

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211709

MMC 换流站阀侧交流接地故障电流解析

单节杉, 任敏, 田鑫萃, 束洪春, 李涛

(昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650504)

摘要: 对模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)换流站阀侧交流接地故障特性进行研究发现: 阀侧交流系统发生金属性接地故障时, 故障点入地电流由下桥臂电容放电电流和上桥臂以及对端桥臂电容放电电流构成, 网侧交流系统不会馈入入地电流; 带过渡电阻接地故障时, 网侧交流系统将通过过渡电阻作用于故障点入地电流。详细推导了三相接地故障和单相接地故障下的入地故障电流和桥臂电流的数学解析式。采用 RTDS 仿真验证了该表达式的正确性。由于阀侧交流出口处电位被钳制为 0, 因此上桥臂的子模块电容将产生过电压。下桥臂与故障点构成放电电容回路, 下桥臂流过的故障电流迅速增大, 且无法通过断路器切断故障电流。因此, 建议采取可靠的限流措施避免阀侧故障对换流站等一次设备造成严重伤害。

关键词: 柔性直流输电; 阀侧交流; 接地故障; 故障回路; 电流解析

Analysis of grounding fault current at the AC valve side of an MMC converter station

SHAN Jieshan, REN Min, TIAN Xincui, SHU Hongchun, LI Tao

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China)

Abstract: In this paper, the AC grounding fault characteristics on the valve side of an MMC converter station are studied. It is found that when the metal grounding fault occurs in the AC system on the valve side, the grounding current at the fault point is composed of the capacitor discharge current of the lower bridge arm and the capacitor discharge current of the upper bridge arm and the opposite bridge arm, and the grid side AC system will not feed the grounding current. For a grounding fault with transition resistance, the AC system at the grid side will act on the grounding current at the fault point through the transition resistance. The mathematical expressions of grounding fault current and bridge arm current under a three-phase grounding fault and single-phase grounding fault are derived in detail. The correctness of the expression is verified by RTDS simulation. Since the potential at the valve side AC outlet is clamped to 0, the sub module capacitance of the upper bridge arm will produce an overvoltage. For the discharge capacitor circuit composed of the lower bridge arm and the fault point, the fault current flowing through the lower bridge arm increases rapidly and cannot be cut off through the circuit breaker. Therefore, it is recommended to take reliable current limiting measures to avoid serious damage to primary equipment caused by a valve side fault, such as to the converter station.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52167011).

Key words: flexible DC transmission; AC valve side; ground fault; fault circuit; current analysis

0 引言

模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)最早由德国学者 R. Marquardt 和 A. Lesnicar 提出, 并于 2010 年 11 月在美国旧金山投运 Trans Bay Cable 首条柔性直流输电工程。2011

年上海南汇投运柔性直流工程是中国首条 VSC 直流工程, 2015 年中国厦门柔性直流工程的投运是世界首个真正意义上的真双极直流系统。经过 60 年的发展, 世界首个四端柔性直流环形电网组网成功, 标志着直流电网成为现实。2020 年 7 月 2 日, 乌东德混合多端高压直流工程昆北站、龙门站双极单阀组系统调试送电成功, 标志着大容量柔性直流在大电网中的应用。可见, 采用架空线路的柔性直流电网已经逐渐形成。由于架空线路故障率高, 而直流

基金项目: 国家自然科学基金地区项目资助(52167011); 国家自然科学基金重点项目资助(52037003)

系统是一个低惯量、弱阻尼系统, 所以直流系统接地故障后, 故障电流迅速上升, 而且幅值很大, 数毫秒内超出换流器内部元件过流保护阈值^[1-8]。

换流站交流阀侧故障作为特殊少有的故障类型^[9-12], 主要由穿墙套管绝缘老化、雷击闪络等引起的接地故障。如某年某月某日 16 时 44 分, 某直流换流站穿墙套管故障引起极 I 高端换流器差动保护 II 段动作、极 I 差动保护 II 段动作。该故障引起的冲击电流巨大, 导致套管防爆膜完全炸裂脱落, 套管内部有熏黑痕迹, 伞裙存在缺口。由于阀侧故障接地点与直流侧接地点构成故障电流的流通通路, 换流器闭锁前的冲击电流很大甚至比直流线路故障更为严重, 而该故障位于交流保护区, 不能通过直流断路器切除, 极易对换流站造成损害, 同时由于现有的限流装置位于直流母线出口, 对于这种情况下, 不能对故障电流进行抑制^[13-15]。目前对换流站交流阀侧接地故障电流特性分析和研究的文献较少, 并且主要聚焦于换流阀闭锁后的故障特性的分析, 如文献[16-18]对交流系统阀侧故障特性进行了分析, 推导了闭锁后故障电流数学表达式并提出了相应的保护控制策略。文献[19]对换流站阀侧交流三相接地故障进行故障解析, 而实际工程中关注的是单相接地故障, 这种情况下解析推导故障电流表达式才有意义。文献[20-21]分析了 MMC 换流站阀侧交流接地故障, 闭锁前及闭锁后过电压的产生机理以及闭锁时刻对过电压的影响。文献[22]对逆变侧换流变压器阀侧接地故障进行理论分析和仿真试验, 并结合仿真试验详细分析了这些保护动作策略存在的问题, 提出了相应的改进措施。

本文对 MMC 换流站交流阀侧故障特性进行了研究, 详细推导了交流阀侧发生三相接地故障和单相接地故障, 换流站 IGBT 闭锁前, 直流侧提供故障点电流以及桥臂电流的数学解析式。分析结果表明: 对于对端换流站与故障点构成的放电回路, 由于上桥臂电容初始电压与故障电流方向相反, 且故障回路存在平波电抗器等限流器件, 故直流线路故障电流较小, 但由于阀侧交流出口处电位被钳制为 0, 因此上桥臂的子模块电容将产生极大的过电压, 导致子模块电容击穿, 通过断开近端直流断路器可有效解决该问题^[23-24]; 而对于下桥臂与故障点构成的放电回路, 下桥臂流过的故障电流迅速增大, 且无法通过断路器切断换流站与故障点的联系, 因此建议采取可靠的限流措施, 有效避免阀侧故障对换流站等一次设备造成严重伤害, 并降低对此类故障的保护要求。

1 架空线路 MMC-HVDC 结构

MMC 结构特性使开关器件损耗、阶跃电压减小, 波形质量以及换流器运行性能提高。与 VSC 相比 MMC 内的子模块以级联形式组成, 同时将直流储能电容分散到每个级联的子模块内, 而不是接在直流线路两极之间。MMC-HVDC 系统整流侧和逆变侧换流站结构相同, 图 1 为换流站拓扑及子模块结构示意图。MMC 的三相电路由 6 个桥臂组成, 同相由上下桥臂构成一个相单元, 而每个桥臂由多个子模块和一个桥臂电抗串联构成, MMC 系统通过控制子模块工作状态来维持电压稳定。

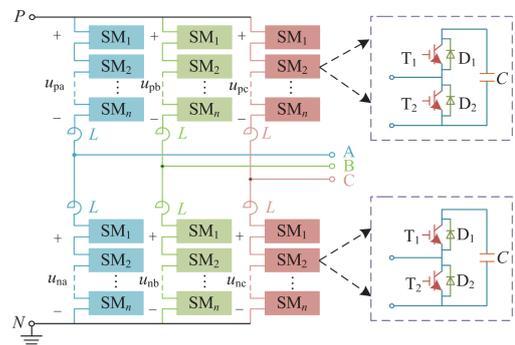


图 1 换流站拓扑及子模块结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the converter station topology and sub module

MMC-HVDC 系统的接地方式可以分为交流侧接地以及直流侧接地。交流侧接地可以分为换流变压器阀侧绕组中性点接地以及换流器阀侧电抗器中性点接地; 直流侧接地可以分为极线经大电阻接地、极线经大电容接地与经接地极引线的接地几种类型。经接地极引线接地的双极 MMC-HVDC 系统单侧的两个换流器之间通过接地极引线接地, 该系统直流输电线路发生单极接地故障时, 非故障极仍可以正常运行。架空线路柔性 MMC 直流系统仿真模型如图 2 所示。

