

# 模块化多电平换流阀子模块旁路方案设计

段军, 谢晔源, 朱铭炼, 殷冠贤, 方太勋

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:**模块化多电平换流阀(MMC)作为柔性直流输电系统中的关键设备,其子模块的可靠性直接影响整个系统的安全稳定运行。文中系统设计了基于永磁双驱动旁路开关的主动旁路方案、基于双向转折晶闸管的被动旁路方案,并结合主动旁路的经济性和被动旁路的可靠性,设计了分级旁路方案。试验结果表明,主动旁路方案能主动下发旁路命令,可靠旁路故障子模块;在主动旁路方案失效的情况下,被动旁路方案可靠旁路故障子模块。所提方案解决了因子模块单一故障引起系统跳闸的难题,为后续柔性直流换流阀工程实施提供了设计指导。

**关键词:**柔性直流;模块化多电平(MMC);换流阀;子模块;旁路方案

中图分类号:TM711

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)04-0207-07

## 0 引言

柔性直流输电可以突破常规直流输电的局限,更好地服务于新能源占比日益提升的现代电网。柔性直流输电使用全控型半导体器件绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT),在控制维度上超越常规直流输电,可实现有功和无功功率高速独立控制,为大规模清洁能源送出与消纳、国际异步联网等需求提供新的解决方案。

模块化多电平换流阀(modular multilevel converter, MMC)是柔性直流输电系统的核心设备,每个桥臂由多个子模块(sub module, SM)串联组成,运行中故障子模块旁路失败会导致换流站跳闸,因此设计可靠的故障子模块旁路方案对提高柔性直流输电系统安全稳定性具有重要意义。文献[1]分析了鲁西背靠背柔性直流工程一起典型的子模块旁路拒合引起的跳闸事故,原因为旁路开关本体触发信号回路连接失效,事故说明了提高旁路开关本体可靠性的重要性。文献[2]提出一种子模块冗余取能电路,电源板从本模块直流电容取能的同时,也从相邻子模块电容取能,提高了电源板供电可靠性,但增加了模块之间的相互耦合,易造成故障扩大。文献[3]提出了一种子模块失控强制旁路电路,在电源板或控制板故障失控时强制旁路子模块,但未涉及旁路开关本体拒合的解决方法。

文中从 MMC 子模块故障旁路执行原理入手,针对通信回路、电源板、旁路开关和触发信号回路等执行旁路关键元件,基于全链路冗余思想,设计主动旁路方案;针对主动旁路失效,设计基于双向

旁路晶闸管的无源被动旁路方案,并进行试验验证。

## 1 MMC 结构及子模块旁路原理

### 1.1 MMC 结构

柔性直流 MMC 主电路拓扑结构如图 1(a)所示,换流器包含 6 个桥臂,每个桥臂由多个相同的半桥型子模块及一个桥臂换流电抗器串联组成。子模块拓扑结构如图 1(b)所示,包括 IGBT 上管 T1 和下管 T2,2 个反向并联二极管 D1 和 D2,子模块电容 C,晶闸管 SCR,旁路开关 KM 及均压电阻 R<sup>[4-6]</sup>。

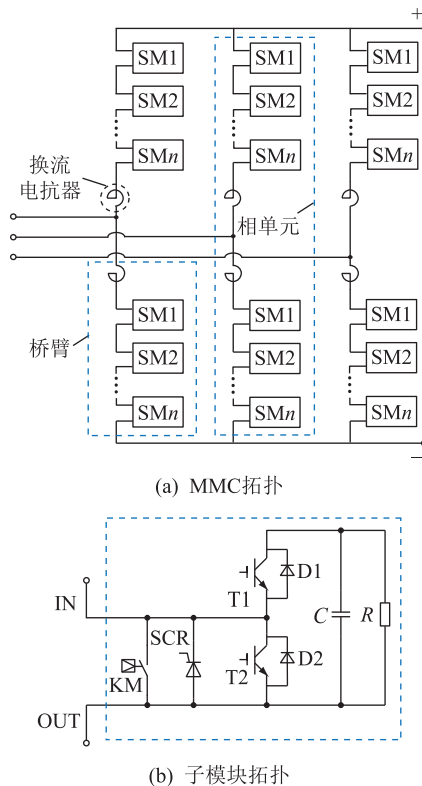


图1 MMC 基本结构

Fig.1 Basic structure of MMC

### 1.2 子模块旁路执行原理

除了一次元件,子模块正常运行还需要二次板卡,主要包括子模块控制板(sub-module controller, SMC)、IGBT 驱动板和电源板<sup>[7-8]</sup>,电气原理如图 2 所示。

