

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.02.007

基于龙伯格观测器的 MMC 子模块故障检测方法

李群¹, 林金娇¹, 邓富金², 周琦¹, 陈双锋²

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2. 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)由大量子模块(submodule, SM)串联构成,是高压大功率领域最有发展潜力的变换器之一。SM功率开关开路故障和短路故障严重影响了MMC的可靠性,给MMC稳定运行带了巨大挑战。因此,为了快速地检测出故障SM,文中提出一种基于龙伯格观测器的SM功率开关故障检测方法。首先,分析SM故障特性,根据SM电容电压变化的数学关系,建立龙伯格观测器模型;然后,通过龙伯格观测器计算SM电容电压估计值,比较电容电压估计值与测量值,实现SM功率开关故障检测;最后,在PSCAD/EMTDC中搭建MMC系统仿真平台,并在实验室搭建MMC实验平台进行验证。仿真和实验结果表明,龙伯格观测器能够准确有效地检测出SM开路故障和短路故障,验证了该故障检测方法的可行性与有效性,但要每个SM进行监测。

关键词:模块化多电平换流器(MMC);子模块故障;故障检测;故障定位;龙伯格观测器;电容电压

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)02-0058-09

0 引言

模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)凭借优良的输出电压波形和极高的传输效率,在高压、大功率场景应用中广受青睐^[1-4]。MMC包含大量的子模块(submodule, SM),而每个SM包含了若干绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)^[5-7],数目庞大的电力电子器件投入使用导致系统发生故障的概率增加^[8-10],影响MMC稳定运行。因此,有必要快速检测出SM中IGBT故障。目前,SM故障诊断集成于每个SM控制单元中,与操作电源等多种电源共用SM电容取能,这种SM故障检测方式简单、速度快,但其每个SM单一光纤通道传输信息、多种电源共用回路的结构易造成SM故障误判别、误传输的问题。

目前国内外已有诸多文献针对MMC中SM故障检测新方法进行了相关研究。一类是人工智能方法:文献[11-16]提出基于人工智能算法的故障检测方法,能够有效检测出SM故障,但当MMC包含大量SM时须采集大量数据,计算量大且参数设计复杂。另一类是观测器方法:文献[17-18]提出基于滑模观测器的SM故障检测方法,通过比较各种类型故障特征与实际故障特征来进行SM故障检测,但须对比大量故障特征,工程量大且过程复杂;文献[19]提出基于扩展状态观测器的SM故障检测方法,通过观测桥臂电压的变化来实现SM故障检测,

但检测方法中的最速微分跟踪器容易受噪声影响且计算复杂;文献[20]提出基于卡尔曼滤波器的SM开路故障检测方法,通过观测桥臂环流的变化来实现SM故障检测,但须利用协方差矩阵实时更新算法中的增益系数,算法复杂。从国内外研究现状来看,无论是人工智能方法还是观测器方法,都能够快速有效地检测出SM故障,但算法复杂,计算量大。

基于上述分析,文中提出基于龙伯格观测器的SM故障检测方法,通过建立一个简单的龙伯格观测器模型,根据故障模块电容电压变化特征来实现故障诊断。该方法简化了故障检测过程,且只须设置固定的算法增益系数即可实现故障的精确诊断,极大简化了算法的复杂性,减少了计算量。首先介绍MMC拓扑和工作原理,接着分析SM在各类功率开关故障下的故障特性,然后提出基于龙伯格观测器的故障检测方法,最后由仿真和实验结果证明文中所提方法的有效性,为保证实际工程中MMC稳定可靠运行提供了理论基础与研究方法。

1 MMC 拓扑和工作原理

MMC拓扑如图1(a)所示,MMC由6个桥臂组成,每个桥臂由 N 个串联的SM、1个桥臂电感 L_s 和1个等效桥臂电阻 R 组成。同一相的上桥臂和下桥臂组成一个相单元。 V_{dc} 为MMC的直流侧电压; u_{ga} 、 u_{gb} 、 u_{gc} 为交流侧三相电压; i_a 、 i_b 、 i_c 为三相电流; i_{uj} 、 i_{lj} 分别为上、下桥臂三相电流, j 可取a、b、c。每个SM

收稿日期:2022-09-17;修回日期:2022-12-22

由2个IGBT(T_1 、 T_2)、2个反并联二极管(D_1 、 D_2)以及1个储能电容(C)构成,如图1(b)所示。

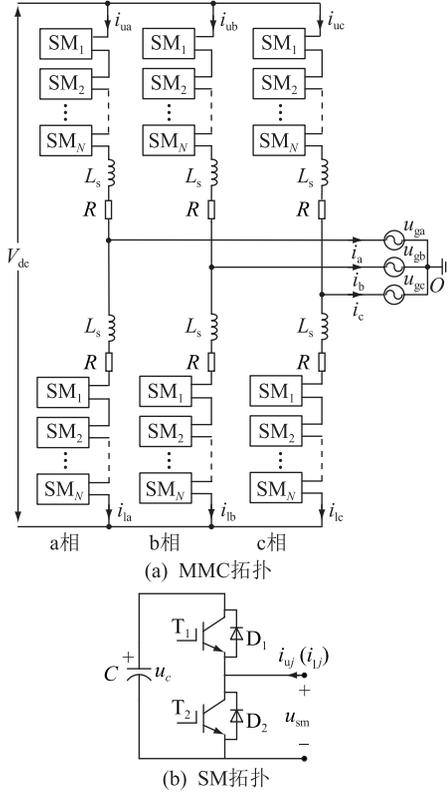


图1 MMC和SM的拓扑

Fig.1 Topologies of MMC and SM

在正常运行时,每个SM的投入与切除都可用开关函数 S 表示,定义为:

$$S = \begin{cases} 1 & g_1 = 1; g_2 = 0 \\ 0 & g_1 = 0; g_2 = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: g_1 、 g_2 分别为功率开关 T_1 和 T_2 的驱动信号。当 $S=1$ 时, T_1 导通, T_2 关断,SM输出电压 u_{sm} 为电容电压 u_c ,SM处于投入状态。当 $S=0$ 时, T_1 关断, T_2 导通,SM输出电压 u_{sm} 为0,SM处于切除状态。

正常运行时,每个SM有4种运行状态。以a相上桥臂SM为例,如表1所示。

表1 正常运行时SM工作状态

Table 1 Operation modes of SM under normal operation

i_{ua}	S	T_1	T_2	C	u_c
>0	1	导通	关断	充电	增大
>0	0	关断	导通	旁路	不变
<0	1	导通	关断	放电	减小
<0	0	关断	导通	旁路	不变

当桥臂电流 $i_{ua}>0$ 且 $S=1$ 时, i_{ua} 流过电容 C ,电容处于充电状态,电容电压 u_c 增大;当 $i_{ua}>0$ 且 $S=0$ 时, i_{ua} 流过 T_2 ,电容处于旁路状态,电容电压不变;当 $i_{ua}<0$ 且 $S=1$ 时, i_{ua} 流过电容 C ,电容处于放电状

态,电容电压 u_c 减小;当 $i_{ua}<0$ 且 $S=0$ 时, i_{ua} 流过二极管 D_2 ,电容处于旁路状态,电容电压不变。因此,SM电容电压变化 Δu_c 可以表示为:

$$\Delta u_c = \frac{1}{C} \int S i_{ua} dt \quad (2)$$

2 SM故障特性分析

由于IGBT的过载能力较弱,过压、过流等容易造成IGBT损坏,从而导致MMC中SM发生故障。通常,IGBT故障可以分为开路 and 短路2种^[21-24]。IGBT的短路故障会导致SM内产生较大的短路电流^[25-27],因而SM驱动电路中一般会设置集成电路保护,一旦检测到过电流,SM内2个IGBT的驱动信号就会立即被封锁,避免IGBT损坏^[28-30],从而保证MMC能够稳定可靠运行。IGBT开路故障亦会影响MMC正常运行^[31-32]。文中将分别研究SM中IGBT开路故障和短路故障。

2.1 T_1 开路故障

T_1 发生开路故障,如图2所示,此时SM工作状态如表2所示。

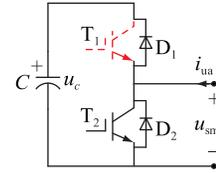


图2 T_1 开路故障

Fig.2 T_1 open-circuit fault

表2 T_1 开路时SM工作状态

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

i_{ua}	S	T_1	T_2	C	u_c
>0	1	开路	关断	充电	增大
>0	0	开路	导通	旁路	不变
<0	1	开路	关断	旁路	不变
<0	0	开路	导通	旁路	不变

当 $i_{ua}>0$ 且 $S=1$ 时, i_{ua} 流过二极管 D_1 和电容 C ,电容电压增加;当 $i_{ua}>0$ 且 $S=0$ 时, i_{ua} 流过 T_2 ,电容处于旁路状态,电容电压不变;当 $i_{ua}<0$ 且 $S=1$ 时,由于 T_1 发生开路故障,电容无法放电,所以 i_{ua} 被迫流过 D_2 而不是 C 和 T_1 ,此时电容处于旁路状态,电容电压不变;当 $i_{ua}<0$ 且 $S=0$ 时, i_{ua} 流过二极管 D_2 ,此时电容处于旁路状态,电容电压不变。因此,此时模块中电容电压变化 Δu_c 可以表示为:

$$\Delta u_c = \begin{cases} \frac{1}{C} \int S i_{ua} dt & i_{ua} > 0 \\ 0 & i_{ua} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

2.2 T₂开路故障

T₂发生开路故障,如图3所示,此时SM工作状态如表3所示。

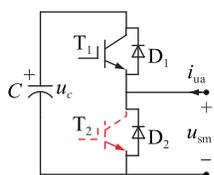


图3 T₂开路故障

Fig.3 T₂ open-circuit fault

表3 T₂开路时SM工作状态

Table 3 Operation modes of SM under T₂ open-circuit fault

i_{ua}	S	T ₁	T ₂	C	u_c
>0	1	导通	开路	充电	增大
>0	0	关断	开路	充电	增大
<0	1	导通	开路	放电	减小
<0	0	关断	开路	旁路	不变

