

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190792

渝鄂背靠背柔性直流工程交流侧单相重合闸问题分析

王 帅, 熊凌飞, 郭庆雷, 宫 勋

(国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209)

摘要: 当柔性直流输电工程接入弱交流系统时, 如何与交流系统保护的重合闸策略配合需要深入研究。以渝鄂背靠背柔性直流输电工程为例, 研究了交流线路重合闸期间系统电压和电流的变化规律。并结合柔性直流的故障穿越的控制逻辑, 分析了断线故障下原有的控制策略的可行性。分析结果表明, 断线故障之后, 柔直的正序控制器和负序控制器不能完全解耦, 造成控制系统不稳定。并且可能造成故障相过电压, 在故障恢复时候可能使桥臂过流。因此, 如果单根线路带柔性直流输电系统运行, 发生接地故障时, 应该在故障时间内尽量减少柔直的功率传输, 或者不启用交流进线的重合闸功能。

关键词: 渝鄂柔性直流; 重合闸; 故障穿越; 负序控制器

Analysis of AC side single-phase reclosing problem of Chongqing-Hubei back to back MMC-HVDC project

WANG Shuai, XIONG Lingfei, GUO Qinglei, GONG Xun

(State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: The problems of the coordination strategy of MMC-HVDC transmission system connecting with weak AC system and AC side reclosing deserves further study. The voltage and current variation characteristic during AC line reclosing is studied in this paper, with Chongqing-Hubei back to back MMC-HVDC project as an example. Combined with the fault ride through control logic, the feasibility of the control strategy after the line disconnection is analyzed. The analysis results show that after the line disconnection, the positive sequence controller and the negative sequence controller cannot be completely decoupled, which causes the control system to be unstable. The disconnected line may overvoltage and when the fault is recovered, the overcurrent may occur in bridge arm. Therefore, when single line with MMC-HVDC operates and the break fault occurs, the power transmission of the straight line should be minimized during the fault time, or the reclosing function of the AC line should not be enabled.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. B3441416K012) "Complete Design and System Integration of Flexible DC Engineering and its Application in Engineering Demonstration".

Key words: Chongqing-Hubei back to back MMC-HVDC project; reclosing; fault ride through; negative sequence controller

0 引言

近年来, 柔性直流输电技术^[1-8]发展迅速, 舟山多端柔性直流输电工程、鲁西柔性直流背靠背工程、渝鄂柔性直流背靠背工程^[9-13]等相继投运, 展现了柔性直流在灵活性等方面的技术优势。虽然柔性直

流技术本身已经比较成熟, 但是在与交流系统保护策略配合^[14-15]等方面还存在许多问题, 值得深入研究。

与柔性直流输电工程连接的交流系统进线通常设置重合闸功能, 在交流系统故障时断开故障相然后重合闸。而柔性直流交流系统发生故障时会进入故障穿越逻辑^[16-21], 此时交流重合闸断开故障相, 使得故障形态由短路变为断路, 柔性直流系统将面对相对复杂的交流系统状况, 可能存在桥臂子模块过流和闭锁的风险, 因此需要对交流系统断线故障

基金项目: 国家重点研发计划项目资助 (B3441416K012) “柔性直流工程成套设计与系统集成及其工程示范应用”

进行分析, 研究断线故障后系统电压电流的变化规律, 制定相应的策略以避免对柔性直流设备和交流系统造成影响。

现有关于柔性直流重合闸的研究大多集中在直流断路器重合闸策略的研究^[22-28], 对交流进线重合闸的研究较少。而对基于 MMC 的柔性直流的故障分析研究主要分为直流侧故障分析和交流侧故障分析。对于直流侧故障, 文献[29]分析了直流侧故障时的故障特性和保护策略, 但是只分析了极间故障的情况。文献[30-31]分析了直流线路断线故障特性, 指出换流器处于整流模式时, 阀设备将出现严重过电压。对于交流侧故障, 文献[32]论述了多端柔性直流阀侧三相交流故障时换流器不同闭锁条件下的控制和保护策略, 没有详细论述不平衡故障时的情况。文献[33]对 3 种混合直流系统在送端交流系统故障和受端交流系统故障情景下的响应特性进行对比分析, 但是仅仅分析了三相短路故障。文献[34]研究了交流系统单相、三相接地故障时柔性直流的无功控制策略, 并没有分析非全相运行时的工况。因此, 现有文献对交流侧断线故障的分析研究较少, 有必要进行详细研究。

