

# 极端环境下 MMC 子模块故障高可靠旁路保护策略

刘凡,卜祥航,付峥争,范松海,朱轲,张宗喜,崔涛,赵福平

(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川成都 610041)

**摘要:**电力系统空间范围大且各环节联系紧密,雷击、地震、极寒等极端环境易对电力设备产生直接和间接影响,并进一步引起系统电气量的剧烈变化,研究极端环境下 MMC 子模块的故障保护对提高电力系统的安全稳定运行水平具有重要意义。文中分析了极端环境下 MMC 子模块的故障特性,采用基于子模块电容电压比较的故障诊断方法,提出一种在子模块输出端口间加装晶闸管的极端环境下 MMC 子模块高可靠旁路故障保护策略:配置冗余供能电路确保子模块状态可控,利用晶闸管过电压击穿作为后备被动保护,结合子模块的多级保护和热、冷备用冗余子模块的投入,实现极端环境下对故障子模块的高可靠旁路保护。以 $\pm 800$  kV 特高压柔性直流输电系统为算例,经仿真验证所提策略具有良好的可行性,能够提高极端环境下子模块故障保护的可靠性和速动性,同时对晶闸管击穿后流过桥臂电流进行热仿真,发现已超过其工作温度限制,为满足长期旁路通流要求,加装晶闸管击穿后须通过散热器进行强制冷却。

**关键词:**MMC 子模块;故障保护;极端环境;过电压击穿;晶闸管

**中图分类号:**TM 461 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)02-0015-07

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20230203

## Bypass Protection Strategy with High Reliability for MMC Sub-module Faults in Extreme Environments

LIU Fan, BU Xianghang, FU Zhengzheng, FAN Songhai, ZHU Ke, ZHANG Zongxi, CUI Tao, ZHAO Fuping  
(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** Power system has a large spatial range and all links are closely connected. Extreme environments such as lightning strikes, earthquakes, and extreme cold are likely to have direct and indirect impacts on power equipment, and further cause drastic changes in electrical quantity of the system. Studying fault protection of MMC sub-modules in extreme environments is of great significance to improve the safe and stable operation level of power system. The fault characteristics of MMC sub-modules in extreme environments are analyzed, and a fault diagnosis method based on sub-module capacitance-voltage comparison is used to propose a bypass fault protection strategy with high reliability for MMC sub-modules in extreme environments where thyristors are installed between the output ports of sub-modules. The redundant energy supply circuit is configured to ensure the controllable state of sub-modules, and the overvoltage breakdown of thyristor is used as a backup passive protection. Combined with the multi-level protection of sub-modules and the input of hot and cold backup redundant sub-modules, it can realize the highly reliable bypass protection for faulty sub-modules in extreme environments. Taking the  $\pm 800$  kV UHV HVDC flexible transmission system for example, the proposed strategy has good feasibility and can improve the reliability and quickness of sub-module fault protection in extreme environments. In order to meet the long-term bypass flow requirements, forced cooling must be carried out through the radiator after the breakdown of the installed thyristor.

**Key words:** MMC sub-module; fault protection; extreme environment; overvoltage breakdown; thyristor

## 0 引言

极端气候、环境和灾害状况是指在统计学意义

基金项目:国网四川省电力公司科技项目(52199722001G)

上发生概率非常低的事件,如极寒、高温、暴雨、地震、洪水、台风、闪电、野火等。极端自然环境及灾害往往是突发性的,很容易对电力设施产生直接和间接影响,甚至对电力系统设备造成破坏,影响电力系统安全稳定运行,引发大规模停电,并造成大量财产损失。

模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)拓扑由德国学者于 2003 年提出,MMC 主电路拓扑的基本单元为子模块<sup>[1]</sup>。单个 MMC 子模块发生故障的概率较低,具有较高的可靠性。但考虑到极端自然环境及灾害对 MMC 设备的不利影响,MMC 含有大量的级联子模块,一旦发生故障,换流器将无法正常工作甚至发生跳闸停运等事故<sup>[2-3]</sup>。在极端环境下,对 MMC 子模块及时的故障诊断与保护直接关系到电力系统能否正常运行。因此,研究极端环境下 MMC 子模块的故障保护,对减少极端自然环境及灾害的不利影响,以及对提高电力系统的安全稳定运行水平有着重要作用。