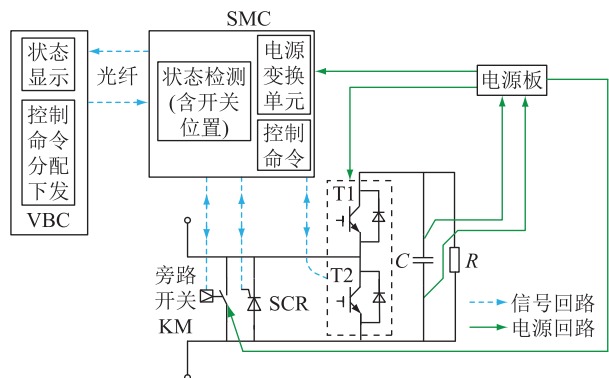


图 2 子模块电气原理

Fig.2 Sub-module electrical principle

SMC 通过状态监测单元监视子模块运行状态,解析后通过光纤上传阀基控制装置(valve base controller, VBC),检测到元器件故障时,向 VBC 上传故障信息。SMC 通过光纤接收 VBC 下发的控制信号,主要包括:IGBT 控制信号、故障子模块旁路开关合闸命令。

电源板从高压直流电容取电,产生低压和高压直流电源。低压直流电源供控制板和 IGBT 驱动板使用,高压直流电源供旁路开关使用。

旁路开关作保护旁路用,故障时接收 SMC 下发的触发信号,快速合闸旁路开关使故障子模块短路退出运行,并返回合闸位置信号。

因此,旁路方案可靠性主要由光纤、SMC、电源板、旁路开关共同决定。各个执行旁路的元器件组成可靠性串联系统,任一元件故障,将会影响旁路的正常执行。设计柔性直流换流阀子模块旁路方案,首要目标是在故障情况下,子模块能可靠旁路,单一子模块故障不导致换流站闭锁或跳闸停运;其次,故障子模块的状态信息可以上传至 VBC,不影响换流阀正常运行监控。

## 2 主动旁路方案

设计子模块主动旁路方案如图 3 所示。通信回路、供电回路、旁路开关和触发信号等旁路执行元件均为冗余设计,子模块故障时主动下发触发信号合闸永磁双回路驱动式旁路开关,使故障模块退出运行。

### 2.1 通信冗余方案设计

VBC 与 SMC 通过光纤连接。SMC 发送至 VBC

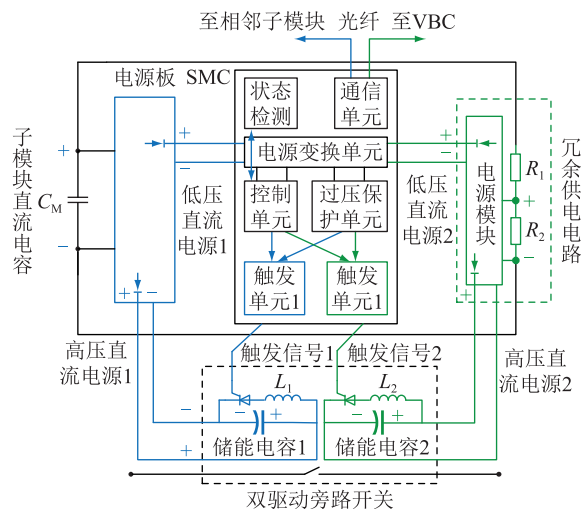


图 3 子模块主动旁路电气原理

Fig.3 Sub-module active bypass electrical principle

的通信链路定义为上行通道,VBC 发送至 SMC 的通信链路定义为下行通道。

目前国内投运的柔性直流工程<sup>[3]</sup>,SMC 与 VBC 均采用一对一光纤连接方式,每个子模块的 SMC 通过上/下行一对光纤与 VBC 连接,当上行通道故障时,子模块故障信息不能正常上传至 VBC;当下行通道故障时,VBC 的控制保护命令不能下达至 SMC。为解决光纤通道故障导致的旁路无法正常执行,故障子模块状态无法监控的问题,设计通信冗余方案。

