

# 基于滑模观测器的 MMC IGBT 开路故障诊断\*

柏同扬 汪飞 吴春华 郭慧

(上海大学机电工程与自动化学院 上海 200072)

**摘要:** 为了提高模块化多电平变换器(MMC)系统的可靠性,提出了一种基于滑模观测器的 MMC 子模块(SM)开路故障诊断方法。首先根据 MMC 的运行原理设计了滑模观测器。再利用观测器估计的输出与传感器测量的输出构造残差信号,通过对残差信号的分析实现子模块开路故障的检测。然后根据故障子模块输出电压特性确定故障位置。最终,在 MATLAB/Simulink 中搭建单相 MMC 仿真模型,模拟其中的一个子模块的 IGBT 发生开路并进行故障诊断。结果表明提出故障诊断方法的正确性。

**关键词:** 模块化多电平变换器;故障诊断;IGBT 开路;滑模观测器

**中图分类号:** TM46 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

## IGBT open circuit fault diagnosis for MMC based on sliding mode observer

Bai Tongyang Wang Fei Wu Chunhua Guo Hui

(Institute of Electrical and Mechanical Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** To improve the reliability of the modular multilevel converter (MMC) system, an open circuit fault diagnosis method based on sliding mode observer for MMC sub-module(SM) is proposed. First, the sliding mode observer is designed according to the operating principle of MMC. Then, the residual signal is constructed by the output of the observer and the output by the sensor. The residual signal is analyzed to realize the open circuit fault detection. Then, the fault location is determined according to the output voltage characteristic of fault sub-module. Finally, the single-phase MMC simulation model is constructed in Matlab/Simulink, and one of the sub-modules of the IGBT is opened and the fault diagnosis is carried out. The simulation results show the correctness of the proposed fault diagnosis method.

**Keywords:** modular multilevel converter; fault diagnosis; IGBT open circuit; sliding mode observer

## 0 引言

模块化多电平变换器(MMC)自提出后得到各国专家学者的深入研究<sup>[1-4]</sup>。MMC 系统由成百上千个子模块构成,每个子模块的正常工作关系到整个系统安全性和可靠性。在投入冗余子模块以提高变换器的持续运行能力之前需要快速准确地故障诊断。文献[5]详细的分析了各种故障类型并给出了诊断方案。由于某个子模块的 IGBT 发生开路故障并不会造成整个桥臂的失效,故障状态具有隐蔽性,但是危害巨大。因为 MMC 结构的特殊性,不能将其他变换器故障诊断方法直接运用其中<sup>[6-8]</sup>。文献[9]通过测量子模块出口电压进行故障诊断。虽然该方法没有额外增加传感器数量,但是不同于实际工程中的测量电路,工程难以运用。文献[10]的诊断方案中,故障定位时需要先假定一个确定的子模块发生故障,再逐一对所有子模块电压计算,最后给出定位结果。当模块数目过多时,计算量大,故障诊

断时间长。文献[11]考虑电压传感器的测量噪声,利用卡尔曼滤波器估计状态变量和实际测量的变量比较,检测子模块开路故障,但是观测器的设计较为复杂。

本文针对 MMC 子模块 IGBT 开路故障提出了一种基于滑模观测器的在线诊断方法。文章首先分析了正常运行的 MMC 模型,并梳理了正常和故障的子模块开关状态的特点,确定观测变量。利用李雅普诺夫方法证明了观测器的稳定性,设计了滑模观测器。通过实时比较观测量和检测量,准确快速地进行故障诊断。

## 1 MMC 运行原理及子模块(SM)开关状态

### 1.1 MMC 运行原理

图 1 所示为单相 MMC 等效电路。单相相单元包含上下两个桥臂,各有 N 个子模块和 1 个桥臂电抗器 L,桥臂等效电阻 R 串联组成。 $L_s$  为交流侧电感, $R_s$  为交流侧电阻。

