

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190765

## 柔性直流交流连接区故障分析

范雪峰<sup>1</sup>, 黄金海<sup>1</sup>, 宋延涛<sup>1</sup>, 韩伟<sup>2</sup>, 郭玉茹<sup>1</sup>, 吴东崛<sup>1</sup>, 彭松<sup>3</sup>

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450000;  
3. 珠海许继电气有限公司, 广州 珠海 519060)

**摘要:** 描述常规特高压直流输电工程现状, 展望柔性直流输电前景, 介绍基于 VSC 模块化多电平换流器(modular multi-level converter)技术直流输电的基本原理。根据渝鄂背靠背直流输电工程柔性直流一次拓扑结构, 搭建实时数字仿真器(RTDS)仿真模型。结合仿真验证结果, 分析交流连接线区充电软启电阻切除前、解锁软启电阻切除后故障时的故障暂态及稳态特性。通过对柔性直流阀侧故障特性及阀侧故障时阀控本体过压过流现象的研究, 设计针对柔性直流的保护配合策略。

**关键词:** 柔性直流输电; 交流连接线区; 故障暂态稳态特性; 保护策略; 实时仿真器

### Fault analysis of flexible DC/AC connection area

FAN Xuefeng<sup>1</sup>, HUANG Jinhai<sup>1</sup>, SONG Yantao<sup>1</sup>, HAN Wei<sup>2</sup>, GUO Yuru<sup>1</sup>, WU Dongjue<sup>1</sup>, PENG Song<sup>3</sup>  
(1. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 2. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450000, China; 3. Zhuhai XJ Electric Co., Ltd., Zhuhai 519060, China)

**Abstract:** This paper describes the current situation of a conventional HVDC transmission project, looks forward to the future of flexible DC transmission, and introduces the basic principle of DC transmission based on VSC modular multilevel converter technology. A Real Time Digital Simulator (RTDS) simulation model is built according to the flexible DC primary topology of the Y-E back to back DC transmission project. Based on the simulation results, the fault transient state and steady state characteristics are analyzed before charging soft open resistor removal and after unlocking soft open resistor removal. Through the study of the fault characteristics of the flexible DC valve side and the overpressure overflow of valve body in case of valve side failure, a protection and cooperation strategy for flexible DC is designed.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. 52170218000M): Research on Fault Protection and Adaptive Coincidence Method of Hybrid Multi-terminal HVDC Transmission Lines.

**Key words:** hybrid HVDC; AC connection area; fault transient steady state characteristics; protection strategy; real-time digital simulator (RTDS)

## 0 引言

近年来, 常规高压直流输电工程在我国建设已接近饱和, 再加上它最大的特点是存在换相失败的可能<sup>[1-4]</sup>, 所以基于电压换流器型高压直流输电(又称柔性直流输电)方式, 有很大的发展前景<sup>[5-6]</sup>。

目前, 世界范围内欧洲、大洋洲、美洲、亚洲、非洲 16 个国家均有柔性直流输电工程投运或在建

工程, 瑞典的赫尔斯扬实验性工程、赞比亚的卡普里维联网工程、旧金山的传斯贝尔电缆工程等。国内也有多个工程项目, 2011 年的上海南汇、2014 年的舟山五端柔直、2016 年的厦门柔直、2018 年渝鄂背靠背联网工程、张北新能源示范工程、乌东德(LCC-VSC)混合工程, 均预示着柔性直流输电工程在我国的大规模兴起<sup>[7-8]</sup>。

在这种应用背景下, 柔性直流输电运行过程中的暂态及稳态故障分析和保护配置就尤为重要。但是柔性直流输电又有一个明显的缺点: 由于高电压级别的直流断路器在我国刚刚研制成功, 目前为止没有工程应用<sup>[9]</sup>, 所以在没有直流断路器的情况下,

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目资助(52170218000M): 混合多端直流输电线路故障保护与自适应重合方法研究

交流连接线区故障时故障电流会引入到直流系统；直流区故障时，直流偏置又会引入到交流系统。这使得柔性直流输电的故障特性也较为复杂，相应的保护策略研究也增加了难度。

本文依托于渝鄂背靠背联网工程，搭建 RTDS 仿真模型，根据仿真结果结合 MMC 基本工作原理及电力系统相关知识，针对交流连接线区故障(包括启动时的故障、解锁后的故障)做出分析。并配置实用的保护方案。

