

文章编号: 1006-4710(2012)02-0210-06

# IGBT 高压串联组件的失效检测与恢复策略

宁大龙, 同向前

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 针对 IGBT 串联组件中失效器件导致整个装置异常的问题, 提出了一种 IGBT 器件开路失效的检测方法与组件功能恢复策略。从 IGBT 的内部结构分析了器件失效机理, 借助于 IGBT 驱动电路监测组件中各个 IGBT 的状态, 根据状态反馈对 IGBT 器件的开路失效故障进行诊断和定位, 针对 IGBT 的开路失效故障, 设计了在串联组件阻断后吸合相应旁路开关以恢复组件功能的重启动策略。建立了串联组件中 IGBT 失效监控实验系统。实验结果表明该系统能准确识别组件内失效的 IGBT 器件, 并及时可靠地恢复了 IGBT 串联组件的正常开关功能。

**关键词:** IGBT 串联组件; IGBT 失效; 开路故障; 旁路开关

中图分类号: TM46 文献标志码: A

## Failure Detection and Recovery Strategy of High Voltage Series Connected IGBT Stack

NING Dalong, TONG Xiangqian

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Aiming at the faults of power electronic equipment caused by the failure IGBT in a series connected IGBT stack, the strategy of failure IGBT detection and series stack restart is proposed. The failure mechanism is analyzed from the internal structure of semiconductor device, and the open circuit failure IGBT in the series IGBT stack is diagnosed and located based on the feedback signal from IGBT's gate driving circuit, and then the stack with the failure IGBT is restarted by closing the bypass-switch paralleled with the failure IGBT during the period the stack is blocked. The experimental system of the series IGBT stack is established, and the results show that the failure IGBT can be identified effectively, and the normal switching patterns of the series IGBT stack can be resumed promptly and reliably.

**Key words:** series connected IGBT stack; IGBT failure; open circuit fault; bypass-switch

电力电子技术在电力系统、风力发电并网、节能等领域得到了广泛应用,但在诸多高压应用场所,电力电子器件的耐压成为阻碍电力电子装置高压应用的瓶颈。

将 IGBT 器件直接串联构成组件是最直接有效地提高装置耐压水平的方法,对于串联 IGBT 组件运行时存在的内部 IGBT 器件电压分配不均衡问题,多种门极控制型均压方法已被提出和研究<sup>[1]</sup>。

在串联组件的运行过程中,内部的某个 IGBT

器件失效会引起串联组件故障,严重时将导致整个装置损坏,因而,快速准确地检测出组件内失效的 IGBT 器件并采取合理的保护措施是提高高压电力电子装置运行可靠性的必要途径。

目前,许多文献从电力电子装置输出角度研究了 IGBT 器件失效的检测方法,但对于串联组件中单个 IGBT 的失效检测和组件功能恢复策略却鲜有论述。文献[2-3]综述了 IGBT 器件失效的检测方法,通过检测转子磁链轨迹变化,或对装置直

收稿日期: 2012-03-06

基金项目: 陕西省科技计划基金资助项目(2010K09-09)。

作者简介: 宁大龙(1984-),男,陕西乾县人,博士生,研究方向为电能质量控制与柔性直流输电技术。E-mail: xautndl@yahoo.com.cn。同向前(1961-),男,陕西户县人,博士,教授,博导,研究方向为现代电力电子技术及其在电力系统中的应用。E-mail: xqtong@xaut.edu.cn。

流侧电流的频谱分析来判断 IGBT 器件是否发生开路失效。该方法对串联组件应用时内部某个器件的开路失效不能给予准确定位。文献[4]研究了在 IGBT 器件开关瞬间的米勒效应区,检测门极电压的变化情况以判断器件的故障状态,该方法对检测电路精度要求较高,且线路寄生参数对检测结果影响较大。文献[5]通过外部回路直接监测串联的各个 IGBT 器件集射极电压,当承受电压过高时认为 IGBT 器件发生开路失效,装置停运,该方法的检测精度低,系统结构复杂,且并未对器件开路失效进行处理。文献[6-8]检测器件开通期间饱和和压降变化以判断 IGBT 是否发生短路失效,但未对短路故障进行处理。