从可靠性的角度,SMC 与 VBC 采用二对二冗余光纤直连时可靠性最高,但是换流阀与 VBC 之间的光纤增加一倍,增加成本的同时,也大幅增加施工和维护难度。

设计通信冗余方案,VBC 与 SMC 之间采取相邻 2 个子模块一组的方式构成环网。正常情况下子模块 SMC 通过一对一光纤与 VBC 直连,子模块上/下行通道任意一路通信通道出现故障,通过与相邻模块互联的通道进行上/下行通信,如图 4 所示。该方式相邻子模块两两通过光纤互连,增加通信通道冗余度的同时,不大幅增加成本和施工难度。



图 4 通信冗余示意

Fig.4 Communication redundancy scheme

### 2.2 供电回路冗余方案设计

子模块电源板主要由功率转换电路和电源监视电路 2 部分组成。其中功率转换电路从高压储能

电容取电,产生低压直流供驱动板、控制板使用,产生高压直流供旁路开关使用。电源监视电路电源板产生低压和高压直流电源,任一电源异常时通过控制板上报电源异常报警。

当高压直流电源故障时,旁路开关的储能电容不能正常充电,尤其在换流阀充电阶段,旁路开关储能电容不能充电至最低合闸电压,旁路开关拒合,进而导致换流站跳闸。当低压直流电源故障时,SMC不能正常执行旁路命令,故障状态无法上送至VBC,无法正常监控换流阀故障子模块状态。

冗余供电电路如图3所示,在电源板发生故障时,为控制板卡和旁路开关提供冗余供电回路,确保旁路开关储能电容正常供电,旁路开关能可靠合闸,同时故障子模块状态可上送至VBC。冗余供电电路取电范围与模块内电源板卡取电范围一致,从子模块直流电容取电,与电源板之间完全独立。冗余供电电路使用电阻分压,通过电源模块给旁路开关储能电容和控制板卡供电。

冗余供电电路输出与电源板输出之间采用阻断二极管隔离,避免同时供电,任意一路供电回路短路,不影响另一回路供电。电源模块在子模块直流电容电压较低时不工作,且电源模块工作时输出电压略低于电源板输出电压;当电源板工作时,冗余供电电路空载待机;当电源板损坏时,冗余供电电路接管供电。

### 2.3 永磁双回路驱动式开关方案设计

子模块旁路开关主要用于使高速旁路故障子模块短路,并退出运行,当某个故障子模块出现旁路开关拒动,将导致系统跳闸。

旁路开关主要由接触系统、电磁系统和驱动电路组成,结构如图5所示。其中,接触系统包括真空灭弧室、导电板、合闸弹簧和超程弹簧4部分。电磁系统是旁路开关的输入部分,是产生电磁吸力驱动接触系统的主动机构。驱动电路包括与高压直流电源连接的储能电容和触发电路,收到触发信号后,储能电容与驱动线圈连接,驱动线圈得电,电磁系统推动传动杆完成合闸。

旁路开关出现拒动的原因多为电磁系统、驱动电路故障,而旁路开关本体的接触系统则很少出现故障。

目前国内投运的柔性直流工程,旁路开关均采用单驱动系统。为提高合闸可靠性,文中设计的柔性直流换流阀子模块采用永磁双回路驱动式开关,在不增加旁路开关体积的情况下,内部设置2套完全独立的主电磁系统和附加电磁系统、2套驱动电

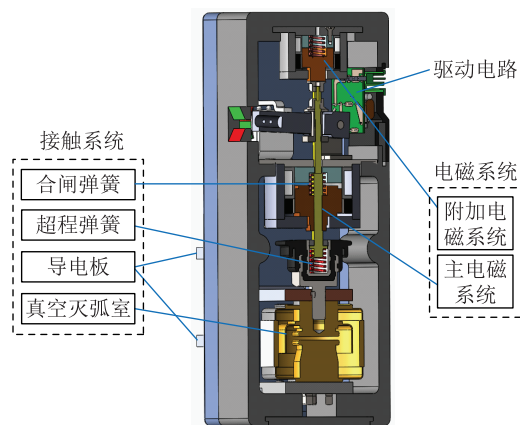


图5 双驱动旁路开关结构

Fig.5 Dual-drive bypass switch structure

路,分别由电源板和冗余供电电路供电的2个储能电容,如图3所示。

模块故障时,两路触发电路同时发送合闸触发信号,输出合闸电流。当一路电磁系统驱动出现拒动时,另一路电磁系统产生电磁力,推动动铁芯、绝缘部分结构及动触头完成旁路开关合闸动作,避免因旁路开关拒合引起系统跳闸。