## 1 MMC 拓扑结构及基本原理

### 1.1 拓扑结构

本文研究的子模块为半桥型子模块，单个子模块拓扑结构图如图 1 所示，经典多电平换流器拓扑结构如图 2 所示。

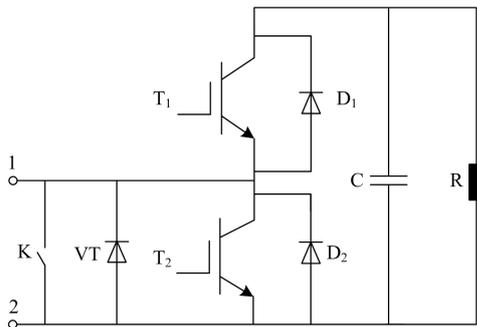


图 1 HBSM 拓扑结构图

Fig. 1 HBSM topology diagram

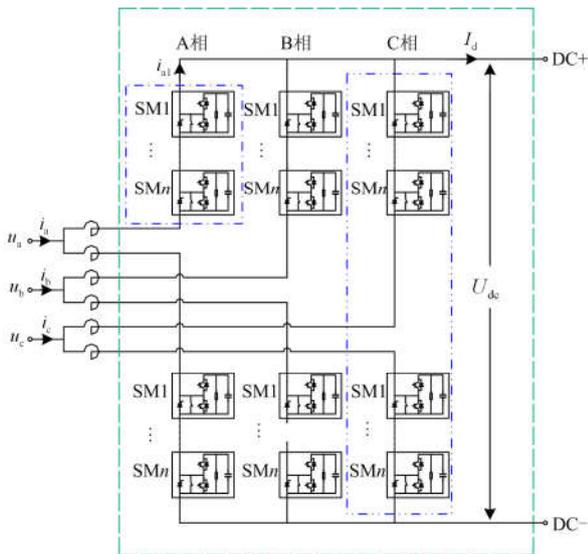


图 2 多电平换流器拓扑结构图

Fig. 2 Topology diagram of multilevel converters

### 1.2 子模块基本工作原理

如图 1 所示， $T_1$ 、 $T_2$  为 IGBT， $D_1$ 、 $D_2$  为反并

联二极管， $C$  为直流侧充电电容， $R$  为子模块放电电阻， $VT$  为旁路晶闸管， $K$  为旁路开关。MMC 通过控制  $T_1$ 、 $T_2$  的开通与关断来实现对子模块电容的充放电，从而来支撑直流电压。MMC 有 3 个状态和 6 个工作模式，由表 1 给出。

表 1 MMC 的 3 个状态和 6 个工作模式

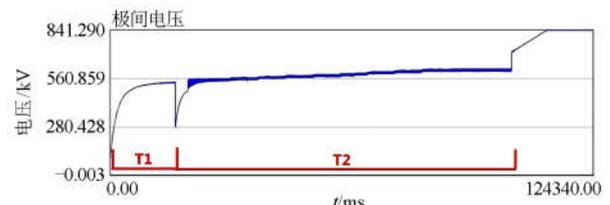
Table 1 3 States and 6 modes of operation of MMC

$T_1$	$T_2$	$D_1$	$D_2$	$i_{SM}$	$u_{SM}$	说明
0	0	1	0	1→2	$u_C$	充电
0	0	1	0	1→2	$u_C$	充电
0	1	0	0	1→2	0	旁路
0	0	0	1	2→1	0	旁路
1	0	0	0	2→1	$u_C$	放电
0	0	0	1	2→1	0	旁路

对图 2 而言，MMC 正常工作时直流电压维持不变，就是 3 个相单元中处于投入状态的子模块数都相等且不变，使  $U_{ap} + U_{an} = U_{bp} + U_{bn} = U_{cp} + U_{cn}$ 。三相交流电压的输出，就是通过对 3 个相单元上、下桥臂中处于投入状态的子模块数进行动态分配而实现对换流器输出电压的调节<sup>[10-11]</sup>。

## 2 YUE-MMC 启动过程描述

正常的多电平 MMC 柔性直流输电系统启动过程包括以下 3 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 解锁。由下文中提到的搭建的 RTDS 模型，给出了整个启动波形，波形如图 3 所示。



±420 kV 渝鄂背靠背直流输电工程

图 3 柔直系统启动波形

Fig. 3 Start waveform of the flexible DC system

由图 3 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，如图 3 中标示的 T1 阶段。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 4 所示，用红色标注充电电流的流电路径。

由图 4 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。

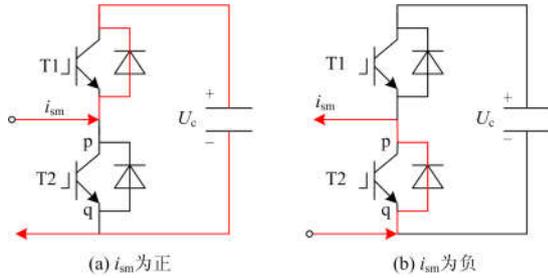


图 4 HBSM 等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of HBSM

YUE-MMC 的整体不控充电回路如图 5 所示, 图中只给出了上桥臂的不控充电回路, 下桥臂和上桥臂同理。

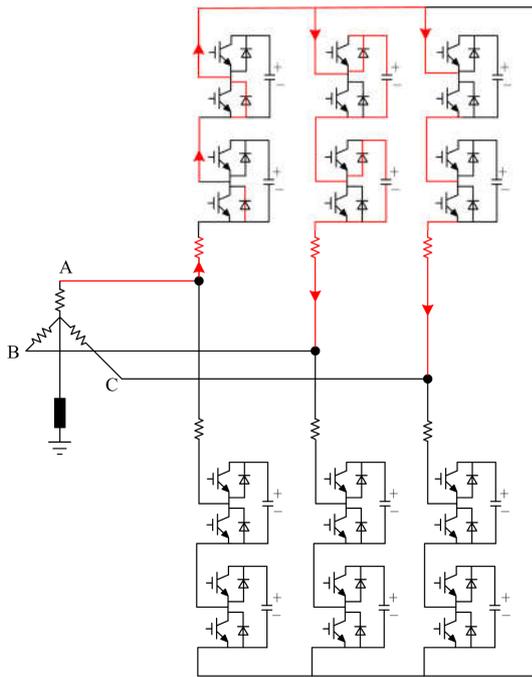


图 5 MMC 的整体不控充电回路

Fig. 5 Overall uncontrolled charging loop of MMC

## 2.2 子模块可控充电

当子模块电压满足阀控的驱动使能电压后, 阀控驱动板从子模块电压取能进入可控充电, 正是由于阀控的取能, 导致了直流电压的下跌, 如图 3 所示的 T2 阶段。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<sup>[12-13]</sup>, 具体的控制流程此处不再赘述。