针对因串联 IGBT 开路失效影响组件运行的问题,本研究从半导体器件结构角度分析了 IGBT 失效机理,通过检测每只 IGBT 在开通期间承受的电压来反馈 IGBT 的运行状态,根据回报的逻辑信息设计了对发生开路失效的 IGBT 的检测方案,提出了一种解决 IGBT 串联组件运行时器件开路失效时的开关旁路处理方法,通过实验验证了该方法的可行性。

## 1 IGBT 器件失效机理

基于 IGBT 器件的电力电子装置在运行时半导体器件自身的材料缺陷或装置外部运行条件恶化会引起 IGBT 工作异常,严重时可能导致器件失效。IGBT 内部等效晶体管热电击穿、器件运行时集射极过电压击穿、开关瞬间电磁脉冲使 IGBT 门极功能弱化等原因是引起 IGBT 器件管芯失效的主要外来因素<sup>[9]</sup>。

图 1 所示为 IGBT 器件的等效结构<sup>[10]</sup>。等效 PNP 结构中漂移区厚度决定了器件的耐压水平。IGBT 开通时半导体内漂移区两侧的载流子会先于中间部分产生复合运动,即存在电流集边效应,而关断时漂移区两侧载流子先达到平衡状态,中间部分载流子复合拖尾形成电流夹紧效应。

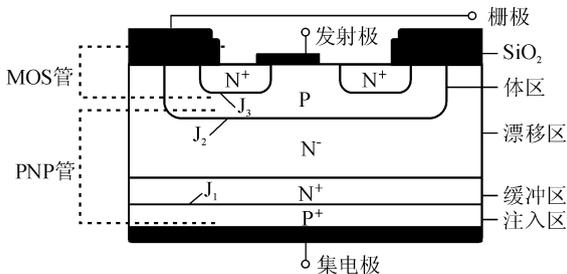


图 1 IGBT 器件结构

Fig. 1 Structure of IGBT device

IGBT 器件集射极承受正向电压阻断时,漂移区  $J_2$  结的空间电荷区向缓冲区方向延伸,当承受电压使  $J_2$  结空间电荷区展宽至整个漂移区时,IGBT 发生雪崩击穿,器件集电极电流激增,管芯温度升高,PN 结中载流子完全被激发,至使管芯温度进一步升高,最终发生热电击穿效应。

IGBT 开关过程中漂移区电流集边、夹紧效应同样可能引起类似的热电效应。发生热电击穿的 IGBT 器件内部出现半导体晶格熔融现象,从外部线路角度看,损伤后的晶格表现为短路特性。

在图 1 所示的器件结构中,IGBT 的开通、关断是通过施加栅极电压使体区中 P 区靠近  $\text{SiO}_2$  绝缘层一侧形成导电沟道,发射极通过沟道向漂移区注入电荷控制的。但限于  $\text{SiO}_2$  层耐压,IGBT 器件门极最大可承受电压仅为数十伏,开关过程的电磁脉冲或静电可能造成栅极  $\text{SiO}_2$  绝缘层损坏或者  $J_3$  结导电沟道永久消失,器件失去通断控制能力,IGBT 呈现开路特性。

## 2 串联组件中 IGBT 器件的失效处理方法

串联组件中某个 IGBT 器件的开路失效或者驱动电路故障,都将引起整个串联组件发生开路故障。组件开通时正常运行的 IGBT 器件集射极电压下降,而开路失效器件承受的电压上升,当承受电压达到自身额定电压时,该器件发生雪崩击穿,流过整个组件的电流将陡然上升,组件内串联的其余 IGBT 运行条件恶化。

在 IGBT 组件开通期间,当内部的某个 IGBT 器件集射极承受电压超过设定的限值时,判断该 IGBT 发生开路故障,在该器件承受电压上升至额定电压水平前封锁组件脉冲,利用与故障 IGBT 器件并联的开关旁路该器件,整个组件依靠设计的电压裕量冗余运行。若组件中某个 IGBT 发生短路失效,则故障后组件仍依靠设计的电压裕量冗余运行。