本文以渝鄂背靠背柔性直流输电工程为例, 研究了双回交流进线中一回线路检修, 另一回线路发生断线故障之后系统电压和电流的变化规律, 并结合柔性直流的故障穿越的控制逻辑, 分析了断线故障下原有的控制策略的可行性。分析结果表明, 断线故障之后, 柔性直流的正序控制器和负序控制器不能实现完全解耦, 造成控制系统不稳定, 并且可能造成故障相过电压, 在故障恢复时候可能使桥臂过流。因此, 当单回线路运行, 发生断线故障或者故障重合闸时, 应该在故障时间内尽量减少柔直功率传输, 或者不启用交流进线的重合闸功能。

1 渝鄂工程概述

渝鄂直流背靠背联网工程在西南-华中电网南北两个 500 kV 交流通道上分别建设柔性直流背靠背换流站, 每站包含 2 个换流单元, 采用伪双极拓扑结构。换流单元额定电压等级 ± 420 kV, 额定单元容量 1 250 MW, 南北通道总输送容量 5 000 MW。

渝鄂工程是当前世界上电压等级最高、输送容量最大的柔性直流输电工程, 该工程实现川渝电网与华中电网异步互联, 首次将柔性直流输电电压提升至 ± 420 kV, 电力输送容量达到 500 万 kW, 对优化国家电网格局、促进能源供给侧结构性改革、提升电网科技水平具有重要意义。渝鄂工程结构示意图如图 1。

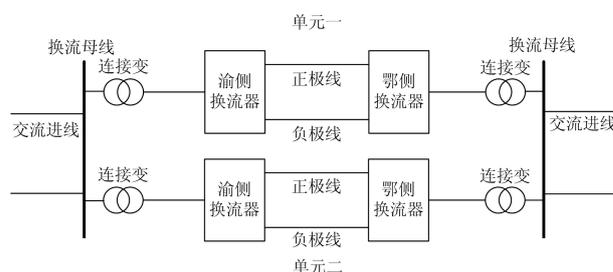


图 1 渝鄂工程结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the Chongqing-Hubei back to back MMC-HVDC project

2 渝鄂工程交流进线故障和单相重合闸分析

2.1 渝鄂交流进线接地故障重合闸动作逻辑

渝鄂柔性直流工程南通道和渝侧交流系统的连接示意图如图 2 所示, 渝鄂直流工程南通道渝侧有张家坝到施州两回进线, 两个柔直单元连接在施州母线上, 双单元功率一共 2 500 MW。

当一回线路检修时, 如果发生线路故障, 动作逻辑如图 3 所示。发生单相接地故障后, 电压降低, 柔直控制系统检测到电压降低后进入故障穿越逻辑, 限制功率传输, 保证柔直不因过流而闭锁。此时交流系统如果配置单相重合闸则会断开单相, 对柔直来说, 交流侧就由单相接地故障变为单相断线故障。

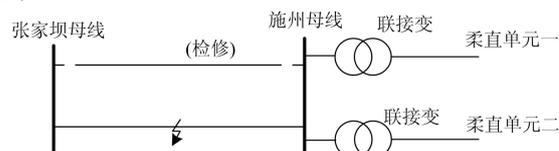


图 2 南通道渝侧交流进线示意图

Fig. 2 Schematic diagram of south channel AC line

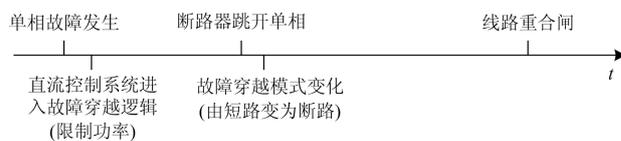


图 3 发生单相接地故障之后的动作逻辑

Fig. 3 Action sequence after a single phase ground fault

2.2 故障穿越逻辑

渝鄂工程南北通道在交流系统故障时, 为限制短路电流, 会对内环控制中的 d 轴电流目标值 I_{dref} 进行限制。

根据交流电压正序幅值的跌落程度, 分为普通交流故障和严重交流故障。

普通交流系统故障故障判断条件(或):

$$(1) U_1 < U_{1set1}$$

$$(2) U_0 > U_{0set1}$$

其中, U_1 、 U_0 分别为交流电压正序幅值和零序幅值。

此时, I_{dref} 限制为 $\min\{0.8, U_1\}$ 。

严重交流系统故障判断条件(或):