## 2.3 MMC 解锁

本文引用了比较成熟的控制逻辑, 适用于基于 MMC 的柔性直流配网工程以及基于 MMC 的柔性直流海上风电工程<sup>[14]</sup>, 下面简单描述其控制过程。

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 6 所示。

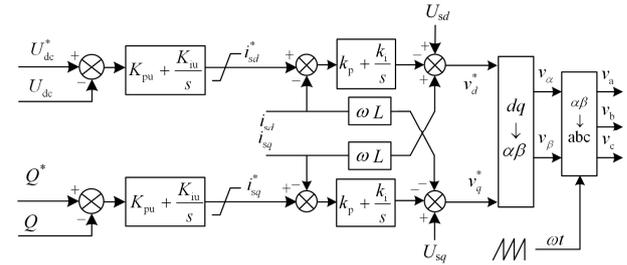


图 6 MMC 控制器逻辑框图

Fig. 6 Logic diagram of MMC controller

图 6 中,  $U_d$ 、 $U_{dc}^*$  分别为直流电压的实际值和参考值,  $Q$ 、 $Q^*$  分别为无功功率的实际值和参考值,  $i_{sd}$ 、 $i_{sd}^*$  分别为阀侧电流  $d$  轴分量的实际值和参考值,  $i_{sq}$ 、 $i_{sq}^*$  分别为阀侧电流  $q$  轴分量的实际值和参考值,  $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$  分别为阀侧电压  $d$  轴、 $q$  轴分量,  $v_d^*$ 、 $v_q^*$  分别为所生成三相调制波的  $d$  轴、 $q$  轴分量<sup>[15-16]</sup>。

## 3 RTDS 仿真

### 3.1 RTDS 平台介绍

依托于渝鄂背靠背联网工程搭建 RTDS 仿真模型, 平台搭建的主回路拓扑结构如图 7 所示。该拓扑结构引用半桥对称单极的拓扑结构, 与伪双极及真双极的故障特性有明显的区别。伪双极及真双极的特点<sup>[17-18]</sup>在以往的论文中已做过分析。

系统主要参数如表 2 所示。

表 2 YUE-MMC 系统主要参数

Table 2 Main parameters of YUE-MMC system

项目	MMC
单元额定容量	1 250 MW
额定直流电压	420 kV
额定网侧电压	525 kV
换流变压器	525/437 kV
电抗器	140 mH (桥臂)
软启电阻	6 kΩ
中性点接地电阻	2 kΩ
子模块电容	3.4 mF
单桥臂子模块个数	540 个

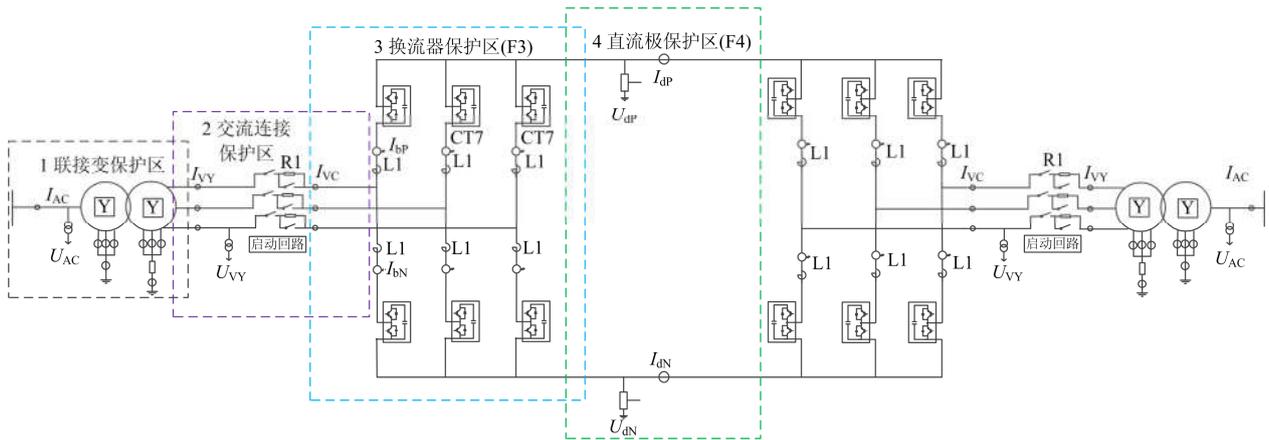


图 7 YUE-MMC 拓扑结构图

Fig. 7 Topology diagram of YUE-MMC

### 4 故障分析

为了对本文所描述的仿真系统进行暂态和稳态的分析以便更好地配置保护功能，对第 3 节所搭建的仿真系统进行故障试验。其中故障试验包含整个启动过程，如第 2 节所描述不控充电、可控充电、解锁，做到对柔性直流的整个启停过程全面分析，

在此基础上配置没有死区的保护策略。

试验工况分为以下几项：① 充电时，软启电阻未切除前，F1 故障试验；② 充电时，软启电阻未切除前，F2 故障试验；③ 解锁后，F1 故障试验；④ 解锁后，F2 故障试验；⑤ 解锁后，F3 故障试验。