收稿日期:2017-03

\* 基金项目:上海市教育委员会科研创新项目(15ZZ043)资助

每个 SM 是由 2 个带反并联二极管的 IGBT 和 1 个电容  $C_{sm}$  构成的半桥结构<sup>[12]</sup>。

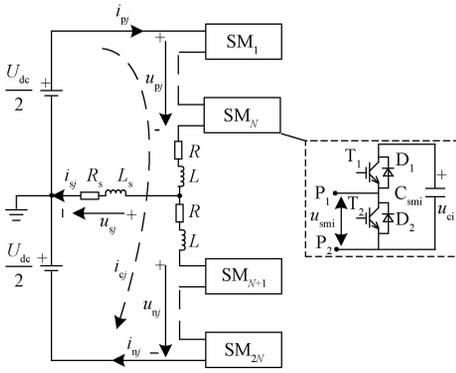


图 1 MMC 单相等效电路

$u_{sj}$  表示 MMC 交流侧输出电压 ( $j = a, b, c$ , 下同);  $i_{sj}$  表示  $j$  相交流侧输出电流;  $u_{pj}, u_{nj}$  表示  $j$  相上下桥臂输出电压 ( $p$  表示上桥臂,  $n$  表示下桥臂, 下同);  $i_{pj}, i_{nj}$  表示  $j$  相上下桥臂输出电流;  $i_{cj}$  为表示  $j$  相环流;  $U_{dc}$  表示直流母线电压。  $u_{smi}, u_{ci}$  表示第  $i$  个 SM 出口电压和第  $i$  个 SM 电容电压 ( $i = 1, 2, \dots, 2N$ , 下同)。根据基尔霍夫定律得出 MMC 运行时的电压电流方程:

$$\begin{cases} Ri_{pj} + L \frac{di_{pj}}{dt} = \frac{U_{dc}}{2} - u_{pj} - u_{sj} \\ Ri_{nj} + L \frac{di_{nj}}{dt} = \frac{U_{dc}}{2} - u_{nj} + u_{sj} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_{pj} = \sum_{i=1}^N (Si u_{ci}) \\ u_{nj} = \sum_{i=N+1}^{2N} (Si u_{ci}) \end{cases} \quad (2)$$

$$Si = \begin{cases} 1, & g_1 = 1; g_2 = 0 \\ 0, & g_1 = 0; g_2 = 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$i_{sj} = i_{pj} - i_{nj} \quad (4)$$

$$i_{cj} = (i_{pj} + i_{nj})/2 \quad (5)$$

式(3)中  $S_i$  为第  $i$  个子模块的开关函数,  $g_1, g_2$  为  $T_1, T_2$  的驱动信号。整理式(1)~(5)可得:

$$\begin{cases} L \frac{di_{sj}}{dt} = -Ri_{sj} + (u_{nj} - u_{pj}) - 2u_{sj} \\ L \frac{di_{cj}}{dt} = -Ri_{cj} - \frac{1}{2}(u_{nj} + u_{pj}) + \frac{1}{2}U_{dc} \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可知,通过调节上下桥臂电压之差得到  $i_{sj}$ , 通过调节上下桥臂电压之和得到  $i_{cj}$ 。

### 1.2 子模块开关状态

在实际工作中的功率开关管可能会发生开路和短路故障<sup>[13]</sup>。由于短路故障电流大,一般在硬件电路上进行处理;并且开路故障不易检测,影响了系统可靠运行。因此,本文研究图 2 所示的 IGBT 开路故障。

为了诊断 SM 的 IGBT 开路故障,将正常工作和发生

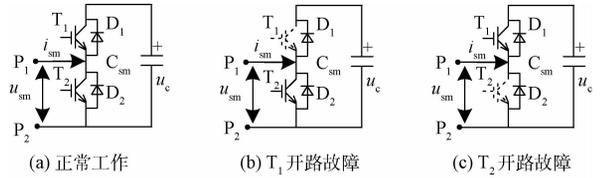


图 2 SM 开路故障

开路故障 SM 的开关状态、电流通路、出口电压归纳如表 1、2 所示。以  $T_1$  开路故障为例,分析子模块的开路故障特征(本文子模块皆指非冗余子模块)。当  $T_1$  开路的 SM 处于工作模式 1、2、4 时,其运行状态与正常工作的 SM 相同。当 SM 电流  $i_{sm} < 0$ , 处于模式 3 时,  $i_{sm}$  经  $P_2$  结点,通过二极管  $D_2$ , 回到  $P_1$  结点。SM 电流通路发生改变,此时 SM 出口电压  $u_{sm} = 0$ 。而正常工作模式 SM 出口电压为  $u_c$ , 因此,  $T_1$  开路期间会使得  $u_c$  无放电通路而升高。

表 1 SM 正常工作和  $T_1$  开路故障时开关状态

SM 电流 $i_{sm}$	开关函数 $S_i$	工作模式	正常工作 $i_{sm}$ 电流通路	出口电压 $u_{sm}$	$T_1$ 开路故障 $i_{sm}$ 电流通路	出口电压 $u_{sm}$
> 0	1	1	$P_1 \rightarrow D_1 \rightarrow C_{sm} \rightarrow P_2$	$u_c$	$P_1 \rightarrow D_1 \rightarrow C_{sm} \rightarrow P_2$	$u_c$
	0	2	$P_1 \rightarrow T_2 \rightarrow P_2$	0	$P_1 \rightarrow T_2 \rightarrow P_2$	0
< 0	1	3	$P_2 \rightarrow C_{sm} \rightarrow T_1 \rightarrow P_1$	$u_c$	$P_2 \rightarrow D_2 \rightarrow P_1$	0
	0	4	$P_2 \rightarrow D_2 \rightarrow P_1$	0	$P_2 \rightarrow D_2 \rightarrow P_1$	0