(1) $U_1 < U_{1set2}$

(2) $U_0 > U_{0set2}$

此时, I_{dref} 限制为 $\min\{0.7, U_1\}$ 。

意味着交流电压越低, I_{dref} 的限值就越低, 在交流电压故障时可以限制值短路电流, 保护换流阀等设备。

2.3 一相断开后电压特性分析

假设张家坝到施州一回线路检修, 另一回线路发生 a 相接地并由重合闸断开 a 相, 在此时刻用序阻抗分析法分析电压电流的变化情况。由于序阻抗分析法的零序网络和变压器的接线相关, 因此需首先考虑联接变的接线方式。

渝鄂工程的联接变为三相三绕组变压器, 如图 4 所示。变比为 525/437.23/60 网侧星型接法直接接地, 阀侧星型经过 2 000 Ω 大电阻接地, 第三绕组为三角形接线, 为站用电供电。图 4 中 U_s 为故障前交流系统的稳态电压, U_{MMC} 为换流器逆变电压, 故障点在电压测点的电源侧。

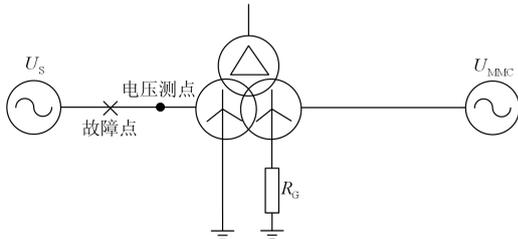


图 4 有第三绕组时柔直换流侧示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the project when there is a third winding

A 相断线时故障端口的电压电流如图 5 所示, ΔU_a 、 ΔU_b 、 ΔU_c 分别为三相故障端口的电压差, I_a 、 I_b 、 I_c 为每相的电流。

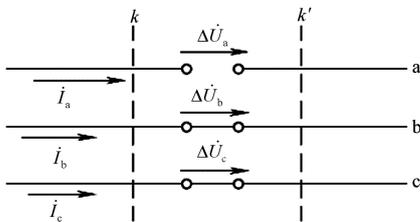


图 5 故障端口

Fig. 5 Fault port

采用序阻抗分析方法可得故障点故障分量的边界条件为 $I_a=0$, $\Delta U_b=\Delta U_c=0$, 由此可得:

$$\begin{cases} I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} = 0 \\ \dot{U}_{a1} = \dot{U}_{a2} = \dot{U}_{a0} \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_{a1} 、 U_{a2} 、 U_{a0} 分别为正序、负序、零序网络的电压; I_{a1} 、 I_{a2} 、 I_{a0} 分别为正序、负序、零序网络的电流。

由式(1)可得如图 6 所示的 a 相断线的序网络图。

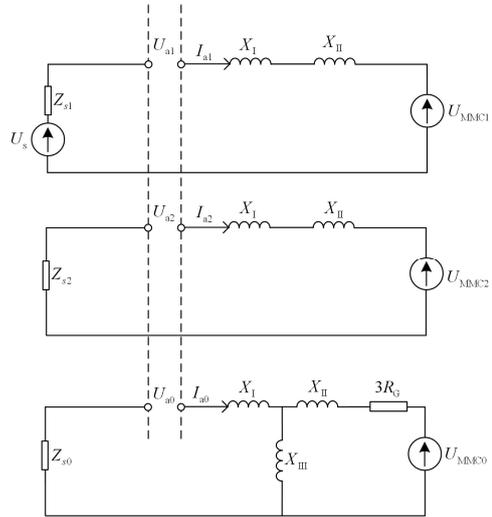


图 6 a 相断线的序网络图

Fig. 6 Sequence network when a single phase break fault occurs

图 6 中, X_I 、 X_{II} 、 X_{III} 分别为联接变压器三个绕组的电抗, Z_{S1} 、 Z_{S2} 、 Z_{S0} 分别为交流侧的正序、负序、零序阻抗, U_{MMC1} 、 U_{MMC2} 、 U_{MMC0} 分别为柔直逆变出的正序、负序、零序电压。零序网络中 $3R_G$ 为 6 000 Ω , 可认为是断路, 可得如图 7 所示的等效网络。

图 7 中, $Z_{T1}=X_I+X_{II}$, $Z_{T2}=X_I+X_{II}$, $Z_{T0}=X_I+X_{III}$, 利用节点电压法并认为正序阻抗和负序阻抗相等可求得图 7 中的正序、负序、零序电压为

$$U_{a1} = U_{a2} = U_{a0} = \frac{U_{MMC1} + U_{MMC2} - U_{S1}}{2 + \frac{Z_{S1} + Z_{T1}}{Z_{S0} + Z_{T0}}} \quad (2)$$