IGBT 器件开关频率高、承受高功率耐量等运行特性限制了旁路开关的选取,若旁路开关采用 IGBT 器件时备用的 IGBT 与串联组件内的 IGBT 器件承受电压相同,则 2 只 IGBT 可能同时因开关过程功率脉冲造成开路失效。采用晶闸管旁路时在两电平拓扑结构的每个开关周期中上、下桥臂存在换流过程,要求旁路晶闸管达到 IGBT 器件的开关速度等级,显然晶闸管不宜用作 IGBT 器件的旁路开关。选用机械开关旁路可以在串联组件阻断期间吸合,

对旁路开关容量要求小,且投入后一直处于闭合状态。

图2所示的串联组件由3只IGBT器件串联构成,该组件具有允许两只IGBT串联运行所需要的电压裕量。 $K_x$ 是每只IGBT器件并联的旁路机械开关,阻容 $C_{1x}$ 、 $C_{2x}$ 、 $R_{1x}$ 、 $R_{2x}$ 、 $R_{3x}$ 和 $D_x$ 组成动、静态均压支路,DRV $_x$ 是门极驱动电路,PWM是组件中IGBT门极驱动信号, $FB_x$ 、 $CTL_x$ 分别是每只器件的状态反馈信号和旁路开关控制信号, $x$ 是串联器件的序号。

监测保护板对控制侧和主回路进行光电隔离,并对回报的IGBT器件信息 $FB_x$ 进行处理,将故障状态信息反馈给上位CPU,CPU通过 $CTL_x$ 端控制旁路开关投入以排除组件故障。

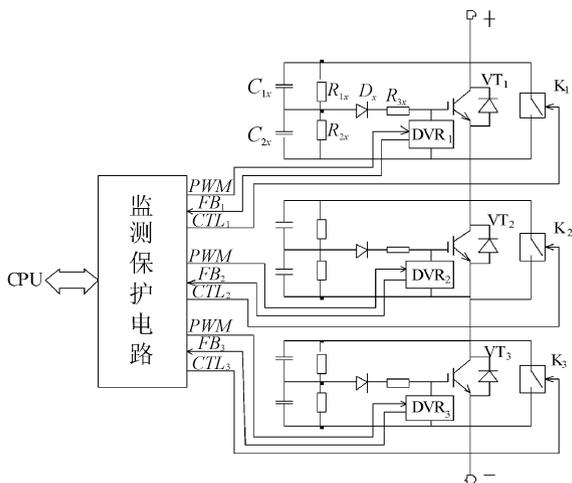


图2 IGBT串联组件原理示意图

Fig.2 Scheme of series connected IGBT stack

串联组件运行时若监测保护电路检测到组件内IGBT器件 $VT_1$ 发生开路失效,则首先在 $VT_1$ 管承受电压上升至额定电压前封锁IGBT串联组件的PWM驱动脉冲,再通过控制端 $CTL_1$ 投入与开路器件 $VT_1$ 并联的旁路开关 $K_1$ ,待开关保持吸合状态后重新开通IGBT组件的驱动脉冲,此时 $VT_2$ 、 $VT_3$ 与旁路开关 $K_1$ 构成运行回路。

在IGBT开路失效故障处理期间,整个串联组件处于阻断状态。当开路故障器件被开关旁路后,组件依靠设计的电压裕量恢复运行,待计划检修时更换故障器件。考虑到串联组件仅设计有1只IGBT的冗余量,为了保证组件安全,故障时组件内仅允许1只IGBT器件的旁路开关吸合。

### 3 串联组件中失效IGBT的检测

如图2所示,每个IGBT驱动电路(1SD210F2)

