

## IGBT 的过流保护策略

刘云峰 陈国平

(东南大学电子工程系, 南京 210096)

摘要 本文研究了 IGBT 的过流保护策略, 给出了一种新的过流保护设计思路。

关键词: IGBT 过流保护

中图分类号: TN386.2

文献标识码: A

绝缘栅, 双极晶体管  
TN386.2

## 1 前 言

绝缘栅双极晶体管(IGBT—Insulated Gate Bipolar Transistor)是本世纪末出现的一种新型复合电力电子器件。IGBT 综合了功率 MOSFET 和功率晶体管(GTR)的优点, 因而具有良好的开关特性和导通特性。目前, 600 A—1 200 V 甚至更大额定电流的 IGBT 模块已经商品化; 1 700 V 以上耐压的高压 IGBT 也正在开发之中<sup>[1,2]</sup>。近年来, IGBT 已经在电气传动、大功率 UPS、新型电源等方面获得了广泛的应用。由于 IGBT 通常工作于高压大电流的恶劣条件之下, 在开发使用过程中经常遇到过流损坏的问题, 严重影响其应用。鉴于 IGBT 的过流损坏是器件的主要破坏机制, 因此有必要对其过流保护作进一步的研究。本文将从研究 IGBT 的过流特性着手, 探讨 IGBT 过流损坏的原因, 提出相应的解决途径。

## 2 IGBT 过流保护的特性

## 2.1 IGBT 的失效机理

IGBT 在短路和过流时, 如不迅速加以保护就会导致器件失效, 其主要原因有: 超过热极限、发生擎住效应、器件过压击穿等<sup>[3,4]</sup>。

(1) 超过热极限 器件短路时的功耗将导致器件芯片温度迅速上升。若温度超过 250℃, 由于芯片材料硅的本征化将会导致 IGBT 迅速热击穿而损坏。

(2) 发生擎住效应 IGBT 结构上存在寄生晶闸管, 在极大的短路电流下关断 IGBT 时极易发生动态擎住导致器件损坏。

(3) 器件过压击穿 大电流下关断 IGBT 时极大的  $dI/dt$  在回路电路中产生的关断电压尖峰有可能使 IGBT 因雪崩击穿而损坏。

## 2.2 IGBT 的短路耐量

通常把短路发生至器件损坏为止的这段时间称为短路耐量。器件短路时间超过短路耐量后, 降低  $V_{GE}$  已无法关断 IGBT, IGBT 电流将失控并会导致器件的损坏。

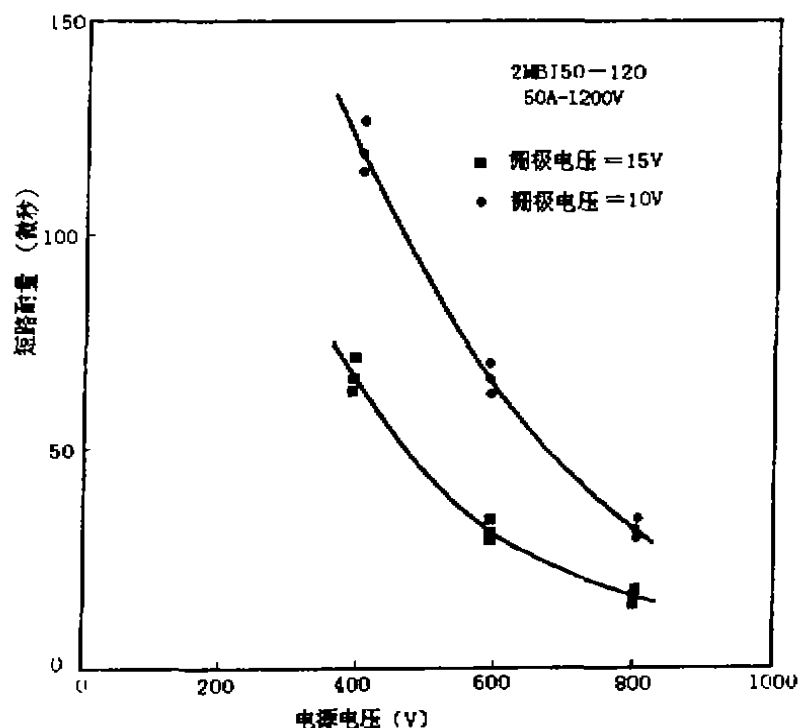


图 1 IGBT 的短路耐量

图 1 为富士电机 IGBT (2MBI150-120, 1200V-50A) 短路耐量与电源电压及栅极电压  $V_{GE}$  的关系, 由图中可见:

(1) 随着电源电压的上升, 短路耐量  $t_{cs}$  迅速下降。对于额定电压为 1200 V 的 2MBI150-120, 在结温为 125℃ 时, 800 V 时的短路耐量仅为 400 V 时的四分之一。

(2) 降低栅极电压  $V_{GE}$  可以提高短路耐量。栅极电压由 15 V 降至 10 V 后, 短路耐量提高了一倍。

### 2.3 IGBT 的短路安全工作区 (SCSOA)

IGBT 短路时的安全工作特性由短路安全工作区 (SCSOA) 来表述。图 2(a)、(b) 分别为富士电机公司及西门康公司 IGBT 的短路安全工作区。显然, IGBT 是不可能持续工作于短路安全工作区的, 富士电机公司明确将短路安全工作区称为非重复区, 而将反偏安全工作区 (RBSOA) 称为重复区即表明了这一点。各 IGBT 生产公司均对 IGBT 工作于短路安全工作区的时间或次数作出了规定。三菱电机公司第三代 IGBT (H 系列) 关于短路安全工作区的说明中规定: 当栅极脉冲宽度  $\leq 10 \mu s$  时, 短路安全工作区有效; 短路安全工作区不可无限重复的动作, H 系列 IGBT 模块规定可经受 100 次的短路情况。西门康公司规定: 当栅极脉冲宽度  $\leq 10 \mu s$  时, 短路安全工作区有效; IGBT 模块规定可经受 1000 次的短路情况, 且两次短路之间的间隔时间应不小于 1 s。