当前针对极端环境下 MMC 子模块故障保护的研究仍较少,主要采用的保护方法为配置子模块故障冗余保护:受极端环境影响子模块故障后合闸子模块旁路开关,实现故障子模块的隔离;将热备用冗余子模块迅速接入桥臂,结合电容电压均衡控制实现子模块故障的就地保护<sup>[4-6]</sup>。文献[3,7]提出将少量子模块置于热备用状态,而将其余子模块则置于冷备用的子模块冗余保护方法。文献[8]提出一种可在阀基控制器(valve base controller, VBC)和子模块控制器(sub-module controller, SMC)中实现的子模块故障诊断策略;但诊断精度受限于子模块电容电压的采集精度和系统控制周期,电压监测电路易受干扰发生电压采样错误,导致保护误动。文献[9-10]对 MMC 子模块保护时序逻辑进行了优化,通过延时动作降低了保护误动作的可能性;但一定程度也降低了保护的可靠性和速动性。文献[11]提出在换流阀原结构上加装晶闸管的保护方法,能够较快将故障子模块旁路,对绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)起到保护作用,但晶闸管需要被施加触发信号。极端环境下电力设备可靠性下降,上述方法均存在一定不足,在极端环境下对 MMC 子模块故障保护的可靠性受到限制。

下面从极端环境下 MMC 子模块故障被可靠旁路入手,分析 MMC 子模块的故障特性和晶闸管的过电压击穿特性,并对子模块故障监测方法进行介绍,提出一种极端环境下 MMC 子模块故障高可靠旁路保护策略,在子模块输出端口间加装单向或双向晶闸管,利用晶闸管过电压击穿实现子模块的高可靠旁路,并对其可行性进行了仿真验证。

## 1 MMC 拓扑结构及子模块故障

### 1.1 MMC 基本拓扑结构

图 1 为三相 MMC 拓扑及半桥子模块结构,MMC 由 6 个桥臂组成,每个桥臂由若干个子模块级联和一个电抗器  $L_0$  串联构成,上下桥臂组成一个相单元。半桥子模块由 IGBT 管( $VT_1$ 和 $VT_2$ )和二极管( $VD_1$ 和 $VD_2$ )以及电容  $C_0$  组成; $K$  为旁路开关,用于旁路故障子模块。其中, $U_{dc}$  为直流电压; $I_{dc}$  为直流电流; $i_{arm}$  为桥臂电流; $U_c$  为子模块的电容电压; $u_{SM}$  为子模块的端口电压。

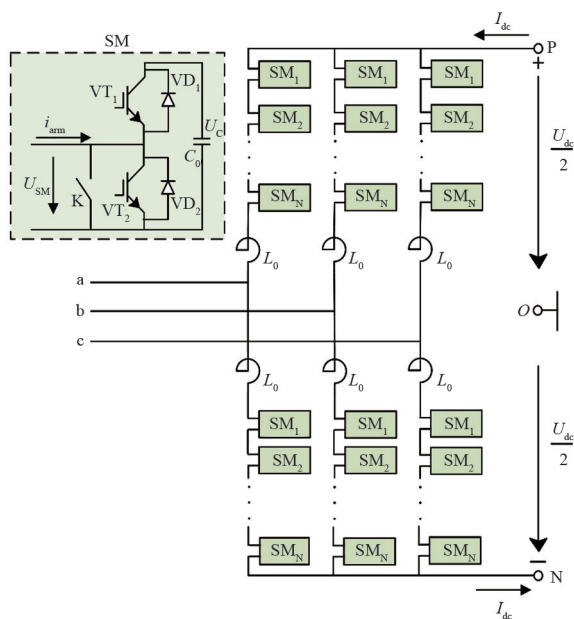


图 1 三相 MMC 拓扑及半桥子模块结构

子模块正常工作过程时有 3 种状态:

状态 1(投入状态):  $VT_1$  开通、 $VT_2$  关断,电流可双向流动,其输出端始终引出子模块电容电压。

状态 2(切除状态):  $VT_1$  关断、 $VT_2$  开通,子模块电容被旁路,输出电压为 0。

状态 3(闭锁状态):  $VT_1$ 、 $VT_2$  均关断,随电流方向的改变电容状态在充电、旁路之间变化。

### 1.2 极端环境下子模块故障特性分析

电力系统由发、输、变、配、用多个环节组成,空间范围大且联系紧密。雷击、地震、极寒等极端环境易对电力设备造成损害,并进一步引起系统电气量的剧烈变化,使电力电子器件和储能电容的故障率大大提高,IGBT 和续流二极管等电力电子器件损坏、储能电容损坏、触发控制故障会造成 MMC 子模块故障。MMC 子模块故障特性分析已有相关研究,

这里针对极端环境下电力电子器件损坏引起的3种典型 MMC 子模块故障进行故障特性分析<sup>[3,8]</sup>。

### 1) IGBT 或续流二极管短路故障

当一正常 IGBT 开通时,与之互补的续流二极管或另一 IGBT 发生短路故障,会使子模块的桥臂连通。导致子模块放电并产生高等级的短路电流,子模块端口电压减少。

### 2) IGBT 开路故障

当子模块处于投入状态时,若  $VT_2$  发生开路故障,运行状态与正常情况下相同;若  $VT_1$  发生开路故障,运行状态如图 2 所示,此时子模块输出电压和电容充电情况受桥臂电流  $i_{arm}$  的方向影响。当  $i_{arm} > 0$  时,桥臂电流通路与正常运行状态相同,电容充电;当  $i_{arm} < 0$  时,桥臂电流流过  $VD_2$ , 电容不会放电,子模块输出电压为 0 而不是  $U_c$ , 此时桥臂中将产生较大环流,需要启动子模块保护。而在保护将故障子模块旁路之前,  $VT_1$  开路故障会导致故障子模块的电容电压持续上升。由于电容电压均衡策略,当电容电压上升到一定值时,将不再开通  $VT_1$  给电容充电。