当 $i_{ua} > 0$ 且 $S = 1$ 时,桥臂电流 i_{ua} 流过二极管 D_1 和电容 C , 电容电压增加; 当 $i_{ua} > 0$ 且 $S = 0$ 时, 由于 T_2 开路, i_{ua} 无法正常流过 T_2 , 而被迫流经 D_1 和 C , 对 SM 电容充电, 此时电容电压增加; 当 $i_{ua} < 0$ 且 $S = 1$ 时, i_{ua} 流过 T_1 和电容 C , 电容放电, 电容电压减小; 当 $i_{ua} < 0$ 且 $S = 0$ 时, i_{ua} 流过二极管 D_2 , 电容处于旁路状态, 电容电压不变。因此, 此时模块中电容电压变化 Δu_c 可以表示为:

$$\Delta u_c = \begin{cases} \frac{1}{C} \int i_{ua} dt & i_{ua} > 0 \\ \frac{1}{C} \int S i_{ua} dt & i_{ua} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

2.3 T₁短路故障

T₁发生短路故障,在T₂给定驱动信号时,驱动会检测出过流从而闭锁T₁和T₂的驱动信号,如图4所示,此时SM工作状态如表4所示。

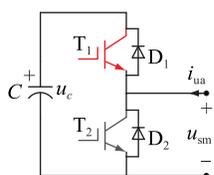


图4 T₁短路故障

Fig.4 T₁ short-circuit fault

当 $i_{ua} > 0$ 且 $S = 1$ 或 0 时, i_{ua} 流过电容, 电容电压增加; 当 $i_{ua} < 0$ 且 $S = 1$ 或 0 时, i_{ua} 流过 C , 电流 i_{ua} 对电容进行放电, 电容电压减小。因此, 此时模块中电容电压变化 Δu_c 如式(5)所示。

表4 T₁短路时SM工作状态

Table 4 Operation modes of SM under T₁ short-circuit fault

i_{ua}	S	T ₁	T ₂	C	u_c
>0	1	短路	关断	充电	增大
>0	0	短路	关断	充电	增大
<0	1	短路	关断	放电	减小
<0	0	短路	关断	放电	减小

$$\Delta u_c = \frac{1}{C} \int i_{ua} dt \quad (5)$$

2.4 T₂短路故障

T₂发生短路故障,在T₁给定驱动信号时,驱动会检测出过流从而闭锁T₁和T₂的驱动信号,如图5所示,此时SM工作状态如表5所示。

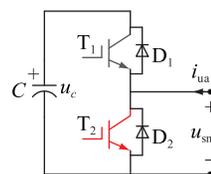


图5 T₂短路故障

Fig.5 T₂ short-circuit fault

表5 T₂短路时SM工作状态

Table 5 Operation modes of SM under T₂ short-circuit fault

i_{ua}	S	T ₁	T ₂	C	u_c
>0	1	关断	短路	旁路	不变
>0	0	关断	短路	旁路	不变
<0	1	关断	短路	旁路	不变
<0	0	关断	短路	旁路	不变

当 $i_{ua} > 0$ 且 $S = 1$ 或 0 时, i_{ua} 流过短路 T_2 , 电容旁路; 当 $i_{ua} < 0$ 且 $S = 1$ 或 0 时, i_{ua} 不流过电容, 电容旁路。因此, 电容电压变化 Δu_c 可表示为:

$$\Delta u_c = 0 \quad (6)$$

3 SM故障检测

根据SM故障特性, IGBT故障会直接影响电容电压。文中提出采用龙伯格观测器来估计电容电压, 通过比较电容电压估计值与测量值来检测故障。

3.1 基于龙伯格观测器的电容电压估计

龙伯格观测器分为2个部分: 时间更新方程和测量更新方程。时间更新方程主要起预测作用, 测量更新方程主要起校正作用。

根据MMC系统电路(即图1)可得SM电容电压 u_c 为:

$$u_c(t) = u_c(t-1) + \frac{1}{C} \int_{t-1}^t i_{arm}(t) s(t) dt \quad (7)$$

式中: $u_c(t)$ 、 $u_c(t-1)$ 分别为 t 时刻、 $t-1$ 时刻的电容电压值; $i_{arm}(t)$ 为 t 时刻的桥臂电流值; $s(t)$ 为 t 时刻的开关函数值。基于式(7)可构建针对电容电压观测的龙伯格观测器。

3.1.1 时间更新

将式(7)离散化,可获得电容电压的预测状态估计值为:

$$u_{c-p}(k) = u_{c-c}(k-1) + \frac{\Delta T}{C} i_{arm}(k) s(k) \quad (8)$$

式中: $u_{c-p}(k)$ 为 k 时刻电容电压的预测值; $u_{c-c}(k-1)$ 为 $k-1$ 时刻电容电压的估计值; ΔT 为采样时间; $i_{arm}(k)$ 为 k 时刻的桥臂电流值; $s(k)$ 为 k 时刻的开关函数值。

3.1.2 测量更新

根据式(8),基于龙伯格观测器的电容电压的估计值可表示为:

$$u_{c-c}(k) = u_{c-p}(k) + K(u_c(k) - u_{c-p}(k)) \quad (9)$$

式中: $u_{c-c}(k)$ 为 k 时刻电容电压的估计值; $u_c(k)$ 为 k 时刻电容电压的测量值; K 为龙伯格观测器的增益系数。

根据式(8)和式(9)可获得基于龙伯格观测器的电容电压估计算法,如图6所示,其中 Z^{-1} 表示滞后一个控制周期。

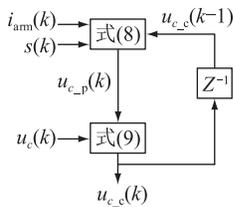


图6 SM 电容电压估计

Fig.6 SM capacitance voltage estimation

3.2 SM 故障检测方法

MMC 正常运行时,根据式(2)、式(7)和式(8)可知,模块中电容电压的估计值 u_{c-c} 与测量值 u_c 接近。若功率开关发生故障,根据式(3)一式(6)可知,功率开关故障将影响电容电压的变化,因此,由式(8)和式(9)确定的 k 时刻电容电压的估计值 $u_{c-c}(k)$ 将与测量值 $u_c(k)$ 相偏离。基于该原理,文中提出基于龙伯格观测器的 SM 故障检测方法,图7为该检测方法检测第 i 个 SM 是否发生开关故障的具体流程。