因此可得 a 相断口处的电压差为

$$\Delta U_a = 3U_{a1} = 3 \frac{U_{MMC1} + U_{MMC2} - U_{S1}}{2 + \frac{Z_{S1} + Z_{T1}}{Z_{S0} + Z_{T0}}} \quad (3)$$

根据图 7 计算可得零序电流 I_{a0} 为

$$I_{a0} = \frac{U_{a0}}{Z_{S0} + Z_{T0}} \quad (4)$$

零序电流不能流入 MMC 侧的绕组, 但是能在三角形绕组内形成环流, 如图 8 所示。此电流会在网侧 a 相绕组中感应出电压。

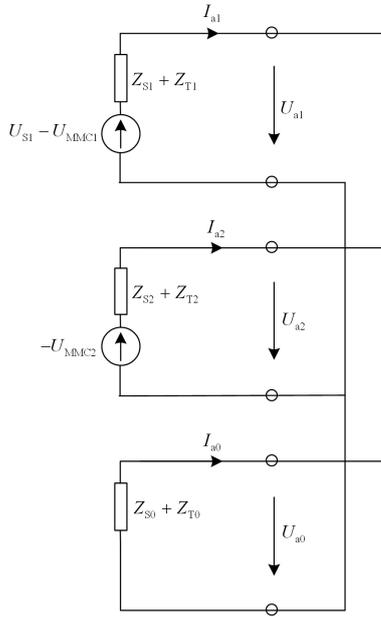


图 7 等效序网络图

Fig. 7 Equivalent sequence network

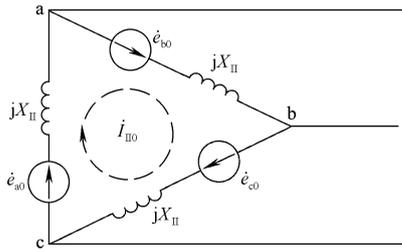


图 8 角接绕组中产生零序电流

Fig. 8 Zero sequence current in the delta-winding

角接绕组中 a 相绕组上的电压为

$$U_{a\Delta} = X_{III} I_{a\Delta} = X_{III} I_{a0} \frac{N_1}{N_3} \quad (5)$$

感应网侧 a 相绕组上的电压 U_{aI} 为

$$U_{aI} = U_{a\Delta} \frac{N_1}{N_3} = X_{III} I_{a0} \left(\frac{N_1}{N_3}\right)^2 \quad (6)$$

结合式(3)、式(6)可得网侧电压测点的电压为

$$U_a = U_{a(0)} + \Delta U_a + U_{aI} = U_{a(0)} + \left(\frac{X_{III}}{Z_{S0} + Z_{T0}} \left(\frac{N_1}{N_3}\right)^2 + 3\right) \frac{U_{MMC1} + U_{MMC2} - U_{S1}}{2 + \frac{Z_{S1} + Z_{T1}}{Z_{S0} + Z_{T0}}} \quad (7)$$

$$U_{a(0)} + K(U_{MMC1} + U_{MMC2} - U_{S1})$$

式中: $K = \frac{X_{III}}{Z_{S0} + Z_{T0}} \left(\frac{N_1}{N_3}\right)^2 + 3 > 0$; $U_{a(0)}$ 为断口左端

电压, 是正常的交流电压; U_a 为断口右端电压(柔直网侧电压测点)。

由公式(7)可以看出, 网侧电压测点的电压是否大于断口左端的电压由式(7)中 $U_{MMC1} + U_{MMC2} - U_{S1}$ 的正负来决定, 而 U_{MMC1} 、 U_{MMC2} 是柔直调制的电压量, 和故障前传输的功率以及接地故障中调制电压的策略相关。当 $U_{MMC1} + U_{MMC2} - U_{S1} > 0$ 时, $U_a > U_{a(0)}$, 电压测点的电压高于交流侧额定电压, 影响设备安全, 而且可能会在单相重合时产生较大电流, 使得桥臂过流, 进而桥臂过流保护动作。

3 MMC 控制系统在单线路重合闸时的分析

3.1 渝鄂柔性直流控制器结构

渝鄂柔性直流控制系统电流内环有正序控制器和负序控制器, 分别如图 9 和图 10 所示。正序控制器实现功率或电压控制, 而负序控制器目标值为 0, 抑制系统负序分量。