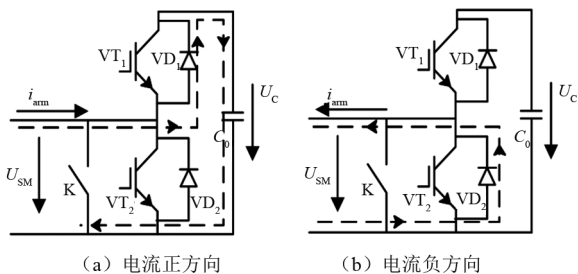


图 2 投入子模块且  $VT_1$  开路时桥臂电流通路

当子模块处于切除状态时,若  $VT_1$  发生开路故障,其运行状态与正常情况下相同;若  $VT_2$  发生开路故障,该情况下子模块的电流通路与图 2 所示通路相同。当  $i_{arm} > 0$  时,桥臂电流通过  $VD_1$  对电容充电;当  $i_{arm} < 0$  时,桥臂电流流过  $VD_2$ , 与正常运行状态相同。故障子模块的电容电压将会上升,并在桥臂上出现电流环路。

### 3) 续流二极管开路故障

此时子模块的电流通路会发生改变。在  $VD_1$  发生开路故障情况下,子模块电容因电路改变无法充电,其电压减少;当  $VD_2$  开路故障时,故障子模块中的充放电通路仍然存在,不会导致电容电压下降。但无论哪一个续流二极管发生开路,均会导致桥臂电流断续,严重影响系统的稳定运行。

## 2 晶闸管过压击穿与功率模块旁路机理

### 2.1 晶闸管过电压失效模式及击穿稳定性

晶闸管是目前耐压水平最高、输出容量最大的电力电子器件<sup>[12]</sup>。发生反向过电压击穿之后晶闸管就失去反向阻断特性,反向的半波电流可连续流经晶闸管。但起初正向的半波电流仍无法在晶闸管导通,随着反向过电压击穿的多次进行,晶闸管的正向阻断特性也会失去,使正向半波电流也能在晶闸管上连续导通。如在过电压击穿过程中晶闸管上发生面积较大的损坏,使上下钼片出现接触情况,晶闸管将会在损坏处联接导通双向电流。

选取  $45\text{ }^\circ\text{C}$  环境温度对 3 个晶闸管(型号为 KPC3900-42,最大工作温度为  $85\text{ }^\circ\text{C}$ ) 进行正反向直流阻断电压极限耐受能力测试,得到该款晶闸管阻断电压与漏电流关系曲线如图 3 所示。

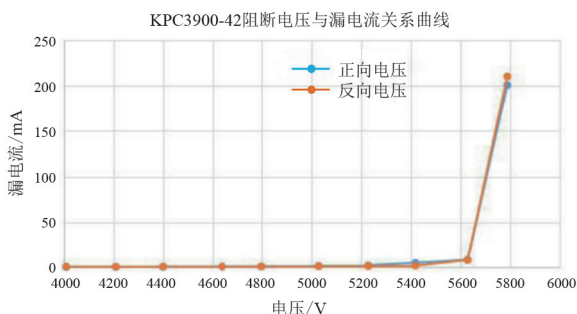


图 3 晶闸管正反向直流阻断电压测试曲线

由图 3 可得,晶闸管的正反向漏电流在阻断电压不大时变化很小,转折点在  $5200\text{ V}$  阻断电压处,在该点后晶闸管的漏电流出现上升,并在正反向阻断电压为  $5600\text{ V}$  时开始猛烈上升。

晶闸管的击穿电压远远大于其额定电压,同时具有不连续性,因此一般情况下 MMC 子模块内的其他元器件会在晶闸管被击穿前损坏。在实际应用中采用提前设计好的转折晶闸管,基于晶闸管击穿试验,得到转折晶闸管击穿电压可受控的结果,晶闸管的击穿稳定性较好。

### 2.2 晶闸管旁路功率模块机理

MMC 在极端环境下的运行过程中,脉冲误发、过电流、过电压或机械损坏等都可能造成子模块故障,经故障诊断后可采取以下动作使故障子模块在较小影响下退出运行:向保护系统发出故障报警信号并闭锁子模块脉冲;闭合旁路开关 K 将故障子模