首先,采集第 i 个模块电容电压、开关状态、桥臂电流,根据式(8)计算 k 时刻电容电压的预测值 $u_{c-p}(k)$,根据式(9)计算 k 时刻模块电容电压估计值 $u_{c-c}(k)$ 。其次,将电容电压的估计值 $u_{c-c}(k)$ 和测量值 $u_c(k)$ 进行比较。设 Δu_i 为电容电压误差阈值,

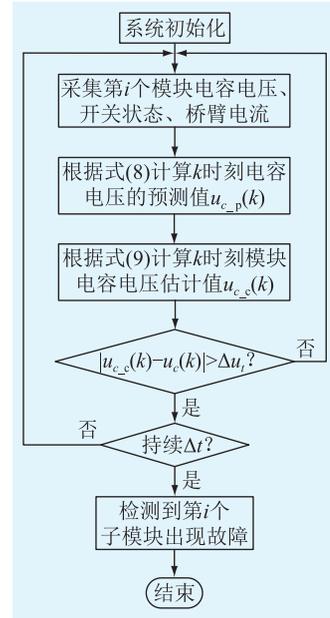


图7 提出的故障检测方法流程

Fig.7 Flow chart of proposed fault detection method

若 $|u_{c-c}(k) - u_c(k)| > \Delta u_i$,且至少持续时间 Δt ,则认为在 MMC 系统中该 SM 出现了故障;否则,认为 MMC 系统正常运行,此检测算法将继续执行。

4 仿真实验

为了验证文中提出的 SM 功率开关故障检测方法的有效性,利用软件 PSCAD/EMTDC 搭建 MMC 并网系统模型进行仿真验证,系统参数见表6。

表6 MMC 仿真系统参数

Table 6 Parameters of MMC simulated system

参数	数值
额定直流电压 V_{dc}/kV	40
负载频率 f/Hz	50
桥臂 SM 数量 N	20
SM 电容 C/mF	4
桥臂电感 L_s/mH	30
等效桥臂电阻 R/Ω	0.01
采样时间 $\Delta T/ms$	0.1
电容电压误差阈值 $\Delta u_i/kV$	0.1
持续时间 $\Delta t/ms$	3.0

4.1 正常状态仿真

图8显示了 MMC 正常运行时系统的运行性能。图8(a)给出了 a 相上桥臂电流 i_{ua} 和下桥臂电流 i_{la} ,图8(b)给出了 a 相上桥臂 SM₁中电容电压的测量值 u_c 和估计值 u_{c-c} 。此时,龙伯格观测器获得的估计值 u_{c-c} 和测量值 u_c 很接近。

4.2 T₁开路故障仿真

考虑 MMC 的 a 相上桥臂 SM₁中发生 T₁开路故

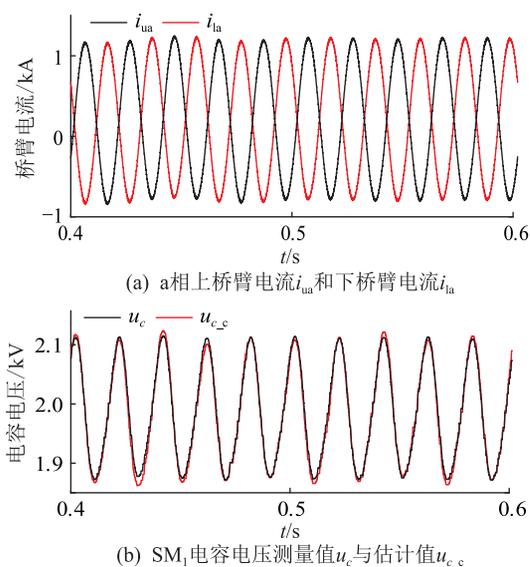


图8 正常运行时的仿真结果

Fig.8 Simulation results under normal operation

故障。图9给出了a相上桥臂电流 i_{ua} 、SM₁电容电压的测量值 u_c 和估计值 u_{c_e} 。故障发生前,SM₁电容电压估计值与测量值基本一致。0.50 s发生故障后,随着时间的推移,电容电压估计值与测量值相偏离,0.52 s时检测出故障。因此,提出的故障检测方法可有效检测出SM₁出现故障,故障检测所需时间为0.02 s。