### 2.4 触发信号冗余方案设计

在SMC通信光模块或下行通道故障时,VBC旁路命令不能正常下发至故障子模块。随着换流阀持续运行,子模块电压将持续升高,如无保护措施,将危及换流阀正常运行,导致系统跳闸<sup>[9-14]</sup>。

针对此情况,设计硬件过压保护单元,其由电压检测电路、比较电路和旁路触发电路组成,其中旁路触发功能不依赖控制板上的可编程器件,电压检测电路和比较电路均由模拟器件组成,过压定值可根据需要修改电阻值进行整定。故障时,当子模块直流电容电压达到硬件过压保护单元动作门限值时,硬件过压保护单元触发旁路开关合闸。

控制板控制单元和硬件过压保护单元电路均能由触发单元独立产生旁路开关触发电流信号,驱动旁路开关合闸。针对双驱动旁路开关,设置2个独立的触发单元,双重化的触发单元与控制单元和过压保护单元交叉互联。任何故障下,2个触发单元同时输出触发信号,双驱动旁路开关可靠合闸。

## 3 被动旁路方案

针对主动旁路失效的情况,设计被动旁路方案作为后备旁路方案。

### 3.1 双向转折晶闸管旁路原理

将子模块交流输出端口并联的普通晶闸管更换为双向转折晶闸管,晶闸管作为被动过压保护元

件,利用其过压短路失效特性对子模块进行旁路,作为主动旁路的后备旁路方案,如图6所示。

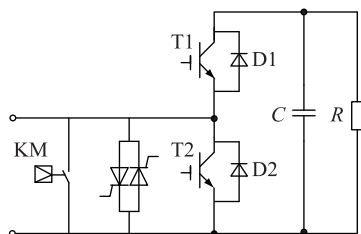


图6 子模块拓扑

Fig.6 Sub-module topology

双向转折晶闸管由2个反并联的晶闸管组成。在正向击穿电压或反向击穿电压设计值范围内,晶闸管呈现阻断特性;当电压超过设计值,晶闸管发生电压转折,进入短路失效状态。

### 3.2 双向转折晶闸管过压旁路机理

柔性直流换流阀子模块采用4 500 V/3 000 A压接式IGBT,其具有短时短路失效特性<sup>[15]</sup>。根据半桥子模块运行特点,当故障子模块出现主动旁路失败、旁路开关拒合时,无论子模块IGBT1和IGBT2初始是否失效,均会因子模块直流电压升高,先后短路失效,之后长期通过桥臂电流,进而开路失效,如图7所示。最终子模块输出交流端出现过压,双向转折晶闸管过压击穿短路,被动旁路故障子模块。

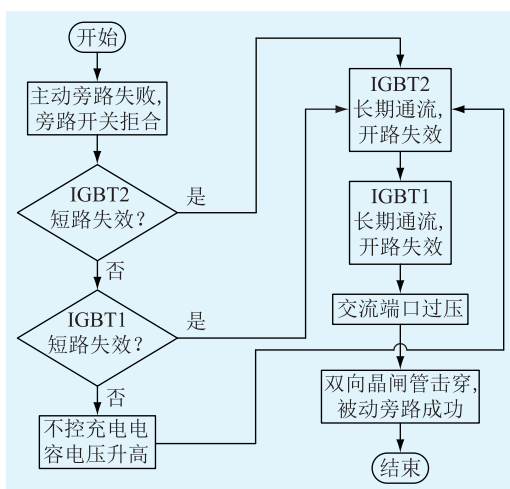


图7 双向转折晶闸管动作流程

Fig.7 Operation flow chart of break-over bidirectional thyristor

### 3.3 双向转折晶闸管击穿电压稳定性

普通晶闸管的击穿电压具有不确定性和离散性,其击穿电压比额定电压高很多,且具体击穿电压存在离散性。如采用普通晶闸管作为被动旁路元件,则在旁路晶闸管击穿之前,故障子模块内部其他元器件有可能先于晶闸管失效,特别是直流电容,在晶闸管击穿前的过压会造成直流电容持续自