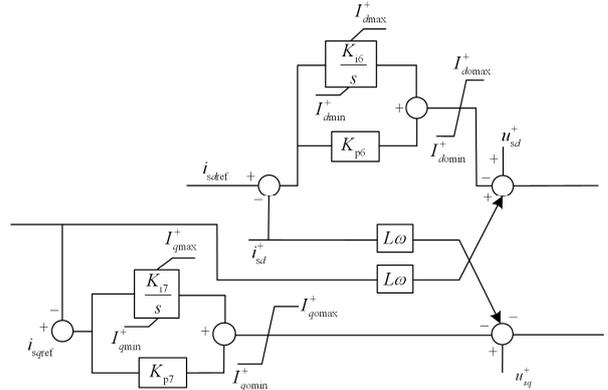


图 9 正序控制器结构

Fig. 9 Structure of positive sequence controller

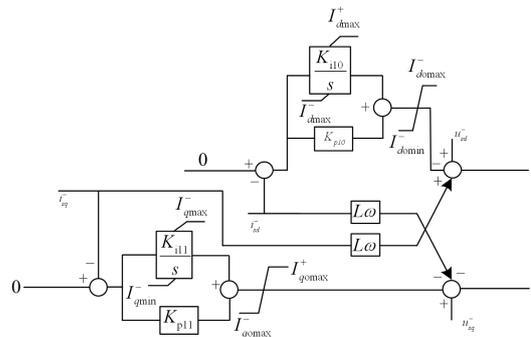


图 10 负序控制器结构

Fig. 10 Structure of negative sequence controller

3.2 故障期间正负序分量分析

三相电流分别为 i_a 、 i_b 、 i_c , 则正负零序分量分别为

$$\begin{cases} i_1 = \frac{1}{3}(i_a + ai_b + a^2i_c) \\ i_2 = \frac{1}{3}(i_a + a^2i_b + ai_c) \\ i_0 = \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c) \end{cases} \quad (8)$$

式中, a 和 a^2 分别为定子绕组平面内的 120° 和 240° 空间算子, $a = e^{j120^\circ}$, $a^2 = e^{j240^\circ}$,

若 a 相断线, 则 $i_a = 0$, 此时正负零序分量分别为

$$\begin{cases} i_1 = \frac{1}{3}(ai_b + a^2i_c) \\ i_2 = \frac{1}{3}(a^2i_b + ai_c) \\ i_0 = \frac{1}{3}(i_b + i_c) \end{cases} \quad (9)$$

在故障过程中, 控制器抑制负序为 0, 即

$$i_2 = \frac{1}{3}(a^2i_b + ai_c) = 0 \quad (10)$$

可得:

$$i_c = -ai_b \quad (11)$$

代入上式可得

$$\begin{cases} i_1 = \frac{1}{3}(ai_b + a^2i_c) = \frac{1}{3}(ai_b - a^3i_b) = \frac{1}{3}i_b(a - 1) \\ i_2 = 0 \\ i_0 = \frac{1}{3}(i_b + i_c) = \frac{1}{3}(1 - a)i_b \end{cases} \quad (12)$$

即 $i_1 = -i_0$ 。

正序和零序相位相同, 符号相反, 此时 dq 变换之后

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ i_b \\ -ai_b \end{bmatrix} = \frac{2}{3}i_b \begin{bmatrix} \cos(\theta - 2\pi/3) - a\cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta - 2\pi/3) + a\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/2(1 - a) \end{bmatrix} = \frac{2}{3}i_b \begin{bmatrix} \cos(\theta - 2\pi/3) - \cos(\theta - 2\pi/3) \\ -\sin(\theta - 2\pi/3) + \sin(\theta - 2\pi/3) \\ 1/2(1 - a) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{3}i_b(1 - a) \end{bmatrix} \quad (13)$$

式(13)表明, 在断线故障时候如果要实现负序电流为 0, 需要 $i_d=0, i_q=0$ 。即断线故障时, 负序控制器会把 i_d 和 i_q 往 0 控制。

而根据渝鄂工程的故障穿越策略, 断线故障时, 控制策略设定柔直传输的有功和三相交流电压正序值相关, 而断线故障时, 正序电压不为 0, 柔直会保留一部分功率, 即时 i_d 目标值不为 0。

通过上面的分析可得, 断线故障时, 负序控制器会控制 $i_d=0$, 而正序控制器控制 $i_d \neq 0$, 即正序控制器和负序控制器不能同时满足目标, 可能使控制系统不稳定。

4 仿真

在渝鄂 RTDS 硬件闭环仿真平台进行仿真, 控制设备(极控、阀控)全部采用工程实际装置。在渝鄂工程南通道渝侧设置单相 100 ms 的 A 相接地故障, 然后断路器断开 A 相, 仿真结果如图 11 所示。