故障点示意图如图 8 所示，故障列表由表 3 给出。

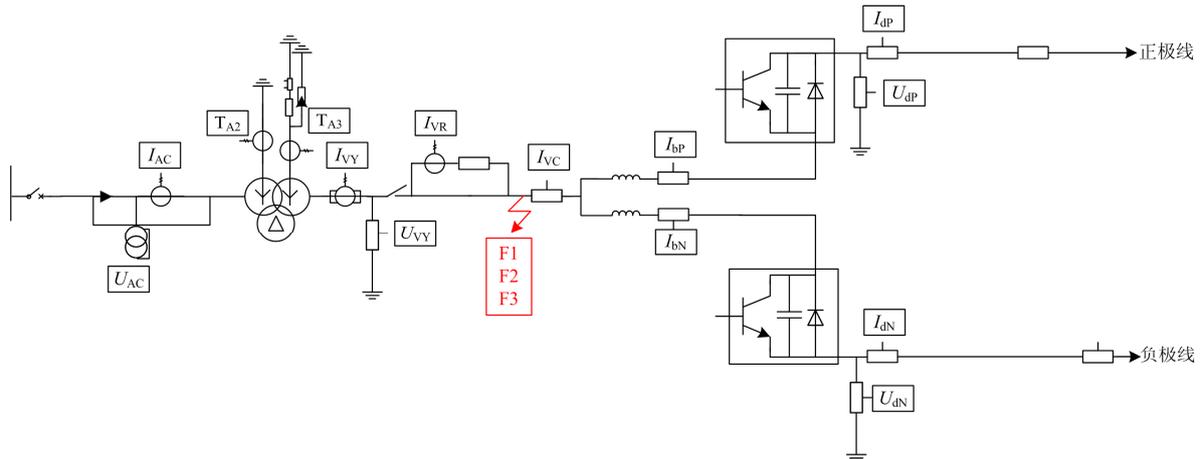


图 8 YUE-MMC 阀侧交流连接线区故障点示意图

Fig. 8 Diagram of fault point of YUE-MMC valve side AC connection line area

表 3 故障点列表

Table 3 List of trouble points

故障点	名称
F1	单相接地故障
F2	两相短路故障
F3	三相短路故障

#### 4.1 充电时，软启电阻未切除前，F1 故障试验，故障分析

合交流进线开关，使联接变带电对换流器进行充电，在启动电阻 R1(图 7 中启动回路中的 R1)未切

除前，发生 F1 单相接地故障，故障后的故障回路如图 9 所示。

故障后的一侧单相等效电路图如图 10 所示。图 10 中：R1 为启动回路的启动电阻；R2 为联接变阀侧接地电阻。

由上述电路图可以看出，当单相接地时，该相并非直接接地而是通过电阻然后接地。所以故障后 A 相上的相电压还会有一部分，大小为流经接地电阻的压降。如图 11 中的绿色线条 A 相电压波形。

由上述分析及图 11 的试验结果可以看出，当发

生充电过程中的单相接地时, 故障电流较小。导致故障时的差流就很小, 这给保护动作判据及定值带来很大难度。

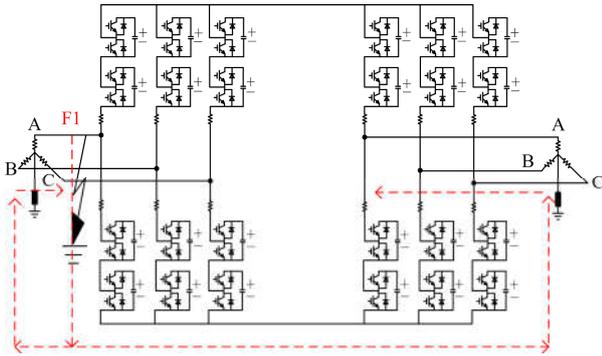


图 9 YUE-MMC 单相接地故障回路示意图

Fig. 9 Schematic diagram of single phase ground fault loop of YUE-MMC

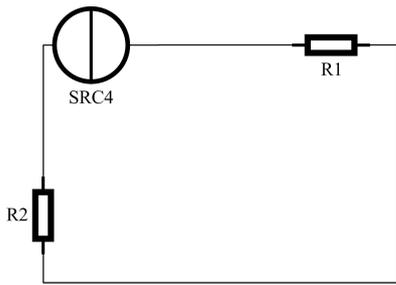


图 10 单相等效电路图

Fig. 10 Single phase equivalent circuit diagram

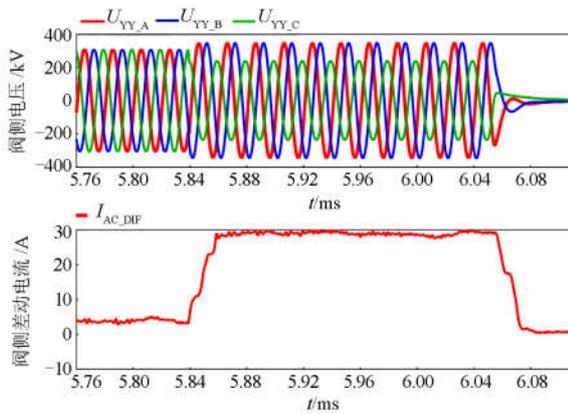


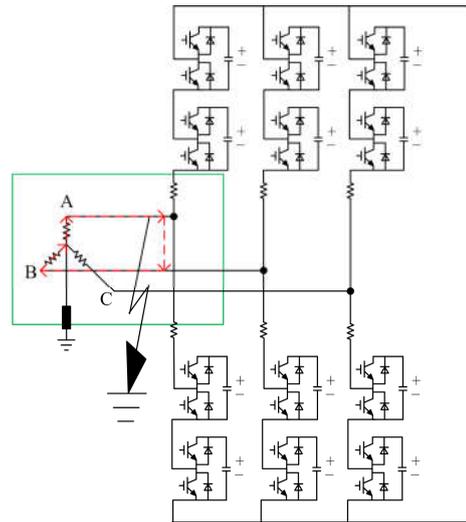
图 11 接地相阀侧电压与阀侧差动电流波形图

Fig. 11 Ground phase valve and differential current waveform at valve side waveform