愈,甚至有爆炸风险,导致被动旁路过程不可控,风险较大。

子模块被动旁路元件采用击穿电压可控的双向转折晶闸管,击穿电压设计值为 $(4\ 400 \pm 100)$  V,解决普通晶闸管击穿电压过高且离散的问题。

选取10只双向转折晶闸管,测试正向击穿电压和反向击穿电压,测试数据如图8所示,正、反向击穿电压分布范围为4.3~4.5 kV,满足设计要求。

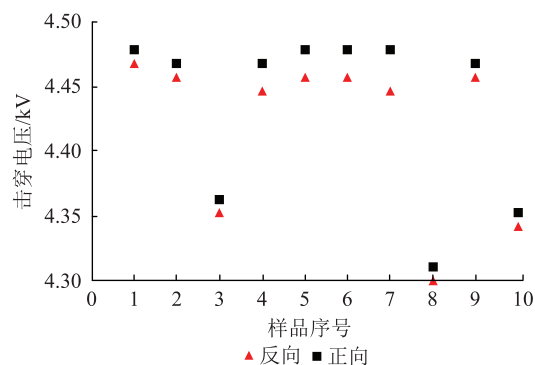


图8 双向转折晶闸管击穿电压

Fig.8 Breakdown voltage of breakover bidirectional thyristor

## 4 分级旁路方案

### 4.1 方案设计

考虑可靠性和经济性,结合主动和被动旁路方案,设计分级旁路方案如图9所示。

#### 4.1.1 主动旁路方案

旁路元件为永磁双回路驱动式开关,子模块故障时,监测到故障后,VBC主动下发或者通过子模块过压保护单元主动下发旁路开关合闸命令。旁路开关为机械合闸保持型,故障子模块维修后,手动分闸,旁路开关可以循环使用,成本较低。通信通道、供电回路、触发信号和旁路器件等旁路执行关键元件均采用完全冗余配置,提高旁路可靠性。

(1) VBC主动旁路。在通信通道、供电回路和触发信号均正常时,VBC监测换流阀所有子模块状态,采用主动旁路策略可以保证换流阀子模块整体在安全合理的范围内运行<sup>[16]</sup>。

