

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.01.014

# 基于拉依达准则的 MMC 子模块开路故障定位

王宝安, 张涵璐, 邓富金

(东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:**模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)凭借模块化结构等优点,被广泛应用于高压大功率输电领域。MMC 含有大量子模块(submodule, SM), SM 的开关器件故障是影响 MMC 可靠性的关键问题之一。其中 SM 开路故障不易及时检测,威胁系统正常运行,为此提出一种基于拉依达准则的 SM 开路故障定位方法。首先,对 SM 开路故障进行故障特性分析,根据 SM 开路故障会引起 SM 电容电压的异常变化,应用拉依达准则进行判别。其次,计算同桥臂内 SM 电容电压的均值和 3 倍标准偏差来构造一个置信区间,通过判断 SM 电容电压是否超出置信区间且持续一定时间来检测并定位发生开路故障的 SM。该方法不需要额外传感器,不用建立精确数学模型,不用手动设置经验阈值,算法较为简单。最后,在 PSCAD/EMTDC 中搭建三相 MMC 系统仿真,并在实验室搭建单相 MMC 实验平台对该方法进行验证。仿真和实验结果表明,基于拉依达准则的 SM 开路故障定位方法能够快速有效地定位出发生开路故障的 SM。

**关键词:**模块化多电平换流器(MMC);子模块(SM)故障;绝缘栅双极型晶体管(IGBT)开路故障;故障定位;拉依达准则;电容电压

中图分类号:TM46

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2023)01-0116-08

## 0 引言

模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)具有输出谐波含量小、开关频率低、操作灵活等优点<sup>[1-5]</sup>,被广泛应用于高压大功率场合<sup>[6-9]</sup>。MMC 由大量子模块(submodule, SM)级联而成<sup>[10]</sup>,内部包含大量开关器件,一旦 SM 开关器件发生故障将会危害系统的稳定运行和设备安全<sup>[11-12]</sup>。其中 SM 开关器件的短路故障特征明显,已有成熟的工业解决方案,在驱动电路配置过流保护即可快速闭锁出现短路故障的 SM<sup>[13]</sup>。而开路故障往往不易及时检测,威胁系统正常运行,因此须对 SM 开路故障定位展开研究。

目前关于 SM 开路故障的定位方法大致可分为 3 类<sup>[14]</sup>。第一类是基于额外传感器的故障定位方法,文献[15]通过冗余的监控传感器实现 SM 的故障定位,但增加了硬件成本。第二类是基于人工智能算法的故障定位方法,通过分析一组相关变量,将其与正常条件下的值或轨迹进行比较来定位故障 SM。如文献[16]利用大量原始电压和电流数据构建一维卷积神经网络进行 SM 故障定位。文献[17]基于聚类算法通过识别 SM 特征变量的二维轨迹模式来定位发生开路故障的 SM。基于人工智能的方法需要对故障特征变量进行复杂计算来定位故障 SM,算法计算量相对较大。第三类是基于数学

模型的故障定位方法,通常采用构建 MMC 数学模型,比较故障特征变量的估计值与测量值的方式来定位故障。文献[18]基于滑模观测器估计桥臂电流、文献[19]基于卡尔曼滤波器估计环流、文献[20]通过状态观测器估计交流侧电流和环流来实现 SM 开路故障定位。基于数学模型的方法不仅要对 MMC 建立精确的数学模型,还要手动设置经验阈值,而 MMC 是高阶时变非线性系统,因此算法较为复杂。

文中提出了基于拉依达准则的 SM 开路故障定位方法。该方法根据桥臂内 SM 电容电压的平均值和标准偏差构建置信区间,通过检测 SM 电容电压数据异常来定位故障 SM。最后通过仿真和实验验证该方法的有效性,并与其他方法进行性能对比。相比第一类基于传感器的方法,文中方法不用引入额外的传感器;相比第二类基于人工智能的方法,文中方法不用进行大量数据处理;相比第三类基于数学模型的方法,文中方法不用建立精确的数学模型,更不用手动设置经验阈值。基于拉依达准则的 SM 开路故障定位方法算法简单、计算量小,可有效定位 SM 开路故障,适用于含 SM 较多的 MMC 应用场景。

## 1 MMC 拓扑和工作原理

图 1(a)为三相 MMC 拓扑。该模型一共有 3 个相单元,每相包含上下 2 个桥臂,每个桥臂由  $N$  个相同的 SM 和 1 个桥臂电感  $L_s$  构成。从上、下桥臂

收稿日期:2021-10-18;修回日期:2021-12-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61873062)

连接点处引出三相交流电作为输入或输出,三相桥臂共用一条直流母线,可实现能量在交流和直流间双向流动。图 1(b)为 A 相上桥臂 SM 拓扑,由 2 个开关器件  $T_1$ 、 $T_2$ , 2 个反并联二极管  $D_1$ 、 $D_2$  和 1 个电容  $C$  构成。图 1 中,  $i_{dc}$ 、 $U_{dc}$  分别为直流电流和直流电压;  $u_{ua}$ 、 $u_{la}$  分别为 A 相上、下桥臂电压;  $i_{ua}$ 、 $i_{la}$  分别为 A 相上、下桥臂电流;  $i_a$  为 A 相电流;  $u_{sm}$  为 SM 输出电压;  $u_c$  为电容电压。