都具有一个PWM输入信号和一个IGBT状态反馈信号 $FB_x$ 。PWM信号和 $FB_x$ 信号的配合关系如图3所示。

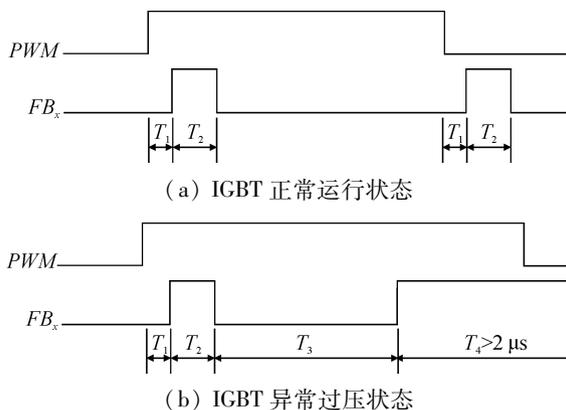


图3 不同状态下IGBT回报信号 $FB_x$

Fig.3 Feedback signal  $FB_x$  at different conditions

如图3(a)所示,正常运行时在每个PWM边沿后的规定时段内, $FB_x$ 上产生一个脉冲信号,表示IGBT器件正常开通或关断,其中 $T_1 = 450 \text{ ns}$ 、 $T_2 = 900 \text{ ns}$ ;当监测保护电路检测到 $FB_x$ 信号不满足要求时(缺脉冲或脉宽超时),判定IGBT器件出现异常。

若IGBT器件开路失效,当串联组件的各个IGBT接收到PWM开通信号时,开路失效的IGBT器件会承受高电压,在相应的 $FB_x$ 上提前出现图3(b)所示的持续高电平,且 $T_4 > 2 \mu\text{s}$ 。

若IGBT器件未发生开路失效但装置发生负载短路故障,整个串联组件在开通期间承受与阻断时相同大小的电压,组件内串联的每只IGBT器件回报信号 $FB_x$ 均出现图3(b)所示情况。

为避免装置负载短路引起旁路开关误动作,通过监测保护电路对组件中IGBT的回报信号 $FB_x$ 进行对比,若2只以上IGBT的 $FB_x$ 信号出现图3(b)情况,则判断装置发生负载短路类故障,此时监控系统将封锁组件的全部驱动脉冲。

根据上述不同工况下IGBT反馈信号 $FB_x$ ,设计故障判断逻辑单元,如图4所示。

正常运行时反馈信号 $FB_x$ 中 $T_1 = 450 \text{ ns}$ 、 $T_2 = 900 \text{ ns}$ ,开路故障时 $T_4 > 2 \mu\text{s}$ ,因而若 $FB_x$ 维持高电平时间超过 $2 \mu\text{s}$ 或在PWM边沿时刻 $FB_x$ 低电平持续时间超过 $1 \mu\text{s}$ ,则IGBT驱动器故障;IGBT正常开通后若 $FB_x$ 出现 $2 \mu\text{s}$ 以上高电平认为该IGBT发生开路失效;当监测电路判断串联组件内器件同时出现开路失效时,则认为装置发生短路类故障。