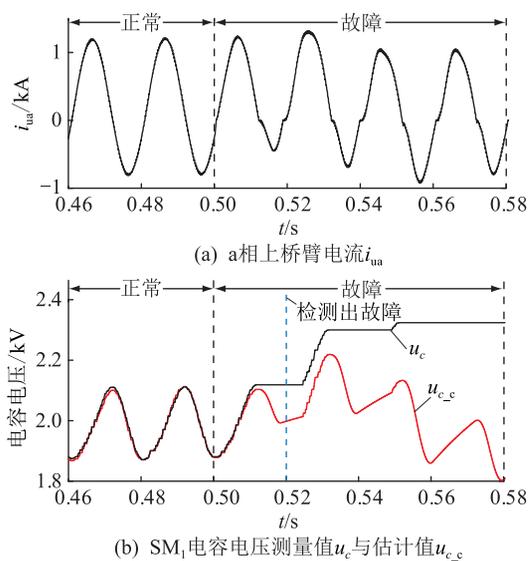


图9 T_1 开路故障时的仿真结果

Fig.9 Simulation results under T_1 open-circuit fault

4.3 T_2 开路故障仿真

考虑MMC的a相上桥臂SM₁中发生 T_2 开路故障。图10给出了a相上桥臂电流 i_{ua} 、SM₁电容电压的测量值 u_c 和估计值 u_{c_e} 。故障发生前,SM₁电容电压估计值与测量值基本一致。0.50 s发生故障后,随着时间的推移,电容电压估计值与测量值相偏离,0.508 s时检测出故障。因此,提出的故障检测方法可有效检测出SM₁出现故障,故障检测所需时间为0.008 s。

偏离,0.508 s时检测出故障。因此,提出的故障检测方法可有效检测出SM₁出现故障,故障检测所需时间为0.008 s。

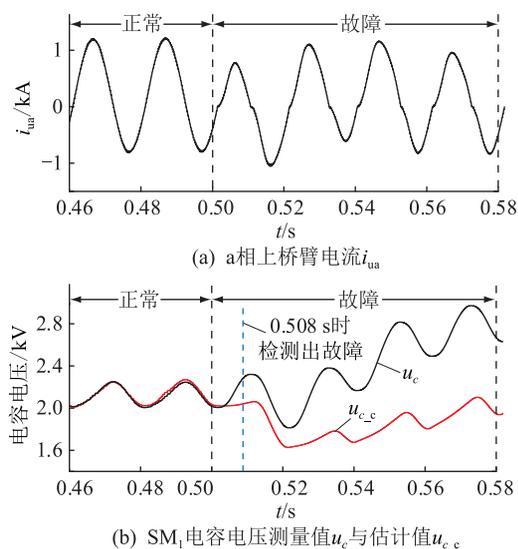


图10 T_2 开路故障时的仿真结果

Fig.10 Simulation results under T_2 open-circuit fault

4.4 T_1 短路故障仿真

考虑MMC的a相上桥臂SM₁中发生 T_1 短路故障。图11给出了a相上桥臂电流 i_{ua} 、SM₁电容电压的测量值 u_c 和估计值 u_{c_e} 。故障发生前,SM₁电容电压估计值与测量值基本一致。0.50 s发生故障后,随着时间的推移,电容电压估计值与测量值相偏离,0.508 s时检测出故障。因此,提出的故障检测方法可有效检测出SM₁出现故障,故障检测所需时间为0.008 s。

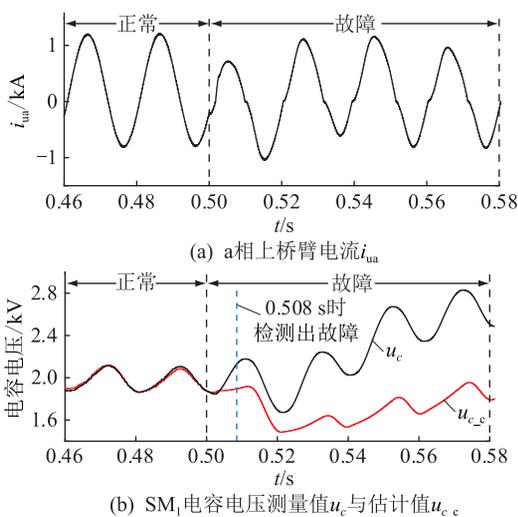


图11 T_1 短路故障时的仿真结果

Fig.11 Simulation results under T_1 short-circuit fault

4.5 T_2 短路故障仿真

考虑MMC的a相上桥臂SM₁中发生 T_2 短路故障。图12给出了a相上桥臂电流 i_{ua} 、SM₁电容电压

的测量值 u_c 和估计值 $u_{c,c}$ 。故障发生前, SM_1 电容电压估计值与测量值基本一致。0.50 s 发生故障后, 随着时间的推移, 电容电压估计值与测量值相偏离, 0.506 s 时检测出故障。因此, 提出的故障检测方法可有效检测出 SM_1 故障, 故障检测所需时间为 0.006 s。

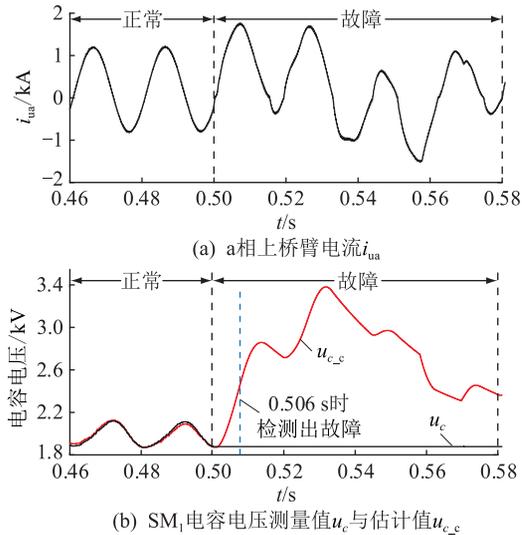


图 12 T_2 短路故障时的仿真结果

Fig.12 Simulation results under T_2 short-circuit fault

5 实验验证

为了验证提出的故障检测方法的可行性和有效性, 在实验室搭建了 MMC 平台, 如图 13 所示, 直流电源用于支撑 MMC 直流侧电压, MMC 交流侧通过变压器连接到电网。系统控制算法在数字信号处理控制器中实现, 控制器的驱动信号通过光纤传输到各个 SM 的驱动板上。系统参数如表 7 所示。