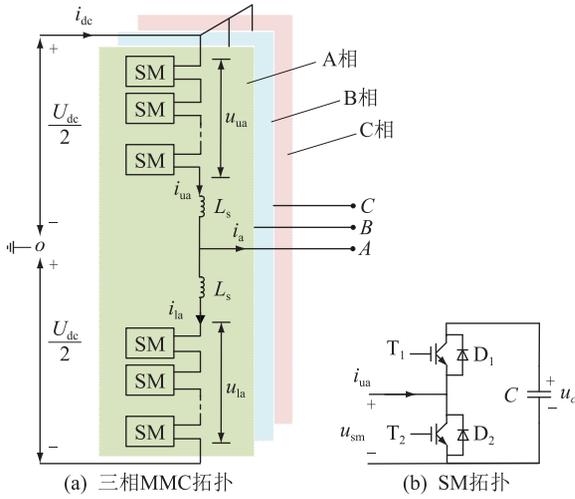


图 1 三相 MMC 拓扑和 SM 拓扑

Fig.1 Topologies of three-phase MMC and SM

SM 有投入和切除 2 种工作状态,可用开关函数  $S$  来控制 SM 的工作状态:

$$S = \begin{cases} 1 & T_1 \text{ 导通}, T_2 \text{ 关断} \\ 0 & T_1 \text{ 关断}, T_2 \text{ 导通} \end{cases} \quad (1)$$

$S=1$  时, SM 为投入状态,  $T_1$  导通,  $T_2$  关断, SM 输出电压  $u_{sm}$  为电容电压。  $S=0$  时, SM 为切除状态,  $T_1$  关断,  $T_2$  导通, SM 输出电压  $u_{sm}$  为 0。

当开关函数  $S$  确定时,由于桥臂电流方向不同,对应的 SM 电流通路不同,电容的充放电特性也不同。SM 的 4 种工作模式总结如表 1 所示。以 A 相上桥臂 SM 为例,规定电流  $i_{ua}$  的正方向如图 1(b) 所示。  $S=1$  时, SM 为投入状态,当桥臂电流  $i_{ua}>0$  时,电容处于充电状态,电容电压  $u_c$  增大;当  $i_{ua}<0$  时,电容处于放电状态,电容电压  $u_c$  减小。  $S=0$  时, SM 为切除状态,电容被旁路,此时无论桥臂电流方向如何,电容电压都不会改变。

表 1 SM 工作模式

Table 1 Operation modes of SM

模式	$S$	$T_1$	$T_2$	$u_{sm}$	$i_{ua}$	$C$	$u_c$
1	1	导通	关断	$u_c$	正	充电	增大
2	1	导通	关断	$u_c$	负	放电	减小
3	0	关断	导通	0	正	旁路	不变
4	0	关断	导通	0	负	旁路	不变

## 2 SM 开路故障特性分析

SM 的开关器件通常采用绝缘栅双极型晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT), 相比二极管, IGBT 耐过压、过流能力低, 易发生故障。 IGBT 的故障类型包括开路故障和短路故障, 其中短路故障易引发过电流, 故障特征明显, 易于解决, 在驱动电路配置过流保护即可快速闭锁出现短路故障的 SM<sup>[13]</sup>。而开路故障往往具有一定潜伏性<sup>[21]</sup>, 不易及时定位。因此须分析 IGBT 的开路故障特性, 找出故障特征变量, 进而以此为依据进行故障定位。

### 2.1 $T_1$ 开路故障特性分析

SM 正常运行过程中, 当  $S=1$  且  $i_{ua}<0$  时, 电流经过  $T_1$  流通, 电容处于放电状态, 其电压减小。若此时  $T_1$  发生开路故障, 如图 2 所示, 则  $i_{ua}$  将被迫流过  $D_2$ , 而不是  $C$  和  $T_1$ , 电容处于旁路状态, 电容电压不变, 此时本应减小的电容电压因  $T_1$  开路故障而异常不变。 SM 其他 3 种工作模式则不受  $T_1$  开路故障影响。表 2 总结了  $T_1$  故障下 SM 4 种工作模式, 可知  $T_1$  开路故障会导致 SM 电容电压出现异常, 检测 SM 电容电压可定位出发生  $T_1$  开路故障的 SM。

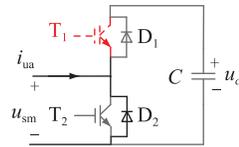


图 2  $T_1$  开路故障

Fig.2  $T_1$  open-circuit fault

表 2  $T_1$  开路故障时 SM 工作模式

Table 2 Operation modes of SM under  $T_1$  open-circuit fault

模式	$S$	$T_1$	$T_2$	$i_{ua}$	通路	$u_c$
1	1	开路	关断	正	$D_1$ 、 $C$	增大
2	1	开路	关断	负	$D_2$	不变(异常)
3	0	开路	导通	正	$T_2$	不变
4	0	开路	导通	负	$D_2$	不变