块旁路,并投入冗余子模块;故障情况严重时保护还动作使系统跳闸。

保护动作判定依据基于对 MMC 子模块的电容电压测量数据,数据误差将导致保护误动作。通常采用设定多级保护按时序逻辑动作的方法提高保护动作的准确性,但同时会减小在突发故障情况下保护动作的速动性。故提出在子模块输出端口加装单向或双向晶闸管 V,如图 4 所示。在半桥子模块中,晶闸管放置方向为阴极连接桥臂中点,阳极连接电容负极,晶闸管之间电压为  $0$ 、 $U_c$  ( $U_c$  为电容电压)。晶闸管 V 仅作为无源过压保护元件使用,不需要主动触发。当子模块发生故障导致电压异常上升,在保护系统因电压采集错误或延时动作而没有及时闭合旁路开关时,子模块输出端口间的晶闸管作为后备保护元件,由于过电压被击穿,从而实现对故障子模块的高可靠旁路。

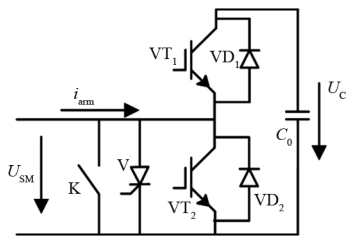


图 4 子模块输出端口加装晶闸管拓扑

通过对 MMC 子模块故障特性分析可知,IGBT 开路故障下子模块的桥臂电流通路、输电电压和储能电容充放电情况均会发生改变,并导致子模块输出端口电压上升。以  $\pm 800$  kV 直流输电工程为例,MMC 正常运行状态下子模块输出端口电压应为  $2$  kV,将子模块过电压后备保护阈值,即加装晶闸管的击穿电压设置为  $2200$  V $\pm 100$  V。当子模块发生故障导致输出端口电压迅速上升并超过过电压后备保护阈值时,加装晶闸管立即发生击穿,其击穿波形如图 5 所示。

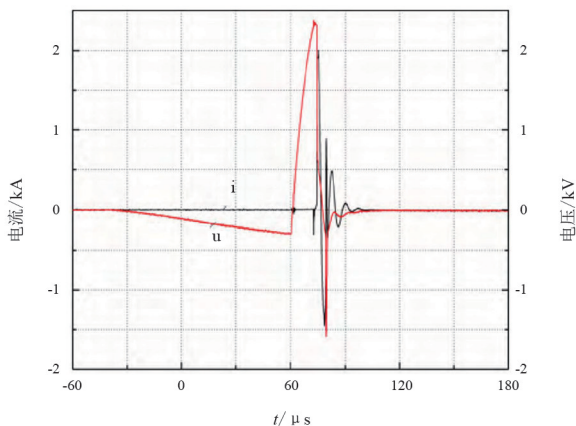


图 5 晶闸管过电压击穿波形

加装晶闸管被击穿后,流过电流迅速增大而电压迅速跌落,从而快速将故障子模块旁路。经过一段延时后,保护系统动作闭合旁路开关 K,使流过晶闸管的电流下降,防止晶闸管因门极附近局部温度过高被烧毁。

### 3 极端环境下 MMC 子模块故障保护策略

#### 3.1 子模块故障诊断

目前用于子模块故障诊断与定位的方法主要有参数计算法和子模块电容电压比较法<sup>[13-16]</sup>。这里采用基于子模块电容电压比较的故障诊断方法。

对于每个桥臂具有  $N$  个子模块的三相 MMC 系统,用开关函数描述第  $i$  个子模块的开通和关断状态。

$$S_i = \begin{cases} 1, & \text{VT}_1 \text{ 开通, VT}_2 \text{ 关断} \\ 0, & \text{VT}_1 \text{ 关断, VT}_2 \text{ 开通} \end{cases} \quad (1)$$

流过子模块电容的电流正方向与桥臂电流  $i_{\text{arm}}$  相同,正常运行时流过子模块电容的电流  $i_{C_0}$  为

$$i_{C_0} = S_i i_{\text{arm}} \quad (2)$$

由图 2 可知:当  $i_{C_0} > 0$  时,子模块电容充电;当  $i_{C_0} < 0$  时,电容放电。设系统控制周期为  $T_c$ ,则任一控制周期结束时的子模块电容电压  $U_c(t+T_c)$  为

$$U_c(t+T_c) = U_c(t) + \frac{1}{C_0} \int_t^{t+T_c} i_{C_0}(t) dt = U_c(t) + T_c S_i \frac{i_{\text{arm}}(t) + i_{\text{arm}}(t+T_c)}{2C_0} \quad (3)$$

式中: $U_c(t)$  为子模块电容电压  $t$  时刻的初始测量值; $C_0$  为子模块电容值; $i_{\text{arm}}(t)$  为  $t$  时刻的桥臂电流; $i_{\text{arm}}(t+T_c)$  为控制周期结束时的桥臂电流; $S_i$  为该控制周期内的子模块开关状态。

