三段式启动方案以实现系统的平稳启动。文献[13]针对 VSC-LCC 双端混合系统,提出了在系统单向潮流限制下,采用直流侧极性切换的控制启动方法。文献[14]在整流侧采用 LCC、逆变侧采用混合子模块型 MMC 的混合直流系统结构下,分析了此种混合结构下系统的启动过程,设计了系统整体的充电解锁方案。文献[15]对 LCC-VSC 三端混合直流系统,开展了换流站不同解锁顺序下系统启动控制策略的研究。针对上述不同结构的混合直流输电系统,分阶段启动的第一步均需要预先投入限流电阻以限制柔性换流器内部电容预充电时产生的冲击过电流。然而,关于限流电阻的参数设计,需要充分考虑系统最大允许启动电流和启动时间的要求^[16],相关文献给出了限流电阻参数与交流侧充电电流的近似关系表达式^[17],但其忽略了充电回路中桥臂电抗的影响,导致计算出来的 MMC 最大启动电流与实际最大电流存在较大的误差。因此,在混合直流系统的启动充电阶段,还需要进一步研究更准确合理的混合直流系统 MMC 限流电阻的定量计算方法。

除上述混合直流输电系统拓扑结构外,我国目前正在建设的白鹤滩-江苏混合直流输电系统逆变侧采用 LCC 与 3 个并联 MMC 直接串联的新型拓扑结构^[18-21],对于该混合结构,由于逆变侧采用多个 MMC 相互并联的结构,若换流器间协调控制措施不当,系统启动时将在 MMC 并联阀组直流侧产生不平衡电流,给系统的安全启动带来极大威胁。针对并联 MMC 产生不平衡电流的问题,文献[22-23]给出了交直流故障下混合级联输电系统 MMC 阀组间不平衡电流的抑制策略。然而,在系统启动与故障暂态两种情况下,MMC 阀组间不平衡电流的诱发机理并不相同,现有针对混联系统故障暂态不平衡电流的抑制方法并不直接适用于启动过程中多阀组间不平衡电流的抑制。因此,亟须提出一种多换流器间的协调控制策略,以有效解决混联系统低压侧多个 MMC 阀组间的启动不平衡电流问题。

基于此,本文以上述逆变侧混合级联型直流系统为研究对象,首先介绍了 LCC-MMC 混合级联型直流输电系统拓扑结构与数学模型,推导了 MMC 启动时最大冲击电流和预充电时间的解析表达,并

设计了 MMC 在有源启动方式下限流电阻参数的选取原则。针对在控制器解锁时 MMC 并联组间的不平衡电流问题,分析了不平衡启动电流的产生机理,提出一种基于不同换流器间控制时序配合与自适应 MMC 功率参考值的启动不平衡电流抑制策略。最后,基于 PSCAD/EMTDC 仿真模型验证了所提混合级联直流输电系统协调启动方案的有效性。

1 逆变侧混合级联直流系统简述

1.1 基本拓扑结构

逆变侧 LCC-MMC 混合级联结构的单极系统主接线结构如图 1 所示。

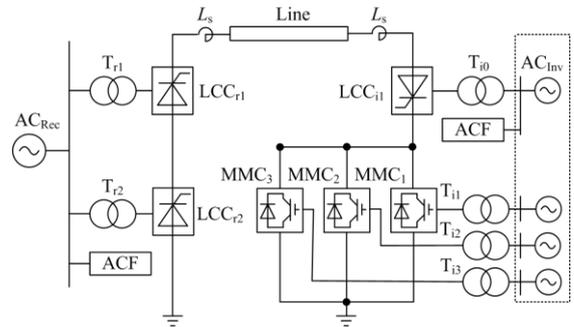


图 1 LCC-MMC 混合级联直流输电系统拓扑

Fig. 1 Topology of LCC-MMC hybrid DC transmission system

图 1 中,整流侧单极由双 12 脉动串联 LCC 构成;逆变侧单极由 12 脉动 LCC 和模块化多电平换流器阀组(bank of MMCs, MMCB)串联构成,其中,高压端为 LCC,低压端换流器阀组由 3 个 MMC 并联构成。每个 MMC 均采用半桥子模块结构,其拓扑结构如图 2 所示,由 N 个半桥子模块 SM 和桥臂电感 L_{arm} 构成一个桥臂,每个 SM 均包含一个半桥和一个直流储存电容 C_{SM} ,同一相的上下两个桥臂构成一个相单元。

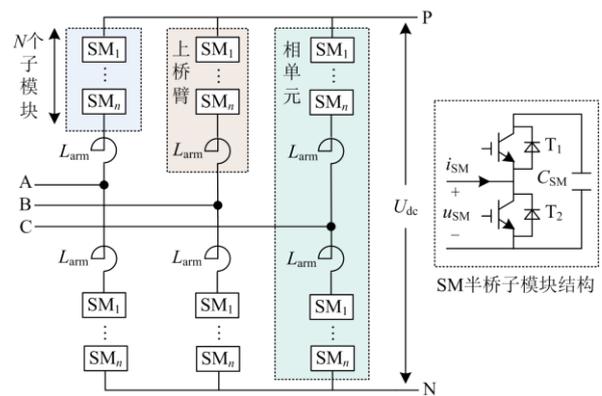


图 2 半桥子模块 MMC 拓扑结构

Fig. 2 Half bridge sub-module MMC topology

与传统高压直流输电系统相比, 在逆变侧采用 LCC 与 MMC 串联混合的形式具有以下技术特点: (1) 逆变侧 MMC 能够独立控制有功和无功功率, 系统运行控制灵活性好。 (2) 当发生直流故障时, 可通过整流侧 LCC 强迫移相达到清除故障电流的目的。 (3) 逆变侧交流故障导致 LCC 换相失败时, MMC 换流器仍能维持一定的有功功率传输, 加强受端交流系统稳定性; (4) 受端多馈出落点结构满足不同负荷中心电力需求, 并通过多 MMC 并联关系解决柔性直流系统容量较小的弊端。

1.2 数学模型

以单极系统为例, 整流侧 LCC 输出直流电压 U_{dcr} [24] 为

$$U_{\text{dcr}} = n_1 \left(\frac{3\sqrt{2}U_r}{\pi} \cos\alpha - \frac{3}{\pi} X_r I_{\text{dc}} \right) \quad (1)$$