设置故障标志位 $FD_x$ 和 $FS_x$ , $FD_x$ 表示组件中串联的第 $x$ 只IGBT器件或驱动器故障, $FS_x$ 对发

生故障的类型判别,为后续故障元器件更换提供依据。

故障处理完毕后,监控系统利用 CLR 信号清除锁存的故障信息。

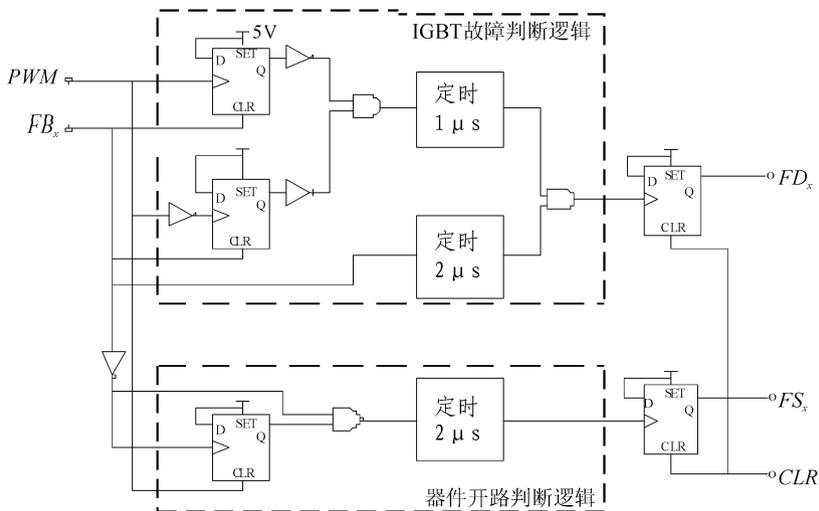


图4 IGBT 故障检测逻辑  
Fig. 4 IGBT faults detection logic

表 1 以组件中 IGBT 器件  $VT_1$  发生故障为例,利用监测保护板对回报信号  $FB_x$  进行分析,给出了

在不同反馈信息情况下故障标志位  $FD_x$  与  $FS_x$  的组合状态。

表 1 串联 IGBT 故障时状态标志与故障类型  
Tab. 1 Flags and fault types when IGBT faults in a stack

$FB_x$ 信号状态	故障标志位	组件故障类型
1. $FB_x$ 中脉冲 $T_1$ 和 $T_2$ 正常(图 3(a)所示)	$FD_x = 0, FS_x = 0$	系统正常
2. $FB_1$ 中 $T_1, T_2$ 超时,或 $FB_1$ 恒为高、低电平	$FD_1 = 1, FS_1 = 0$	$VT_1$ 驱动器故障
3. $FB_1$ 中 $T_2$ 脉冲回报后,再次出现由低到高的脉冲,且高电平持续 $2 \mu s$ 以上(图 3(b)所示)	$FD_1 = 1, FS_1 = 1$	$VT_1$ 管开路失效
4. 组件内串联 IGBT 回报信号 $FB_x$ 均出现图 3(b)所示情况	$FD_x = 1, FS_x = 1$	系统短路故障

### 4 实验及结果分析

在搭建的串联 IGBT 组件中对设计的故障检测方案进行实验验证。实验线路如图 2 所示,组件由 3 只 6.5kV/400A IGBT 器件串联,每只 IGBT 器件由独立的门极均压和驱动电路构成,电路均采用无感元件,监测保护单元利用 CPLD 可编程器件对组件中 IGBT 的反馈信号  $FB_x$  进行分析,将故障标志位反馈给上位 CPU,监测保护单元与器件门极驱动电路之间通过光纤隔离。

#### 4.1 故障信号检测实验

门极驱动电路中判断 IGBT 器件开路失效的阈值电压为 1.2 kV,实验中将直流电压加至 1.2 kV 对

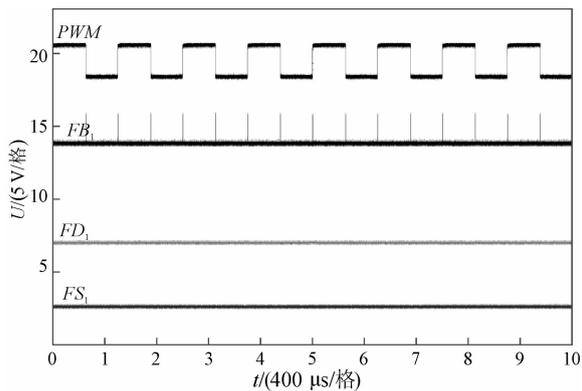
串联组件中  $VT_1$  管在不同工况下进行测试,结果如图 5 所示。

图 5(a)是串联组件正常运行时的实验波形,在 PWM 信号的每个边沿  $FB_1$  回报脉冲信号,状态标志位均为低电平。

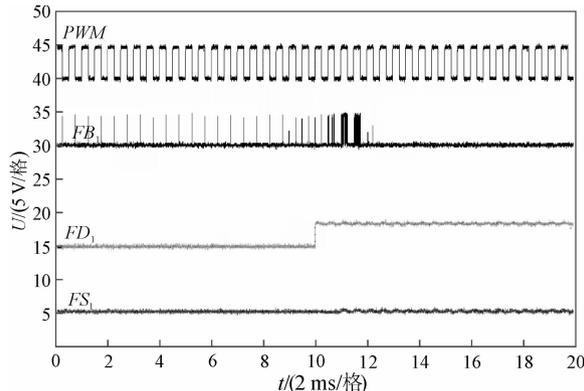
图 5(b)中  $VT_1$  管正常运行时,突然发生 IGBT 门极驱动电路断线故障, $FB_1$  信号变为低电平, $FD_1$  变为高电平表明驱动部分故障。