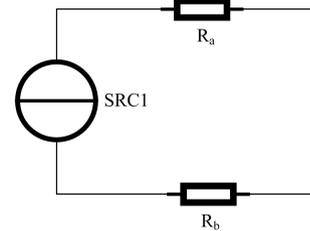
4.2 充电时, 软启电阻未切除前, F2 故障试验, 故障分析  
合交流进线开关, 使联接变带电对换流器进行

充电, 在启动电阻 R1(图 7 中启动回路中的 R1)未切除前, 发生 F2 两相短路故障, 故障回路如图 12(a)所示, 等效电路图如图 12(b)所示。

图 12 中:  $R_a$  为启动回路的 A 相串联启动电阻;  $R_b$  为启动回路的 B 相串联启动电阻。



(a) 两相短路故障示意图



(b) 等效电路示意图

图 12 两相短路故障示意图及等效电路图

Fig. 12 Schematic diagram and equivalent circuit diagram of two-phase short-circuit fault

故障后的故障波形如图 13 所示。

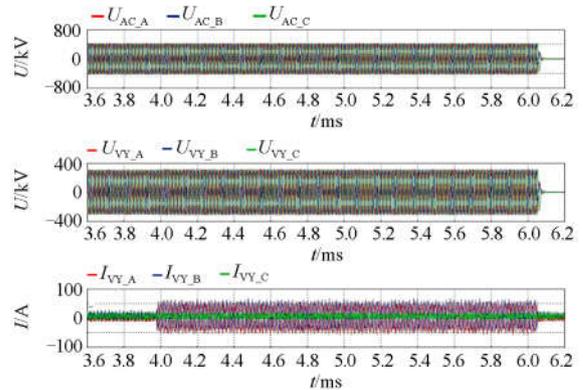


图 13 两相短路故障波形

Fig. 13 Two-phase short circuit fault waveform

从图 13 可以看出,发生两相短路时,故障电流流经两个 6 kΩ 的启动电阻后,电流大小为 60 A 左右,非常小,与 1 p.u.正常运行的电流相比为 60/2577=0.023 p.u.。所以该工况同样给保护判别带来了难度。

### 4.3 解锁后, F1 故障试验, 故障分析

解锁后,由于系统已经投入运行,所以此时启动电阻已经切除,故障回路如图 9 所示的故障回路一样。

故障后的波形图如图 14 所示。

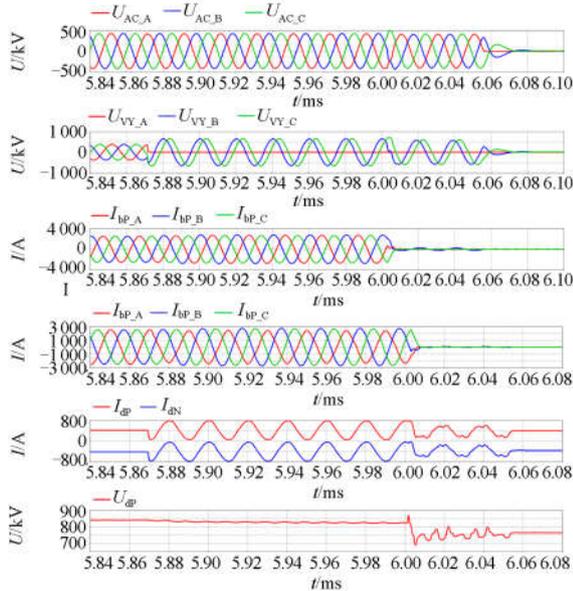


图 14 YUE-MMC 单相接地故障波形图

Fig. 14 YUE-MMC single phase ground fault wave

图 14 中,1 通道:网侧电压;2 通道:阀侧电压;3 通道:阀侧电流;4 通道:换流器电流;5 通道:正极、负极母线电压;6 通道:极线间电压。

在正常运行过程中,定义各相阀侧电压相电压为 A 相相电压  $\dot{U}_a^*$ 、B 相相电压  $\dot{U}_b^*$ 、C 相相电压  $\dot{U}_c^*$ ,定义中性点电压为  $\dot{U}_N^* = 0$ ,定义阀侧电压线电压为  $\dot{U}_{ak}^*$ 、 $\dot{U}_{bk}^*$ 、 $\dot{U}_{ck}^*$ 。

闭锁前:(如图 14 单相接地故障波形图红色框内)

#### (1) 网侧电压 $U_{ac}$

由于变压器副边为高阻接地,当发生阀侧单相接地时,阀侧三相线电压不变,对于 Y-Y 型变压器来说其网侧电压也不会变化,所以网侧的线电压也不变,对应于图 14 中的通道 1。