### 2.2 $T_2$ 开路故障特性分析

SM 正常运行过程中, 当  $S=0$  且  $i_{ua}>0$  时, 电流经过  $T_2$  流通, 电容处于旁路状态, 其电压不变。若此时  $T_2$  发生开路故障, 见图 3, 则  $i_{ua}$  将被迫流过  $D_1$  和  $C$ , 而不是  $T_2$ , 电容处于充电状态, 电容电压增大, 此时本应保持不变的电容电压因  $T_2$  开路故障而异常增大。 SM 其他 3 种工作模式则不受  $T_2$  开路故障的影响。表 3 总结了  $T_2$  故障下 SM 4 种工作模式, 可见  $T_2$  开路故障会导致 SM 电容电压出现异常, 检测 SM 电容电压可定位出发生  $T_2$  开路故障的 SM。

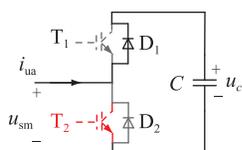


图3 T<sub>2</sub>开路故障

Fig.3 T<sub>2</sub> open-circuit fault

表3 T<sub>2</sub>开路故障时 SM 工作模式

Table 3 Operation modes of SM under T<sub>2</sub> open-circuit fault

模式	S	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	i <sub>ua</sub>	通路	u <sub>c</sub>
1	1	导通	开路	正	D <sub>1</sub> 、C	增大
2	1	导通	开路	负	C、T <sub>1</sub>	减小
3	0	关断	开路	正	D <sub>1</sub> 、C	增大(异常)
4	0	关断	开路	负	D <sub>2</sub>	不变

### 3 SM 开路故障定位

由前文分析可知,当某个 SM 发生开路故障时,该 SM 的电容电压会出现异常变化,相对于其他 SM 的电容电压为异常数据。因此,可采用拉依达准则检测出桥臂 SM 电容电压中的异常数据,进而定位出发生开路故障的 SM。

#### 3.1 拉依达准则原理

拉依达准则又称 3σ 准则,是基于概率论原理的一种异常数据判别原则,可有效检测出一组样本数据中的异常值,被广泛运用于金融、科研、工程等领域的数据处理中<sup>[22-23]</sup>。

拉依达准则判别异常值的原理是:首先假设一组测量数据只含随机误差,计算样本数据的均值 μ 和标准偏差 σ。然后按照一定的概率确定一个置信区间,区间通常取 μ±3σ,对应置信概率为 99.7%。则数据集中在置信区间(μ-3σ, μ+3σ)内的概率超过 99.7%,而超出这个范围的概率极小,所以可以认为超过这个置信区间的误差属于粗大误差,即异常数据<sup>[24]</sup>。因此,设一组正态分布数据为 x<sub>i</sub>(i=1,2,3,⋯,n),其平均值为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

数据与均值之差的绝对值为:

$$|v_i| = |x_i - \bar{x}| \quad (3)$$

其标准偏差 σ 为:

$$\sigma = \sqrt{\left( \sum_{i=1}^n v_i^2 \right) / n} \quad (4)$$

由于正常样本点与均值之差超过 3 倍标准偏差的概率很小,可以忽略不计,因此当样本与均值之差的绝对值大于 3 倍标准偏差时,可认为该样本点

为异常数据点。即当样本数据超出置信区间,满足式(5)或式(6)时,可认为该样本点为异常数据点。

$$x_i > \bar{x} + 3\sigma \quad (5)$$

$$x_i < \bar{x} - 3\sigma \quad (6)$$

#### 3.2 基于拉依达准则的 SM 开路故障定位方法

拉依达准则通常适用于样本数量较大的场合,而 MMC 内部包含大量的 SM,SM 的数量可达几十、上百个,因此拉依达准则可用于检测 SM 电容电压中的异常数据。当 SM 发生开路故障后,该 SM 的电容电压出现异常变化,逐渐超出置信区间,可据此定位出发生开路故障的 SM。为防止系统误判断,可设置一段判定时间,使其具有较好的可行性。基于拉依达准则的 SM 开路故障定位流程如图 4 所示。

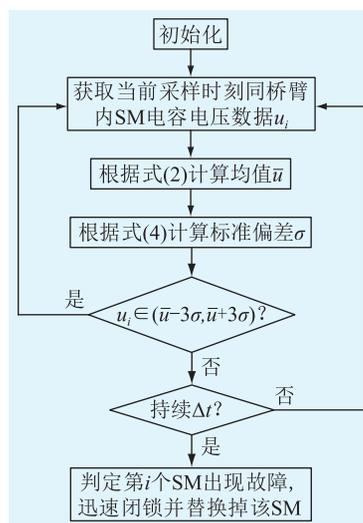


图4 基于拉依达准则的故障定位流程

Fig.4 Flow chart of fault localization based on Pauta criterion

首先获取当前采样时刻同桥臂内 SM 电容电压数据 u<sub>i</sub>(i=1,2,3,⋯,n),然后根据式(2)~式(4)计算电容电压均值  $\bar{u}$  和标准偏差 σ,得到置信区间(μ-3σ, μ+3σ)。判断 SM 电容电压是否超出该区间,若某 SM 电容电压超出置信区间且至少持续时间 Δt,则认为该 SM 出现故障,控制器发出信号迅速闭锁并替换掉该 SM;否则,判定该桥臂正常运行,此定位算法继续执行。