表 2 SM 正常工作和  $T_2$  开路故障时开关状态

SM 电流 $i_{sm}$	开关函数 $S_i$	工作模式	正常工作 $i_{sm}$ 电流通路	出口电压 $u_{sm}$	$T_2$ 开路故障 $i_{sm}$ 电流通路	出口电压 $u_{sm}$
> 0	1	1	$P_1 \rightarrow D_1 \rightarrow C_{sm} \rightarrow P_2$	$u_c$	$P_1 \rightarrow D_1 \rightarrow C_{sm} \rightarrow P_2$	$u_c$
	0	2	$P_1 \rightarrow T_2 \rightarrow P_2$	0	$P_1 \rightarrow D_1 \rightarrow C_{sm} \rightarrow P_2$	$u_c$
< 0	1	3	$P_2 \rightarrow C_{sm} \rightarrow T_1 \rightarrow P_1$	$u_c$	$P_2 \rightarrow C_{sm} \rightarrow T_1 \rightarrow P_1$	$u_c$
	0	4	$P_2 \rightarrow D_2 \rightarrow P_1$	0	$P_2 \rightarrow D_2 \rightarrow P_1$	0

## 2 基于滑模观测器的故障诊断方法

### 2.1 滑模观测器设计

当子模块 IGBT 发生开路故障时, SM 出口电压发生改变。由式(6)可知,当开路故障发生时,输出电流  $i_{sj}$  会发生畸变,并且在相间出现较大的环流  $i_{cj}$ 。因此,根据在故障状态下电流观测器的估计值与实时测量值产生的残差便可对开路故障进行诊断。为了便于分析,将式(6)写成状态方程的形式:

$$di/dt = Ai + Bu + Dw \quad (7)$$

式中:  $A = \begin{bmatrix} -R/L & 0 \\ 0 & -R/L \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1/L & -1/L \\ -1/2L & -1/2L \end{bmatrix},$

$D = \begin{bmatrix} -2/L & 0 \\ 0 & 1/2L \end{bmatrix}, i = [i_{sj} \ i_{cj}]^T, u = [u_{nj} \ u_{pj}]^T,$

$w = [u_{sj} \ U_{dc}]^T$ 。基于式(7)选择  $i = [i_{sj} \ i_{cj}]^T$  作为观测

变量,定义滑模面  $S = \tilde{i} = i - i$ , 则滑模观测器方程可为:

$$d\hat{i}/dt = A\hat{i} + Bu + Dw - K\text{sign}(\tilde{i}) \quad (8)$$

$K = \begin{bmatrix} k_{sj} & 0 \\ 0 & k_{cj} \end{bmatrix}$ ,  $k_{sj}$ 、 $k_{cj}$  为正常数; sign 为符号函数。符号

“ $\sim$ ”代表对应变量的估计值,“ $\tilde{\cdot}$ ”代表对应变量的误差。为了保证滑模观测器的稳定性选取  $V = 1/2S^T S$  为李雅普诺夫函数<sup>[14-15]</sup>。要求其导数  $\dot{V} = S^T \dot{S} =$

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_{sj} & \tilde{i}_{cj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{R}{L}\tilde{i}_{sj} - k_{sj}\text{sign}(\tilde{i}_{sj}) \\ -\frac{R}{L}\tilde{i}_{cj} - k_{cj}\text{sign}(\tilde{i}_{cj}) \end{bmatrix} < 0, \text{ 可以推出当}$$

$k_{sj} > \left| -\frac{R}{L}\tilde{i}_{sj} \right|, k_{cj} > \left| -\frac{R}{L}\tilde{i}_{cj} \right|$  时,  $\dot{V} < 0$ 。只要选择合适的

$k_{sj}$ 、 $k_{cj}$  就可以保证滑模观测器收敛到实际值。由于符号函数易使滑模面发生高频抖振,为了平滑观测器估计值实际选用饱和函数取代。

### 2.2 故障诊断方法

IGBT 开路故障诊断包含了故障检测和故障定位两个部分。故障检测的方法是实时计算观测器估计的输出电流和环流与传感器测量的输出电流和环流之间的残差,比较残差与设定阈值之间的大小。如果两项残差均大于设定的阈值,说明该相有子模块发生开路故障,否则正常。故障定位方法是通过对电容电压的判断实现的。当某个子模块发生开路故障时,由于电流通路的改变,该子模块电压会升高。当该电压减去电容参考电压大于设定的电压阈值时,即判断出该子模块发生了开路故障。该检测和定位方法具有不改变原有测量电路结构、防止误判、诊断时间短、观测器设计简单等优点。