#### (2) 阀侧电压 $U_{VY}$

当 A 相接地短路时,故障相对地电压变为零,中性点电压值为相电压,未故障的两相对地电压升

为原来的  $\sqrt{3}$  倍<sup>[19-20]</sup>,变为线电压,对应图 14 中的通道 2,故障向量示意图如图 15 所示。

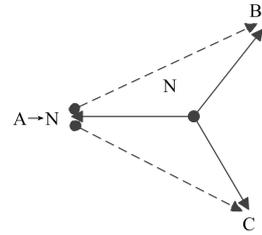


图 15 YUE-MMC 单相接地故障向量示意图

Fig. 15 Diagram of single phase ground fault vector of YUE-MMC

由图 15 所示故障向量示意图可知,当 A 相故障时,其他两相变为相电压幅值。

$$\begin{aligned} \dot{U}_N^* &= -\dot{U}_a^*; \\ \dot{U}_{bk}^* &= \dot{U}_N^* + \dot{U}_b^* = -\dot{U}_a^* + \dot{U}_b^*; \\ \dot{U}_{ck}^* &= \dot{U}_N^* + \dot{U}_c^* = -\dot{U}_a^* + \dot{U}_c^*; \\ \dot{U}_b^* &= \dot{U}_c^* = \sqrt{3} \dot{U}_a^*。 \end{aligned}$$

#### (3) 阀侧电流

功率方向如图 16 中绿线所示,发生故障后,由于故障两侧的电流同时向故障点流,所以故障相(A 相)阀侧电流( $I_{VY}$ )向正方向增大,换流器电流( $I_{VC}$ )向正方向减小,对应图 14 中的通道 3( $I_{VY}$ )、通道 4( $I_{VC}$ )。该故障特性与微电网多潮流方向故障特性类似<sup>[21]</sup>。

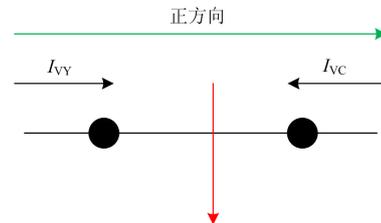


图 16 YUE-MMC 单相接地故障电流流向示意图

Fig. 16 Diagram of the current flow of single-phase ground fault of YUE-MMC

#### (4) 中性点电流

由于渝鄂两侧中性点电阻为 2 kΩ,故障时故障电流为 A 相整个相电压加在  $I_{GND}$  的电阻上,即  $I_{GND} = \frac{U_a}{R_2} = \frac{356.9}{2} = 178.5 \text{ A}$ 。

#### (5) 直流电压

由于零序电流的引入,而控制系统是控制正序、抑制负序但对零序不做处理,导致整个系统引入零序电压,所以直流正母线电压引入交流振荡,振荡

大小为 A 相相电压, 负母线同理。控制系统仍可以保持极间直流电压不变, 以渝鄂工程为例, 幅值为 63.1~776.2 kV, 直流正母线电压 1 p.u. 为 420 kV, 振荡 356.55 kV, 对应于图 14 中的通道 5( $U_{dP}$ 、 $U_{dN}$ )。

闭锁后:(如图 14 单相接地故障波形图绿色框内)。

(1) 网侧电压

渝侧网侧电压, 由于故障闭锁前柔直系统向电网提供无功支撑, 网侧电压被抬高, 闭锁后无功变为 0, 原本被无功支撑起来的网侧电压恢复到正常 525 kV, 阀侧电压同理。

(2) 直流电压

闭锁后阀控固定切除 80 个子模块, 其余子模块均为闭锁状态 540-80=460 个, 由于每个子模块带电 1 p.u.=1680 V。所以闭锁后直流电压为子模块撑起的, 即  $460 \times 1.68 = 772.8$  kV。

(3) 阀侧电流

闭锁后, 由于交流断路器仍未跳开交流侧电流还会向故障点流入, 所以 A 相阀侧电流仍有一部分, 但很小。该电流也为流过阀侧中性点的电流  $I_{GND}$ 。

4.4 解锁后, F2 故障试验, 故障分析

解锁后, 将工况设置为满功率运行, 各个特征量均为 1 p.u. 以便进行分析。该工况下发生 F2 故障, 故障电流较大。故障回路与图 12 相同, 区别为故障后故障回路内没有串接的启动电阻。故障波形如图 17 所示。

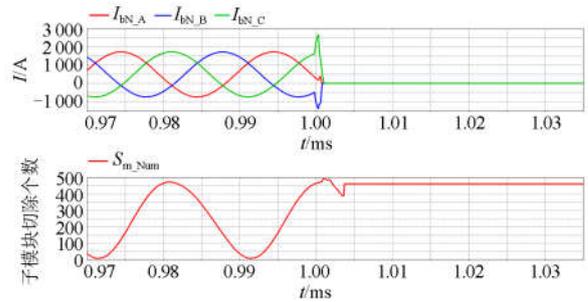
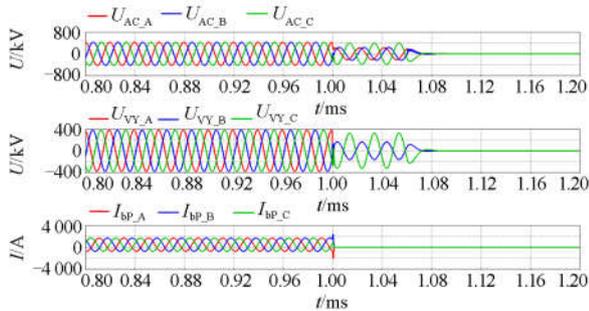