#### 3.3 基于拉依达准则的故障定位法性能分析

##### 3.3.1 基于拉依达准则的故障定位方法执行时间

假设桥臂内有 n 个 SM,每个故障定位周期须对 n 个 SM 进行一次平均值和标准偏差计算,获取左右置信区间端点后,进行 2n 次比较,则一共需要加法 2n-1 次,减法 n+1 次,乘法 n+1 次,除法 2 次,开方 1 次,比较 2n 次。以文献[25]中的数字信号处理器为例,其主频为 150 MHz,则执行一次故障定位用时

约  $(16n+536)/150 \mu\text{s}$ 。

图 5 为桥臂 SM 个数  $n$  与文中故障定位方法用时  $t$  之间的关系。可以看到,随着 SM 数量的增加,故障定位用时也增加。SM 数量达到 200 个时,用时不超过  $25 \mu\text{s}$ 。

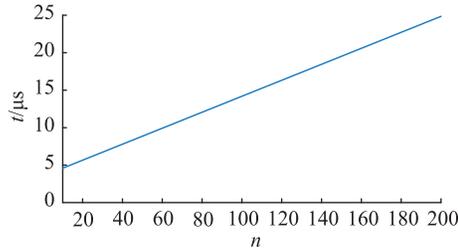


图 5 执行时间与 SM 数量的关系

Fig.5 Relationship between operation time and SM quantity

### 3.3.2 故障定位方法对比分析

表 4 为文中方法与其他故障定位方法<sup>[14-20,26]</sup>的对比。

表 4 SM 故障定位方法对比

方法	难易程度	数学模型	经验阈值	高数据量	定位时间
传感器 <sup>[15]</sup>	需要额外硬件电路	不需要	不需要	不需要	约 20 ms
滑动时间窗 <sup>[14]</sup>	须处理大数据、训练神经网络	不需要	不需要	需要	约 20 ms
神经网络 <sup>[16]</sup>	须构建卷积神经网络	不需要	不需要	需要	约 100 ms
聚类算法 <sup>[17]</sup>	须识别故障特征量轨迹模式	需要	需要	需要	约 40 ms
滑模观测器 <sup>[18]</sup>	须构建滑模观测器模型	需要	需要	不需要	约 40 ms
卡尔曼滤波 <sup>[19]</sup>	须构建卡尔曼滤波模型	需要	需要	不需要	平均 100 ms
状态观测器 <sup>[20]</sup>	须构建 MMC 状态模型	需要	需要	不需要	50~150 ms
单环定理 <sup>[26]</sup>	须构建高维随机矩阵	需要	需要	不需要	约 40 ms
文中方法	仅计算均值和标准偏差	不需要	不需要	不需要	约 20 ms

由表 4 可知,基于额外传感器的方法<sup>[15]</sup>会增加额外的硬件成本。基于人工智能算法的方法<sup>[14,16-17]</sup>要对 SM 开路故障特征变量进行大量数据分析和样本训练,计算过程相对复杂,计算量较大。聚类算法<sup>[17]</sup>和基于数学模型的方法<sup>[18-20,26]</sup>应对 MMC 建立精确的数学模型,但 MMC 具有高阶时变非线性特点,因此算法相对复杂,且要手动设置经验阈值,而阈值会随着 MMC 实际运行工况的变化而改变,因此阈值难以确定。文中方法不用引入额外的传感

器,不用建立精确的数学模型,也不用手动设置阈值,只要计算桥臂电容电压的均值和 3 倍标准偏差,计算量较小。此外,由于 MMC 正常运行时要测量电容电压数据来进行电容电压平衡控制,因此文中方法也不增加额外的测量负担,且文中方法所需时间短,仅约 20 ms。

## 4 仿真实验

为验证基于拉依达准则的 SM 开路故障定位方法的准确性,在 PSCAD/EMTDC 中搭建图 1(a)所示三相 MMC 并网系统模型进行仿真验证,系统参数见表 5。

表 5 MMC 仿真系统参数

Table 5 Parameters of MMC simulation system

参数	数值
额定直流电压 $U_{dc}/\text{kV}$	20
线电压 $U_{ab}/\text{kV}$	10
桥臂 SM 数量	20
SM 电容值 $C/\text{mF}$	4
桥臂电感 $L_s/\text{mH}$	8
等效桥臂电阻 $R/\text{m}\Omega$	10
采样频率 $f_s/\text{kHz}$	10
持续时间 $\Delta t/\text{ms}$	3

### 4.1 $T_1$ 开路故障定位的仿真结果

考虑 MMC 的 A 相上桥臂 SM<sub>1</sub> 发生  $T_1$  开路故障,图 6 为此时 A 相上桥臂电流和上桥臂 SM 电容电压波形。

图 6(a)为 A 相上桥臂电流  $i_{ua}$  波形,  $t_1 = 1 \text{ s}$  时 SM<sub>1</sub> 发生  $T_1$  开路故障,由于桥臂电流  $i_{ua} > 0$ , SM<sub>1</sub> 仍能保持正常运行。直到  $t_2 = 1.012 \text{ s}$  时桥臂电流  $i_{ua} < 0$ , 由于  $T_1$  开路故障, SM<sub>1</sub> 会进入异常运行状态,桥臂电流开始出现畸变。