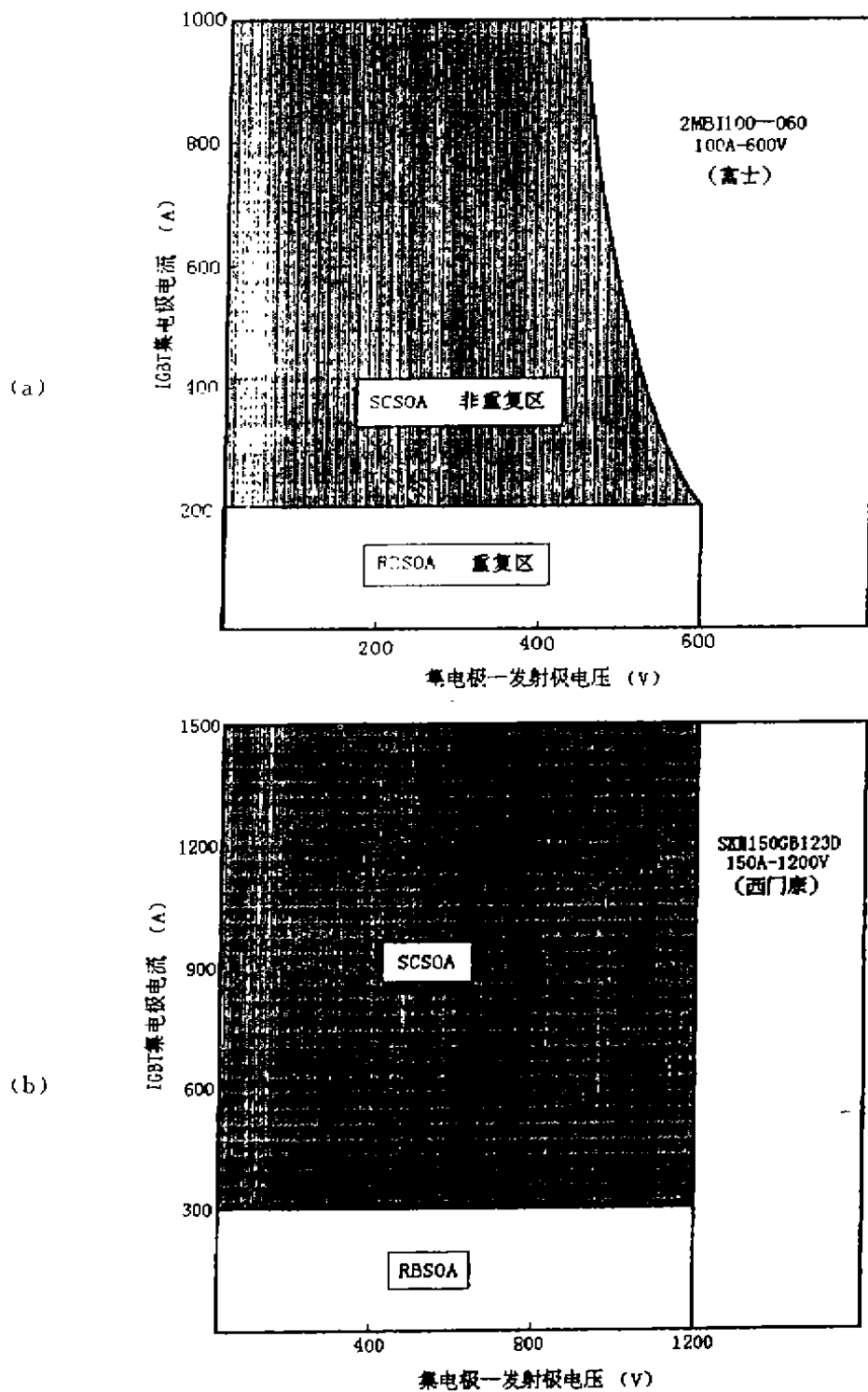


图2 西门康IGBT的短路安全工作区

#### 2.4 IGBT混合驱动集成电路的过流保护特性

为了提高产品的可靠性,IGBT电路的设计者多采用集驱动与保护功能于一体的专用

驱动集成电路。常用的有日本富士电机公司的 EXB841 系列、日本三菱电机公司的 M57959L 系列、日本英达公司的 HR065 系列、美国 MOTOROLA 公司的 MPD 系列、美国 IR 公司的 IR2110 系列等。对于普遍应用的 EXB841 系列、M57959L 系列、HR065 系列等混合驱动集成电路,其过流检测均为退饱和检测,即通过判断 IGBT 导通时的压降是否超过电压阈值(EXB841 系列为 7.5 V, M57959L 系列、HR065 系列均为 10 V)来决定保护电路是否动作。