(2) 过压保护单元主动旁路。当冗余下行通道全部故障、低压直流电源故障或SMC故障时,SMC不能下发旁路命令,采用子模块过压保护单元主动旁路策略。

#### 4.1.2 被动旁路方案

旁路元件为双向转折晶闸管,在主动旁路方案失效时,各种运行工况均会导致子模块交流端口出现过压,被动击穿晶闸管实现旁路。故障子模块维

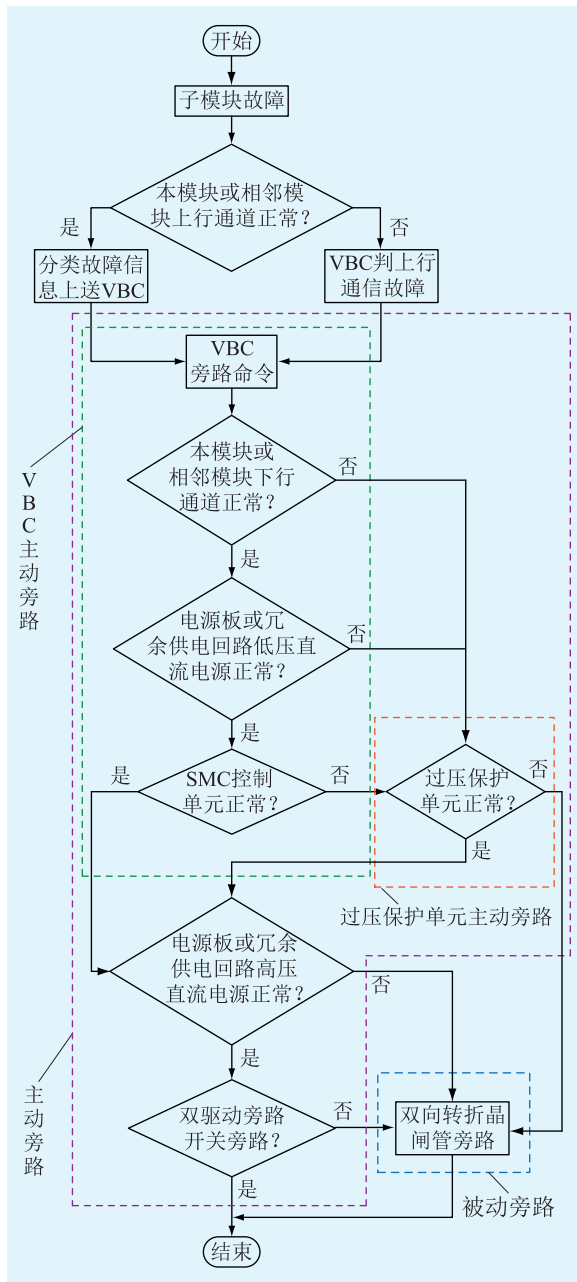


图9 分级旁路方案流程

Fig.9 Hierarchical bypass flow

修时,需要更换失效的晶闸管和 IGBT,旁路成本比主动方案高,但被动方案作为后备保护,确保不因单一子模块故障导致换流站跳闸。

4.2 试验验证

为验证所提分级旁路方案的有效性,在柔性直流换流阀阀段试验系统进行试验<sup>[17-20]</sup>,试验回路、参数分别如图 10、表 1 所示。模拟子模块故障,验证基于永磁双回路驱动式开关的主动旁路方案可靠旁路子模块的可行性。

启动试验系统,试品阀段电压  $V_{arm}$  为 13.6 kV,桥臂额定电有效值  $I_{arm}$  为 1 238 A,试品子模块直流电压为 2 240 V。在 270 ms 时,VBC 置故障试验模

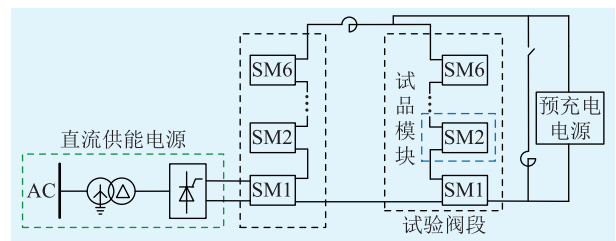


图 10 试品功率模块试验接线

Fig.10 Test wiring diagram of test sub-module

表 1 阀段试验参数

Table 1 Valve section test parameters

参数	数值
阀段子模块个数	6
子模块编号	SM1—SM6
试品子模块	SM2
阀段电压 $V_{arm}/kV$	$\geq 13.2$
试品子模块直流电压/V	$\geq 2\ 205$
桥臂额定电流有效值(RMS) $I_{arm}/A$	1 238
旁路晶闸管击穿电压/V	$4\ 400 \pm 100$

拟,下发 SM2 旁路开关的合闸命令,交流端口电压  $V_{SM}$ 降为 0,成功旁路试品子模块,旁路开关流过桥臂电流,试验无异常,波形如图 11 所示。

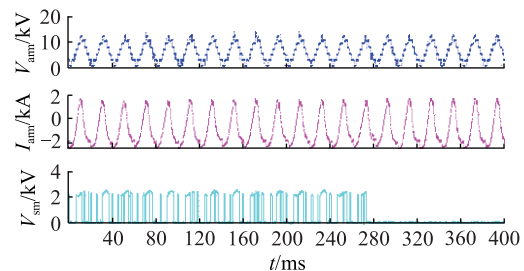


图 11 主动旁路试验波形

Fig.11 Active bypass test waveform

试验结果表明:子模块故障时,基于永磁双回路驱动式开关的主动旁路,能可靠旁路子模块。

将试品子模块的旁路开关合闸回路断开,模拟子模块出现电源板、控制板等故障,主动旁路失败,验证基于双向旁路晶闸管的被动旁路方案能可靠旁路子模块。

启动试验系统,试品阀段电压  $V_{arm}$  为 13.6 kV,桥臂额定电流有效值  $I_{arm}$  为 1 238 A,试品子模块直流电压为 2 205 V,波形如图 12 所示。在 400 ms 时 VBC 置故障试验模拟,使试品子模块 SM2 闭锁,由阀段运行电流对 SM2 子模块的直流电容持续充电,在 440 ms 时,试品子模块 SM2 交流端口电压  $V_{SM}$  升至 4 415 V,双向转折晶闸管击穿短路,  $V_{SM}$  降为 0,成功旁路试品子模块,晶闸管击穿电压在设计值以内。需要说明的是,因  $V_{SM}$  已达 4 415 V,旁路后对推

2个阀段压差突变过大,桥臂电流过流触发试验系统保护跳闸。晶闸管击穿后,重新启动试验系统,试品子模块SM2进行2h额定电流通流试验试验异常,说明晶闸管击穿后能够满足长期通流要求。