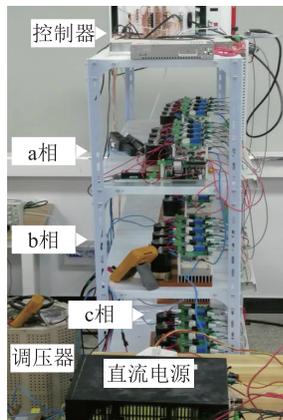


图 13 MMC 故障模拟平台

Fig.13 MMC fault simulation platform

5.1 T_1 开路故障实验

考虑 MMC 的 a 相上桥臂 SM_1 发生 T_1 开路故障, 实验波形如图 14 所示。故障发生前, SM_1 电容电压

表 7 MMC 实验系统参数

Table 7 Parameters of MMC experimental system

参数	数值
额定直流电压 V_{dc}/V	200
负载频率 f/Hz	50
桥臂 SM 数量 N	4
SM 电容 C/mF	3.5
桥臂电感 L_s/mH	1.5
采样时间 $\Delta T/ms$	0.1
持续时间 $\Delta t/ms$	3.0

估计值 $u_{c,c}$ 与测量值 u_c 基本一致。故障发生后, 上桥臂电流 i_{ua} 发生畸变, 随着时间的推移, 电容电压估计值与测量值相偏移。提出的故障检测方法可在故障发生 0.088 s 后检测出 SM_1 发生故障。

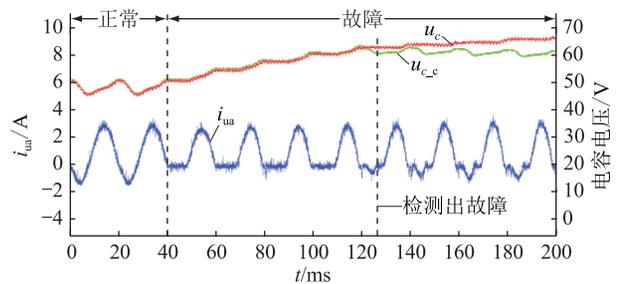


图 14 T_1 开路故障时的实验结果

Fig.14 Experiment results under T_1 open-circuit fault

5.2 T_2 开路故障实验

考虑 MMC 的 a 相上桥臂 SM_1 发生 T_2 开路故障, 实验波形如图 15 所示。故障发生前, SM_1 电容电压估计值 $u_{c,c}$ 与测量值 u_c 基本一致。故障发生后, 上桥臂电流 i_{ua} 发生畸变, 随着时间的推移, 电容电压估计值与测量值相偏离。提出的故障检测方法可在故障发生 0.026 s 后检测出 SM_1 发生故障。

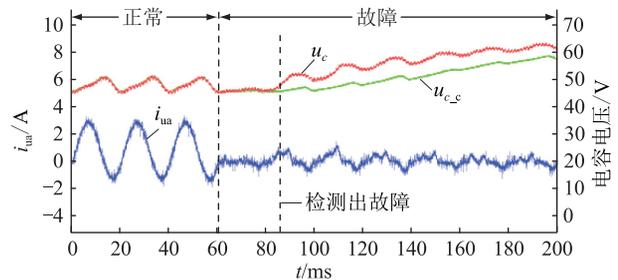


图 15 T_2 开路故障时的实验结果

Fig.15 Experiment results under T_2 open-circuit fault

5.3 T_1 短路故障实验

考虑 MMC 的 a 相上桥臂 SM_1 发生 T_1 短路故障, 实验波形如图 16 所示。故障发生前, SM_1 电容电压估计值 $u_{c,c}$ 与测量值 u_c 基本一致。故障发生后, 上桥臂电流 i_{ua} 发生畸变, 随着时间的推移, 电容电压估计值与测量值相偏离。提出的故障检测方法可

在故障发生 0.024 s 后检测出 SM₁ 发生故障。

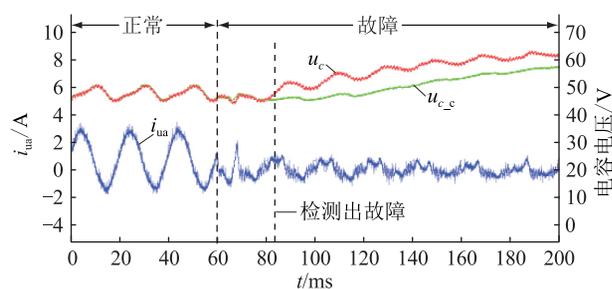


图 16 T₁ 短路故障时的实验结果

Fig.16 Experiment results under T₁ short-circuit fault

5.4 T₂ 短路故障实验

考虑 MMC 的 a 相上桥臂 SM₁ 发生 T₂ 短路故障, 实验波形如图 17 所示。故障发生前, SM₁ 电容电压估计值 u_{c_c} 与测量值 u_c 基本一致。故障发生后, 上桥臂电流 i_{ua} 发生畸变, 随着时间的推移, 电容电压估计值与测量值相偏离。提出的故障检测方法可在故障发生 0.004 s 后检测出 SM₁ 发生故障。