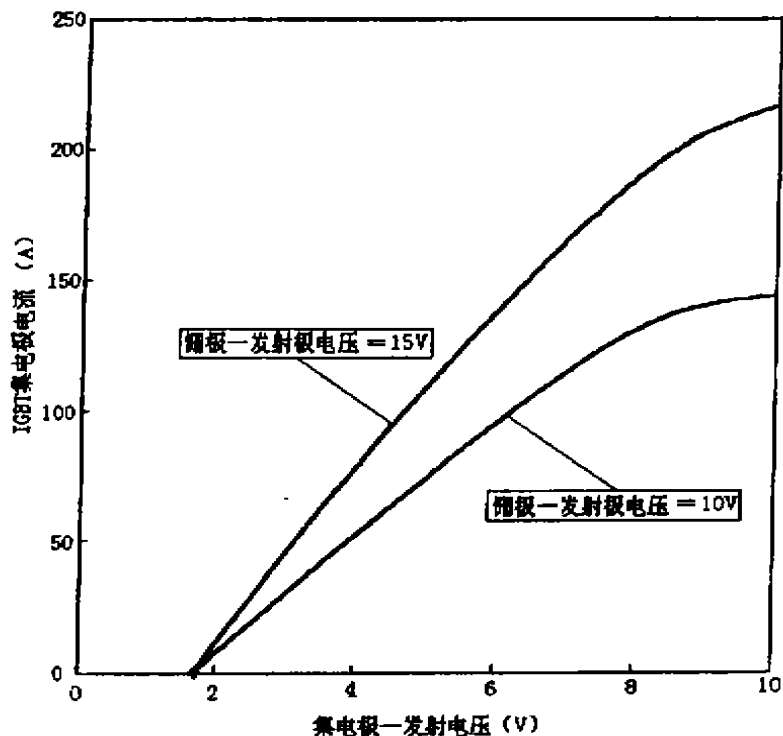


图 3 IGBT 的导通特性

图 3 为富士电机 1MBI50-090(900 V-50 A)的导通特性曲线。由图 3 可得在  $V_{GE}=15V$  时,对于额定电流为 50 A 的 IGBT,在  $V_{CE}=7.5V$  时,电流为 180 A;  $V_{CE}=10V$  时,电流为 220 A 左右。由此可知,在 7.5 V 或 10 V 的阈值电压下,即使 IGBT 通过三倍的额定电流(150 A),保护电路也不一定会动作。如这种状态持续时间过长,IGBT 有可能发生擎住锁定。

#### 2.5 持续短路过流的判断

对于电流波动较小的负载(如电阻性负载)或实验性设备,可以在 IGBT 过流后直接进行跳闸保护。但大多数场合下(如电气传动)为了保护系统工作的连续性,不容许频繁掉电保护。此时必需仅在系统确实存在持续短路过流时才进行跳闸保护。为了保证设备的正常工作,保护电路必须对真正持续的短路及过流,即“真过流”,提供可靠的保护;而对于瞬态电流尖峰等干扰性过流信号,即“假过流”,则应在过流后恢复系统正常工作。

#### 2.6 关断电压尖峰

在短路过流时,即使及时降低了 IGBT 的  $V_{GE}$ ,由于回路电感产生的关断电压尖峰仍然

可能使 IGBT 击穿损坏。即使 IGBT 未损坏,该电压尖峰也有可能损坏其它元器件,最终可能导致 IGBT 损坏。

由上可知,设计一个性能完善的 IGBT 过流保护方案时应考虑到以下问题:

- (1)应尽量缩短 IGBT 处于短路过流状态的时间。
- (2)仅依靠混合驱动集成电路的保护功能不足以全面保护 IGBT。
- (3)必需对过流现象进行判别,避免系统频繁跳闸保护。
- (4)过流保护电路关断 IGBT 时不应产生过高的关断电压尖峰。

### 3 IGBT 过流保护的方法

#### 3.1 短路耐量的提高

##### (1)采用高耐压 IGBT

对于任一特定型号的 IGBT,随着电源电压的下降,短路耐量  $t_{CS}$  将上升。额定电压为 1 200 V 的 2MGI50-120,400 V 时的短路耐量约为 800 V 的 4 倍,可达 50  $\mu s$  以上。而额定电压为 600 V 的 2MGI50-060,400 V 时的短路耐量仅为 10  $\mu s$  左右。因此,对于同一电源电压选用耐压较高的 IGBT 可以获得更大的短路耐量,但电路成本将有所提高。

##### (2)降低栅极电压

由图 1 可见,降低栅极电压  $V_{GE}$  可以提高短路耐量。因此在短路过流时可以通过临时降低栅极电压提高短路耐量,保护 IGBT。富士电机第二代 IGBT(H、L 系列)额定短路耐量为 5  $\mu s \sim 7 \mu s$ 。而第三代 IGBT(N 系列)由于采用了内部电流限制技术(即短路时降低栅压),短路时最大电流也不会超过额定值的三倍,短路耐量因而可达 15  $\mu s$ 。但降低栅极电压在 IGBT 正常运行期间是不允许的,这样做将会导致驱动电压不足并增加开通损耗。因此,仅在短路过流期间才能通过降低栅极电压提高短路耐量。

##### (3)串联辅助 IGBT

图 4 为两只 IGBT 串联短路时的短路耐量( $V_{GE}=15 V$ )。和单只器件相比,由于每只 IGBT 的电流、电压均有所下降,短路耐量得以提高。因此,在要求可靠性高的应用场合,可以在主回路中串联辅助 IGBT 以提高系统的抗过载能力。系统正常运行时,串联的辅助 IGBT 应始终保持在导通状态。