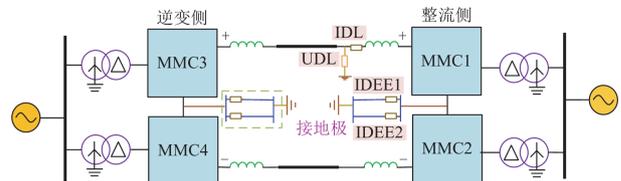


图 2 架空线路柔性 MMC 直流系统仿真模型

Fig. 2 Simulation model of overhead line flexible MMC DC system

2 交流阀侧三相接地故障电流解析

现场实际存在由于穿墙套管绝缘老化、雷击闪

络等引起的阀侧接地故障。故障引起的巨大冲击电流导致套管防爆膜完全炸裂脱落，套管内部有熏黑痕迹，伞裙存在缺口，如图3所示。

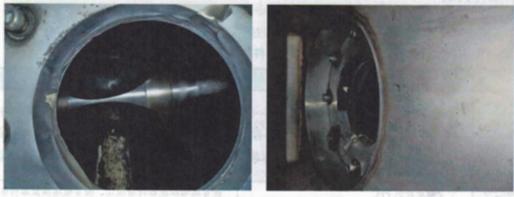


图3 套管防爆膜脱落实物图

Fig. 3 Physical picture of casing explosion proof film falling off

2.1 下桥臂故障回路电流解析

阀侧交流发生三相接地故障，按照电流的流通路径可分为3个部分，其故障电流回路如图4所示。

回路 I：交流网侧的馈入电流，对于对称短路，不会提供入地电流(零序电流)。对于非金属性接地，网侧电流会影响桥臂电流。

回路 II：下桥臂电容的放电电流，其放电回路由故障点→故障侧下桥臂→接地极构成。

回路 III：对端换流站以及故障侧上桥臂的放电电流，其放电回路由上桥臂→直流线路→远端换流站→远端换流站接地极→故障点构成。

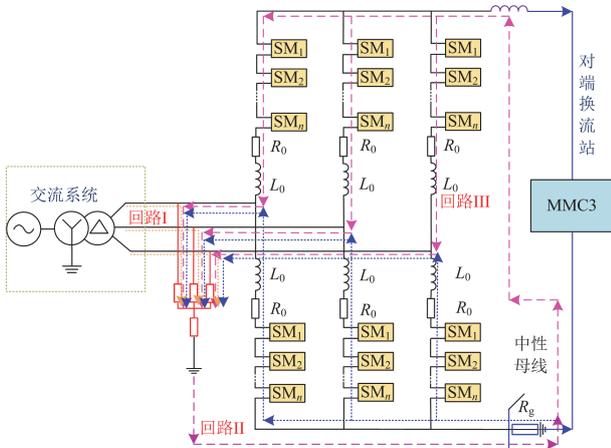


图4 阀侧交流发生三相接地故障电流回路

Fig. 4 Three-phase grounding fault current path of valve side AC

由于阀侧故障接地点与直流侧接地点构成桥臂电容放电电流的流通通路，故障冲击电流很大，因此在下文分析直流侧提供的故障点入地电流，同时当接地点过渡电阻为零时，交流网侧没有馈入入地电流，且回路 II 和回路 III 没有耦合，可以独立计算。对于过渡电阻的影响，将在仿真验证时进行讨论分析。

现从换流站视入，故障点与下桥臂以及接地极构成电流流通通路如图5所示，其对应的等效电路如图6所示。图中 R_0 为桥臂等效电阻， L_0 为桥臂电感， $N_{nj} (j = a, b, c)$ 为故障时每相下桥臂投入的子模块总个数， $U_{nj} (0) (j = a, b, c)$ 为故障时刻下桥臂等效电容电压， $i_{nj} (0) (j = a, b, c)$ 为故障时刻下桥臂瞬时电流， R_g 为接地极极址等效电阻。

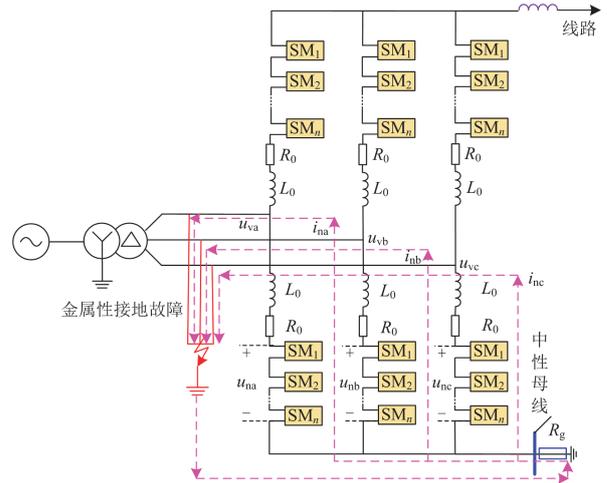


图5 Δ 侧接地故障下故障点、下桥臂和接地极构成的电流流通通路

Fig. 5 Current flow path of fault point, lower bridge arm and grounding electrode under Δ side grounding fault

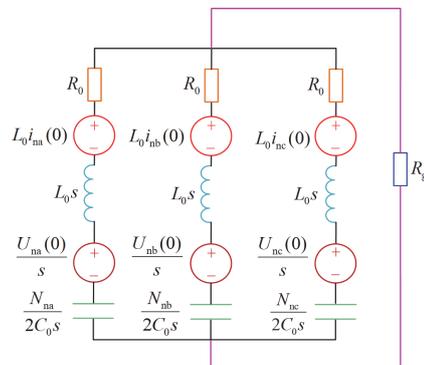


图6 Δ 侧接地故障下故障点、下桥臂和接地极构成的电流流通通路的等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit of current flow path of fault point, lower bridge arm and grounding electrode under Δ side grounding fault

考虑到下桥臂子模块投切与控制系统密切相关，精确求取下桥臂故障电流较为复杂，而由于 MMC 闭锁前电容放电过程极短，约为 1~2 ms，因此本文忽略控制投切的影响，以故障临界时刻的桥臂电压、电流为初始条件，求解闭锁前换流站提供

的故障电流。

假设交流调制比为 1, 由于上下桥臂同一交流分量相差 180° , 可知阀侧交流电压 u_{vj} 和下桥臂电流 i_{nj} 为

$$u_{vj}(t) = 0.5U_{dc}(0) - U_{smj} \sin(\omega t + \varphi_j) \quad j = a, b, c \quad (1a)$$

$$i_{nj}(t) = \frac{i_{dc}(0)}{3} - \frac{I_{smj} \sin(\omega t + \varphi_j - \varphi')}{2} \quad j = a, b, c \quad (1b)$$

式中: U_{smj} 为交流侧线电压幅值; I_{smj} 为交流电流幅值; $U_{dc}(0)$ 为输电系统稳态下的直流电压; $i_{dc}(0)$ 为稳态运行下线路上的直流电流; φ_j 表示交流电压初相角; φ' 为交流系统稳态运行下的负载阻抗角; ω 为交流侧角频率。对下桥臂组成的故障回路列写 KVL 方程, 如式(2)所示。

$$L_0 \frac{di_{nj}(t)}{dt} + u_{nj}(t) = u_{vj}(t) \quad j = a, b, c \quad (2)$$

由此可知, 故障时刻 j 相下桥臂投入的子模块总个数 $N_{nj} = u_{nj}(0)/u_c(0)$, 其中 $u_c(0)$ 为子模块平均电容电压, 可根据 $U_{dc}(0)$ 和稳态时上下桥臂投入的子模块个数之和 N 获取。

现假设在 t_0 时刻 Δ 侧三相接地短路, 根据叠加定理, 只有 a 相桥臂等效电源单独作用时, 其等效电路如图 7 所示。

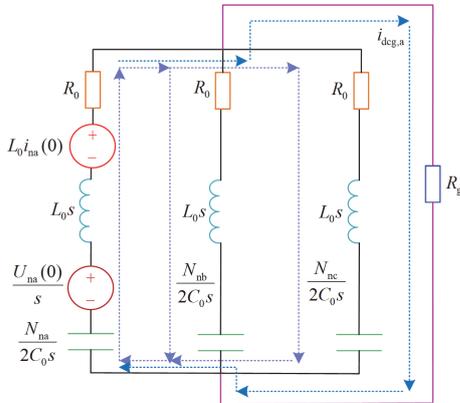


图 7 a 相桥臂等效电源单独作用下的等效电路

Fig. 7 Equivalent circuit of a-phase bridge arm equivalent power supply acting alone

根据图 7 即可得下桥臂 a 相提供的故障点入地电流为

$$I_{dcg,a}(s) = \frac{\frac{U_{na}(0)}{s} + L_0 i_{na}(0)}{Z_{na}(s) + Z_{nb}(s) // Z_{nc}(s) // R_g} \quad (3)$$

式中: $Z_{nj}(s) = R_0 + L_0 s + \frac{N_{nj}}{2C_0 s}$, R_0 为桥臂等效电阻,

C_0 为子模块电容值; $U_{na}(0)$ 为故障时刻 a 相下桥臂等效电容电压; $i_{na}(0)$ 为故障时刻 a 相下桥臂瞬时电流。

对于式(3), 其时域表达式是很难直接得到的, 因此这里采用数值拉普拉斯反变换方法(NILT)^[25-27] 得到 $I_{dcg,a}(s)$, 其时域表达式为

$$i_{dcg,a}(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} I_{dcg,a}(s) e^{st} ds \quad (4)$$