式中: n_1 为整流站单极 6 脉动 LCC 换流器个数, 本文中 $n_1 = 4$; U_r 为整流侧换流变压器阀侧空载线电压有效值; α 为整流器延迟触发角; X_r 为整流侧 LCC 等效换相电抗; I_{dc} 为额定直流电流。

逆变侧 LCC 输出直流电压 $U_{\text{dci,H}}$ [24] 为

$$U_{\text{dci,H}} = n_2 \left(\frac{3\sqrt{2}U_{\text{IH}}}{\pi} \cos\gamma - \frac{3}{\pi} X_{\text{i,lcc}} I_{\text{dc}} \right) \quad (2)$$

式中: n_2 为逆变站单极 6 脉动 LCC 换流器个数, $n_2 = 2$; U_{IH} 为逆变侧高压端换流变压器阀侧空载线电压有效值; γ 为逆变器关断角; $X_{\text{i,lcc}}$ 为逆变侧 LCC 等效换相电抗。

逆变侧 MMC 换流器输出的直流电压 $U_{\text{dci,L}}$ 以及与交流系统交换的功率 P_s 、 Q_s [25] 分别为

$$\begin{cases} U_{\text{dci,L}} = \frac{2\sqrt{2}U_{\text{il}}}{\sqrt{3}m} \\ P_s = \frac{U_s U_{\text{il}}}{X_c} \sin\delta \\ Q_s = \frac{U_s (U_s - U_{\text{il}} \cos\delta)}{X_c} \end{cases} \quad (3)$$

式中: U_{il} 为逆变侧低压端 MMC 网侧交流线电压有效值; m 为 MMC 的输出电压调制比; U_s 为交流母线电压; δ 为 U_s 与 U_{il} 之间的相位差; X_c 为交流系统与 MMC 交流出口间的基波阻抗。

由系统两侧直流电压可得到直流电流为

$$I_{\text{dc}} = \frac{U_{\text{dcr}} - U_{\text{dci,H}} - U_{\text{dci,L}}}{R_{\text{dc,line}}} \quad (4)$$

式中, $R_{\text{dc,line}}$ 为直流线路总电阻。

由式(1)一式(4)可知, 通过调节交流侧电压、LCC 触发角、MMC 电压调制比和相角差等, 可以调节逆变侧混合级联系统的直流电压与电流。考虑到换流变压器分接头调压在实际工程中响应速度慢的问题, 故一般选择 LCC 触发角 α 、 γ 作为主要控制量; 而 MMC 则可以通过改变电压调制波的相角 δ 与调制比 m 来进行调节控制。在混合级联系统的启动过程中, 即通过联合调节上述各换流器间的控制量, 以保证系统的电压电流被控量从零平滑过渡至额定值。但不同类型换流器拓扑结构各异, 控制策略也各不相同, 使得混联系统的启动过程需要综合考虑多个换流器间的协调配合关系。

参考传统 MMC-HVDC 系统的启动流程 [26-28], 本文将所研究的新型混合级联系统的启动过程划分为 2 个阶段: (1) MMC 不可控充电阶段; (2) 系统控制解锁阶段。在 MMC 不可控充电阶段, 主要对依靠交流侧自励充电启动方式中限流电阻的计算问题进行分析; 而在系统控制解锁阶段, 将分别对 MMCB 控制解锁以及 LCC 控制解锁阶段的系统不平衡电流问题展开分析。

2 低压端 MMC 不控充电阶段

在 MMC 的实际运行过程中, IGBT 的控制驱动电路直接由各子模块内部电容进行分压供电, 而在启动初期, 子模块内部电容初始电压为零, 因此 MMC 缺乏外部能量而处于不控闭锁状态。此时首先需要对各储能电容进行预充电以初步建立起直流电压, 这也是整个混联系统启动的第一步。考虑到在所研究的混联系统中, 低压端 3 个 MMC 分散连接于不同的交流电网, 因此可选择依靠交流侧自励启动方式进行子模块电容的预充电, 此阶段中, 交流系统与 IGBT 反并联二极管形成的不控充电回路如图 3 所示。

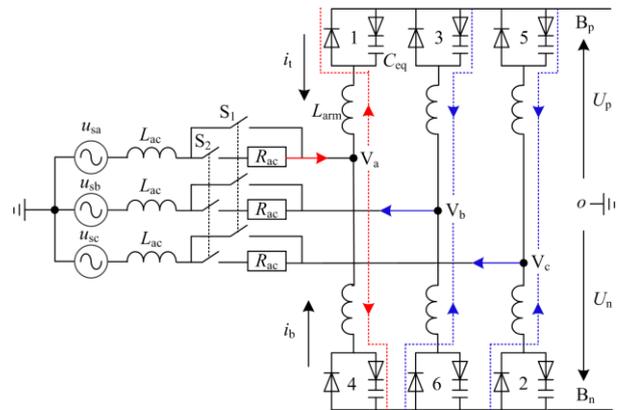


图 3 MMC 不可控充电等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of MMC uncontrollable charging

图 3 中, L_{ac} 、 R_{ac} 分别代表交流侧等效电感与电阻; L_{arm} 代表桥臂电感; C_{eq} 代表一个桥臂内的等效电容, 3 个上桥臂从左到右编号依次为 1、3、5, 下桥臂编号为 4、6、2。以图中所示电流方向 i_t 、 i_b 代表规定的正方向。

当交流断路器 S_2 合闸, MMC 进入不控充电阶段时, 整个充电回路的电流方向将根据此时交流侧各相对地电压的正负关系确定。按照三相电压是否过零点, 可将一个周期内三相合闸的时间分为 6 段, 其分段示意图如图 4 所示。