#### 3.2 IGBT 的短路保护

由 IGBT 的短路安全工作区图表可知短路安全工作区的应用是有次数限制的。因此,不能认为凡是小于 10  $\mu s$  的短路过流电流脉冲对 IGBT 均是完全安全的。在短路期间强大的电流脉冲将会缩短 IGBT 的使用寿命并有可能最终导致不可恢复性损坏,该脉冲宽度越窄越好。因此,在 IGBT 短路时保护电路应尽快动作。在新型智能 IGBT 模块(IPM)中,由于设计了实时电流控制电路直接监测 IGBT 电流,响应时间可小于 10 ns。和普通 IGBT 模块相比,采用实时电流控制电路后的 IPM 短路过流脉冲的峰值及能量均小得多。

IGBT 的短路状态可以通过测量 IGBT 的导通压降或 IGBT 电流来判别,IGBT 的电流可采用霍尔电流传感器或无感电阻取样进行测量。

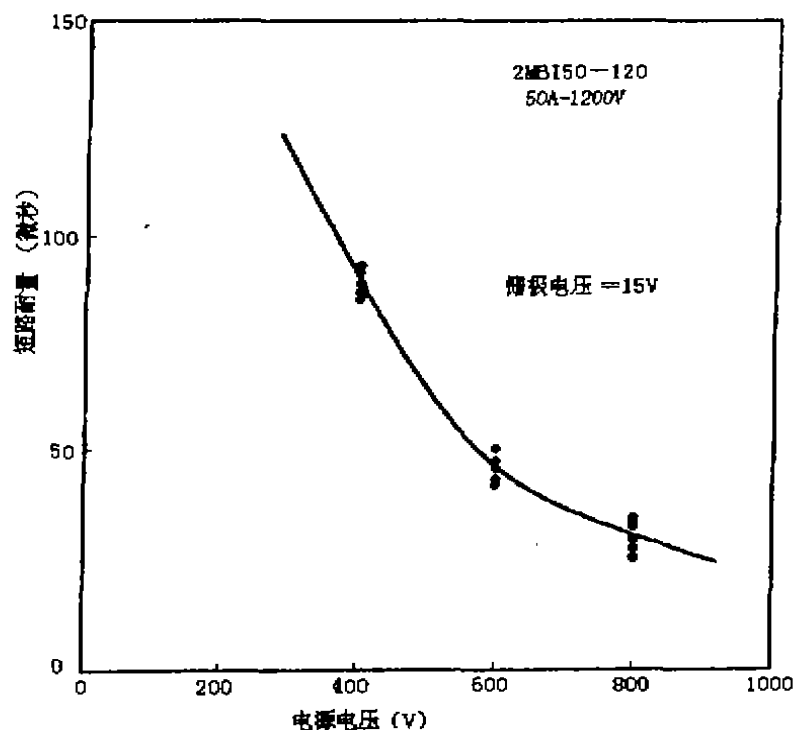


图4 两只 IGBT 串联时的短路耐量

### 3.3 IGBT 的普通过流保护。

如 IGBT 仅仅是普通过流而并非短路过流,即电流大于 IGBT 工作电流但小于短路阈值电流,此时为了提高电路的抗干扰能力可采用延时判断法,即保护电路仅当普通过流时间超过一定时间阈值时关断 IGBT。表 1 为三菱智能 IGBT 模块(IPM)内部过流保护动作最小电流值,对应时间阈值为 10  $\mu$ s。由表 1 可见,过流保护动作最小电流值约为 IGBT 额定电流的 1.2~1.5 倍,负载电流峰值的 2 倍。

表 1 应用于 220 V 交流电机的 IGBT 的过流保护动作最小电流值

220 V 交流电机 额定功率 /kW	电流峰值 /A	推荐 IGBT 额定电流 /A	过流保护动作 最小电流值 /A
0.4	6.4	10	12
3.7	36	50	65
22	181	200	310
55	456	600	740

IGBT 的普通过流状态不能通过测量 IGBT 的导通压降来判别,EXB840 等混合驱动集成电路不能独立完成普通过流保护,必需外加辅助保护电路。对于直接测量 IGBT 电流进行过流判别的保护电路,短路保护或普通过流保护动作后应能持续作用一段时间。否则,保护

动作后的 IGBT 有可能处于保护-电流下降-保护解除-电流上升-再次保护的循环之中。

### 3.4 持续短路过流的判断方法

持续短路过流常用的判断方法有:

#### (1) 计时判断法<sup>[5]</sup>

计时判断法根据每次短路过流状态信号的时间长度来判断。如超过时间阈值,则判断为持续短路过流。

#### (2) 计数判断法<sup>[5]</sup>

计数判断法根据短路过流状态信号连续出现的次数来判断。如有超过一定次数的信号连续出现,则判断为持续短路过流。但为了防止对“假过流”作出反应,计数阈值不能取值过小。因此,计数判断法对于小于计数阈值的过流现象无法加以评估,易于“漏判”。

#### (3) 频率判断法

频率判断法根据短路过流状态信号出现的频率来判断。如单位时间内出现的过流信号次数超过阈值,则判断为持续短路过流,但频率判断法对瞬时电流尖峰的反应较敏感,抗干扰性差。

采用计时判断法时,有可能使 IGBT 承受时间较长的过流脉冲,不利于 IGBT 的安全,因此常配合降栅压法使用。采用频率判断法或计数判断法只要 IGBT 过流则封锁该周期 IGBT 的驱动电压,因而更有利于 IGBT 的安全,但电路较为复杂。对于使用广泛的 EXB841 等采用退饱和检测法进行过流检测的混合驱动集成电路,因其电路结构设计存在“自锁”的特点(即 IGBT 软关断后栅压被锁定于低电位,即使负载解除短路状态栅压也不会上升),其输出的过流报警信号仅表示 IGBT 过流而不具有表示过流持续时间的意义。因此,这类混合驱动集成电路只适宜采用频率判断法或计数判断法进行判断。

为了克服计数判断法易于“漏判”和频率判断法抗干扰性差的缺点。作者提出了一种新的判断方法,即频率计数法。

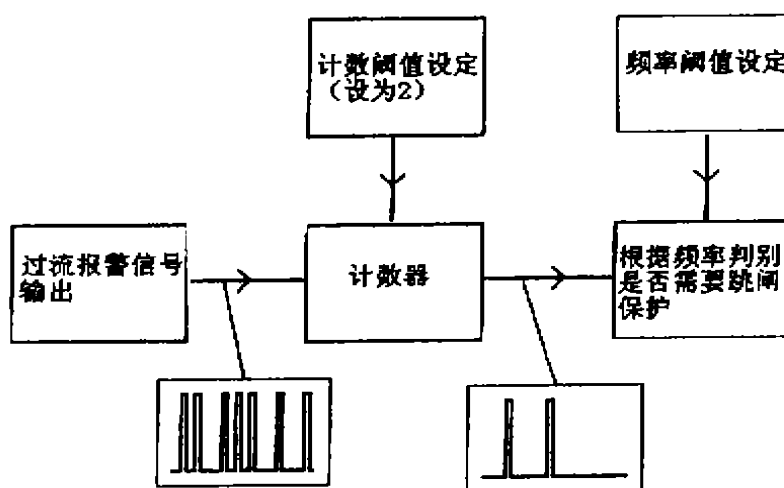


图 5 频率计数法

如图 5 所示,频率计数法的原理是给定一个连续计数的阈值(比计数判断法小),每当等

于计数阈值的连续信号出现,计数器计数一次;如计数器在单位时间内的计数数值超过一定阈值,则系统跳闸掉电。采用这一方法,可以有效克服频率判断法或计数判断法的缺点,即有较强的抗干扰能力;对于“真过流”又不会发生误判。

### 3.5 减小关断电压尖峰

采用慢速关断技术可以成功地减小关断 IGBT 时的  $dI/dt$ ,从而降低关断电压尖峰,同时,关断缓冲电路的设计应使短路过流时 IGBT 的关断轨迹不超出短路安全工作区。