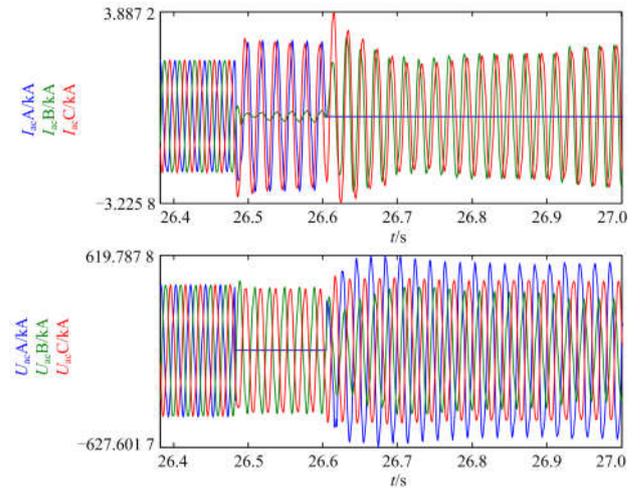


图 11 单相接地后断开单相时网侧电压和电流图

Fig. 11 Grid side voltage and current when single phase is disconnected after single phase grounding

从图中可以看出, 断开故障相之后, A 相电压明显高于 B、C 相电压, 电压峰值可达到交流侧额定值的 1.6 倍, 可能对设备造成损害。

图 12 为故障期间电流 i_d 正序分量和负序分量, 图中断开故障相之后, 正负序控制器同时控制 i_d , 造成 i_d 不能达到控制目标, 出现振荡。

另外, 在重合故障相时, 由于 A 相电压过高, 重合瞬间, 可能引起 A 相桥臂过流, 如图 13 所示。图 13 中, A 相重合时电压过高, 引起 A 相桥臂过流, 造成 A 相上桥臂闭锁, 进而引起其他桥臂全部闭锁, 最终换流器闭锁。

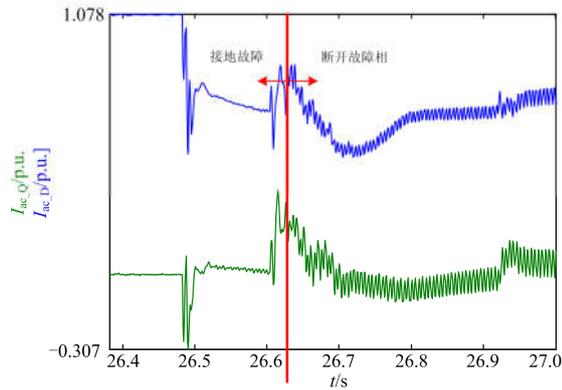
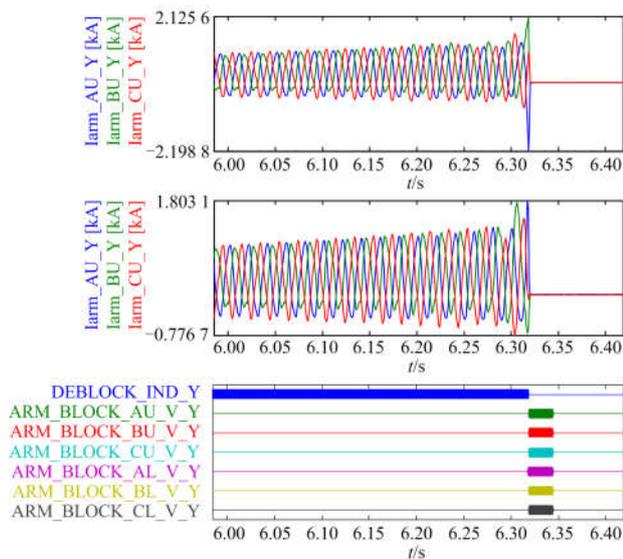
图 12 故障期间电流 i_d 正序分量和负序分量Fig. 12 Positive sequence component and negative sequence component of i_d during fault

图 13 断路器重合故障相之后引起桥臂过流

Fig. 13 Bridge arm overcurrent after the reclose of the fault phase

5 结论

柔性直流工程如渝鄂柔性直流工程仅一回交流进线运行时, 在发生接地故障后, 如果配置重合闸功能, 会造成柔直非全相运行, 可能引起两方面的结果:

1) 故障相断开时, 由于角接绕组的存在, 绕组中的零序电流会在故障相感应出电压, 可能造成过电压; 故障相重合后可能引起桥臂过流。

2) 单相重合闸断开故障相时, 柔直的正序控制器和负序控制器不能完全解耦, 造成控制系统不稳定。

因此, 发生断线故障或者重合闸时, 应该在故

障时间内尽量较少柔直的功率传输, 或者不投入交流进线的重合闸功能。

该研究结论已经被渝鄂工程采用, 当渝鄂工程换流站只有一回交流进线时, 不投入线路单相重合闸功能, 也即在交流线路故障后直接跳交流断路器并闭锁柔性直流, 减小断路器重合前后的过电压和桥臂过流风险。本文的分析和仿真可以为后续柔性直流输电工程的运行提供参考。

参考文献

- [1] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153.
JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [5] XUE Y L, 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.
- [6] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [7] 朱益华, 郭琦, 李威, 等. 含柔性直流输电系统的电网安全稳定特性和控制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(12): 20-26.
ZHU Yihua, GUO Qi, LI Wei, et al. Research on security and stability characteristics and control strategy of power grid with VSC-HVDC[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(12): 20-26.
- [8] 欧阳荻一, 张旭航, 李东东. 基于 RTDS 的海上风电柔性直流输电控制研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(8):

86-93.
 OUYANG Hongyi, ZHANG Xuhang, LI Dongdong, et al. Research on the control of flexible HVDC connected to offshore wind farms based on RTDS[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(8): 86-93.

[9] 朱琳, 贺之渊, 吴学光, 等. 渝鄂背靠背柔性直流附加控制对系统稳定性的影响[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2519-2527.
 ZHU Lin, HE Zhiyuan, WU Xueguang, et al. Influence of additional control strategy of back-to-back VSC-HVDC on system stability[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2519-2527.

[10] 李大虎, 张志杰, 张伟晨, 等. 背靠背柔性直流接入电网后的影响评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 71-80.
 LI Dahu, ZHANG Zhijie, ZHANG Weichen, et al. Influence evaluation of provincial power grid integrated with back-to-back VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 71-80.

[11] LI Xuan, PU Ying, WU Yankun. Design of control and protection system in Chongqing-Hubei DC back-to-back interconnection project[C] // 2016 International High Voltage Direct Current Conference (HVDC 2016).

[12] 朱琳, 寇龙泽, 刘栋. 渝鄂柔性直流输电交直流动态特性及控制保护策略研究[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(4): 454-460.
 ZHU Lin, KOU Longze, LIU Dong. Research on transient characteristics of AC-DC system and control and protection strategy for Chongqing-Hubei project[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(4): 454-460.

[13] 李大虎, 张志杰, 张伟晨, 等. 背靠背柔性直流接入电网后的影响评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 71-80.
 LI Dahu, ZHANG Zhijie, ZHANG Weichen, et al. Influence evaluation of provincial power grid integrated with back-to-back VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 71-80.

[14] 刘树, 赵宇明, 陈莉, 等. 柔性直流配电网控制保护系统设计及策略研究[J]. 供用电, 2018, 35(1): 21-27, 39.
 LIU Shu, ZHAO Yuming, CHEN Li, et al. Research on control and protection strategy and design scheme of VSC-DC distribution network control and protection system[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(1): 21-27, 39.

[15] 罗飞, 焦在滨, 马钊, 等. 直流配电网故障分析和继电保护综述[J]. 供用电, 2018, 35(6): 3-11.
 LUO Fei, JIAO Zaibin, MA Zhao, et al. Review of fault analysis and relay protection of DC distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(6): 3-11.

[16] 曹帅, 向往, 林卫星, 等. 含风电的真双极混合型 MMC-MTDC 系统故障穿越及能量耗散控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 39-48.
 CAO Shuai, XIANG Wang, LIN Weixing, et al. Fault ride-through and energy dissipation control of bipolar hybrid MMC-MTDC integrating wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 39-48.

[17] 李少华, 王秀丽, 李泰, 等. 混合式 MMC 及其直流故障穿越策略优化[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1849-1858.
 LI Shaohua, WANG Xiuli, LI Tai, et al. Optimal design for hybrid MMC and its DC fault ride-through strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1849-1858.

[18] 孔明, 贺之渊, 汤广福. 子模块混合型 MMC-HVDC 直流故障穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5343-5351.
 KONG Ming, HE Zhiyuan, TANG Guangfu. A DC fault ride-through strategy for cell-hybrid modular multilevel converter based HVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5343-5351.

[19] 胡兆庆, 田杰, 董云龙, 等. 模块化多电平柔性直流输电系统网侧故障控制策略及验证[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 71 - 75, 108.
 HU Zhaoqing, TIAN Jie, DONG Yunlong, et al. A control strategy for modular multilevel converter based HVDC flexible systems under system faults and its verification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 71-75, 108.