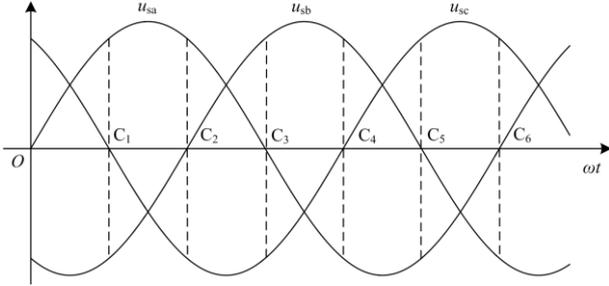


图 4 合闸时间分段示意图

Fig. 4 Schematic diagram of closing time section

以在 C_1 — C_2 区域 S_2 合闸为例进行分析。合闸时正负极直流母线对地电压为 0, 由于此时 $u_{sa} > 0$, 则 A 相电流将从 V_a 流向正极直流母线 B_p 和负极直流母线 B_n , 对应桥臂 4 子模块电容充电, 桥臂 1 子模块电容被旁路; 而由于 u_{sb} 、 $u_{sc} < 0$, 则 B、C 相上电流将由正极直流母线 B_p 和负极直流母线 B_n 流向 V_b 和 V_c 位置, 对应桥臂 3、5 中子模块电容充电, 桥臂 6、2 中子模块电容被旁路。图 4 中, 由三相电压间关系可知, 除了三相电压过零点以外, 在 C_1 — C_6 任意时间段进行合闸操作, 必然有 3 个桥臂内电容处于充电状态, 3 个桥臂处于短路状态。

在后续的电容器充电过程中, 伴随着子模块电容电压的上升以及 MMC 交流侧线电压瞬时值的变化, 一旦某个桥臂内承受的正向电压小于桥臂电容电压之和, 充电电流反向, 但是由于子模块中续流二极管承受反向电压截止, 从而使桥臂电流保持为 0。由于 MMC 的强非线性特点, 对此充电全过程中的启动电流难以进行定量的解析计算, 实际工程中更为关注的是 MMC 在此不可控充电过程中最大冲击电流的估算。此时, 忽略线间电压较小的两相电源作用, 选择线电压绝对值最大的相间回路作为启动简化等效电路, 以 AB 相为例, 其简化后的预充电等效电路如图 5 所示。

根据图 5, 列写充电回路特性方程如式(5)所示。

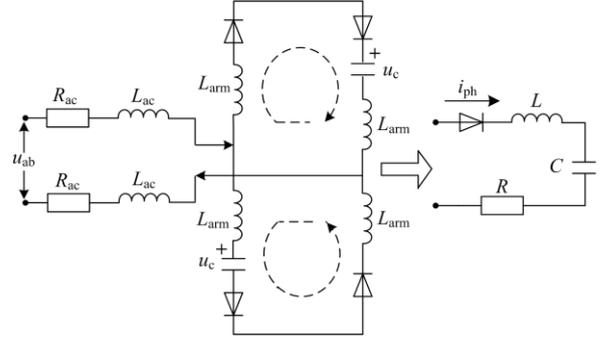


图 5 预充电等效电路

Fig. 5 Pre-charge equivalent circuit

$$\begin{cases} L \frac{di_{ph}(t)}{dt} + Ri_{ph}(t) + u_c(t) = u_{ab}(t) \\ u_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_{ph}(t) dt, \quad u_c(0) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: R 为等效电阻, $R = 2R_{ac}$; C 为等效电容, $C = 2C_{SM} / N$; L 为等效电感, $L = 2L_{ac} + L_{arm}$; $u_{ab}(t)$ 为交流线电压, $u_{ab}(t) = U_{lm} \cdot \sin(\omega t + \varphi_0)$, U_{lm} 为 MMC 等效交流电源线电压幅值, φ_0 为电源初相位, 也即断路器合闸时间。利用拉普拉斯变换法则并代入初始边界条件, 式(5)的通解可以表示为

$$i_{ph}(t) = i_p(t) + i_{\alpha 1}(t) + i_{\alpha 2}(t) \quad (6)$$

其中,

$$\begin{cases} i_p(t) = -I_0 \cos(\omega t + \varphi + \theta_0) \\ i_{\alpha 1}(t) = k_1 I_0 e^{-\frac{R}{2L}t} [\omega_d \sinh(\omega_d t) - \frac{D}{2L} \cosh(\omega_d t)] \\ i_{\alpha 2}(t) = k_2 I_0 e^{-\frac{R}{2L}t} [\cosh(\omega_d t) - \frac{D}{2\omega_d L} \sinh(\omega_d t)] \end{cases} \quad (7)$$

相关符号变量含义表示为

$$\begin{cases} I_0 = \frac{U_{lm} \cdot \omega C}{\sqrt{A_0^2 + B_0^2}}, \quad \omega_d = \sqrt{4L^2 - \frac{1}{LC}} \\ k_1 = \sin(\varphi + \theta_0) / \omega, \quad k_2 = -R \sin(\varphi + \theta_0) / 2\omega L \\ A_0 = 1 - \omega^2 CL, \quad B_0 = \omega CR \\ D = \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \sin(\varphi + \theta_1) / \sqrt{A_0^2 + B_0^2} \sin(\varphi + \theta_0) \\ A_1 = R(\omega^2 CL + 1), \quad B_1 = 2\omega L(1 - \omega^2 CL - R^2 C / 2L) \\ \theta_0 = \tan^{-1}(B_0 / A_0), \quad \theta_1 = \tan^{-1}(B_1 / A_1) \end{cases} \quad (8)$$

由式(6)一式(8)可知, 根据图 5 预充电等效回路计算出的 MMC 交流侧相电流由稳态分量 $i_p(t)$ 与自由分量 $i_{\alpha 1}(t)$ 、 $i_{\alpha 2}(t)$ 共同构成。在整个充电过程中, 通常认为 MMC 交流侧最大冲击电流峰值 I_{ph_max} 只

在合闸后的一个工频周期内产生^[9,29], 此时需要在交流侧串入限流电阻 R_{st} 以抑制产生的过电流, 限流电阻阻值越大, 其产生的冲击电流峰值越小。因此, 在进行限流电阻的选择时, 可将式(6)在一个工频周期 0.02 s 内计算得到的最大电流值作为 MMC 不可控充电阶段的交流侧最大相电流估计值, 并根据交流侧最大允许相电流 I_{lim} 得到启动限流电阻的最小限定值 R_{st_min} , 即

$$I_{ph_max} = \max(|i_{ph}(t, R_{st_min})|) \leq I_{lim} \quad (9)$$

根据式(9), 对比了在不同交流侧等效电阻情况下, MMC 不控充电阶段最大冲击电流的近似计算结果和仿真结果, 如图 6 所示。可以看到, 最大启动电流等效计算结果与仿真结果总体表现出良好的近似性, 验证了本文所提等效计算方法的合理性。