由于模块在极端环境下的故障特性分析可知,故障子模块的电容会发生不正常充放电情况。可以比较各周期内电容电压增量的计算值和实际值,从而对子模块是否故障进行诊断。由式(3)可得子模块电容电压增量的计算值为

$$\eta_1 = T_c S_i \frac{i_{\text{arm}}(t) + i_{\text{arm}}(t+T_c)}{2C_0} \quad (4)$$

子模块电容电压增量的实际值为

$$\eta_2 = U'_c(t+T_c) - U_c(t) \quad (5)$$

式中, $U'_c(t+T_c)$  为控制周期结束时的子模块电容电

压测量值。

在正常和故障情况下,单个控制周期内电容电压计算值和实际值相差不大,因此采用两者比值作为故障诊断指标。子模块故障诊断指标  $\eta$  为

$$\eta = \left| \frac{\eta_1}{\eta_2} \right| \quad (6)$$

子模块正常运行时,任一控制周期结束时  $\eta \approx 1$  (充放电时  $\eta_1 = \eta_2$ ;不充放电时  $\eta_1 = 0$  且  $\eta_2 \approx 0$ ,定义该情况下  $\eta = 1$ ),子模块不同状态下监测到的  $\eta$  为

$$\eta = \begin{cases} 1, & \text{正常运行} \\ 0, & \text{VT}_1 \text{ 短路故障,VT}_2 \text{ 开路故障} \\ \infty, & \text{VT}_1 \text{ 开路故障} \end{cases} \quad (7)$$

在极端环境下,通过监测  $\eta$  可实现对子模块的典型故障诊断。该故障诊断方法基于控制周期前后的桥臂电流测量值,在系统故障发生时满足  $\eta = 1$ ,可避免极端环境下系统故障时子模块保护误动。

### 3.2 极端环境下 MMC 启动控制策略

极端环境下在诊断子模块发生故障后,保护系统执行以下指令:

- 1) 封锁故障子模块的 IGBT 脉冲;
- 2) 闭合旁路开关 K 将故障子模块旁路;
- 3) 控制系统禁止故障子模块再次投入;
- 4) 热备用冗余子模块接入桥臂,同时由冷备用冗余子模块及时补充。

为避免信号干扰使电压采集错误而导致的保护误动作,通过硬件和软件过、欠电压保护相结合对子模块电容电压进行可靠监测,同时结合上述基于子模块电容电压比较的故障诊断方法实现对故障子模块的可靠诊断<sup>[17-18]</sup>。在子模块控制板上设置硬件模拟电路对子模块电容电压进行检测,同时在阀控软件保护上设置延时上报机制,使阀控进行多次故障判别,在检测到电压异常达到一定时间后,再上报故障并使保护系统动作。基于子模块电容电压比较的故障诊断方法判别准确,且可避免系统故障时子模块保护的误动;但需要等待 MMC 控制周期的结束。以 MMC 控制频率为 800 Hz 为例,对子模块故障的保护延时最长可达 1.25 ms,因此将其作为子模块故障的一个后备保护诊断。

图 6 为极端环境下 MMC 子模块故障的保护诊

断框图。

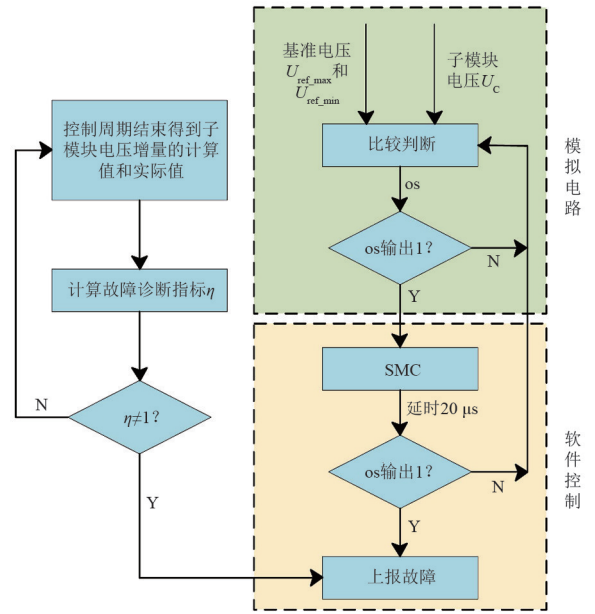


图 6 子模块故障诊断

设置硬件模拟电容过电压基准电压  $u_{ref\_max}$  和欠电压基准电压  $u_{ref\_min}$ ,当子模块电容电压大于  $u_{ref\_max}$  或小于  $u_{ref\_min}$  时,通过硬件模拟电路比较判断并向 SMC 输出故障信号。此时 SMC 控制芯片开始计时,设定延时时长为  $20 \mu s$ ,通过延时动作减小因信号干扰造成电压采集错误的影响;同时在子模块电压异常情况下及时切除故障,避免子模块承受故障的时间超过临界值。经过阀控的多次故障判别,若  $20 \mu s$  延时后故障信号不消失,则 SMC 向上层控制器上报故障使保护系统动作。另外在控制周期结束时,对子模块电容电压增量的计算值和实际值进行比较,若  $\eta \neq 1$ ,也直接上报故障使保护系统动作。