图 5(c)中  $VT_1$  管状态反馈信号  $FB_1$  断线,监测保护板处  $FB_1$  维持高电平, $FD_1$  变为高电平。

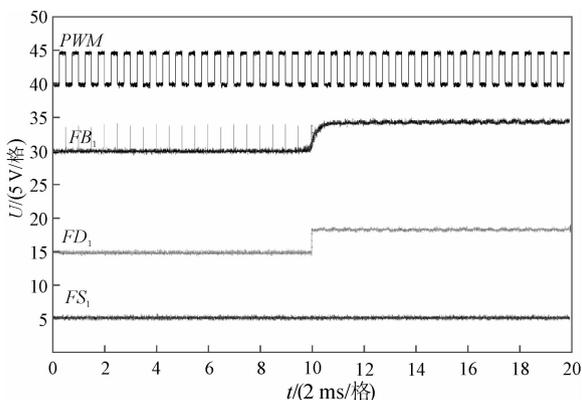
图 5(d)将  $VT_1$  管集电极开路, $FB_1$  在 PWM 边沿反馈脉冲后,由低电平跳变为高电平, $FD_1$  和  $FS_1$  均变为高电平,表明器件发生开路失效。



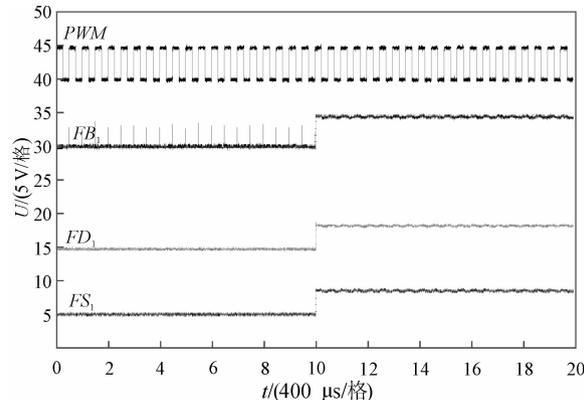
(a) 正常运行



(b) IGBT 门极驱动电路断线



(c) 状态反馈信号  $FB_1$  断线



(d) IGBT 器件开路

图5 不同故障下  $FB_1$  与输出标志信号波形图

Fig. 5 Figures of  $FB_1$  and flag signals at different fault types

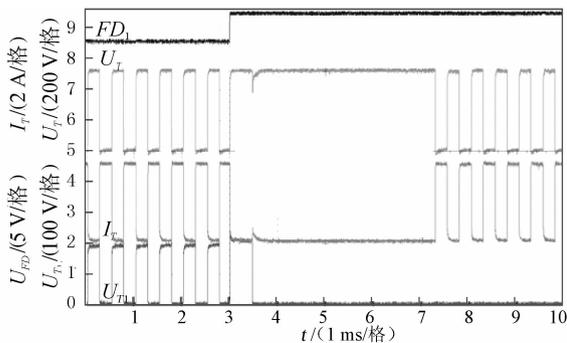
### 4.2 故障处理实验

利用故障状态判断逻辑产生的 IGBT 器件的故障标志位  $FD_x$  作为旁路开关投切的控制信号。

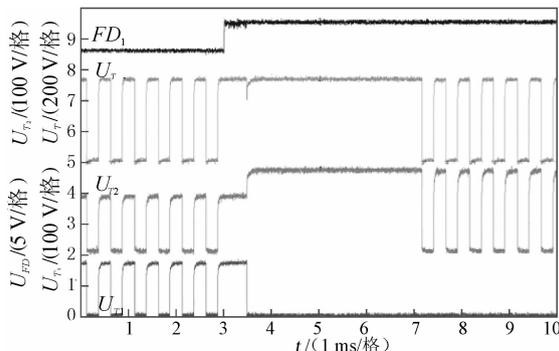
实验中的故障模拟方法是在组件正常运行过程

中,人为切断  $VT_1$  管的驱动脉冲,产生一个 IGBT 器件开路故障。

图6是串联组件中  $VT_1$  管开路故障时处理过程的波形。



(a) 电压、电流及故障检测信号



(b) 串联组件中 IGBT 器件电压的变化

图6  $VT_1$  开路故障的检测与恢复过程图

Fig. 6 The chart of fault detection and recovery at  $VT_1$  open circuit

图6(a)中串联 IGBT 组件正常运行时每只 IGBT 器件承受总直流电压的 1/3,  $VT_1$  管的故障标志  $FD_1$  维持低电平。在  $VT_1$  管发生开路故障瞬间,  $FD_1$  跳变至高电平, 同时立即封锁该组件的驱动脉

冲, 0.5 ms 后投入故障 IGBT 侧的旁路开关,  $VT_1$  承受电压跳变至零, 而另外两只 IGBT 器件的承受电压上升到总直流电压的 1/2 (参见图 6(b))。在旁路开关动作 3.5 ms 后, 组件中 IGBT 器件的驱动脉

冲再次输出,组件恢复运行。

由于串联 IGBT 器件门极有源均压电路中电容的作用,在器件承受电压突变瞬间会在组件中出现短暂的暂态充电电流,如图 6(a)所示。

## 5 结 论

检测 IGBT 串联组件中的开路失效器件并及时予以旁路处理是提高高压电力电子装置运行可靠性的重要途径。本研究通过理论分析和实验验证研究了 IGBT 器件开路失效的检测与旁路处理方法,得出结论为:

- 1) 利用 IGBT 器件门极驱动电路的故障回报信号可以检测 IGBT 的开路失效状态;
- 2) 通过对 IGBT 器件的 PWM 驱动信号和故障回报信号的数字逻辑处理,实现了 IGBT 串联组件的失效检测和功能恢复;
- 3) 如果 IGBT 串联组件具有足够的电压冗余能力,机械开关可以选作为 IGBT 器件的应急旁路开关。

## 参考文献:

[1] Withanage R, Crookes W, Shamma N. Novel voltage balancing technique for series connection of IGBTs: proceedings of european power electronics and applications conference[C]. Aalborg, Denmark, 2007: 1-10.