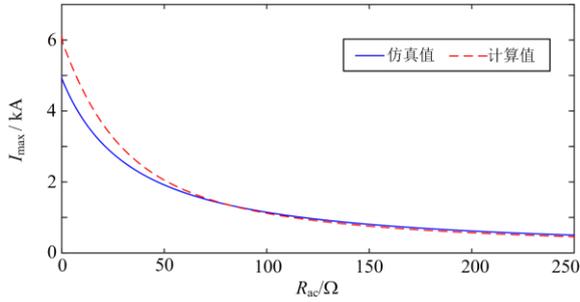


图 6 计算结果对比

Fig. 6 Comparison of calculation results

经过几个周期的轮流充电后, 每个桥臂子模块电容电压充电至一定值, 从直流侧来看, MMC 处于轮流充电状态的 3 个桥臂电容保持并联关系, 等效电阻为 $2R_{ac}$, 此过程中, 整个 MMC 的直流侧电压可近似表示为

$$U_{dc}(t) = U_{lm}(1 - e^{-t/\tau}) \quad (10)$$

式中, τ 等效时间常数, $\tau = 6R_{ac}C_{SM}/N_{tot}$, 其中 N_{tot} 为桥臂子模块电容数量总和。式(10)表明了 MMC 直流电压上升速度与交流侧等效电阻 R_{ac} 呈现出逆相关的关系, 限流电阻越大, 充电时间就越长。将直流电压 U_{dc} 上升至 $0.99U_{lm}$ 时所需的充电时间记为 t_c , 则在给定的 MMC 预充电时间 t_{ref} 下, 可反解得到启动限流电阻的最大限定值 R_{st_max} , 即

$$\begin{cases} U_{dc}(t) = U_{lm}(1 - e^{-t/\tau}) \leq 0.99U_{lm} \\ t_c < t_{ref} \end{cases} \quad (11)$$

在不控充电阶段结束后, MMC 各子模块电容最终电压为

$$U_c = U_{lm} / N \quad (12)$$

式中, N 为 MMC 单个桥臂子模块个数。考虑到实际工程中子模块电容电压达到额定电压的 30% 即可

满足控制驱动电路的取能要求, 此时各 MMC 均已达到正常控制 IGBT 通断的要求, 可进入到下一步的控制解锁环节。

3 控制解锁环节

3.1 MMCB 启动不平衡电流的产生原因

由前述分析可知, 在 MMC 不可控充电阶段结束后, 子模块电容电压尚未达到额定值, 但已达到其控制触发电路的分压取能要求, 此时各 MMC 需要投入内外环控制器以继续抬升直流电压, 同时在子模块电容电压均衡控制策略的作用下, 周期性地投切子模块以完成对子模块电容的充电。在白鹤滩-江苏混合级联直流工程的逆变侧结构中(如图 7 所示), 为了保证整个系统具有有功功率分配能力, 低压端 3 个并联的 MMC 在稳定运行阶段采用“定直流电压+定有功功率”的主从控制配合方式, 其中 MMC₁ 控制直流侧电压为定值, MMC₂ 和 MMC₃ 控制交流侧有功功率为定值, 其各自的稳态工作点为图 8 MMCB 主从控制图中的 A₁—A₃ 点。

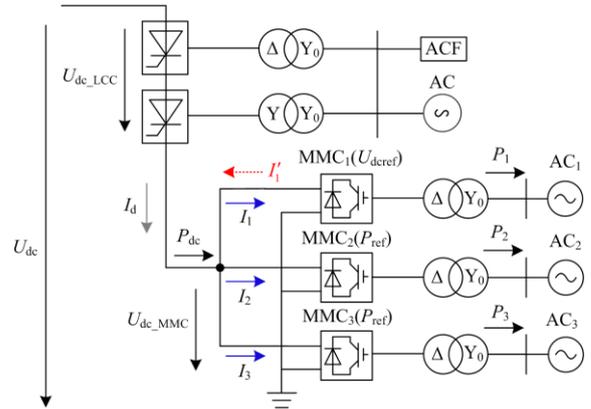


图 7 混合级联系统逆变侧结构

Fig. 7 Inverter side structure of hybrid cascade system

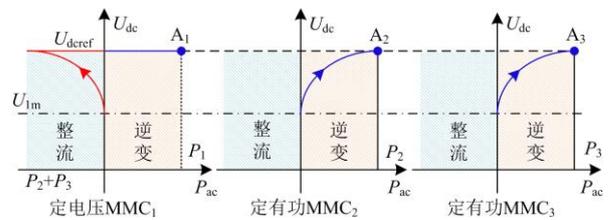


图 8 MMCB 主从控制示意图

Fig. 8 Block diagram of MMCB master-slave control

根据图 7, 由稳态时的 KCL 关系可知, 此时逆变侧低压端的电流、功率满足关系式(13)。

$$\begin{cases} I_d = I_1 + I_2 + I_3 \\ P_{dc} = P_1 + P_2 + P_3 + \Delta P_{loss} \end{cases} \quad (13)$$

式中： I_d 、 P_{dc} 分别代表直流侧总电流以及馈入 MMCB 直流总功率； I_n 、 P_n 分别代表 MMC_n ($n=1,2,3$) 各自的直流侧电流以及交流馈出功率； ΔP_{loss} 代表 MMC 阀组总损耗。

式(13)表明了系统稳态时低压端 MMCB 的功率分配模式，但在 3 个 MMC 过渡到各自的稳态工作点之前，采用定直流电压与定有功功率控制的 MMC 将表现出不同的控制特性。若直接按照主从控制策略进行解锁，则在分阶段投入 MMC 控制以及 LCC 控制时将引起低压端 MMCB 的不平衡启动电流，原因分析如下。

1) MMCB 控制解锁阶段：由于 MMC_1 采用定直流电压控制，不具备电流或功率控制能力，因此其直流电流可以双向流动，其大小取决于总电流 I_d 与其余两个定功率控制换流器的直流电流。启动时，在高压端 LCC 尚未解锁的情况下， $I_d = 0$ ， MMC_1 换流器内部子模块电容将会在电压控制器的作用下继续从交流侧汲取有功功率，从而提升至额定直流电压， MMC_1 工作在整流模式， MMC_2 和 MMC_3 采用定有功功率控制，其有功功率定值 P_{ref} 决定了与其所连交流系统的功率交换情况。