图 17 YUE-MMC 两相短路故障波形图

Fig. 17 YUE-MMC two-phase short-circuit fault wave

图 17 中, 1 通道: 网侧电压; 2 通道: 阀侧电压; 3 通道: 上桥臂电流; 4 通道: 下桥臂电流; 5 通道: 阀控本体保护请求跳闸。

由图 12 和图 17 可以看出, 当发生交流连接区的两相短路, 相当于联接变 A/B 两相直接短接。故障电流短时间就达到了阀本体的耐受能力, 导致阀控本身过流动作。

4.5 解锁后, F3 故障试验, 故障分析

三相短路故障, 故障特征也很明显, 故障电流较大。所以故障后仍为阀控本体保护先闭锁。三相短路故障与双极短路故障相似, 已有成熟的理论分析<sup>[20]</sup>, 本文不再做分析。

5 保护策略及保护配合

针对渝鄂直流背靠背保护和以往的柔性直流工程不同, 该主接线为大电阻接地。单相接地时故障电流较小, 给保护判断带来很大的难度, 参考以往论文研究<sup>[22-26]</sup>。

综合本文所描述的暂态、稳态故障分析, 配置保护逻辑。

(1) 当发生充电过程中的阀侧单相接地故障时, 由于差流较小所以保护应对其单独处理。处理逻辑如图 18 所示。

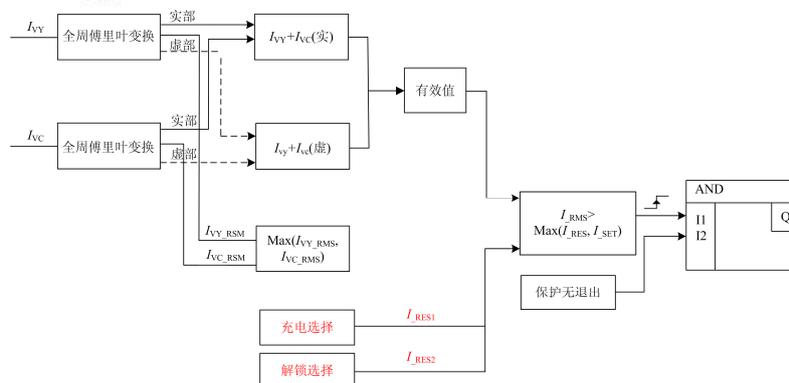


图 18 YUE-MMC 针对于充电过程中的单相接地故障保护处理逻辑图

Fig. 18 Logic diagram of single-phase ground fault protection for charging with YUE-MMC needle

充电过程中带有充电电阻，发生故障时故障电流小，所以选择  $I_{RES1}$ ；解锁后，充电电阻切除，发生故障时故障电流增大，所以选择  $I_{RES2}$ 。如图 18 红色部分标识。

(2) 解锁后，当发生阀侧单相接地故障时，明显的变化为

a. 接地相相电压变为 0 kV，其他不接地两相由相电压变为线电压；

b. 三相线电压不变，对于 Y-Y 型变压器来说其网侧电压也不会变化。

所以对于控制系统来说仍可进行正常控制，但是对于保护来说必须要进行闭锁，保护一次设备的安全。由上文分析可知，解锁后的故障电流较大，用差动作为其主保护。

(3) 解锁后，当发生充电过程中的阀侧两相短路故障时，由于差动电流已经近似零漂，不能满足作为保护判据的条件，所以引入启动电阻过流保护。充电过程中的两相短路故障保护处理逻辑图如图 19 所示。

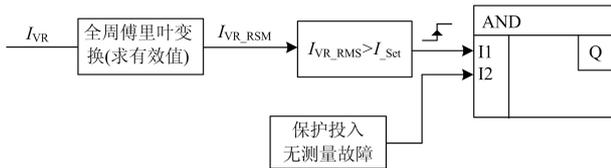


图 19 YUE-MMC 针对于充电过程中的两相短路故障保护处理逻辑图

Fig. 19 Logic diagram of two-phase short-circuit fault protection for charging with YUE-MMC needle

## 6 结论

本文给出了半桥子模块的基本工作原理，且依托渝鄂工程建立数学模型。并在所搭建的动模平台上试验分析了整个柔直系统的启动过程，着重研究了阀侧单相接地及两相短路故障的故障特性。最后给出了适用于该工程的保护策略。综上所述及试验验证表明本文所提保护策略有效地保证了系统安全运行。

## 参考文献

[1] 汤奕, 郑晨一. 高压直流输电系统换相失败影响因素研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 499-513, 647. TANG Yi, ZHENG Chenyi. Review on influencing factors of commutation failure in HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 499-513, 647.

[2] 黄方能, 周磊, 马骞, 等. 异步联网格局下广东电网规划网架适应性综合评估[J]. 广东电力, 2018, 31(9): 45-53. HUANG Fangneng, ZHOU Lei, MA Qian, et al.

Comprehensive evaluation on adaptability of planning grid of Guangdong power grid under asynchronous interconnection pattern[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(9): 45-53.

[3] LI Tan, ZHAO Tong, LÜ Mingchao, et al. The mechanism and solution of the anomalous commutation failure of multi-infeed HVDC transmission systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 114.

[4] 邵瑶, 周勤勇, 张健, 等. 多馈入直流输电系统换相失败风险评估简化指标[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3453-3458. SHAO Yao, ZHOU Qinyong, ZHANG Jian, et al. Analysis of influencing factors of multi-infeed HVDC system interaction factor[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3453-3458.