图 6(b)为 SM 电容电压  $u_c$  波形,由于 SM 数量较多,图中只给出了前 6 个 SM 的电容电压。其中红色曲线为 SM<sub>1</sub> 的电容电压  $u_{cau1}$ , 黑色曲线为置信区间的上限即  $\bar{u} + 3\sigma$ 。由于故障 SM 电压只超过了区间一条边界,因此图中省略了置信区间下限,下文同理。  $t_2 = 1.012 \text{ s}$  后,由于  $T_1$  开路故障, SM<sub>1</sub> 电容电压异常不变,因此 SM<sub>1</sub> 的电容电压相对于其他 SM 为异常数据,  $t_3 = 1.017 \text{ s}$  时,基于拉依达准则的 SM 开路故障定位方法定位出 SM<sub>1</sub> 发生故障。从发生故障到定位出故障所需时间为 17 ms,其中从 SM<sub>1</sub> 表现出故障特征到定位出故障 SM 所需时间为 5 ms。

### 4.2 $T_2$ 开路故障定位的仿真结果

考虑 MMC 的 A 相上桥臂 SM<sub>1</sub> 发生  $T_2$  开路故

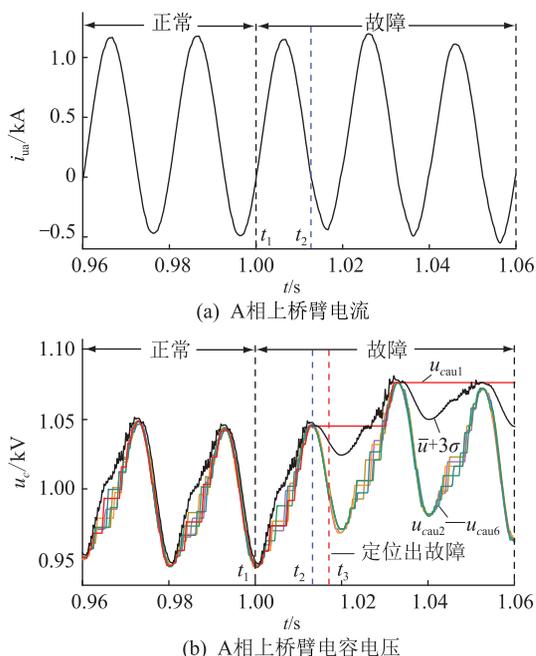


图6 T<sub>1</sub>开路故障时的仿真波形

Fig.6 Simulation waveforms under T<sub>1</sub> open-circuit fault 故障,图7为此时A相上桥臂电流和上桥臂SM电容电压波形。

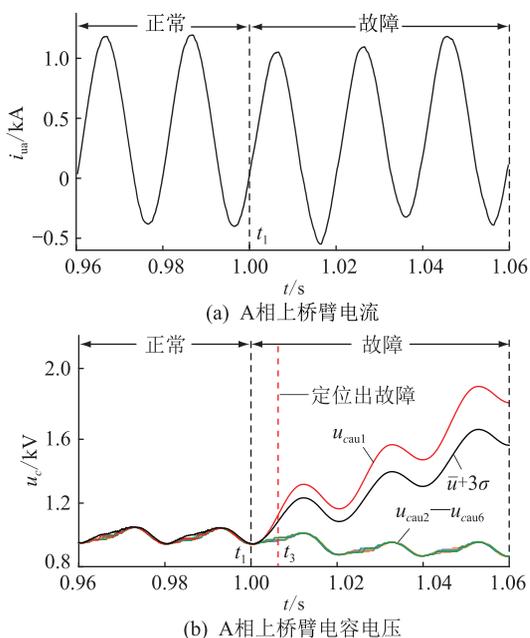


图7 T<sub>2</sub>开路故障时的仿真波形

Fig.7 Simulation waveforms under T<sub>2</sub> open-circuit fault

图7(a)为上桥臂电流  $i_{ua}$  波形,  $t_1 = 1\text{ s}$  时  $SM_1$  发生  $T_2$  开路故障, 此时桥臂电流  $i_{ua} > 0$ , 由于  $T_2$  开路故障,  $SM_1$  会进入异常运行状态, 桥臂电流开始出现畸变。

图7(b)为SM电容电压  $u_c$  波形, 由于SM数量较多, 图中只给出了前6个SM的电容电压。  $T_2$  开路故障,  $SM_1$  电容电压异常增大, 因此  $SM_1$  电容电压

相对于其他SM为异常数据。  $t_3 = 1.006\text{ s}$  时, 基于拉依达准则的SM开路故障定位方法定位出  $SM_1$  发生故障。从发生故障到定位出故障所需时间为6ms。

## 5 实验验证

为验证基于拉依达准则的SM开路故障定位方法的准确性, 在实验室搭建单相MMC平台进行验证, 平台实物图如图8所示, 系统参数见表6。直流电源用于支撑MMC直流侧电压, MMC交流侧接阻感负载。控制器的驱动信号通过光纤传输到各个SM的驱动板上。由于桥臂SM数量较多, 而示波器通道有限, 实验中通过控制器采集并记录桥臂中所有SM电容电压和桥臂电流。