## 4 IGBT 过流保护策略。

综上所述。作者给出图 6 所示的 IGBT 过流保护策略。

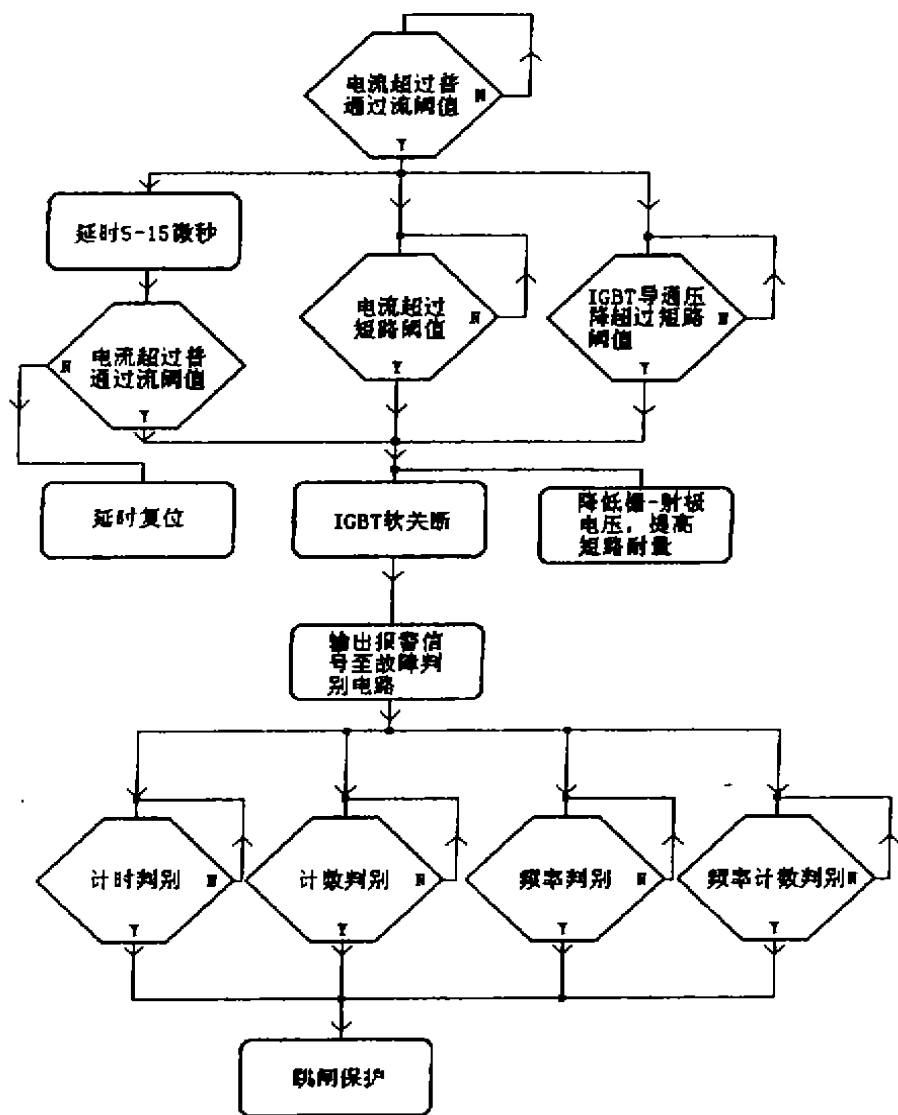


图 6 IGBT 过流保护策略



## 5 小 结

本文对 IGBT 过流保护的特性和方法进行了研究,并提供了一种全面的 IGBT 过流保护策略和一种新的故障判断方法-频率计数法。该方法既不会对持续短路过流发生误判,同时又具有较强的抗干扰能力。

## 参 考 文 献

- [1] Tanaka, et al. 2000 V 500A high power IGBT module. (J). IEEE International symposium on Power Semiconductor Devices & ICs. 1995;80-83
- [2] Takahashi, et al. 2.5KV 100A mu-stack IGBT (J). IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs. 1994;25-30
- [3] Chokhawala, et al. IGBT fault current limiting circuit (J). IEEE Industry Applications Magazine, Sept-Oct 1995; 1(5);313-319
- [4] Chokhawala, et al. Discussion on IGBT short-circuit behavior and fault protection Schemes (J). IEEE Transactions on Industry Applications, Mar-Apr 1995; 31 (2);256-263
- [5] 王正仕等,IGBT 的过流保护(J),电力电子技术,1996;(8)

## Study on the Design of Overcurrent Protection of IGBT

*Liu Yunfeng      Chen Guoping*

*(Electronic Engineer Department, Southeast University, Nanjing 210096)*

**Abstract** The way of overcurrent protection of IGBT has been studied in this paper. A new design idea of overcurrent protection for IGBT is discussed.

**Key words:** IGBT      overcurrent protection

EEACC: 2560R