保护系统立即将故障子模块旁路并对热备用冗余子模块施加触发信号,使其经历一个电容充电过程后进入正常工作。随后将一定数量的冷备用冗余子模块切换至热备用状态,保持热备用冗余子模块数量的稳定,该冗余保护方法框图如图 7 所示<sup>[19-20]</sup>。

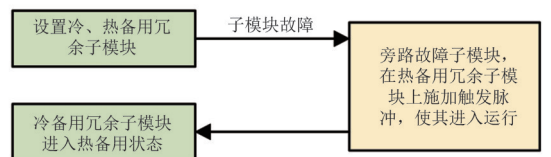


图 7 子模块冗余保护

所提的极端环境下子模块故障多级保护策略设置多个阈值与延时判据协同工作,能够较好地提高

保护的可靠性与快速性,减少保护系统因数据采集错误等因素造成的误动作,同时在子模块故障后电压迅速上升的情况下能够使晶闸管击穿及时将故障子模块旁路,实现极端环境下对故障子模块的高可靠旁路。配置冗余供能电路并采用冷、热备用子模块的保护方法,有效地保障系统在极端环境下子模块发生故障后能继续稳定运行。

## 4 仿真验证

为验证所提极端环境下 MMC 子模块故障高可靠旁路保护策略的可行性和有效性,在 PSCAD/EMTDC 上搭建±800 kV 特高压柔性直流输电系统模型,对 MMC 子模块发生故障后的旁路过程进行仿真分析,仿真步长为  $10^{-6}$  s。换流阀子模块快速旁路开关额定电压为 3.6 kV,额定耐受冲击电压为 10 kV,额定电流为 1600 A,换流阀相关参数如表 1 所示,系统基本参数如表 2 所示。

表 1 柔性直流换流站换流阀参数

参数名称	数值
子模块额定运行电压/V	2100
子模块电容/mF	18
单桥臂子模块数量(含冗余)/个	216
单桥臂全桥子模块数量(含冗余)/个	176
单桥臂半桥子模块数量(含冗余)/个	40

表 2 ±800 kV 特高压柔性直流输电系统基本参数

参数名称	数值
交流系统额定电压/kV	525
交流系统额定频率/Hz	50
直流侧额定功率/MW	5000
直流侧额定电压/kV	±800
联接变压器容量/MVA	290
联接变压器变比	525/220
桥臂电抗器/mH	75

### 4.1 极端环境下 IGBT 发生开路故障

设置柔性直流换流站 A 相上桥臂一个半桥子模块在 1 s 时发生  $VT_1$  开路故障,正常工况下子模块上报故障至阀控系统,由阀控系统下发旁路开关合闸命令。为体现加装晶闸管在极端环境下可靠旁路保护的功能,事先向子模块旁路开关设置拒合命令。故障发生后,子模块电容电压上升,2.9 ms 后达到所提方法加装晶闸管的击穿电压,晶闸管被击穿,子模

块输出端口电压下降至 0 后被旁路。根据动态模拟试验,加装晶闸管的合闸波形如图 8 所示,从合闸波形可知,加装晶闸管合闸时间在 3.0 ms 以内,能够及时旁路故障子模块,保证系统的稳定运行。

将子模块旁路开关拒合命令取消后,由于子模块电容因旁路放电,其电压实际值  $\eta_2$  远小于计算值  $\eta_1$ ,故  $\eta = \infty$ 。在晶闸管合闸结束 1.5 ms 后诊断出子模块故障,故障信号由 0 阶跃至 1,旁路开关闭合后流过桥臂电流,同时故障子模块的触发脉冲被闭锁,热备用冗余子模块被施加触发信号。系统有功功率在故障发生后出现波动,但在晶闸管过电压击穿旁路子模块后迅速恢复稳定。