以 a 相为例,MMC 子模块 IGBT 开路故障诊断算法流程如图 3 所示。诊断算法流程分为检测和定位两部分。图 3 中  $I_{sth}$ 、 $I_{cth}$ 、 $U_{cth}$  分别为输出电流阈值、环流阈值、电压阈值,  $C_c$ 、 $C_u$  表示电流电压计数变量,子模块  $l$  有最大电压是  $u_{cl}$ 。

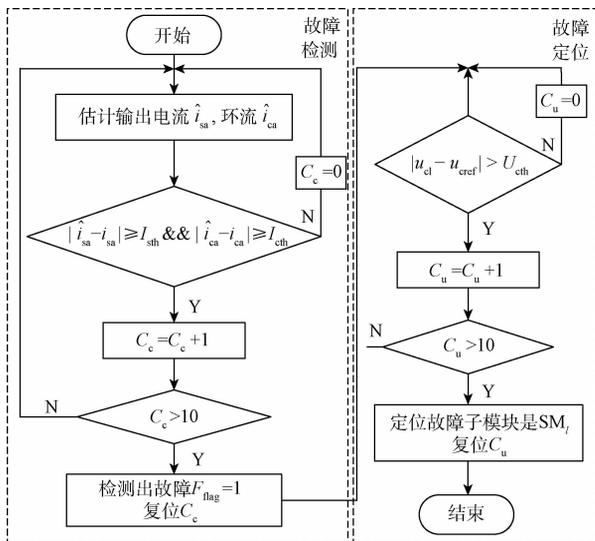
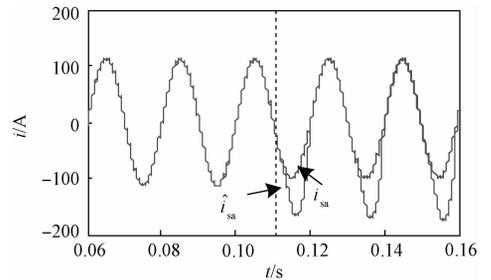


图 3 开路故障诊断流程

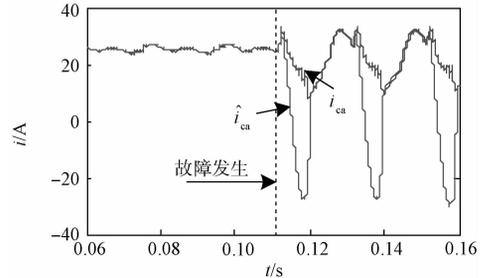
### 3 仿真实验

为了验证所提方法的有效性,在 MATLAB/Simulink 里搭建了如图 1 所示的一个单相 MMC 系统。直流母线电压  $U_{dc} = 10 \text{ kV}$ , 桥臂子模块数目  $N = 10$ , SM 电容参考电压  $u_{\text{cref}} = 1 \text{ kV}$ , SM 电容  $C_{\text{sm}} = 10 \text{ mF}$ , 桥臂电感  $L = 3 \text{ mH}$ , 等效电阻  $R = 0.1 \Omega$ , 交流侧电感和电阻分别为  $L_s = 10 \text{ mH}$ ,  $R_s = 40 \Omega$ , 交流输出频率  $f_s = 50 \text{ Hz}$ , 载波频率  $f_c = 2 \text{ kHz}$ , 输出电流和环流阈值都设定为  $I_{\text{sth}} = I_{\text{cth}} = 5 \text{ A}$ , 电压阈值  $U_{\text{cth}} = 20 \text{ V}$ , 观测器系数  $k_{\text{sa}} = 8\ 500, k_{\text{ca}} = 4\ 000$ 。本文以  $T_1$  发生开路故障为例进行仿真。

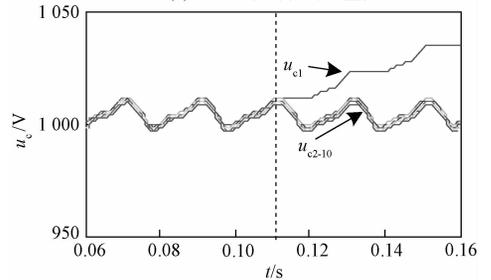
假定  $SM_1$  的  $T_1$  在  $0.11 \text{ s}$  发生开路故障,系统实施了故障检测和定位算法。仿真波形如图 4 所示。