当功率参考值 $P_{ref} \geq 0$ ，则其内部子模块电容继续充电、维持内部开关损耗的功率来源只能是来自于没有功率调节能力的 MMC_1 ，从而造成启动时定电压 MMC_1 与 2 个定功率 MMC_2 和 MMC_3 直流端口间的不平衡启动过电流现象，此时 MMC_1 直流侧电流方向如图 7 中 I'_1 所示， MMC_1 工作于整流模式，并从其交流电网侧汲取大量有功，影响受端电网稳定性。而如果功率参考值 $P_{ref} < 0$ ，相当于从交流系统吸收恒定功率，同样地， MMC_1 快速升高的直流侧电压成为抬升 MMC_2 和 MMC_3 子模块电容电压的充电电源，并在子模块电容充电完成后，直接形成 3 个 MMC 之间的不平衡功率交换模式。此外，有功功率控制器解锁时，在交流网侧产生的功率暂态波动，也将引起并联 MMCB 直流侧电流的不平衡现象。

2) LCC 控制解锁阶段：在整流侧和逆变侧 LCC 解锁后，整个混合输电系统进入直流功率上升阶段，此时直流电流将在定电流控制器作用下以一定速率上升至额定值。此阶段中，为了维持送受端功率的平衡协调，常规启动策略通常认为只需将整流侧 LCC 的电流指令值与定功率控制 MMC 的功率指令值保持相同的斜率上升即可^[23]，但其一方面忽略了长线路功率传输所需要的耗时，另一方面未考虑 LCC 与 MMC 响应特性的快慢问题，由于 MMC 本身阻尼特性较小，从而具有更快的功率调节能力。

因此，在整流侧 LCC 控制器解锁的初期，其传输的功率将不能满足逆变侧定有功功率控制下 MMC_2 和 MMC_3 快速上升的功率输送要求，两者的功率缺额将由没有功率控制能力的 MMC_1 提供，此时，将再次产生 3 个 MMC 之间的不平衡电流现象。

综合以上原因，需要对混合级联系统控制解锁阶段的不平衡电流问题有针对性地采取优化措施。

3.2 不平衡启动电流抑制策略

在混合级联系统的控制解锁阶段，根据 3.1 节所分析的低压端 MMCB 可能产生不平衡启动电流的主要原因有两个：一方面是在 MMCB 外环控制器解锁时，定直流电压与定有功功率控制器之间的控制特性不一致；另一方面则是在 LCC 控制器解锁时，直流传输功率与 MMC 功率的参考值不匹配。针对上述原因，本节提出一种简单有效的并联 MMCB 启动优化控制策略，主要思路由 MMC 外环功率控制器的时序配合以及采取自适应的功率参考值完成，其具体的控制逻辑如图 9 所示。

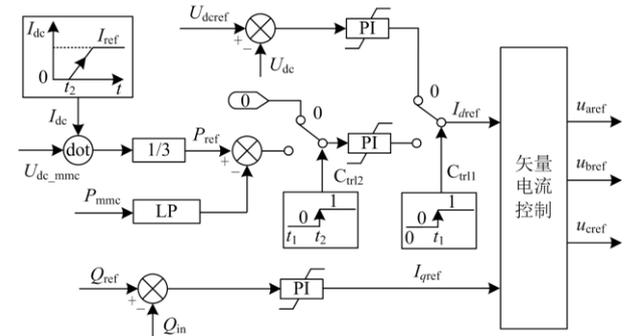


图9 MMCB启动优化控制策略

Fig. 9 MMCB start-up optimization control strategy

图9中，启动优化策略的控制逻辑主要分为以下2个步骤。

1) 在 MMCB 的可控充电阶段，为消除有功类外环控制器控制特性的不一致，选择在 $0-t_1$ 阶段投入相同的直流电压控制器和电容电压均衡控制，待所有子模块电容电压充电至额定电压后， MMC_2 和 MMC_3 的外环控制器可以正常切换到稳态时的定有功功率控制器。切换后，为了抑制 MMC 交流侧功率波动带来 PI 控制器不必要的响应动作，直到 t_2 时刻高压端 LCC 控制器解锁前，外环功率 PI 控制器的输入偏差始终设置为 0。

2) 当低压端 MMC 完成启动，整流侧和逆变侧 LCC 在 t_2 时刻收到解锁命令后，直流线路电流 I_d 开始从 0 上升至额定运行电流，此时线路传输功率与定有功 MMC 功率参考值 P_{ref} 的不匹配将导致 3 个 MMC 之间存在不平衡有功功率的交换。为此，在

提出的优化策略中, 将定有功功率控制 MMC₂ 和 MMC₃ 的功率参考值设置为根据线路电流自适应整定, 具体关系如式(14)所示。

$$P_{\text{ref}} = \frac{1}{3} P_{\text{mmc}} = \frac{1}{3} I_{\text{dc}} U_{\text{dc_mmc}} \quad (14)$$

式中: P_{mmc} 代表传递到低压端 MMCB 的实际总功率; I_{dc} 代表上升的直流线路电流; $U_{\text{dc_mmc}}$ 代表 MMC 端口直流电压。根据式(14), 在系统控制器解锁初期, P_{mmc} 较低, MMC₂ 和 MMC₃ 的有功功率指令值跟随均分后的 P_{mmc} , 从而抑制 MMCB 之间的不平衡电流问题。

4 系统协调启动策略

根据前文所分析的电阻限流措施与不平衡启动电流抑制策略, 设计混合级联直流系统 LCC 与 MMC 间的协调配合启动流程, 如图 10 所示。

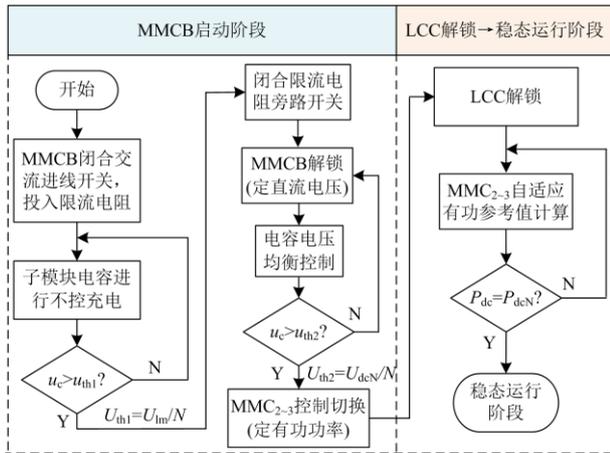


图 10 混联系统协调启动流程

Fig. 10 Coordinated start-up process of hybrid system

图 10 中, 具体的启动控制流程如下:

1) 启动的最初阶段, 所有交流侧开关处于断开状态, MMCB 内部所有子模块 IGBT 处于不控闭锁状态。满足启动条件后, 按照第 2 节所述限流电阻选取原则, 闭合逆变侧低压端并联 MMCB 交流系统侧进线开关, 在交流侧电源激励下, 首先为 MMCB 内部所有子模块电容进行不控充电, 当电容电压达到稳定的阈值 $U_{\text{th1}} = U_{\text{lm}} / N$ 后, 充电电流保持为 0, 闭合限流电阻旁路开关。

2) 不控充电阶段结束后, 3 个 MMC 投入定直流电压控制器以保持相同的外环控制特性, 此时, 结合电容电压均衡排序控制策略, MMC 内部子模块电压逐渐提升至额定运行值 $U_{\text{th2}} = U_{\text{dcN}} / N$ 。待电压稳定后, MMC₂ 和 MMC₃ 转为定有功功率控制, 并在高压端 LCC 解锁前, 将其外环 PI 控制器输入

偏差设置为零。

3) 解锁双侧 LCC 控制器, 在系统直流传输功率从零开始上升并到达额定值阶段, MMC₂ 和 MMC₃ 的外环有功参考值根据实际直流极母线功率进行计算, 抑制 MMCB 之间的不平衡电流, 直到各状态量达到额定值, 系统进入稳态运行阶段。

5 仿真验证

5.1 混合级联直流系统仿真模型

为了验证所提混合级联型直流系统换流器协调优化启动策略的有效性, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建了如图 1 所示的混合直流输电系统, 系统主要仿真参数如表 1 所示。

表 1 系统主要参数

Table 1 Main system parameters

对象	电气参数	额定值
整流侧 LCC	直流电压/kV	800
	直流电流/kA	5
	变压器变比	525 kV/172.3 kV
逆变侧 LCC	直流电压/kV	400
	直流电流/kA	5
	变压器变比	510 kV/161.4 kV
逆变侧	直流电压/kV	400
	直流电流/kA	1.67
	变压器变比	510 kV/182.6 kV
MMC _n (n = 1, 2, 3)	桥臂电感/mH	50
	桥臂子模块数	200
	子模块电容/mF	18
直流线路	线路长度/km	2074
	线路电阻/Ω	1.82
	平波电抗器/mH	150

仿真中几个重要的时间节点设置如下。

1) 0—0.1 s: 所有换流器均闭锁, 交流侧断路器处于分闸状态。

2) 0.1—0.5 s: MMC 交流侧断路器合闸, 投入限流电阻, 进入不控充电阶段。

3) 0.5—1.0 s: MMC 内外环控制器解锁。

4) 1.0 s: 整流侧和逆变侧 LCC 控制器解锁。

同时, 在低压端 MMCB 启动过程中, 设置初始状态下子模块电容电压为 0, 规定 $I_{\text{lim}} = 1.5 I_{\text{acN}}$ 、 $t_{\text{ref}} = 0.3 \text{ s}$, 即规定 MMC 交流侧最大允许过电流峰值为 1.5 倍额定电流运行幅值 ($I_{\text{acN}} = 1.0 \text{ kA}$), 规定最大预充电时间为 0.3 s。

5.2 MMC 限流电阻选取

对混合级联直流输电系统低压端 MMC 预充电过程进行仿真试验, 综合考虑系统中变压器漏抗、

电源内阻等参数后, 根据式(9)和式(11)得出限流电阻 R_{st} 与最大启动电流 I_{max} 、预充电时间 t_c 的关系如图 11 所示, R_{st} 的取值为 $204 \Omega < R_{st} < 241 \Omega$, 综合考虑后选取中间值 $R_{st} = 220 \Omega$ 。

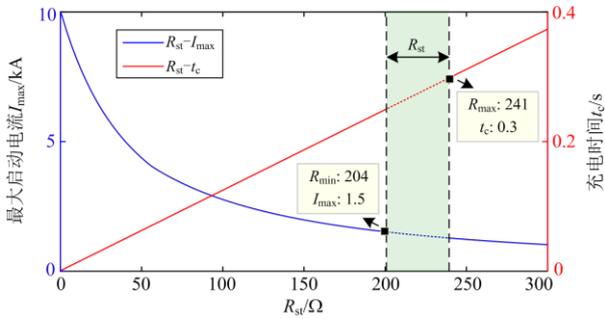


图 11 限流电阻选取范围计算值

Fig. 11 Selection range of current limiting resistance

设定合适的限流电阻参数并满足相应的启动条件后, 以 MMC_1 为例, 仿真得到 MMC 启动全阶段 A 相冲击电流波形, 如图 12 所示。

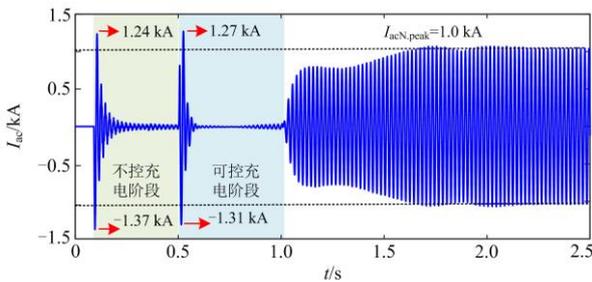


图 12 启动冲击电流仿真值

Fig. 12 Start-up impulse current simulation value

由图 12 可知, 在 MMC 交流侧断路器合闸后, 其合闸暂态冲击电流最大瞬时值约为 1.37 kA, 表明按照第 2 节关于 MMC 不控充电阶段限流电阻选取的合理性。0.5 s 控制器投入时, 冲击电流最大瞬时值约为 1.31 kA, 启动全程 MMC 交流侧最大冲击电流未超过 1.5 倍稳态运行幅值。

5.3 启动控制策略有效性验证

按照混合级联系统分段启动流程, 在直接按照稳态主从控制策略与投入本文所提启动优化控制策略的条件下, 混合级联直流系统的启动特性对比仿真结果如图 13 和图 14 所示。