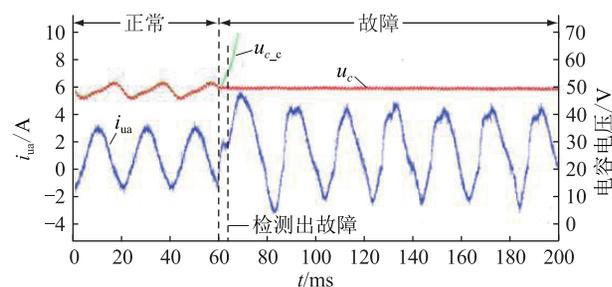


图 17 T₂ 短路故障时的实验结果

Fig.17 Experiment results under T₂ short-circuit fault

6 结语

为了快速有效地检测出故障 SM, 文中分析了 SM 故障特性, 梳理 IGBT 开路或短路故障时 MMC 中电容电压变化规律。基于该故障特性, 提出基于龙伯格观测器的 MMC 故障检测方法, 通过龙伯格观测器, 将 SM 电容电压测量值与估计值进行比较, 从而检测出故障 SM。该方法只要设置固定的算法增益系数即可实现故障的精确诊断, 降低了算法的复杂性。仿真和实验结果均表明, 所提基于龙伯格观测器的故障检测方法能够准确有效地检测出 SM 开路故障和短路故障。

该方法计算较简单、所需测量信息较少且检测准确率高, 具有较强的工程应用价值。后续可开展基于该检测方法的阀控跳闸装置研究, 并研究其与 SM 控制单元中的故障诊断模块的联合检测方法, 不仅可以提升 SM 故障检出率, 还能够辅助分析 SM 故障原因。实用 SM 故障检测方法的研究和应用可

为 MMC 稳定可靠运行提供技术保障。

致谢

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目“适应于城市电网的柔性互联及多潮流控制装置协调运行关键技术研究”(J2021171) 资助, 谨此致谢!

参考文献:

- [1] 李政轩, 宋强, 曾嵘, 等. 海上风电中频汇集和分布式串联直流输电系统[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(22): 7608-7621.
- [2] LI Zhengxuan, SONG Qiang, ZENG Rong, et al. A novel HVDC system integrating offshore wind farms using series-connected distributed MMCs and medium-frequency AC collection network [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(22): 7608-7621.
- [3] 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.
- [4] NGUYEN T H, AL HOSANI K, EL MOURSI M S, et al. An overview of modular multilevel converters in HVDC transmission systems with STATCOM operation during pole-to-pole DC short circuits [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(5): 4137-4160.
- [5] 李鹏, 林金娇, 孔祥平. 统一潮流控制器在苏南 500 kV 电网中的应用[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 20-24.
- [6] LI Peng, LIN Jinjiao, KONG Xiangping. Application of UPFC in the 500 kV southern power grid of Suzhou [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 20-24.
- [7] XU J Z, ZHAO X B, JING H, et al. DC fault current clearance at the source side of HVDC grid using hybrid MMC [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1): 140-149.
- [8] LU M Z, HU J B, ZENG R, et al. Imbalance mechanism and balanced control of capacitor voltage for a hybrid modular multilevel converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(7): 5686-5696.
- [9] 鲁晓军, 向往, 林卫星, 等. 混合型模块化多电平换流器小信号模型及其小信号稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24): 7286-7298, 7502.
- [10] LU Xiaojun, XIANG Wang, LIN Weixing, et al. Research on small signal modelling and small signal stability for hybrid modular multilevel converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(24): 7286-7298, 7502.
- [11] 段军, 谢晔源, 朱铭炼, 等. 模块化多电平换流器子模块旁路方案设计[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 207-213.
- [12] DUAN Jun, XIE Yeyuan, ZHU Minglian, et al. Bypass scheme design for value sub-module of modular multi-level converter [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 207-213.
- [13] CHOI U M, BLAABJERG F, LEE K B. Study and handling methods of power IGBT module failures in power electronic converter systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2517-2533.
- [14] 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.
- [11] 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.
- [12] YANG Q C, QIN J C, SAEEDIFARD M. SubModule failure detection methods for the modular multilevel converter[C]// 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Montreal, QC, Canada. IEEE, 2015: 3331-3337.
- [13] 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.
- [14] ABDELSALAM M, MAREI M I, TENNAKON S B. An integrated control strategy with fault detection and tolerant control capability based on capacitor voltage estimation for modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 2840-2851.
- [15] 李翠, 刘振兴, 柴利, 等. 模块化多电平换流器的子模块开路故障检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6995-7003, 7091.
- LI Cui, LIU Zhenxing, CHAI Li, et al. An open circuit fault detection method for sub-modules in modular multi-level converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6995-7003, 7091.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] SHAO S, WHEELER P W, CLARE J C, et al. Fault detection for modular multilevel converters based on sliding mode observer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(11): 4867-4872.
- [19] HU X, ZHANG J Z, XU S, et al. Detection and location of open-circuit fault for modular multilevel converter[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 115: 105425.
- [20] 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.
- [21] 刘方艳, 汤亚芳. 基于新型滑模观测器的 MMC 子模块 IGBT 开路故障诊断方法[J]. 电力大数据, 2020, 23(8): 71-78.
- LIU Fangyan, TANG Yafang. Open circuit fault diagnosis method of MMC sub-module IGBT based on sliding mode observer[J]. Power Systems and Big Data, 2020, 23(8): 71-78.
- [22] 刘黎, 李康, 黄萌, 等. 基于电压电流特性曲线的 MMC 子模块 IGBT 通态损耗在线计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(23): 19-27.
- LIU Li, LI Kang, HUANG Meng, et al. On-line calculation method of an IGBT on-state loss of an MMC sub-module based on a voltage and current characteristic curve[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(23): 19-27.
- [23] 张彼德, 洪锡文, 刘俊, 等. 基于无监督学习的 MMC 子模块开路故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 98-105.
- ZHANG Bide, HONG Xiwen, LIU Jun, et al. Diagnosis method for sub-module open-circuit fault in modular multilevel converter based on unsupervised learning[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 98-105.
- [24] 马燕君, 谭令其, 马凯, 等. 半桥型 MMC-HVDC 子模块故障诊断与定位方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4600-4609.
- MA Yanjun, TAN Lingqi, MA Kai, et al. A fault detection and location method for sub-module in half-bridge MMC-HVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4600-4609.
- [25] 周登波, 宋述波, 周勇, 等. 基于桶排序和电压离散度阈值的 MMC 子模块电压均衡算法[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(9): 105-111.
- ZHOU Dengbo, SONG Shubo, ZHOU Yong, et al. A voltage balancing algorithm for MMC submodules based on bucket sorting and voltage dispersion threshold[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(9): 105-111.
- [26] 于飞, 王子豪, 刘喜梅. 新型模块化多电平换流器的设计与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 69-77.
- YU Fei, WANG Zihao, LIU Ximei. A gradationally controlled modular multilevel converter and its application[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 69-77.
- [27] 姜斌, 龚雁峰, 李岩. 模块化多电平换流器子模块短路故障分析、检测与定位方法[J]. 南方电网技术, 2019, 13(3): 73-78, 88.
- JIANG Bin, GONG Yanfeng, LI Yan. Short-circuit fault analysis, detection and location method for sub-modules of modular multilevel converters[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(3): 73-78, 88.
- [28] 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.
- [29] KRONE T, XU C Z, MERTENS A. Fast and easily implementable detection circuits for short circuits of power semiconductors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 2871-2879.
- [30] LAMB J, MIRAFZAL B. Open-circuit IGBT fault detection and location isolation for cascaded multilevel converters[J]. IEEE

Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64 (6): 4846-4856.

[31] 王宝安,张涵璐,邓富金. 基于拉依达准则的 MMC 子模块开路故障定位[J]. 电力工程技术,2023,42(1):116-123.

WANG Baoan, ZHANG Hanlu, DENG Fujin. Localization for MMC submodule open-circuit fault based on Pauta criterion [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42 (1): 116-123.

[32] 孙银山,杨晓平,任军辉. 一种具备故障自清除能力的 MMC 新型双子模块拓扑研究[J]. 高压电器, 2021, 57 (8): 115-119.

SUN Yinshan, YANG Xiaoping, REN Junhui. Research on MMC novel dual sub-module topology with fault self-clearance capa-

bility[J]. High Voltage Apparatus,2021,57(8):115-119.

作者简介:



李群

李群(1967),男,博士,研究员级高级工程师,从事柔性输电技术、FACTS 技术在电力系统中的应用、新能源并网技术相关工作(E-mail:Qun_li@sina.com);

林金娇(1988),女,硕士,高级工程师,从事柔性输电控制保护技术、特高压输电控制保护技术相关工作;

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。

Fault detection method for modular multilevel converters based on Luenberger observer

LI Qun¹, LIN Jinjiao¹, DENG Fujin², ZHOU Qi¹, CHEN Shuangfeng²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Modular multilevel converter (MMC), which is composed of a large number of submodules (SM) connected in series, is one of the most promising converters in high voltage field. The open-circuit fault and short-circuit fault of the SM's power switch seriously affect the reliability of the MMC, and it brings great challenges to the stable operation of the MMC. Therefore, in order to quickly detect the faulty SM, a fault detection method of the SM's power switch in the MMC based on Luenberger observer is proposed. Firstly, the fault characteristic of the SM is analyzed, and the model of Luenberger observer is established according to the mathematical relation of the SM capacitor voltage change. Then, the estimated capacitor voltage is calculated by Luenberger observer, and the detection of the power switch fault is realized by comparing the estimated capacitor voltage and the measured capacitor voltage. Finally, the simulation model of the MMC system based on the PSCAD/EMTDC and the experiment platform in the laboratory are respectively built. The simulation and experiment results show that the open-circuit and short-circuit fault of the SM can be detected correctly and effectively, which verifies the validity and feasibility of the proposed method, but each SM needs to be monitored.

Keywords: modular multilevel converter (MMC); submodule fault; fault detection; fault localization; Luenberger observer; capacitor voltage

(编辑 钱悦)