[2] Bin Lu, Sharma S K A. Literature review of IGBT fault diagnostic and protection methods for power inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(5): 1770-1777.

[3] Rothenhagen K F. Performance of diagnosis methods for IGBT open circuit faults in three phase voltage source inverters for AC variable speed drives: proceedings of european power electronics and applications conference [C]. Dresden, Germany, 2005: 7-16.

[4] Rodríguez B M A, Claudio S A, Theilliol D, et al. A failure detection strategy for IGBT based on gate-voltage behavior applied to a motor drive system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(5): 1625-1633.

[5] Ohkami T, Souda M, Saito T, et al. Development of a 40 kV series-connected IGBT switch: proceedings of power conversion conference [C]. Nagoya, Japan, 2007: 1175-1180.

[6] Bhalla A, Shekhawat S, Gladish J, et al. IGBT behavior during desat detection and short circuit fault protection: proceedings of the 10th international symposium on power semiconductor devices and ICs [C]. Kyoto, Japan, 1998: 245-248.

[7] John V, Bum S S, Lipo T A. Fast-clamped short-circuit protection of IGBTs[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(2): 477-486.

[8] Jain A K, Ranganathan V T.  $V_{CE}$  sensing for IGBT protection in NPC three level converters-causes for spurious tripping and their elimination[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(1): 298-307.

[9] 邓永孝. 半导体器件失效分析[M]. 北京: 宇航出版社, 1991.

[10] 徐德鸿. 现代电力电子器件原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

(责任编辑 李虹燕)