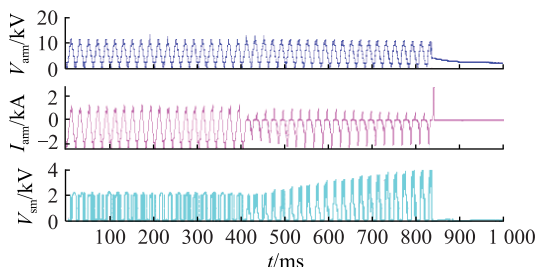


图 12 被动旁路试验波形

Fig.12 Passive bypass test waveform

试验结果表明:主动旁路故障子模块失败的情况下,基于双向转折晶闸管的被动旁路方案,能可靠旁路子模块,晶闸管击穿电压在设计值范围内,击穿后能够满足长期通流要求。

## 5 结论

文中针对通信通道、供电回路和触发信号等旁路执行关键元件故障,基于完全冗余配置思想,设计主动和被动分级旁路方案。基于永磁双回路驱动式开关,设计了主动旁路方案;基于双向转折晶闸管,设计了被动旁路方案。试验表明,主动旁路方案能可靠旁路子模块;主动旁路方案失效的情况下,被动方案作为后备保护也可有效旁路故障子模块。所提子模块分级旁路方案,兼顾可靠性和经济性,解决了单一子模块故障引起的系统跳闸难题,为后续柔性直流换流阀工程实施提供了设计指导。

本文得到南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司科技项目“±800 kV 特高压柔性直流换流阀研制”(JS1800147)资助,谨此致谢!

### 参考文献:

[1] 谢保鸡,张宇. 鲁西背靠背柔性直流广西侧功率模块过压跳闸分析研究[J]. 电工技术,2019(24):96-98.  
XIE Baoji, ZHANG Yu. Analysis and research on overvoltage trip of Guanxi side power module of back-to back flexible DC in Luxi[J]. Electric Engineering, 2019(24):96-98.

[2] 张建,范彩云,夏克鹏,等. 一种 MMC 柔性直流换流阀及其子模块取电电路:CN105576953A[P]. 2016-05-11.  
ZHANG Jian, FAN Caiyun, XIA Kepeng, et al. A flexible direct current shifting valve and its electron module and circuit: CN105576953A[P]. 2016-05-11.

[3] 李子欣,王平,李耀华,等. 级联多电平换流器子模块失控强制旁路电路:CN106849635A[P]. 2017-06-13.  
LI Zixin, WANG Ping, LI Yaohua, et al. Cascade multilevel converter electronic control module the bypass circuit:

CN106849635A[P]. 2017-06-13.

[4] SONG W, HUANG A Q. Fault-tolerant design and control strategy for cascaded H-bridge multilevel converter based STATCOM [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(8): 2700-2708.

[5] GEMMELL B, DORN J, RETZMANN D, et al. Prospects of multilevel VSC technologies for power transmission [C]//Proceedings of IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. IEEE, 2008: 1-16.

[6] CIGRE B4-37 Working Group. DC transmission using voltage sourced converters[R]. Paris, France: International Council on Large Electric Systems, 2004.

[7] GLINKA M. Prototype of multiphase modular multilevel converter with 2 MW power rating and 17-level-output voltage [C]//Proceedings of Power Electronics Specialists Conference. 2004: 2572-2576.

[8] HAGIWARA M, AKAGI H. PWM control and experiment of modular multilevel converters[C]//Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference. 2008: 154-161.

[9] 王朝亮,赵成勇,许建中. 模块化多电平换流器的子模块冗余配置计算方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 103-107.  
WANG Zhaoliang, ZHAO Chengyong, XU Jianzhong. A method for calculating sub-module redundancy configurations in modular multilevel converters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 103-107.

[10] DORN J, HUANG H, RETZMANN D. Novel voltage source converters for HVDC and FACTS applications [C]//CIGRE International Symposium Conference. International Council on Large Electric Systems. 2007(314): 1-8.

[11] 李探,赵成勇,李路遥,等. MMC-HVDC 子模块故障诊断与就地保护策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1641-1649.  
LI Tan, ZHAO Chengyong, LI Luyao, et al. Sub-module fault diagnosis and the local protection scheme for MMC-HVDC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1641-1649.