对于 b 、 c 相同样可以得到形如式(3)所示表达式, 同样采用 NILT 得到时域数值解 $\hat{i}_{dcg,b}(t)$ 、 $\hat{i}_{dcg,c}(t)$ 。故直流侧下桥臂提供的故障点入地电流为

$$i_{dcg,\Sigma} = \sum \hat{i}_{dcg,j}(t) \quad j = a, b, c \quad (5)$$

2.2 上桥臂故障回路电流解析

回路 III 的故障电流通路为: 上桥臂 \rightarrow 直流线路 \rightarrow 远端换流站 \rightarrow 远端换流站接地极 \rightarrow 故障点, 如图 8 所示。

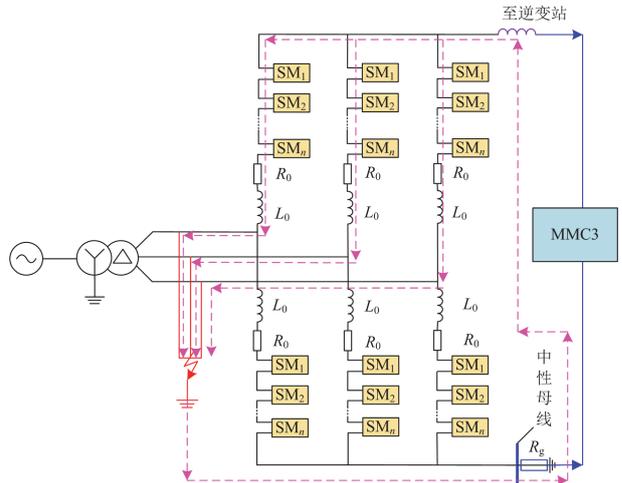


图 8 Δ 侧接地故障上桥臂与对端换流站构成的电流通路

Fig. 8 Current flow path formed by bridge arm and opposite converter station on Δ side grounding fault

对于图 8 所示的故障回路, 其等效电路如图 9 所示。

由图 9 可知, 对于故障回路 III 可视为上桥臂电容等效激励和对端换流站桥臂电容等效激励 2 个故障激励的共同作用, 其放电回路如图 10 和图 11 所示。在图 10 和图 11 中, L_{dc1} 为线路等效电感值, R_{dc1} 为线路电阻值。

综合图 10 和图 11 可知, 对端换流站以及故障侧上桥臂提供的故障点入地电流为

$$I_{dc}(s) = I_{dc1}(s) - I_{dc2}(s) \quad (6)$$

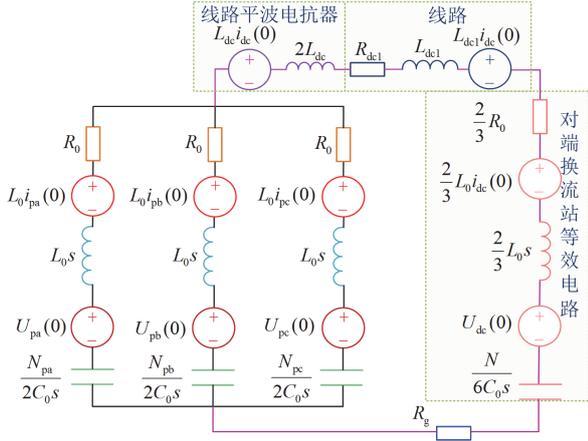


图 9 Δ 侧接地故障上桥臂与对端换流站构成的电流流通路的等效电路

Fig. 9 Equivalent circuit of current flow path formed by bridge arm and opposite converter station on Δ side grounding fault

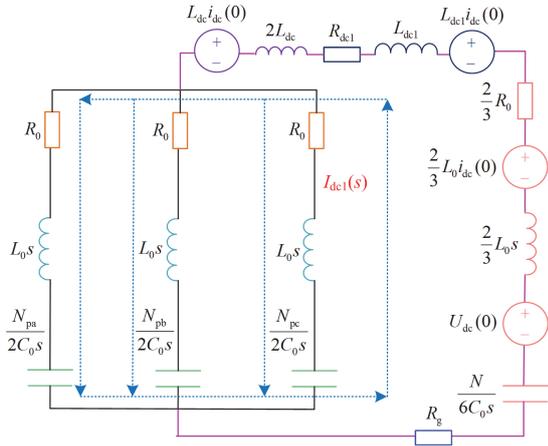


图 10 对端换流站等效电源对上桥臂的放电回路

Fig. 10 Discharge circuit of equivalent power supply of opposite end converter station to upper bridge arm

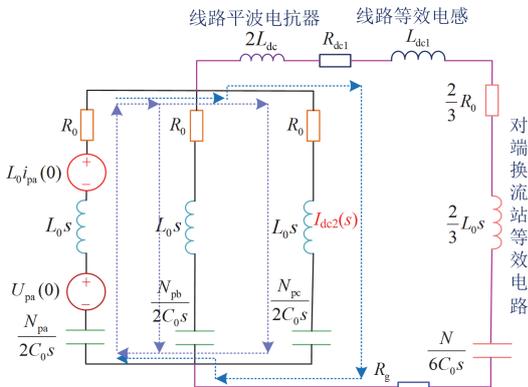


图 11 上桥臂等效电源对换流站的放电回路

Fig. 11 Discharge circuit of equivalent power supply of upper bridge arm to converter station

根据图 10 可以得到对端换流站等效电源对上桥臂的放电回路电流为

$$I_{dc1}(s) = \frac{U_{dc}(0) - \frac{2}{3}L_0 i_{dc}(0) - (2L_{dc} + L_{dk1})i_{dc}(0)}{Z_{pa}(s) // Z_{pb}(s) // Z_{pc}(s) + Z_{op}(s)} \quad (7)$$

式中： $Z_{op}(s) = \left(2L_{dc} + L_{dk1} + \frac{2}{3}L_0\right)s + R_{dk1} + \frac{2}{3}R_0 + R_g + \frac{N}{6C_0 s}$ ； $Z_{pj}(s) = R_0 + R_g + \frac{N_{pj}}{2C_0 s}$ ($j = a, b, c$)。

由于 $N_{pa} \neq N_{pb} \neq N_{pc}$ ，无法简化图 10 和图 11 所示的等效电路，故同样采用 NILT 得到 $I_{dc1}(s)$ 的时域数值解为

$$\hat{i}_{dc1}(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} I_{dc1}\left(\frac{z}{t}\right) \times \frac{P_N(z)}{Q_M(z)} dz \quad (8)$$

根据图 11 可以得到上桥臂等效电源对换流站的放电回路电流为

$$I_{dc2,a}(s) = \frac{u_{pa}(0)}{s} + L_0 i_{pa}(0) \frac{1}{Z_{pa}(s) + Z_{pb}(s) // Z_{pc}(s) // Z_{op}(s)} \quad (9)$$

同理可推得 b、c 相提供的短路电流，对 $I_{dc2}(s)$ 进行反拉氏，可以得到

$$\hat{i}_{dc2,j}(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma-i\infty}^{\sigma+i\infty} I_{dc2,j}\left(\frac{z}{t}\right) \times \frac{P_N(z)}{Q_M(z)} dz \quad j = a, b, c \quad (10)$$

对端换流站以及故障侧上桥臂提供的故障点入地电流为

$$i_{dc}(t) = \hat{i}_{dc1}(t) - \sum \hat{i}_{dc2,j}(t) \quad (11)$$

由上述分析可知，交流阀侧发生三相接地故障，直流侧提供的入地故障电流为

$$f_{f,dc}(t) = i_{dcg\Sigma}(t) + i_{dc}(t) \quad (12)$$

3 交流阀侧单相接地故障电流解析

实际工程中，单相接地故障概率高，现以阀侧 A 相接地为例，故障点入地电流由交流侧电势激励、电感元件和电容元件初始值激励共同作用的结果。根据线性电路的叠加原理，分别解析出各激励源单端作用下的响应，再根据线性相加即可得到总响应。

3.1 交流侧等效电势激励下的响应

交流侧等效电势激励作用下的短路电流如图 12 所示。

根据电路叠加定理，当某一独立电源作用时，其他独立电源应为零值。因此，当交流侧等效电势激励单独作用时，桥臂电容等效激励电压为零，因此，其电容值为零相当于短路，对图 12 进行简化后的等效电路如图 13 所示。