图 13 显示了当未投入启动优化控制策略进行混合级联直流系统的启动时, 低压端并联 $MMCB$ 分别在 0.5 s 时控制器解锁以及 1~1.3 s 直流功率上升阶段发生了阀组间启动电流不平衡现象, 尤其是在 0.5 s 采用定直流电压和定有功功率的主从控制方案解锁时, 由于外环控制特性的不一致导致了严

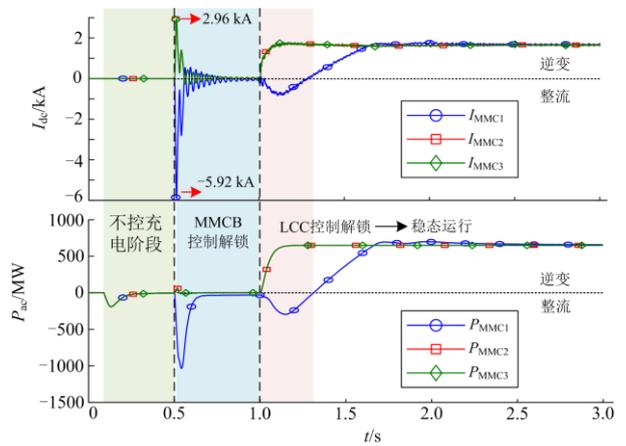


图 13 未投入优化策略时 MMCB 启动特性

Fig. 13 Characteristics of MMCB start-up without optimization control strategy

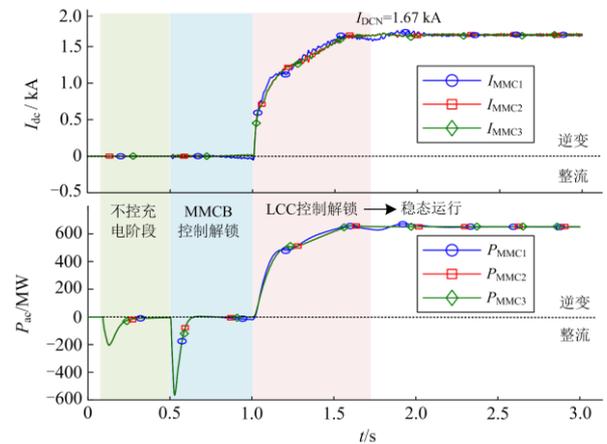


图 14 投入优化策略后 MMCB 启动特性

Fig. 14 Characteristics of MMCB start-up after inputting optimization control strategy

重的过电流现象, 其直流过电流最大绝对值达到 5.92 kA, 超过额定运行电流 3.54 倍, 严重威胁相关换流器设备的安全启动; 同时在 1.0~1.3 s 高压端 LCC 解锁期间, 再次产生了 3 个 MMC 间的启动电流不平衡现象, MMC_1 在启动初期工作于整流模式, 验证了第 3 节中理论分析的正确性。

在投入本文所提启动优化控制策略后, 由图 14 可以看到, 0.5 s 时低压端 $MMCB$ 均采用相同的定直流电压控制器解锁, 能有效抑制并联阀组间的启动不平衡电流。待子模块电容充电至额定值后, 0.7 s 时 MMC_2 和 MMC_3 切换成定有功功率控制, 由于此时外环 PI 控制器输入偏差保持为 0, $MMCB$ 之间未出现较大的功率波动。1 s 时 LCC 控制解锁, 直流功率开始提升后, 根据实际传输功率采取自适应的功率参考值后, LCC 实际输送直流功率与定有功功

率参考值不匹配导致的 MMCB 不平衡功率交换得到了显著抑制, 3 个 MMC 传递到交流系统侧的有功功率经斜坡上升平稳过渡到稳态值。

最后, 图 15 给出了本文所提混合级联系统协调启动策略下的直流系统电压、电流波形图, 可以看到, 直流线路电压 U_{dc_line} 、MMC 端口直流电压 U_{dc_middle} 和直流线路电流 I_{dc} 均在 1 s 内上升至系统额定值, 整个启动过程较平稳, 稳态特性良好。

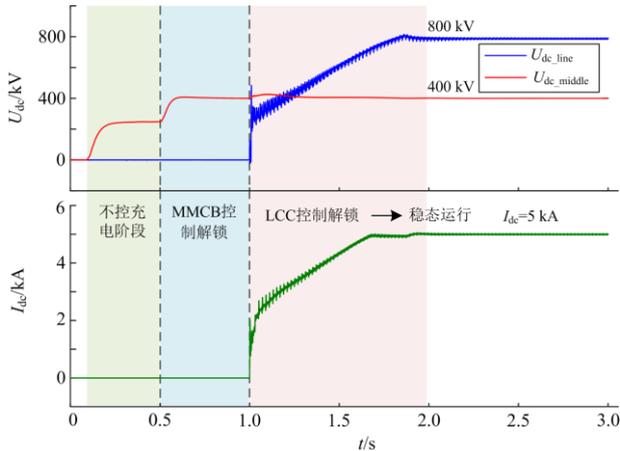


图 15 混合级联直流系统启动电压、电流特性

Fig. 15 Start-up voltage and current characteristics of hybrid cascade DC system

6 结论

本文研究了一种 LCC-MMC 新型混合级联直流输电系统的启动控制策略, 主要贡献如下:

1) 从 MMC 启动暂态特性出发, 分析了 MMC 启动时的不可控充电简化等效回路, 推导了最大启动电流、充电时间与限流电阻间的近似计算方法, 可为实际工程中限流电阻的参数选取提供依据, 具有一定的工程实用价值;

2) 具体分析了混合级联系统低压端 MMCB 在系统控制器解锁时产生不平衡启动电流现象的原因, 提出了一种基于不同换流器间控制时序配合与自适应 MMC 外环功率参考值的启动优化策略, 仿真结果验证了该启动控制策略的有效性。

参考文献

[1] MOHAN M. A comprehensive review of DC fault protection methods in HVDC transmission systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 1-20.

[2] 张伟晨, 熊永新, 李程昊, 等. 基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 63-72.

ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and

coordinated recovery of multi-infeed DC system based on improved VDCOL[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.

[3] NAUSHATH M H, ATHULA D R, ANIRUDDHA M G, et al. Investigation of fault ride-through capability of hybrid VSC-LCC multi-terminal HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 241-250.

[4] 卢东斌, 田杰, 李海英, 等. 电网换相换流器和电压源换流器串联组成的混合直流换流器控制和保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 92-101.