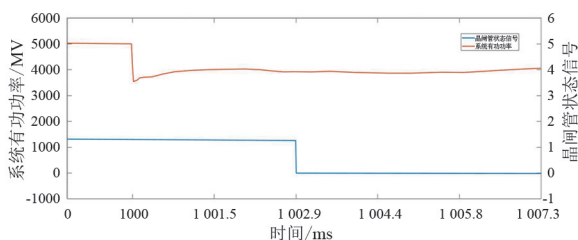


图 8 晶闸管合闸测试波形

图 9 为子模块被旁路后半桥子模块在初始电压为 2200 V 的放电曲线图。根据仿真结果,直流电容电压从额定电压降低到 1% 所需的放电时间为 720 s。

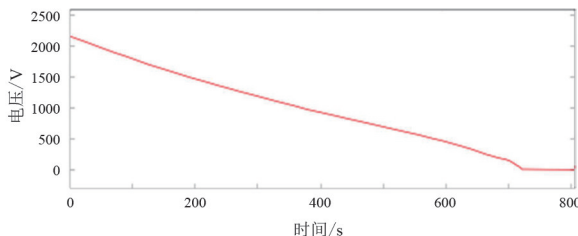


图 9 子模块直流电容放电时间曲线

### 4.2 晶闸管冷却设计

基于 Ansys Workbench 有限元仿真软件对晶闸管击穿后流过桥臂电流进行热仿真如图 10 所示。从图 10 可以看出,晶闸管在不加装散热器的情况下,两个压接面的温度分别超过了 200 °C 和 400 °C,超过 120 °C 的晶闸管被击穿后工作温度限制。所以,加装晶闸管被击穿后,在子模块内必须通过散热器进行强制冷却。

增加散热器条件下加装晶闸管短路失效后长期通流热仿真结果如图 11 所示。

从图 11 可以看出,加装晶闸管被击穿后,在长期通流情况下,晶闸管温度约 70 °C 左右,满足极端环境下长期旁路通流要求。

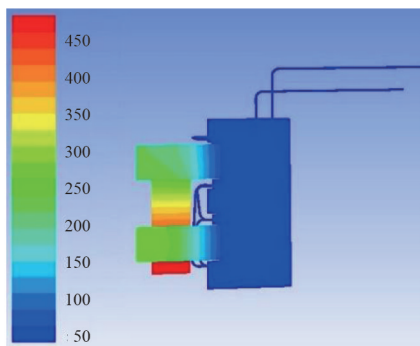


图 10 无散热器条件下的晶闸管短路失效后通流热仿真

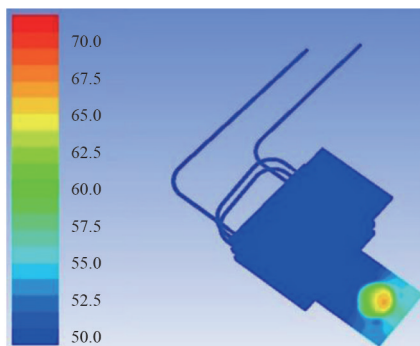


图 11 增加散热器条件下的晶闸管短路失效后通流热仿真

利用晶闸管过电压击穿作为子模块故障后备保护地提高极端环境下保护系统的速动性和可靠性,解决 IGBT 器件的功率模块不能长期故障失效的问题,有效防止极端环境下子模块故障对系统的不利影响进一步恶化。

## 5 结论

上面分析了极端环境下 MMC 子模块典型故障特性,介绍了一种基于子模块电容电压比较的故障诊断方法,可在控制周期结束时诊断子模块的运行状态。并提出了一种极端环境下 MMC 高可靠旁路保护策略,在常规的单/双晶闸管旁路方案的基础上,利用晶闸管过电压击穿特性实现对 MMC 子模块故障的可靠后备保护。硬、软件过电压保护需要设置一定的时延避免保护误动作,而电容电压比较故障诊断方法对 MMC 系统控制周期具有较大的依赖性。利用晶闸管过电压击穿构成的后备被动保护,能够在部分条件下有效提高子模块故障保护的速动性和可靠性,保证系统的安全稳定运行。同时一定程度上避免信号采集错误对保护动作的不利影响,实现极端环境下对故障子模块的高可靠旁路。

通过搭建 $\pm 800$  kV 特高压柔性直流输电系统算

例进行仿真验证,所提出的极端环境下 MMC 子模块高可靠旁路故障保护策略具有良好的可行性,尤其是在极端环境子模块发生 IGBT 开路故障的情况下,能够迅速可靠地旁路故障子模块,保证系统的安全稳定运行。同时,为满足长期旁路通流要求,加装晶闸管被击穿后,在子模块内必须通过散热器进行强制冷却。

## 参考文献

- [1] LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range [ C ]//2003 IEEE Bologna Power Technology Conference, Bologna, Italy, IEEE;2003.
- [2] 汪涛,虞晓阳,文继锋,等.模块化多电平柔性直流输电换流器子模块过电压保护[J].电力系统自动化,2020,44(21):107-115.
- [3] 管敏渊,徐政.模块化多电平换流器子模块故障特性和冗余保护[J].电力系统自动化,2011,35(16):94-98.
- [4] LIU J P,ZHAO B,CHEN Y M, et al.A novel controlled punch-through IGCT for modular multilevel converter with overvoltage bypass function [ J ].IEEE Transactions on Power Electronics,2021,36(7):8280-8290.
- [5] 邓佛良. MMC 子模块多目标冗余优化配置方法研究 [ D ].吉林:东北电力大学,2020.
- [6] 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.
- [7] 杜晓舟,梅军,田杰,等.模块化多电平子模块冗余与带故障运行策略 [ J ].电网技术,2016,40(1):19-25.
- [8] 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.
- [9] 李鑫,刘大明,孙晓瑜,等.模块化多电平换流器功率模块过压保护策略及优化 [ J ].电测与仪表,2019,56(9):43-48.
- [10] 罗程,赵成勇,张宝顺,等. MMC 控制系统时序逻辑与子模块故障监测 [ J ].电力自动化设备,2015,35(5):83-88.
- [11] 敬华兵,年晓红,龚芬. MMC 子模块元件短路故障机理及其新型保护策略 [ J ].电工技术学报,2015,30(3):21-27.
- [12] 岳珂,庞磊,陈炫宇,等.脉冲电压作用下晶闸管反向恢复期损伤效应与机理分析 [ J ].电网技术,2020,44(7):2794-2800.