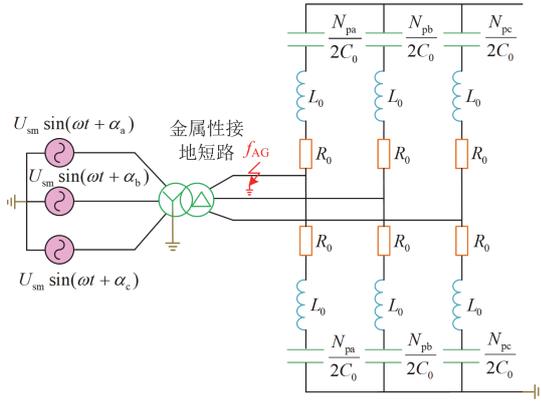


图 12 交流侧等效电势激励源的短路电流

Fig. 12 Short circuit current excited by equivalent potential on AC side

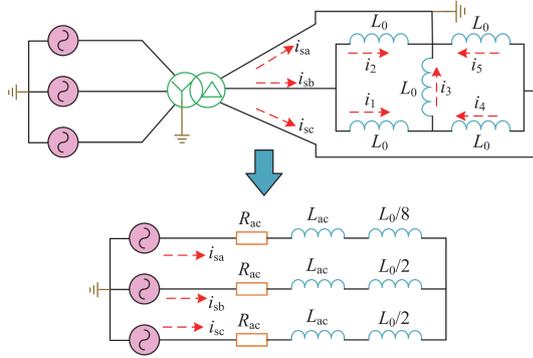


图 13 交流侧等效电势激励源作用下简化等效电路

Fig. 13 Simplified equivalent circuit under the action of AC side equivalent potential excitation source

由图 13 可知, a 相提供的短路电流满足的回路方程为

$$\left(L_{ac} + \frac{L_0}{8}\right) \cdot \frac{di_{sa}}{dt} + R_{ac} \cdot i_{sa} = U_{sm} \sin(\omega t + \alpha_a) \quad (13)$$

求解式(13), 得到

$$i_{sa} = I_{ma} \sin(\omega t + \alpha_a - \varphi_a) + \left[I_{ma|0|} \cdot \sin(\alpha - \varphi_{0|a}) - I_{ma} \sin(\alpha_a - \varphi_a) \right] \cdot e^{-t/T_a} \quad (14)$$

$$\text{式中: } T_a = \frac{(L_{ac} + L_0/8)}{R_{ac}}; \varphi_a = \arctan \frac{\omega(L_{ac} + L_0/8)}{R_{ac}};$$

$$I_{ma} = \frac{U_{sm}}{\sqrt{R_{ac}^2 + (\omega L_{ac} + \omega L_0/8)^2}}; \varphi_{0|a} \text{ 为故障前电流初}$$

相角; $I_{ma|0|}$ 为故障前电流幅值。同样可以得到 b 和 c 相提供的短路电流分别为

$$i_{sb} = I_{mb} \sin(\omega t + \alpha_b - \varphi_b) + \left[I_{mb|0|} \cdot \sin(\alpha - \varphi_{0|b}) - I_{mb} \sin(\alpha_b - \varphi_b) \right] \cdot e^{-t/T_b} \quad (15)$$

$$i_{sc} = I_{mc} \sin(\omega t + \alpha_c - \varphi_c) + \left[I_{mc|0|} \cdot \sin(\alpha - \varphi_{0|c}) - I_{ma} \sin(\alpha_c - \varphi_c) \right] \cdot e^{-t/T_c} \quad (16)$$

由图 14 可知, a、b 和 c 相电流满足

$$\begin{cases} i_{sb} = i_1 + i_2 \\ i_3 = i_1 + i_4 \\ i_{sc} = i_4 + i_5 \\ i_2 + i_5 + i_3 + i_{sa} = 0 \\ L_0 \frac{di_1}{dt} + L_0 \frac{di_3}{dt} = L_0 \frac{di_2}{dt} \\ L_0 \frac{di_4}{dt} + L_0 \frac{di_5}{dt} = L_0 \frac{di_5}{dt} \end{cases} \quad (17)$$

根据式(17)求得 $i_3 = (i_{sb} + i_{sc})/4$, 故交流侧电势激励提供的故障点入地电流为

$$i_{f,ac} = i_{sa} + i_3 = i_{sa} + (i_{sb} + i_{sc})/4 = \frac{3}{4} i_{sa} \quad (18)$$

基于上述分析, 得到交流激励等效作用下的上桥臂电流为

$$\begin{cases} i_{pa,ac} = -0.25 \times i_{sa} \\ i_{pb,ac} = 0.125 \times i_{sa} + 0.5 \times i_{sb} \\ i_{pc,ac} = -(0.375 \times i_{sa} + 0.5 \times i_{sb}) \end{cases} \quad (19)$$

下桥臂电流为

$$\begin{cases} i_{na,ac} = 0 \\ i_{nb,ac} = 0.125 \times i_{sa} - 0.5 \times i_{sb} \\ i_{nc,ac} = -(0.625 \times i_{sa} + 0.5 \times i_{sb}) \end{cases} \quad (20)$$

3.2 直流侧储能元件等效激励下的响应

从近端换流站看, a 相所连接的下桥臂与故障点、接地极构成放电回路 I, 同时, b、c 相桥臂通过 a 相上桥臂、故障点、接地极构成放电回路 II, 如图 14 所示。

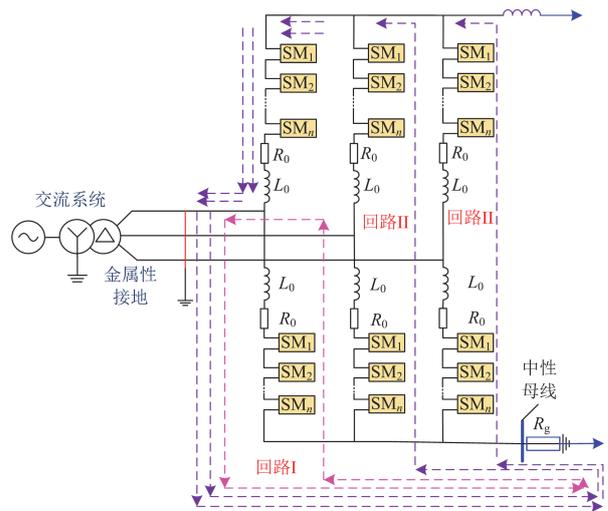


图 14 阀侧 A 相接地近端换流站桥臂电流通路

Fig. 14 Bridge arm current path of phase A at valve side connected to underground near end converter station

对于图 14 所示的放电回路 I, 将其转换成运算电路模型如图 15 所示。

由图 15 可知, 放电回路 I 提供的故障点入地电流为

$$I'_{dc1}(s) = \frac{U_{na}(0) + L_0 i_{na}(0)s}{\frac{N_{na}}{2C_0} + L_0 s^2 + (R_0 + R_g)s} \quad (21)$$

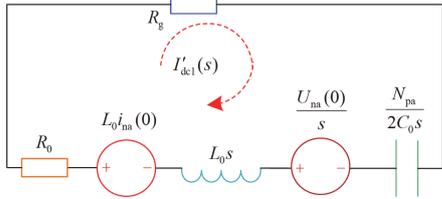


图 15 放电回路 I 等效运算电路

Fig. 15 Equivalent operation circuit of discharge circuit I

式(21)对应的时域表达式为

$$i'_{dc1}(t) = -\frac{1}{\sin \theta'} i_{na}(0) e^{-\frac{t}{\tau_{dc}}} \sin(\omega_{dc} t - \theta_{dc}) + \frac{U_{na}(0)}{R_{dis}} e^{-\frac{t}{\tau_{dc}}} \sin(\omega_{dc} t) \quad (22)$$

式中: $\tau_{dc} = \frac{2L_0}{R_0 + R_g}$; $\theta_{dc} = \arctan(\tau_{dc} \omega_{dc})$; $\omega_{dc} = \sqrt{\frac{2N_{na}L_0 - C_0(R_0 + R_g)^2}{4C_0L_0^2}}$; $R_{dis} = \sqrt{\frac{2N_{na}L_0 - C_0(R_0 + R_g)^2}{4C_0}}$ 。

对于图 14 所示的放电回路 II, 将其转换成运算电路模型如图 16 所示。

由图 16 可知, 放电回路 II 提供的故障点入地电流为

$$I'_{dc2}(s) = \frac{U_{dc}(0) + 2L_0 i_{dc}(0)s/3 - L_0 i_{pa}(0)s - U_{pa}(0)}{\frac{N + 2N_{pa}}{4C_0} + 2L_0 s^2 + 2R_0 s} \quad (23)$$