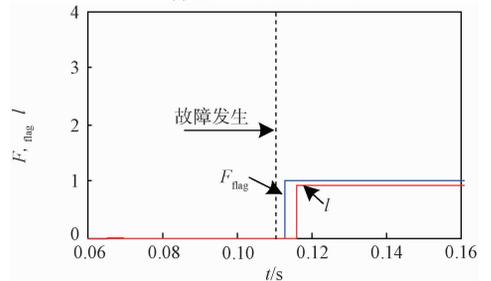
(a) 输出电流的估计值与测量值



(b) 环流的估计值与测量值



(c) 上桥臂子模块输出电压



(d) 故障检测及定位结果

图 4 仿真波形

在子模块未发生故障之前,从图 4(a)、(b)可以看出观测器估计电流很好地跟踪了实际检测电流。在 0.113 s 时,观测器估计值和测量值之间的偏差大于设定的 5A。在图 4(d)故障标志由  $F_{\text{flg}}=0$  跳变为  $F_{\text{flg}}=1$ ,即判断出了故障。图 4(c)是上桥臂 SM 电容电压,在 0.11 s 开路故障发生后,电压就逐渐升高。图 4(d)  $l$  为定位结果输出值,在检测到有故障后,经过 3 ms,  $l$  由 0 跳变为 1,即定位出 SM<sub>1</sub> 发生了故障。仿真结果表明所提出的基于滑模观测器的 MMC 子模块 IGBT 开路故障诊断方法是正确、有效的,能够在不增加额外的测量电路实现 IGBT 的在线开路故障诊断。

## 4 结 论

本文从 MMC 的数学模型出发,分析了子模块发生开路故障的输出特性,并在此基础上建立了 MMC 输出电流和环流的滑模观测器。通过对 MMC 运行状态跟踪,分析残差,进行故障的诊断。仿真结果表明,设计的滑模观测器可以检测系统发生故障,并可以定位出哪一个子模块发生了开路故障。基于滑模观测器的故障诊断方法,具有不改变硬件电路结构、不需要对子模块电容电压逐一观测、观测器设计简单、诊断时间短的特点,可以作为提高 MMC 系统运行可靠性的一种手段。

## 参考文献

- [1] LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range[C]. IEEE Power Tech Conference Proceedings, 2003: 23-26.
- [2] 杨晓峰, 郑琼林, 薛尧, 等. 模块化多电平换流器的拓扑和工业应用综述[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 1-10.
- [3] 王新颖, 汤广福, 陈宇, 等. 一种模块化多电平 DC/DC 变换器的基频调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1987-1998.
- [4] 常非, 杨中平, 林飞. 具备直流故障清除能力的 MMC 多电平子模块拓扑[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 44-49.
- [5] 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.

- [6] 万晓凤, 胡海林, 余运俊, 等. 基于独立量分析的 NPC 光伏逆变器故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(12): 1915-1924.
- [7] 李猛, 王友仁. 电力电子电路软故障诊断方法对比分析[J]. 电子测量技术, 2015, 38(7): 110-114.
- [8] 张朝龙, 何怡刚, 袁莉芬, 等. 基于 GMKL-SVM 的模拟电路故障诊断方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9): 1989-1995.
- [9] HAGHNAZARI S, KHODABANDEH M, ZOLGHADRI M R. Fast fault detection method for modular multilevel converter semiconductor power switches[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(2): 165-174.
- [10] 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.
- [11] DEND F, CHEN Z, KHAN M R, et al. Fault detection and localization method for modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 30(5): 2721-2732.
- [12] 康润生, 张锐. 模块化多电平逆变器的仿真分析[J]. 电子测量技术, 2016, 39(3): 23-28.
- [13] 李志红, 包广清. 基于无刷直流电机电压型逆变器开路故障检测方法的仿真研究[J]. 电子测量技术, 2009, 32(7): 119-121.
- [14] 王福超, 田大鹏, 王昱棠. 基于简化干扰观测器的光电平台稳定与评估[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(12): 13-17.
- [15] 张晓光, 李正熙. 无电压传感器逆变器开路故障诊断方法[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(4): 84-92.

## 作者简介

**柏同杨**, 1992 年出生, 硕士研究生, 研究方向为模块化多电平变换器故障诊断。

E-mail: tongyangbai@126.com

**汪飞**(通讯作者), 1981 年出生, 博士, 副教授, 研究方向为新能源发电与微电网技术。

E-mail: f. wang@shu.edu.cn