[5] 李庚银, 吕鹏飞, 李广凯, 等. 轻型高压直流输电技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 1-5. LI Gengyin, LÜ Pengfei, LI Guangkai, et al. Development and prospects for HVDC light[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 1-5.

[6] 徐政, 陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 1-10. XU Zheng, CHEN Hairong. Review and applications of VSC HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 1-10.

[7] 马为民, 吴方劼, 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.

[8] 徐政, 薛英林, 张哲任. 大容量架空线柔性直流输电关键技术及前景展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5051-5062. XU Zheng, XUE Yinglin, ZHANG Zheren. VSC-HVDC technology suitable for bulk power overhead line transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5051-5062.

[9] 丁晓, 汤广福, 韩民晓, 等. 柔性直流电网用混合式高压直流断路器特征参数提取及应用[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 309-319, 369. DING Xiao, TANG Guangfu, HAN Minxiao, et al. Characteristic parameters extraction and application of the hybrid DC circuit breaker in MMC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 309-319, 369.

[10] 管敏渊, 徐政, 潘伟勇. 模块化多电平换流器型直流输电的调制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 48-52. GUAN Minyuan, XU Zheng, PAN Weiyong. Nearest level modulation for modular multilevel converter in HVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 48-52.

[11] 孙世贤, 田杰. 适合 MMC 型直流输电的灵活逼近调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 62-67, 18. SUN Shixian, TIAN Jie. Flexible approach modulation strategy for HVDC based on modular multilevel converter[J].

- Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 62-67, 18.
- [12] 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.
- [13] 熊凌飞, 韩民晓. 基于组合方式的多端柔性直流输电系统控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1586-1592.  
XIONG Lingfei, HAN Minxiao. A novel combined control strategy for VSC-MTDC[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1586-1592.
- [14] 王迪, 卢晓燕. 海上风电机组控制系统研究[J]. 电气应用, 2012, 31(9): 54-57.
- [15] 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.
- [16] 张浩, 刘欣和, 王先为, 等. 柔性直流输电系统 MMC 换流阀闭环充电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 134-142.  
ZHANG Hao, LIU Xinhe, WANG Xianwei, et al. Closed-loop charging strategy of MMC in flexible DC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 134-142.
- [17] 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.
- [18] 朱晋, 韦统振, 霍群海. 一种新型全桥变桥臂型 VSC-HVDC 变流拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 52-61, 15.  
ZHU Jin, WEI Tongzhen, HUO Qunhai. A new full-bridge alternative arm based VSC-HVDC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 52-61, 15.
- [19] 盛亚如, 丛伟, 卜祥海, 等. 基于中性点电流与零序电流投影量差动的小电阻接地系统高阻接地故障判断方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 17-22, 29.  
SHENG Yaru, CONG Wei, BU Xianghai, et al. Detection method of high impedance grounding fault based on differential current of zero-sequence current projection and neutral point current in low-resistance grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 17-22, 29.
- [20] 张桂斌, 徐征, 王广柱. 基于 VSC 的直流输电系统的稳态建模及其非线性控制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 17-22.  
ZHANG Guibin, XU Zheng, WANG Guangzhu. Steady-state model and its nonlinear control of VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 17-22.
- [21] 王珊珊, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过电流分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(5): 1-7.  
WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Analysis of submodule overcurrent caused by double pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(5): 1-7.
- [22] 萧展辉, 蔡微, 黄剑文, 等. MMC 型多端柔性直流配电系统协同控制与故障电流抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 103-110.  
XIAO Zhanhui, CAI Wei, HUANG Jianwen, et al. Coordinate control scheme for modular multilevel converter based multi-terminal DC distribution power systems and circuit suppression during faults[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 103-110.
- [23] 郭贤珊, 周杨, 梅念, 等. 张北柔性直流电网故障电流特性及抑制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5438-5446.  
GUO Xianshan, ZHOU Yang, MEI Nian, et al. Research on the fault current characteristic and suppression strategy of Zhangbei Project[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5438-5446.
- [24] 朱良合, 盛超, 卢启付, 等. MMC 高速模型在仿真换流阀内故障时的适用性分析[J]. 广东电力, 2019, 32(5): 60-66.  
ZHU Lianghe, SHENG Chao, LU Qifu, et al. Analysis of applicability of MMC high-speed model in simulating internal valve fault[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(5): 60-66.
- [25] 倪腊琴, 李济沅, 龚仁敏, 等. 一起典型的特高压高阻接地故障分析及处理[J/OL]. 电测与仪表: 1-8[2019-09-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.th.20190711.1313.012.html>.  
NI Laqin, LI Jiyuan, GONG Renmin, et al. An analysis and processing of typical UHV high resistance grounding fault[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: 1-8[2019-09-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.th.20190711.1313.012.html>.
- [26] ZHANG Fan, MU Longhua. New protection scheme for internal fault of multi-microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(2): 159-170. DOI: 10.1186/s41601-019-0127-3.

收稿日期: 2019-07-02; 修回日期: 2019-10-21

作者简介:

范雪峰(1991—), 男, 本科, 工程师, 从事柔性直流输电保护软件设计及研究;

黄金海(1975—), 男, 高级工程师, 长期从事高压直流输电保护软件设计及研究;

宋延涛(1986—), 男, 硕士研究生, 从事高压直流输电控制技术研究、工程应用与运行维护。

(编辑 魏小丽)