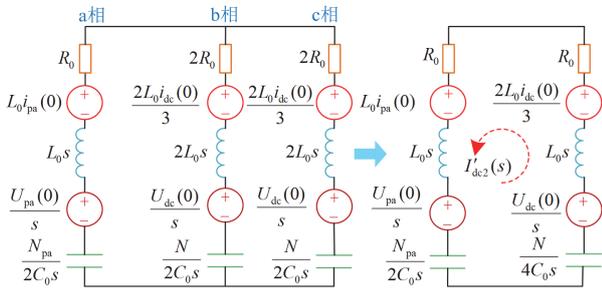


图 16 放电回路 II 等效运算电路

Fig. 16 Equivalent operation circuit of discharge circuit II

式(23)对应的时域表达式为

$$i'_{dc2} = K_1 e^{P_1 t} + K_2 e^{P_2 t} \quad (24)$$

式中:

$$P_1, P_2 = \frac{-2R_0 \pm \sqrt{4R_0^2 - 2L_0(N + 2N_{pa})/C_0}}{4L_0}$$

$$K_1 = \frac{(2L_0 i_{dc}(0)/3 - L_0 i_{pa}(0))P_1 + U_{dc}(0) - U_{pa}(0)}{4L_0 P_1 + 2R_0}$$

$$K_2 = \frac{(2L_0 i_{dc}(0)/3 - L_0 i_{pa}(0))P_2 + U_{dc}(0) - U_{pa}(0)}{4L_0 P_2 + 2R_0}$$

上桥臂电流为

$$\begin{cases} i_{pa,dc} = i_{dc2} \\ i_{pb,dc} = 0.5 \times i_{dc2} \\ i_{pc,dc} = 0.5 \times i_{dc2} \end{cases} \quad (25)$$

下桥臂电流为

$$\begin{cases} i_{na,dc} = i_{dc1} \\ i_{nb,dc} = -0.5 \times i_{dc2} \\ i_{nc,dc} = -0.5 \times i_{dc2} \end{cases} \quad (26)$$

直流侧提供的故障点入地电流为

$$i_{f,dc} = i_{dc2} \quad (27)$$

综上所述, 交流系统阀侧交流侧电势激励、电感元件和电容元件初始值激励共同作用的上桥臂电流为

$$\begin{cases} i_{pa} = i_{pa,ac} + i_{pa,dc} = -0.25 \times i_a + i_{dc2} \\ i_{pb} = i_{pb,ac} + i_{pb,dc} = 0.125 \times i_a + 0.5 \times i_b + 0.5 \times i_{dc2} \\ i_{pc} = i_{pc,ac} + i_{pc,dc} = -(0.375 \times i_a + 0.5 \times i_b) + 0.5 \times i_{dc2} \end{cases} \quad (28)$$

下桥臂电流为

$$\begin{cases} i_{na,dc} = i_{na,ac} + i_{na,dc} = 0 + i_{dc1} \\ i_{nb,dc} = i_{nb,ac} + i_{nb,dc} = 0.125 \times i_a - 0.5 \times i_b - 0.5 \times i_{dc2} \\ i_{nc,dc} = i_{nc,ac} + i_{nc,dc} = -(0.625 \times i_a + 0.5 \times i_b) - 0.5 \times i_{dc2} \end{cases} \quad (29)$$

总的故障点入地电流为

$$i_{f,\Sigma} = i_{f,ac} + i_{f,dc} = \frac{3}{4} i_{sa} + i_{dc2} \quad (30)$$

4 仿真验证

利用 RTDS 搭建如附录图 A1 所示的基于 RTDS 的 MMC 仿真模型, 其中 MMC1、MMC2 为定直流电压和定交流电压控制, 换流器 MMC3、MMC4 为定有功功率和定交流电压控制。换流器采用半桥子模块且参数一致, 单个换流站主回路参数如附录表 A1 所示。

为验证上述理论分析的正确性, 现设 MMC1 换流站交流阀侧发生三相接地短路故障(ABCG)和单相接地故障(AG)进行仿真分析, 仿真电流与计算

电流的结果如图 17 和图 18 所示。

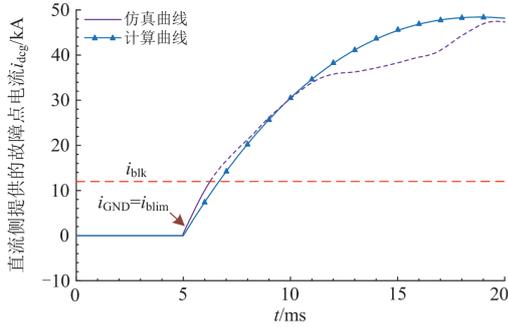
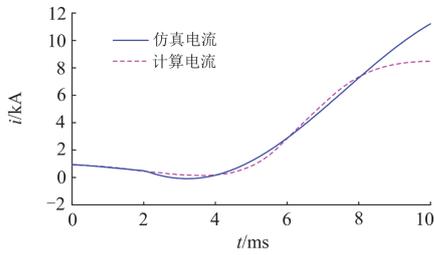
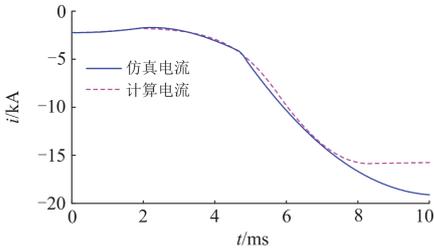


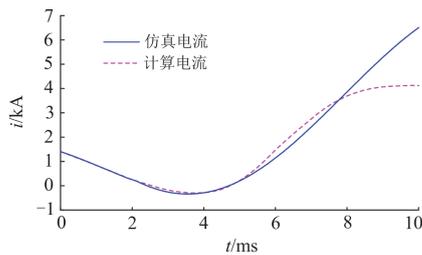
图 17 阀侧三相接地故障直流侧提供的故障点入地电流
Fig. 17 Fault point grounding current provided by three-phase grounding fault DC side at valve side



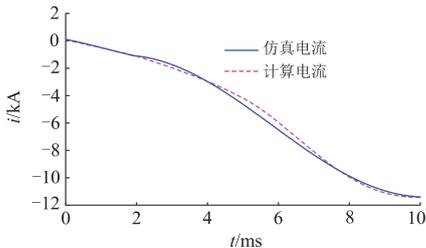
(a) a相上桥臂电流



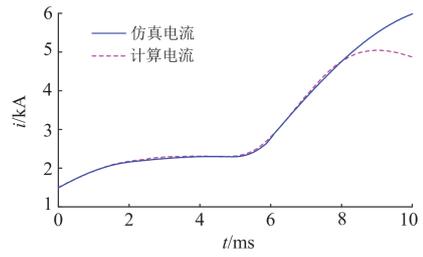
(b) a相下桥臂电流



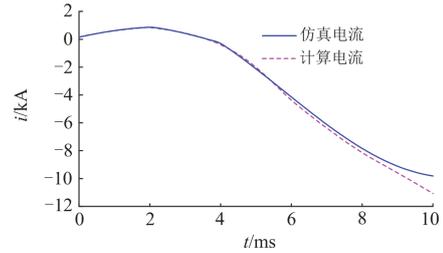
(c) b相上桥臂电流



(d) b相下桥臂电流



(e) c相上桥臂电流



(f) c相下桥臂电流

图 18 阀侧单相接地桥臂电流

Fig. 18 Single phase grounding bridge arm current at valve side

直流故障电流上升快、幅值大, 考虑限流器在内, 保护需在 1~3 ms 出口动作, 目前性能较好的混合式 DCCB 动作时间约为 3~5 ms, 可认为清除故障电流的极限时间为 8 ms, 因此要保证该时间段内故障电流小于换流站闭锁值。结合模型参数, 取桥臂电流 5 kA 换流站闭锁电流。由图 17 和图 18 可知, 当交流系统阀侧发生接地故障, 由于回路阻尼小, 故障相下桥臂电容放电过冲电流大, 且无法通过断路器切断故障电流, 极易对换流站等一次设备产生极大的过应力。