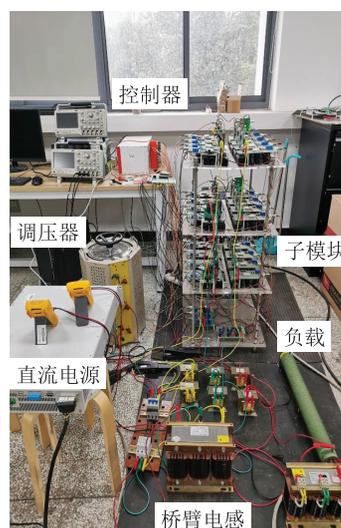


图8 MMC故障模拟平台

Fig.8 MMC fault simulation platform

表6 MMC实验系统参数

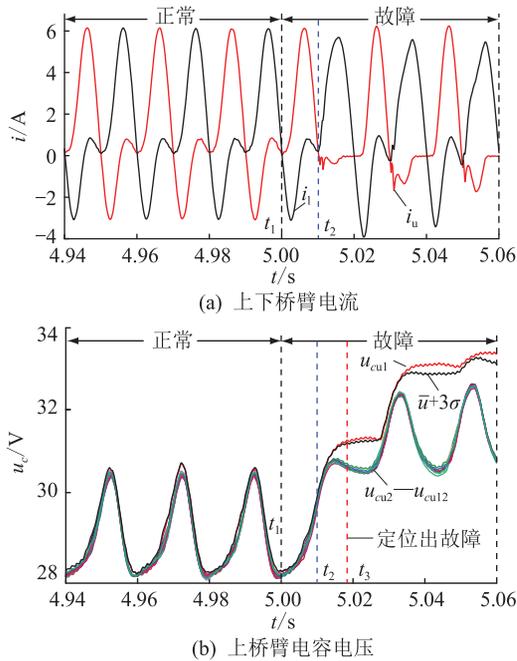
Table 6 Parameters of MMC experimental system

参数	数值
额定直流电压 $U_{dc}/V$	360
桥臂SM数量	12
SM电容值 $C/mF$	2.35
桥臂电感 $L_s/mH$	3
负载电阻 $R/\Omega$	20
负载电感 $L/mH$	1.5
采样频率 $f_s/kHz$	5
持续时间 $\Delta t/ms$	3

### 5.1 T<sub>1</sub>开路故障定位的实验结果

考虑MMC上桥臂  $SM_1$  发生  $T_1$  开路故障, 图9为此时MMC上下桥臂电流和上桥臂电容电压波形。

图9(a)为上桥臂电流  $i_u$  和下桥臂电流  $i_l$  波形,  $t_1 = 5\text{ s}$  时  $SM_1$  发生  $T_1$  开路故障, 由于桥臂电流  $i_u > 0$ ,  $SM_1$  仍能保持正常运行。直到  $t_2 = 5.01\text{ s}$  时桥臂电

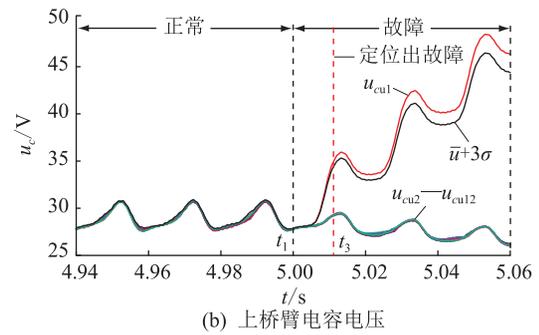
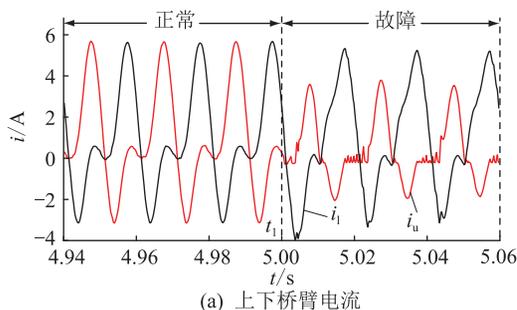
图9  $T_1$ 开路故障时的实验波形Fig.9 Experiment waveforms under  $T_1$  open-circuit fault

流  $i_u < 0$ , 由于  $T_1$  开路故障,  $SM_1$  进入异常工作状态, 桥臂电流开始出现畸变。

图 9(b) 为上桥臂电容电压  $u_c$  波形,  $t_2 = 5.01$  s 后,  $SM_1$  电容电压开始逐渐出现异常,  $t_3 = 5.018$  s 时, 基于拉依达准则的  $SM$  开路故障定位方法定位出  $SM_1$  发生故障。从发生故障到定位出故障所需时间为 18 ms, 其中从  $SM_1$  表现出故障特征到定位出故障  $SM$  所需时间为 8 ms。

## 5.2 $T_2$ 开路故障定位的实验结果

考虑 MMC 上桥臂  $SM_1$  发生  $T_2$  开路故障, 图 10 为此时 MMC 上下桥臂电流和上桥臂电容电压。图 10(a) 为上桥臂电流  $i_u$  和下桥臂电流  $i_l$  波形,  $t_1 = 5$  s 时  $SM_1$  发生  $T_1$  开路故障, 此时桥臂电流  $i_u > 0$ , 由于  $T_2$  开路故障,  $SM_1$  会进入异常工作状态, 桥臂电流出现畸变。图 10(b) 为  $SM$  电容电压波形, 由于  $T_2$  开路故障,  $SM_1$  电容电压逐渐异常增大, 相对于其他  $SM$  为异常数据。  $t_3 = 5.011$  s 时, 基于拉依达准则的  $SM$  开路故障定位方法定位出  $SM_1$  发生故障。从发生故障到定位出故障所需时间为 11 ms。