[20] 董旭, 张峻樾, 王枫, 等. 风电经架空柔性直流输电线路并网的交直流故障穿越技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 48-55.
 DONG Xu, ZHANG Junjie, WANG Feng, et al. AC and DC fault ride-through technology for wind power integration via VSC-HVD cover headlines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 48-55.

[21] ADAM G P, AHMED K H, FINNEY S J, et al. AC fault ride through capability of a VSC-HVDC transmission systems[C] // 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, September 12-16, 2010, Atlanta, US: 3739-3745.

[22] 徐政, 肖晃庆, 徐雨哲. 直流断路器的基本原理和实现方法研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 347-357.
 XU Zheng, XIAO Huangqing, XU Yuzhe. Study on basic principle and its realization methods for DC circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 347-357.

[23] 魏晓光, 高冲, 罗湘, 等. 柔性直流输电网新型高压

- 直流断路器设计方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 95-102.
- WEI Xiaoguang, GAO Chong, LUO Xiang, et al. A novel design of high-voltage DC circuit breaker in HVDC flexible transmission grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 95-102.
- [24] 秦红霞, 孙刚, 时伯年, 等. 柔性直流配网极间故障控制保护策略与主设备参数配合研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 150-156.
- QIN Hongxia, SUN Gang, SHI Bonian, et al. Research on control and protection strategy of MMC based DC distribution grid with interpoles fault[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 150-156.
- [25] 李岩, 龚雁峰. 柔性直流电网重合闸过电流和过电压抑制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 107-119.
- LI Yan, GONG Yanfeng. Suppression of reclosing overcurrent and overvoltage of flexible DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 107-119.
- [26] 薛士敏, 廉杰, 齐金龙, 等. MMC-HVDC 故障暂态特性及自适应重合闸技术[J]. 电网技术, 2018, 42(12): 4015-4021.
- XUE Shimin, LIAN Jie, QI Jinlong, et al. Fault transient characteristic and adaptive reclosing technique of MMC-HVDC network[J]. Power System Technology, 2018, 42(12): 4015-4021.
- [27] 王一, 刘建政. 用于 MMC-HVDC 直流故障保护的新型拓扑及重合闸控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2312-2319.
- WANG Yi, LIU Jianzheng. An enhanced MMC-HVDC topology and system recovery strategy for DC fault protection[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2312-2319.
- [28] 李斌, 何佳伟, 冯亚东, 等. 多端柔性直流电网保护关键技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 2-12.
- LI Bin, HE Jiawei, FENG Yadong, et al. Key techniques for protection of multi-terminal flexible DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 2-12.
- [29] LI Bin, HE Jiawei, TIAN Jie, et al. DC fault analysis for modular multilevel converter-based system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(2): 275-282.
- [30] 杨海倩, 王玮, 荆龙, 等. MMC-HVDC 系统直流侧故障暂态特性分析[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 40-46.
- YANG Haiqian, WANG Wei, JING Long, et al. Analysis on transient characteristic of DC transmission line fault in MMC based HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 40-46.
- [31] 行登江, 吴金龙, 王先为, 等. MMC-HVDC 系统直流断线故障特性分析[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1825-1832.
- XING Dengjiang, WU Jinlong, WANG Xianwei, et al. Analysis on characteristic of DC transmission line breakage fault in modular multilevel converter based HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1825-1832.
- [32] WANG Puyu, ZHANG Xiaoping, COVENTRY P F, et al. Control and protection strategy for MMC MTDC system under converter-side AC fault during converter blocking failure[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(3): 272-281.
- [33] 李晓栋, 徐政, 胡四全, 等. 3 种混合直流输电系统的交流故障特性对比[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 1-8.
- LI Xiaodong, XU Zheng, HU Siqian, et al. Comparison of AC fault characteristics among three types of hybrid HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 1-8.
- [34] CHEN Xiuyu, IRWIN G, WOODFORD D, et al. Reactive power control in MMC HVDC system during AC fault[C] // 12th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2016), May 28-29, 2016, Beijing, China.

收稿日期: 2019-07-07; 修回日期: 2019-11-05

作者简介:

王 帅(1983—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为高压直流和柔性直流输电控制与保护; E-mail: wings_ws@126.com

熊凌飞(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为高压直流和柔性直流输电控制与保护。E-mail: xionglingfei@chinasperi.sgcc.com.cn

(编辑 葛艳娜)