1) 过渡电阻影响分析

在上述分析中均没有考虑接地点过渡电阻影响, 现以三相接地故障带有过渡电阻为例, 分析故障点入地电流, 其故障回路等效电路如图 19 所示。

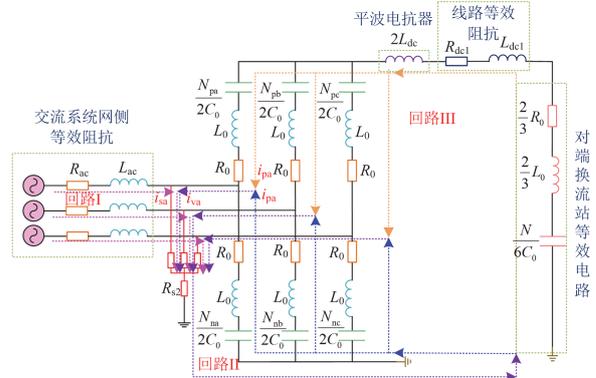
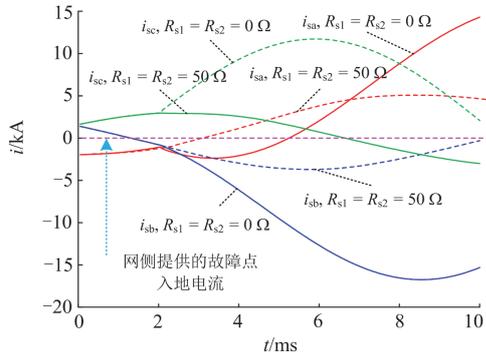


图 19 阀侧交流发生三相带过渡电阻接地故障等效电路
Fig. 19 Equivalent circuit of three-phase grounding fault with transition resistance on valve side AC

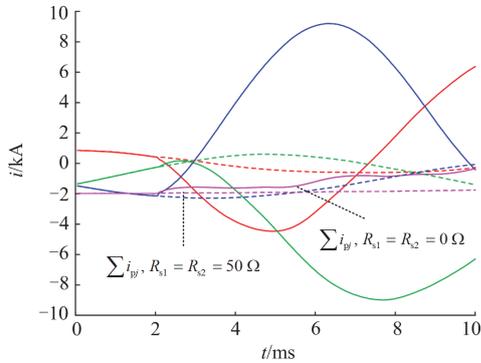
根据图 19、回路电压定理以及节点电流可以得到过渡电阻下故障点入地电流，具体推导过程在附录 A 中展示。当阀侧交流发生三相带过渡电阻的接地故障时，网侧交流系统将通过过渡电阻作用于故障点入地电流。不同过渡电阻下的桥臂电流和故障点入地电流如图 20 所示。

2) 故障时刻的影响

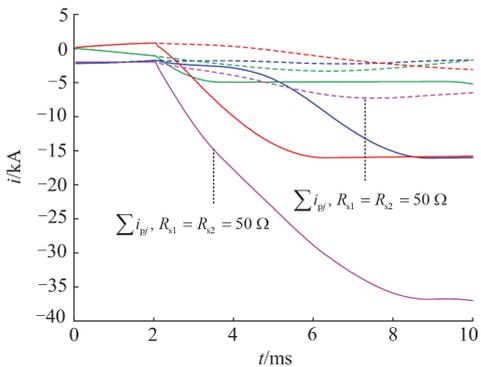
在上述计算中， $N_{ij}(t)$ 、 $U_{ij}(0)$ 以及 $i_{ij}(0)$ 均参与计算，且这些参数均与故障时刻有关。任意时刻上、下桥臂处于投入状态子模块个数如式(31)所示。



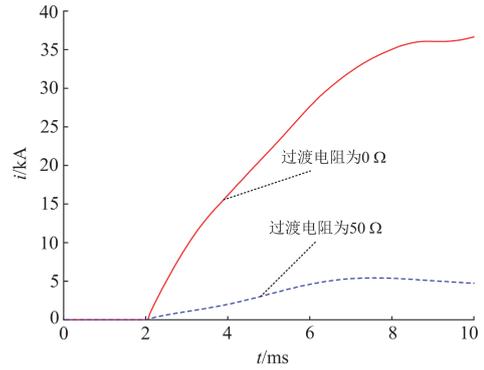
(a) 交流网侧电流



(b) 上桥臂电流



(c) 下桥臂电流



(d) 直流侧电流

图 20 阀侧交流发生三相接地故障不同过渡电阻下电流比较
Fig. 20 Comparison of current under different transition resistance in case of three-phase grounding fault of AC on valve side

$$\begin{cases} N_{pa} = 0.5N - \text{fix}(kU_{sm} \sin(\omega t + \varphi)/u_c(0)) \\ N_{pb} = 0.5N - \text{fix}(kU_{sm} \sin(\omega t + \varphi - 2\pi/3)/u_c(0)) \\ N_{pc} = 0.5N - \text{fix}(kU_{sm} \sin(\omega t + \varphi + 2\pi/3)/u_c(0)) \\ N_{na} = 0.5N + \text{fix}(kU_{sm} \sin(\omega t + \varphi)/u_c(0)) \\ N_{nb} = 0.5N + \text{fix}(kU_{sm} \sin(\omega t + \varphi - 2\pi/3)/u_c(0)) \\ N_{nc} = 0.5N + \text{fix}(kU_{sm} \sin(\omega t + \varphi + 2\pi/3)/u_c(0)) \end{cases} \quad (31)$$

不同故障时刻下的入地故障电流的仿真曲线和计算曲线如图 21 所示。为直观地比较不同故障时刻对故障电流的影响，将不同故障时刻下的电流波形对齐。

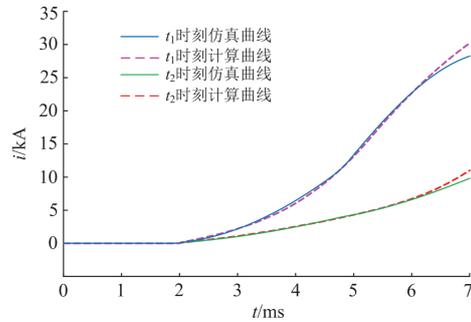


图 21 阀侧单相接地故障，不同故障时刻直流侧提供的故障点入地电流

Fig. 21 Single phase grounding fault at valve side, grounding current at fault point provided by DC side at different fault time

由式(33)可知，当阀侧发生单相接地故障，若故障时间满足 $t = (\pi/2 - \varphi)/\omega$ 时， $N_{na} = N, N_{pa} = 0$ ，则直流侧提供的入地电流最大，而当 $t = -\varphi/\omega$ ， $N_{na} = 0, N_{pa} = N$ ，则直流侧提供的入地电流为零。图 21 中 $t_1 = (\pi/2 - \varphi)/\omega$ ， $t_2 = t_1 + 3 \text{ ms}$ 。

3) 控制方式的影响

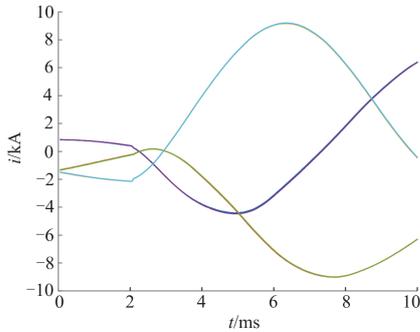
在上述仿真中, MMC1、MMC2 为定直流电压和定交流电压控制, 换流器 MMC3、MMC4 为定有功功率和定交流电压控制。现讨论不同控制方式下的阀侧故障下电流特性。例如将 MMC4 改为定无功功率控制方式, 即

$$i_q^* = K_p(Q_{\text{ref}} - Q) + K_i \int (Q_{\text{ref}} - Q) dt \quad (32)$$

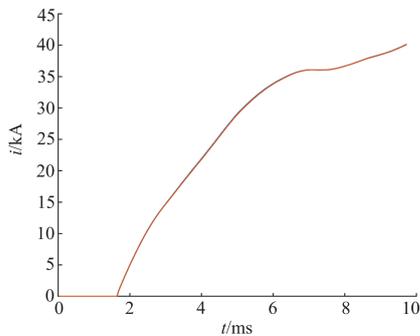
而定交流电压控制为

$$i_q^* = K_p(U_{\text{ref}} - U) + K_i \int (U_{\text{ref}} - U) dt \quad (33)$$

由式(34)、式(35)可知, 采用定交流电压控制或定无功功率控制, 指令值 i_q^* 均会上升, 但是由于控制中有限幅环节, i_q^* 会在短时到达幅值而失效, 控制系统不再起作用。图 22 展示了不同控制方式下的上桥臂电流以及故障点入地电流。



(a) 不同控制方式下上桥臂电流



(b) 不同控制方式下故障点入地电流

图 22 不同控制方式下阀侧故障电流特性

Fig. 22 Valve side fault current characteristics under different control modes

由图 22 可以看出, 在不同的控制策略下, 各特征量的稳态值差别很小。精确计及控制系统对故障电流的影响较为困难, 通常交流网侧故障下, 为避免换流阀提供的故障电流过大从而导致换流阀闭锁, 指令值的限幅值略大于额定值, 阀侧交流接地故障强度高, 控制系统对故障电流影响极小(类似于直流侧故障), 因此本文忽略了控制系统的作用。