(下转第 88 页)

- [2] 刘妮妮. 变电站直流电源系统绝缘检测及校验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [3] 刘佳. 微型直流断路器电弧仿真模型优化研究[D]. 上海: 上海电机学院, 2019.
- [4] 金能, 林湘宁, 徐宁, 等. 应对直流电源丢失问题的中压变电站二次系统性能提升方案及远方冗余保护新判据研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5479-5489.
- [5] 朱晓瑾, 顾静鸣, 李秉宇, 等. 发电厂直流电源系统选择性保护方案分析[J]. 河北电力技术, 2016, 35(5): 37-41.
- [6] 葛飞. 保定南部地区直流电源系统改造策略优化及应用研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2016.
- [7] 关守姝. 电力直流电源系统空气开关级差配合的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [8] 唐宝锋, 张骥, 李亮玉, 等. 变电站直流系统网络设计优化及关键问题研究[J]. 河北电力技术, 2018, 37(6): 50-53.
- [9] 陆洪建, 刘志远, 杨晨, 等. 一种变电站直流电源级差配合实现方法[J]. 宁夏电力, 2021(4): 60-64.
- [10] 李锋. 微型断路器在高压开关二次回路中的应用[J]. 高压电器, 2002, 38(1): 21-23.
- [11] 李晶, 陈轲娜, 罗洋, 等. 基于 Thevenin 模型的蓄电池内阻监测装置的现场校验方法研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(11): 194-200.
- [12] 白忠敏. 电力工程直流系统设计手册(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [13] 孙茗, 於崇干. 直流短路电流计算方法的中外标准差异分析[J]. 电力勘测设计, 2018(10): 50-54.
- [14] Short-circuit currents in d. c. auxiliary installations in power plants and substations; IEC 61660.3 [S/OL]. [2022-08-20]. <http://webstore.iec.ch/publication/5704>.
- [15] Recommended practice for the design of DC auxiliary power systems for generating stations; IEEE Std 946 [S/OL]. [2022-08-20]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1453057>.
- [16] 中国电力企业联合会标准化管理中心. 电力工程电缆设计标准; GB 50217—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.

#### 作者简介:

董汉彬(1987), 男, 高级工程师, 研究方向为高压开关设备及直流电源技术研发与运维;

张明丽(1987), 女, 高级工程师, 研究方向为发电厂设计;

蒋枝(1989), 男, 工程师, 研究方向为变电站二次运维技术。  
(收稿日期: 2022-08-18)

(上接第 21 页)

- [13] ZHOU W H, YANG H Y, YANG H, et al. A statistical submodule open-circuit failure diagnosis method for MMCs enabling failure detection, localization and classification[C]//2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Anaheim, CA, USA, IEEE: 2356-2361.
- [14] XU K S, XIE S J, YAN Y, et al. A fast fault diagnosis method for submodule failures in modular multilevel converters[C]//2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Cincinnati, OH, USA, IEEE: 1125-1130.
- [15] 罗程, 赵成勇, 张宝顺, 等. MMC 控制系统时序逻辑与子模块故障监测[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 83-88.
- [16] KHALEGHI M, IMAN-EINI H, FARHANGIZ S, et al. Detection and localization of Hopen-circuit fault in modular multilevel converter[C]//2020 11th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PED-STC), Tehran, Iran, IEEE: 1-6.
- [17] WANG L, CHENG G, BURENU T, et al. Automation and control design of overvoltage protection for sub-modules in modular multilevel converter[C]//2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), Chengdu, China, IEEE: 1048-1052.
- [18] 李慧, 张鹏, 刘思嘉. MMC 环流抑制策略的暂态分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 30-38.
- [19] 张浩, 刘欣和, 王先为, 等. 柔性直流输电系统 MMC 换流阀闭锁环流策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 134-142.
- [20] 张婕, 曾国辉, 赵晋斌, 等. 基于改进冒泡排序的模块化多电平换流器电容电压均衡策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 92-99.

#### 作者简介:

刘凡(1978), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为输电线路防灾减灾技术与特高压运维检修技术;

卜祥航(1987), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电网防灾减灾关键技术;

付峥争(1994), 女, 博士, 工程师, 研究方向为输电线路故障暂态特性分析。  
(收稿日期: 2022-10-11)