图10  $T_2$ 开路故障时的实验波形Fig.10 Experiment waveforms under  $T_2$  open-circuit fault

## 6 结语

为实现 MMC 的  $SM$  开路故障定位, 文中首先分析了  $SM$  中 IGBT 的开路故障特性, 发现 IGBT 的开路故障会引起  $SM$  电容电压的异常变化, 该异常变化可通过拉依达准则进行判别定位。据此, 文中提出基于拉依达准则的  $SM$  开路故障定位方法, 通过判断  $SM$  电容电压是否超出均值与 3 倍标准差构成的置信区间且持续一段时间来定位  $SM$  开路故障。将文中方法和其他常用故障定位方法进行对比, 可以看出文中方法不用引入额外的传感器, 不用建立精确的数学模型, 也不用手动设置阈值, 算法相对简单、计算量较小。最后通过仿真和实验证明, 文中所提基于拉依达准则的  $SM$  开路故障定位方法可以有效定位  $SM$  开路故障。

## 参考文献:

- [1] PEREZ M A, BERNET S, RODRIGUEZ J, et al. Circuit topologies, modeling, control schemes, and applications of modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 4-17.
- [2] RAJU M N, SREEDEVI J, P MANDI R, et al. Modular multilevel converters technology: a comprehensive study on its topologies, modelling, control and applications[J]. IET Power Electronics, 2019, 12(2): 149-169.
- [3] ZHANG L, ZOU Y T, YU J C, et al. Modeling, control, and protection of modular multilevel converter-based multi-terminal HVDC systems: a review [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(4): 340-352.
- [4] 王雪姣. 模块化多电平换流器子模块拓扑设计及其控制[D]. 淄博: 山东理工大学, 2021.  
WANG Xuejiao. Design of sub module topologies and their control for modular multilevel converter[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2021.
- [5] 江畅. 基于模块化多电平换流器的统一电能质量调节器研究[D]. 上海: 上海电力大学, 2021.  
JIANG Chang. Research on unified power quality conditioner based on modular multilevel converter[D]. Shanghai: Shanghai

- University of Electric Power, 2021.
- [6] 胡宏,陈浩,丁浩寅,等. 特高压混合级联多端直流输电系统的协调控制策略研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(4): 42-51.
- HU Hong, CHEN Hao, DING Haoyin, et al. Coordinated control strategy for hybrid cascaded UHVDC system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(4): 42-51.
- [7] XIANG W, YANG S Z, ADAM G P, et al. DC fault protection algorithms of MMC-HVDC grids; fault analysis, methodologies, experimental validations, and future trends[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(10): 11245-11264.
- [8] DU S X, WU B, ZARGARI N R, et al. A flying-capacitor modular multilevel converter for medium-voltage motor drive[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3): 2081-2089.
- [9] OKAZAKI Y, KAWAMURA W, HAGIWARA M, et al. Experimental comparisons between modular multilevel DSCC inverters and TSBC converters for medium-voltage motor drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3): 1805-1817.
- [10] ALI S, LING Z B, TIAN K, et al. Recent advancements in submodule topologies and applications of MMC[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(3): 3407-3435.
- [11] DENG F J, LYU Y, LIU C K, et al. Overview on submodule topologies, modeling, modulation, control schemes, fault diagnosis, and tolerant control strategies of modular multilevel converters[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2020, 6(1): 1-21.
- [12] CHEN X X, LIU J J, DENG Z F, et al. A diagnosis strategy for multiple IGBT open-circuit faults of modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 191-203.
- [13] GENG Z, HAN M X, KHAN Z W, et al. Detection and localization strategy for switch open-circuit fault in modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(6): 2630-2640.
- [14] DENG F J, JIN M, LIU C K, et al. Switch open-circuit fault localization strategy for MMCs using sliding-time window based features extraction algorithm[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(10): 10193-10206.
- [15] PICAS R, ZARAGOZA J, POU J, et al. Reliable modular multilevel converter fault detection with redundant voltage sensor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(1): 39-51.
- [16] KIRANYAZ S, GASTLI A, BEN-BRAHIM L, et al. Real-time fault detection and identification for MMC using 1-D convolutional neural networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(11): 8760-8771.
- [17] YANG Q C, QIN J C, SAEEDIFARD M. Analysis, detection, and location of open-switch submodule failures in a modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 155-164.
- [18] SHAO S, WATSON A J, CLARE J C, et al. Robustness analysis and experimental validation of a fault detection and isolation method for the modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3794-3805.
- [19] DENG F J, CHEN Z, KHAN M R, et al. Fault detection and localization method for modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2721-2732.
- [20] LI B B, SHI S L, WANG B, et al. Fault diagnosis and tolerant control of single IGBT open-circuit failure in modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(4): 3165-3176.
- [21] 李豪,赵孟,董志文,等. VSC-MTDC 系统中 IGBT 开路检测方法研究[J]. 可再生能源, 2019, 37(12): 1802-1808.
- LI Hao, ZHAO Meng, DONG Zhiwen, et al. Fault detection of IGBT open-circuit for VSC-MTDC system[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(12): 1802-1808.
- [22] 林静,唐国强,覃良文. 基于  $3\sigma$  准则的分段拟合及其 GARCH 修正模型[J]. 经济数学, 2016, 33(3): 26-32.
- LIN Jing, TANG Guoqiang, QIN Liangwen. Piecewise Fitting based on  $3\sigma$  guidelines and its GARCH remaining modified model[J]. Journal of Quantitative Economics, 2016, 33(3): 26-32.
- [23] 徐琛辉,马明辉. 基于拉依达准则的交通数据粗大误差处理优化方法[J]. 上海工程技术大学学报, 2018, 32(1): 64-67.
- XU Chenhui, MA Minghui. Optimization method for gross error processing of traffic data based on pauta criterion[J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2018, 32(1): 64-67.
- [24] 杨婧,辛明勇,欧家祥,等. 基于拉依达准则的计量自动化系统数据准确性判断方法[J]. 电力大数据, 2017, 20(11): 74-78.
- YANG Jing, XIN Mingyong, OU Jiexiang, et al. Data accuracy judgment method of metrology automation system based on Pauta criterion[J]. Power Systems and Big Data, 2017, 20(11): 74-78.
- [25] DENG F J, HENG Q, LIU C K, et al. Capacitor ESR and C monitoring in modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 4063-4075.
- [26] ZHOU W H, SHENG J, LUO H Z, et al. Detection and localization of submodule open-circuit failures for modular multilevel converters with single ring theorem[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(4): 3729-3739.