由上述分析可知, 故障点过渡电阻和故障时刻会影响故障点入地电流的大小。

5 结论

本文详细推导了 MMC 换流站交流阀侧发生三相接地故障和单相接地故障下的桥臂电流的数学解析式, 采用 RTDS 仿真平台搭建了双端柔性直流输电系统的仿真模型, 验证了桥臂电流数学解析式的正确性, 并得出如下结论:

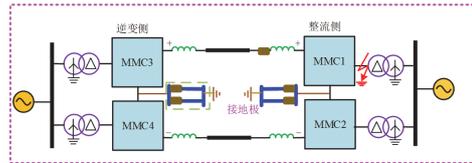
1) 阀侧交流系统发生三相接地故障, 其入地电流成分与过渡电阻有关。对于金属性接地故障, 故障点入地电流由下桥臂电容放电电流和上桥臂以及对端桥臂电容放电电流构成, 网侧交流系统不会馈入入地电流; 对于带过渡电阻接地故障, 网侧交流系统将通过过渡电阻作用于故障点入地电流。

2) 阀侧交流系统发生单相接地故障, 故障点入地电流由交流侧电势激励、电感元件和电容元件初始值激励共同作用的结果。

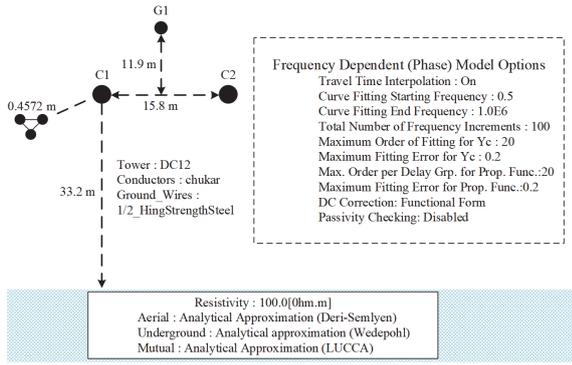
3) 阀侧交流发生接地故障, 交流出口处电位被钳制为 0, 因此上桥臂的子模块电容将产生极大的过电压, 导致子模块电容击穿, 通过断开近端直流断路器可有效解决该问题。

4) 对于下桥臂与故障点构成的放电回路, 下桥臂流过的故障电流迅速增大, 且无法通过断路器切断换流站与故障点的联系, 因此建议采取可靠的限流措施能有效避免阀侧故障对换流站等一次设备造成严重伤害, 并降低对此类故障的保护要求。

附录 A



(a) 基于 RTDS 仿真的架空线路柔性 MMC 直流系统仿真模型



(b) 架空线路杆塔模型
图 A1 基于 RTDS 的 MMC 仿真模型的搭建
Fig. A1 Construction of MMC simulation model based on RTDS

表 A1 换流站主回路参数

Table A1 Main circuit parameters of converter station

参数	数值
换流器额定容量/MVA	750
网侧交流母线电压/kV	175
直流电压/kV	320
额定容量/MVA	900
连接变压器 电压比	230/175
短路阻抗百分比/%	10.5
子模块额定电压/kV	8.5
单个桥臂子模块数目	76
子模块电容值/mF	5.1
桥臂电抗器电感/mH	50
平波电抗器电感/mH	100
极址电阻 R_g/Ω	15

根据图 19 和回路电压定理，得到回路 II 的电压方程为

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{N}{6C_0} \int (\sum i_{vj} - \sum i_{nj}) dt + \frac{2}{3} L_0 \frac{d(\sum i_{vj} - \sum i_{nj})}{dt} + \frac{2}{3} R_0 (\sum i_{vj} - \sum i_{nj}) + L_{dc1} \frac{d(\sum i_{vj} - \sum i_{nj})}{dt} + R_{dc1} (\sum i_{vj} - \sum i_{nj}) + \\ & 2L_{dc1} \frac{d(\sum i_{vj} - \sum i_{nj})}{dt} + \frac{N_{pa}}{2C_0} \int i_{pa} dt + R_0 i_{pa} + L_0 \frac{di_{pa}}{dt} + R_{s1} (i_{sa} + i_{va}) + R_{s2} \sum i_{vj} + R_g \sum i_{pj} = 0 \\ & \frac{N}{6C_0} \int (\sum i_{vj} - \sum i_{nj}) dt + \frac{2}{3} L_0 \frac{d(\sum i_{vj} - \sum i_{nj})}{dt} + \frac{2}{3} R_0 (\sum i_{vj} - \sum i_{nj}) + L_{dc1} \frac{d(\sum i_{vj} - \sum i_{nj})}{dt} + R_{dc1} (\sum i_{vj} - \sum i_{nj}) + \\ & 2L_{dc1} \frac{d(\sum i_{vj} - \sum i_{nj})}{dt} + \frac{N_{pb}}{2C_0} \int i_{pb} dt + R_0 i_{pb} + L_0 \frac{di_{pb}}{dt} + R_{s1} (i_{sb} + i_{vb}) + R_{s2} \sum i_{vj} + R_g \sum i_{pj} = 0 \\ & \frac{N}{6C_0} \int (\sum i_{vj} - \sum i_{nj}) dt + \frac{2}{3} L_0 \frac{d(\sum i_{vj} - \sum i_{nj})}{dt} + \frac{2}{3} R_0 (\sum i_{vj} - \sum i_{nj}) + L_{dc1} \frac{d(\sum i_{vj} - \sum i_{nj})}{dt} + R_{dc1} (\sum i_{vj} - \sum i_{nj}) + \\ & 2L_{dc1} \frac{d(\sum i_{vj} - \sum i_{nj})}{dt} + \frac{N_{pc}}{2C_0} \int i_{pc} dt + R_0 i_{pc} + L_0 \frac{di_{pc}}{dt} + R_{s1} (i_{sc} + i_{vc}) + R_{s2} \sum i_{vj} + R_g \sum i_{pj} = 0 \end{aligned} \right. \quad (A1)$$

故障回路 II 的电压方程为

$$i_{vj} = i_{nj} + i_{pj} \quad (j = a, b, c) \quad (A4)$$

故障点入地电流为

$$i_{f,\Sigma} = i_{va} + i_{vb} + i_{vc} \quad (A5)$$

将式(1)再求一次微分，写成矩阵的形式为

$$L i'' + R i' + C i = 0 \quad (A6)$$

式中：

$$L = \begin{bmatrix} L_\Sigma & L_\Sigma & L_\Sigma & -L_\Sigma & -L_\Sigma & -L_\Sigma & L_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ L_\Sigma & L_\Sigma & L_\Sigma & -L_\Sigma & -L_\Sigma & -L_\Sigma & 0 & L_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ L_\Sigma & L_\Sigma & L_\Sigma & -L_\Sigma & -L_\Sigma & -L_\Sigma & 0 & 0 & L_0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$i^T = [i_{va} \quad i_{vb} \quad i_{vc} \quad i_{na} \quad i_{nb} \quad i_{nc} \quad i_{pa} \quad i_{pb} \quad i_{pc} \quad i_{sa} \quad i_{sb} \quad i_{sc}]$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{N}{6C_0} & \frac{N}{6C_0} & \frac{N}{6C_0} & -\frac{N}{6C_0} & -\frac{N}{6C_0} & -\frac{N}{6C_0} & \frac{N_{pa}}{2C_0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{N}{6C_0} & \frac{N}{6C_0} & \frac{N}{6C_0} & -\frac{N}{6C_0} & -\frac{N}{6C_0} & -\frac{N}{6C_0} & 0 & \frac{N_{pb}}{2C_0} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{N}{6C_0} & \frac{N}{6C_0} & \frac{N}{6C_0} & -\frac{N}{6C_0} & -\frac{N}{6C_0} & -\frac{N}{6C_0} & 0 & 0 & \frac{N_{pc}}{2C_0} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