[12] 敬华兵,年晓红. 新型的模块化多电平换流器子模块保护策略[J]. 电网技术, 2013(7): 1954-1958.  
JING Huabing, NIAN Xiaohong. A novel protection strategy for sub-modules of modularized multi-level converter [J]. Power System Technology, 2013(7): 1954-1958.

[13] 刘国友,覃荣震,黄建伟,等. 牵引级高压 IGBT 模組短路特性研究及其优化[J]. 机车电传动, 2014(1): 7-10, 15.  
LIU Guoyou, QIN Rongzhen, HUANG Jianwei, et al. Research and optimization of high-voltage IGBT module short circuit characteristic for traction application [J]. Electric Drive for Locomotives, 2014(1): 7-10, 15.

[14] 欧阳可凤,孙斌,林成,等. 基于自抗扰控制算法的模块化多电平变换器控制策略研究[J]. 供用电, 2018, 35(2): 42-46, 23.  
OUYANG Kefeng, SUN Bin, LIN Cheng, et al. Research of control strategy in modular multilevel converter based on auto disturbance rejection algorithm [J]. Distribution & Utilization,

- 2018, 35(2):42-46, 23.
- [15] 邓二平, 张经纬, 李尧圣, 等. 焊接式 IGBT 模块与压接型 IGBT 器件可靠性差异分析[J]. 半导体技术, 2016, 41(11):801-810, 815.  
DENG Erping, ZHANG Jingwei, LI Yaosheng, et al. Analysis of the reliability difference between IGBT modules and press-pack IGBTs[J]. Semiconductor Technology, 2016, 41(11):801-810, 815.
- [16] 冯亚东, 汪涛, 卢宇, 等. 模块化多电平柔性直流换流器阀组本体保护的设计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11):64-68.  
FENG Yadong, WANG Tao, LU Yu, et al. Valve protection design of modular multilevel converter for VSC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11):64-68.
- [17] 罗湘, 汤广福, 查鲲鹏, 等. 电压源换流器高压直流输电换流阀的试验方法[J]. 电网技术, 2010(5):25-29.  
LUO Xiang, TANG Guangfu, ZHA Kunpeng, et al. Test methods of converter valves in VSC-HVDC power transmission[J]. Power System Technology, 2010(5):25-29.
- [18] 吴亚楠, 吕天光, 汤广福, 等. 模块化多电平 VSC-HVDC 换流阀的运行试验方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(30):8-15.  
WU Yanan, LYU Tianguang, TANG Guangfu, et al. An operational test method for VSC-HVDC valves based on modular multi-level converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(30):8-15.
- [19] 汤广福, 温家良, 贺之渊, 等. 大功率电力电子大功率电力电子装置等效试验方法及其在电力系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(36):1-9.  
TANG Guangfu, WEN Jialiang, HE Zhiyuan, et al. Equivalent testing approach and its application in power system for high power electronics equipments[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(36):1-9.
- [20] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES G D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3):592-602.

作者简介:



段军

段军(1986),男,硕士,工程师,从事柔性直流输电相关工作(E-mail:duanj@nrec.com);  
谢晔源(1978),男,硕士,教授级高级工程师,从事柔性交直流输电和无功补偿相关工作;  
朱铭炼(1985),男,硕士,高级工程师,从事柔性直流输电相关工作。

## Bypass scheme design for valve sub-module of modular multi-level converter

DUAN Jun, XIE Yeyuan, ZHU Minglian, YIN Guanxian, FANG Taixun  
(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** As the key equipment of high voltage direct current(HVDC) flexible transmission system, the reliability of modular multilevel converter sub-module operation directly affects the safety and stability of the whole system. A sub-module bypass scheme is fully proposed. An active bypass scheme based on a permanent magnetic dual-drive bypass switch is designed. A passive bypass scheme based on breakover bidirectional thyristor is designed. Considering the economics of active bypass and the reliability of passive bypass, a hierarchical bypass scheme is designed. The test results show that fault sub-module can be reliable bypassed by command from the active bypass scheme. Meanwhile, in the case of the failure of active bypass scheme, the passive bypass scheme can reliably bypass the fault sub-module. The hierarchical bypass solves the problem that a single faulty sub-module causes the transfer system tripping. Design guidance for the implementation of HVDC-flexible valve is provided.

**Keywords:** high voltage direct current(HVDC) flexible transmission system; modular multilevel converter(MMC); value; sub-module; bypass scheme

(编辑 吴楠)