作者简介:



王宝安

王宝安(1978),男,博士,副教授,研究方向为电能质量、电力电子技术(E-mail:wbaseu@seu.edu.cn);

张涵璐(1998),女,硕士在读,研究方向为电力电子变换器与柔性直流输电技术;

邓富金(1983),男,博士,教授,研究方向为电力电子变换器与柔性直流输电技术。

## Localization for MMC submodule open-circuit fault based on Pauta criterion

WANG Bao'an, ZHANG Hanlu, DENG Fujin

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The modular multilevel converter (MMC) is widely used in the field of high-voltage and high-power transmission due to its advantage of modular structure. As a large number of submodules (SM) are contained in the MMC, the switch failure of SM is one of the key issues affecting the reliability of MMC. The switch open-circuit fault is usually hard to be detected immediately, which threatens the normal operation of the system. A SM open-circuit fault localization method based on Pauta criterion is proposed in this paper. Firstly, the open-circuit fault characteristics of SM are analyzed in this paper. The SM open-circuit fault causes the abnormal changes of the SM capacitor voltage, which can be judged by the Pauta criterion. Then, a confidence interval is constructed by the average SM capacitor voltage and three times of the standard deviation of SM capacitor voltages in an arm. The SM open-circuit fault can be located through judging whether the SM capacitor voltage exceeds the confidence interval or not for a certain time. The proposed method does not require additional sensors, creation of accurate mathematical models and manual setting of empirical thresholds, and its algorithm is quite simple. Finally, a three-phase MMC is simulated with PSCAD/EMTDC and a single-phase MMC prototype is built in the laboratory to verify the proposed method. The simulation and experimental results both confirm that the proposed Pauta criterion based SM open-circuit fault localization method can locate the SM open-circuit faults effectively and quickly.

**Keywords:** modular multilevel converter (MMC); submodule (SM) fault; insulated gate bipolar transistor (IGBT) open-circuit fault; fault localization; Pauta criterion; capacitor voltage

(编辑 方晶)

(上接第 49 页)

## A converter-assisting flexible switch topology and its control strategy

FANG Rengcun<sup>1</sup>, LEI He<sup>1</sup>, YANG Dongjun<sup>1</sup>, ZHUANG Kaixun<sup>2</sup>, ZHA Xiaoming<sup>2</sup>, SUN Jianjun<sup>2</sup>

(1. Hydrothermal Power Resource Optimization and Simulation Laboratory (State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd. Economic and Technical Research Institute), Wuhan 430077, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The rapid development of new energy in the distribution network increases its flexibility while making it more complicated to operate and manage the network. For this reason, a novel flexible switch, which is composed of integrated gate-commutated thyristors (IGCT) and parallel voltage converters, is proposed in this paper. Applying virtual synchronous generator (VSG) control on the parallel voltage converter ensures smoothness and steadiness while switching from one feeder to another. Firstly, the proposed flexible switch is compared with the flexible multi-state switch and the mechanical switch on their main characteristics. Then, the operating features of the flexible switch before, during, and after feeder fault are analyzed, as well as its switching logic. Finally, the switching process between different feeders is simulated on a control in-the-loop experiment based on RT-Lab. The voltage and current waveforms are obtained under different operating modes and during flexible switching. The experiment results show that the flexible switch has short-term voltage support capability and does not generate voltage and current impulses during the switching process.

**Keywords:** flexible switching; integrated gate-commutated thyristor (IGCT); virtual synchronous generator (VSG); voltage support; pre-synchronization grid-connection; flexible grid-connection

(编辑 陆海霞)