回路 III 的电压方程为

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{N_{na}}{2C_0} \int i_{na} dt + R_0 i_{na} + L_0 \frac{di_{na}}{dt} + R_{s1} (i_{sa} + i_{va}) + R_{s2} \sum i_{vj} + R_g \sum i_{nj} = 0 \\ & \frac{N_{nb}}{2C_0} \int i_{nb} dt + R_0 i_{nb} + L_0 \frac{di_{nb}}{dt} + R_{s1} (i_{sb} + i_{vb}) + R_{s2} \sum i_{vj} + R_g \sum i_{nj} = 0 \\ & \frac{N_{nc}}{2C_0} \int i_{nc} dt + R_0 i_{nc} + L_0 \frac{di_{nc}}{dt} + R_{s1} (i_{sc} + i_{vc}) + R_{s2} \sum i_{vj} + R_g \sum i_{nj} = 0 \end{aligned} \right. \quad (A3)$$

i_{vj}, i_{nj}, i_{pj} 满足的节点电流定理为

$$R = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}R_0+R_{dc1}+R_{s1}+R_{s2} & \frac{2}{3}R_0+R_{dc1}+R_{s2} & \frac{2}{3}R_0+R_{dc1}+R_{s2} & -\frac{2}{3}R_0-R_{dc1} & -\frac{2}{3}R_0-R_{dc1} & -\frac{2}{3}R_0-R_{dc1} & R_0+R_g & R_g & R_g & R_{s1} & 0 & 0 \\ \frac{2}{3}R_0+R_{dc1}+R_{s2} & \frac{2}{3}R_0+R_{dc1}+R_{s1}+R_{s2} & \frac{2}{3}R_0+R_{dc1}+R_{s2} & -\frac{2}{3}R_0-R_{dc1} & -\frac{2}{3}R_0-R_{dc1} & -\frac{2}{3}R_0-R_{dc1} & R_g & R_0+R_g & R_g & 0 & R_{s1} & 0 \\ \frac{2}{3}R_0+R_{dc1}+R_{s2} & \frac{2}{3}R_0+R_{dc1}+R_{s2} & \frac{2}{3}R_0+R_{dc1}+R_{s1}+R_{s2} & -\frac{2}{3}R_0-R_{dc1} & -\frac{2}{3}R_0-R_{dc1} & -\frac{2}{3}R_0-R_{dc1} & R_g & R_g & R_0+R_g & 0 & 0 & R_{s1} \end{bmatrix}$$

对于式(A6)的解析表达式较难获取, 但可通过电流初值迭代式(A6), 得到其数值解。

参考文献

- [1] 姚良忠, 吴婧, 王志冰, 等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6007-6020.
YAO Liangzhong, WU Jing, WANG Zhibing, et al. Pattern analysis of future HVDC grid development[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6007-6020.
- [2] 李欣悦, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 1-8.
LI Xinyue, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Transient over voltage calculation method of HVDC sending-end system under DC bipolar blocking[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 1-8.
- [3] 马为民, 吴方劫, 杨一鸣, 等. 柔性直流输电技术的现状及应用前景分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2429-2439.
MA Weimin, WU Fangjie, YANG Yiming, et al. Flexible HVDC transmission technology's today and tomorrow[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2429-2439.
- [4] 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.
- [5] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [6] 赵冠琨, 贾科, 陈金锋, 等. 基于断路器重合闸的柔性直流输电线路单端故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 48-56.
ZHAO Guankun, JIA Ke, CHEN Jinfeng, et al. A single terminal fault location method for a DC transmission line based on circuit breaker reclosing[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 48-56.
- [7] SONG Guobing, HOU Junjie, GUO Bing, et al. Pilot protection of hybrid MMC DC grid based on active detection[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 82-96.
- [8] 董新洲, 汤涌, 卜广全, 等. 大型交直流混联电网安全运行面临的问题与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3107-3119.
DONG Xinzhou, TANG Yong, BU Guangquan, et al. Confronting problem and challenge of large scale AC-DC hybrid power grid operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3107-3119.
- [9] 梅念, 陈东, 吴方劫, 等. 基于 MMC 的柔性直流系统接地方式研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(4): 1247-1253.
MEI Nian, CHEN Dong, WU Fangjie, et al. Study on grounding methods for MMC-based VSC-HVDC systems[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1247-1253.
- [10] 吴嘉玲, 卢铁兵. 柔性直流电网结构对单极接地故障过电压的影响[J]. 中国电力, 2021, 54(10): 20-27.
WU Jialing, LU Tiebing. Influence of the VSC-HVDC system structure on the overvoltage of single-pole grounding fault[J]. Electric Power, 2021, 54(10): 20-27.
- [11] 周永荣, 秦文康, 葛佳盛, 等. 柔性直流配电系统换流器交流侧接地故障的分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 160-167.
ZHOU Yongrong, QIN Wenkang, GE Jiasheng, et al. Analysis of grounding fault on the AC side of converter station in a flexible DC distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 160-167.
- [12] 张晓宇, 郑超, 莫品豪, 等. 换流变压器阀侧接地故障分析及保护优化[J]. 电力工程技术, 2021, 40(3): 172-178.
ZHANG Xiaoyu, ZHENG Chao, MO Pinhao, et al. Analysis and protection optimization of grounded fault in valve side of converter transformer[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(3): 172-178.
- [13] NI Binye, XIANG Wang, ZHOU Meng, et al. An adaptive fault current limiting control for MMC and its application in DC grid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 920-921.
- [14] ZHENG Zhengfu, SIMA Wenxia, YANG Ming, et al. A mutual-inductance-type fault current limiter in MMC-HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(5): 2403-2413.
- [15] 金晶, 殷勤. 含电阻型超导限流器的南澳柔性直流系统故障特性分析[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 286-291.
JIN Jing, YIN Qin. Fault characteristics analysis of Nan'ao flexible DC system with resistance superconducting

current limiter[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 286-291.

[16] 周杨, 贺之渊, 庞辉, 等. 双极柔性直流输电系统站内接地故障保护策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4062-4069.
ZHOU Yang, HE Zhiyuan, PANG Hui, et al. Protection of converter grounding fault on MMC based bipolar HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4062-4069.

[17] 李振动, 安海清, 樊小伟, 等. 双极 MMC-HVDC 系统站内接地故障特性及保护策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 77-83.
LI Zhendong, AN Haiqing, FAN Xiaowei, et al. Converter grounding fault characteristics and protection strategy in bipolar MMC-HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 77-83.

[18] 姜田贵, 谢晔源, 姚宏洋, 等. 含直流断路器的双极接线柔性直流输电系统 MMC 交流侧单相接地故障研究[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(2): 172-180.
JIANG Tiangui, XIE Yeyuan, YAO Hongyang, et al. Single-phase-to-ground faults at AC side of MMC in bipolar HVDC system with DC circuit breakers[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(2): 172-180.

[19] 薛士敏, 范勃昉, 刘冲, 等. 双极柔性直流输电系统换流站交流三相接地故障分析及保护[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 21-30.
XUE Shimin, FAN Boyang, LIU Chong, et al. Fault analysis and protection scheme for converter AC three-phase grounding of bipolar HVDC systems[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 21-30.

[20] 李浩原, 周国梁, 王刚, 等. 柔直电网阀侧单相接地故障过电压产生及影响因素研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(4): 34-41.
LI Haoyuan, ZHOU Guolian, WANG Gang, et al. Analysis of single-phase-to-ground fault overvoltage at valve-side of HB-MMCs in bipolar HVDC systems[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(4): 34-41.

[21] 肖超, 韩伟, 李琼林, 等. 柔性直流输电系统交流侧线路继电保护适应性研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(4): 1-8.
XIAO Chao, HAN Wei, LI Qionglin, et al. Adaptability of MMC-HVDC system on relay protection of AC transmission lines[J]. Smart Power, 2020, 48(4): 1-8.

[22] 朱韬析, 夏拥, 何杰, 等. 逆变侧换流变压器阀侧接地故障特性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(1): 96-99.
ZHU Taoxi, XIA Yong, HE Jie, et al. Analysis on the characteristics of grounding fault at inverter transformer valve side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(1): 96-99.

[23] 屠卿瑞, 陈桥平, 李一泉, 等. 柔性直流输电系统桥臂过流保护定值配合方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 172-177.
TU Qingrui, CHEN Qiaoping, LI Yiquan, et al. Coordination method of arm overcurrent protection settings in flexible HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 172-177.

[24] 刘玲玲, 金国锋, 谭捷, 等. 一种新型故障限流器选址与配置优化方法[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(5): 161-168.
LIU Lingling, JIN Guofeng, TAN Jie, et al. A novel fault current limiter location and configuration optimization method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(5): 161-168.

[25] BAGCI H, YILMAZ A E, MICHIELSSEN E. An FFT-accelerated time-domain multi-conductor transmission line simulator[J]. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, 2010, 52(1): 199-214.

[26] SINGHAL K, VLACH J. Computation of time domain response by numerical inversion of the Laplace transform[J]. Journal of the Franklin Institute, 1975, 299(2): 109-112.

[27] 郝亮亮, 詹清清, 陈争光, 等. LCC-MMC 型混合直流送端交流系统故障时直流电流的暂态过程解析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 220-227.
HAO Liangliang, ZHAN Qingqing, CHEN Zhengguang, et al. Analysis of DC current transient process under AC system fault at LCC-MMC hybrid HVDC sending end[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 220-227.

收稿日期: 2021-12-15; 修回日期: 2022-05-21

作者简介:

单节杉(1979—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统新型继电保护与控制; E-mail: 736495310@qq.com

田鑫萃(1985—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统新型继电保护与控制, 故障测距。E-mail: 1105479731@qq.com

(编辑 周金梅)