LU Dongbin, TIAN Jie, LI Haiying, et al. Control and protection of series hybrid DC converters with a line-commutated converter and a voltage source converter[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 92-101.

[5] 董朝阳, 吉攀攀, 冯敏, 等. 基于 LCC-FHMMC 混合直流输电的控制策略研究及试验验证[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 148-155.

DONG Chaoyang, JI Panpan, FENG Min, et al. Control strategies and experimental verification for hybrid HVDC system based on LCC and FHMMC[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 148-155.

[6] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于限流器与断路器协调的混合直流输电系统故障隔离方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 119-127.

CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Fault isolation method of a hybrid HVDC system based on the coordination of a fault current limiter and a DC circuit breaker[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 119-127.

[7] SHI Xiaojie, LIU Bo, WANG Zhiqiang, et al. Modeling, control design, and analysis of a startup scheme for modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(11): 7009-7024.

[8] 罗永捷, 蒲羿, 宋勇辉, 等. 混合型模块化多电平换流器启动冲击电流特性分析及控制策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(增刊 1): 49-59.

LUO Yongjie, PU Yi, SONG Yonghui, et al. The inrush current characteristics and control strategies of hybrid-modular multilevel converter systems during start-up processes[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S1): 49-59.

[9] 肖晔庆, 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.

[10] 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.

[11] 陆翌, 赵剑, 裘鹏, 等. 一种适用于 LCC-LCC+FBMMC 串联混合型直流输电系统的启动策略[J]. 电力建设, 2017, 38(8): 95-101.

LU Yi, ZHAO Jian, QIU Peng, et al. Start-up strategy for LCC-LCC and FBMMC series based hybrid HVDC system[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(8): 95-101.

- [12] 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.
- [13] 陈灏泽, 范若萱, 王金玉, 等. VSC-LCC 型混合直流输电系统启动控制策略研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(11): 62-67.
CHEN Haoze, FAN Ruoxuan, WANG Jinyu, et al. Research on startup control strategy for VSC-LCC hybrid HVDC system[J]. Smart Power, 2020, 48(11): 62-67.
- [14] 杨洋, 王瑶, 李浩涛, 等. 子模块混合型 LCC-MMC 混合直流输电系统的启动控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 58-64.
YANG Yang, WANG Yao, LI Haotao, et al. Start-up control strategies for the cell-hybrid LCC-MMC hybrid HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 58-64.
- [15] 胡锦根, 贾轩涛, 王瑶, 等. 基于 LCC-VSC 多端混合直流输电系统的启停控制策略及动模试验[J]. 电力建设, 2017, 38(8): 86-94.
HU Jingen, JIA Xuanta, WANG Yao, et al. Startup-stop control strategy and dynamic simulation experiments of multi-terminal hybrid HVDC system based on LCC-VSC[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(8): 86-94.
- [16] LIN Sheng, WANG Liang, MU Dalin, et al. Research on starting-up control strategy of VSC-HVDC system[J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(16): 1957-1965.
- [17] 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.
LI Chao, LI Gang, DONG Yunlong, et al. Protection strategy of current suppression resistor used in MMC-HVDC startup process[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 39-45.
- [18] 李鹏, 崔玉, 孔祥平, 等. ± 800 kV 多落点 LCC-MMC 直流系统控制器建模[J]. 现代电力, 2019, 36(6): 38-44.
LI Peng, CUI Yu, KONG Xiangping, et al. Modeling of ± 800 kV multi-terminal LCC-MMC HVDC controller[J]. Modern Electric Power, 2019, 36(6): 38-44.
- [19] 刘泽洪, 马为民, 王绍武, 等. 混合级联特高压直流输电系统方案设计及动模试验验证[J]. 电网技术, 2021, 45(3): 1-9.
LIU Zehong, MA Weimin, WANG Shaowu, et al. Schematic design of hybrid cascaded ultra HVDC and its modification in dynamic model experiment[J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 1-9.
- [20] 刘杉, 余军, 贺之渊, 等. 基于 VSC 与 LCC 混合的多点传输直流输电系统拓扑结构研究与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2980-2988, 3148.
LIU Shan, YU Jun, HE Zhiyuan, et al. Research on the topology and characteristic of multi-terminal HVDC based on VSC and LCC[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2980-2988, 3148.
- [21] 彭忠, 孙攀磊, 韩伟, 等. LCC 与 VSC 级联的特高压混合直流输电系统控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 162-172.
PENG Zhong, SUN Panlei, HAN Wei, et al. Control strategy of a hybrid UHVDC transmission system cascaded by LCC and VSC[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 162-172.
- [22] 郭春义, 吴张曦, 赵成勇. 特高压混合级联直流输电系统中多 MMC 换流器间不平衡电流的均衡控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6653-6663.
GUO Chunyi, WU Zhangxi, ZHAO Chengyong. Balancing control strategy for unbalanced current between multiple MMC converts in hybrid cascaded UHVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6653-6663.
- [23] 杨硕, 郑安然, 彭意, 等. 混合级联型直流输电系统直流故障特性及恢复控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 166-172, 179.
YANG Shuo, ZHENG Anran, PENG Yi, et al. DC fault characteristic analysis and recovery control strategy for hybrid cascaded HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 166-172, 179.
- [24] 赵晚君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 31-35.
- [25] 赵成勇. 柔性直流输电建模和仿真技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [26] ZHANG Lei, QIN Jiangchao, WU Xiajie, et al. A generalized precharging strategy for soft startup process of the modular multilevel converter-based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(6): 5645-5657.
- [27] LI Binbin, XU Dandan, ZHANG Yi, et al. Closed-loop precharge control of modular multilevel converters during start-up processes[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(2): 524-531.
- [28] 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 system with DC fault ride-through capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4345-4352.
- [29] 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.
ZHOU Yuebin, JIANG Daozhuo, GUO Jie, et al. Start/stop control of modular multilevel converter based HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 204-209.

收稿日期: 2022-01-22; 修回日期: 2022-02-25

作者简介:

何平港(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为混合直流输电保护与控制; E-mail: pghe@foxmail.com

牟大林(1994—), 女, 博士研究生, 研究方向为高压直流输电保护与控制; E-mail: dalin9009@163.com

林圣(1983—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为交直流混联电网保护与控制, 牵引供电系统故障预测与健康诊断, 城市轨道交通杂散电流分析与抑制。E-mail: slin@swjtu.edu.cn

(编辑 许威)