

IGBT 的过流保护

IGBT Overcurrent Protection

浙江大学 王正仕 吴益良 向 群 陈辉明 (杭州 310027) TN322.8

摘要:根据器件及其应用情况,介绍了 IGBT 过流保护的特点;提出了综合保护方法;进行了过流保护试验,并给出了实验波形。结果表明,IGBT 在其额定容量的 3 倍过流情况下得到了可靠保护。文中还叙述了过流保护的抗干扰措施。

Abstract: This paper presents the feature and method of IGBT overcurrent protection, and proposes a new overcurrent protection method, which is proved to be satisfied by experiments. Some anti-interfere measures are introduced.

关键词: 电力半导体器件; 过电流保护/IGBT
Keywords: power semiconductor device; overcurrent protection/IGBT

1 前言

绝缘栅双极型晶体管(IGBT)集 MOSFET 的输入阻抗高、驱动容易、开关速度快、无二次击穿和 GTR 的通态压降低、高压大电流化容易等优点为一身,广泛应用于电机调速、UPS、开关电源及要求快速、低损耗、低噪音、小体积的领域。

在 IGBT 应用中,关键的技术之一是过流保护。过流保护电路不仅直接关系到 IGBT 器件本身的工作性能和运行安全,而且影响到整个系统的性能和安全。IGBT 应用的成败,很大程度上取决于过流保护系统设计的优劣。

2 IGBT 过流保护的特点

2.1 过流耐量小

图 1 示出 IGBT 的典型失效曲线^[1]。它能承受的过流时间通常仅为几微秒,这与 SCR、GTR(几十微秒)等器件相比要小得多,因此有过流耐量小的不足,因而对过流保护电路的要求也就更高了。它要求过流保护电路能准确、敏捷地检测过流信号,快速传递和处理信息,可靠的保护动作。

2.2 擎住效应使 IGBT 关断失效

由于 IGBT 内部存在一个寄生晶闸管,此寄生晶闸管一旦触通,IGBT 便失去栅极的控制而无法关断,即产生所谓的擎住现象。擎住现象有静态擎住和动态擎住两种。静态擎住指流过 IGBT 的稳态电流过大时所产生的擎住现

象;在开通和关断过程中,若开关速度过快,也会使寄生晶闸管触通,而产生动态擎住。过流保护电路应该使 IGBT 避免发生擎住现象。

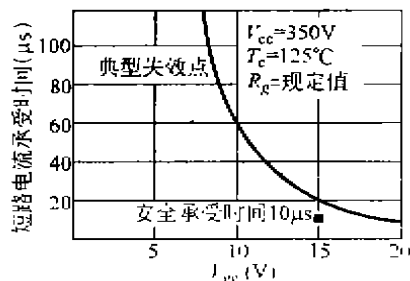


图 1 IGBT 典型失效曲线

2.3 过流检测

IGBT 的特点之一是其通态压降可以反映导通电流的大小。图 2 示出 IMB50-090(50A, 900V)IGBT 的静态特性曲线。由图 2 可见,在正常驱动下,集电极电流 $I_c=50A$ 时,集-发极间饱和压降 $V_{CE(sat)}$ 仅为 3V;一旦出现过流, V_{CE} 则随 I_c 的增大而增大,当 I_c 达到 170A 时,集-发极间压降 V_{CE} 约为 7V。根据这一特性,IGBT 的过流检测可通过检测其集电极电压来代替。这种简单的检测方法带来的另一优点是可防止 IGBT 工作时的退饱和。若工作时 IGBT 的驱动电压过低,则会使 IGBT 退出饱和区而进入放大区,使集电极功耗急剧增大,造成器件热损坏。采用检测 $V_{CE(sat)}$ 的方法可避免出现这种情况。驱动电压过低,导致 IGBT 通态压降上升,保护电路将判其为过流而关断 IGBT。因此,这

种检测方法也称为退饱和检测。

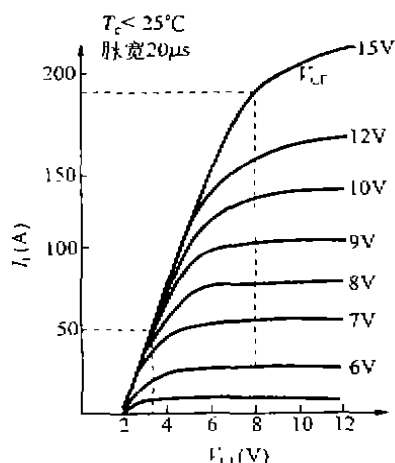


图2 IMB50-090 IGBT 静态特性曲线

3 IGBT 过流保护的方法

根据上述特点,IGBT 过流保护的基本方法有降栅压保护和慢关断保护。它们的作用是设法延长允许承受过流的时间,减小关断时的电压过冲,以避免发生擎住现象。

3.1 降栅压保护法

所谓降栅压保护是指 IGBT 出现过流时,将栅极驱动电压降低。这种保护方法有两大优点,一是延长 IGBT 允许过流的时间,二是降低过流幅值。这对处于过流状态的 IGBT 是有利的。

图3示出 IRGPC40F (40A, 600V) IGBT 的驱动栅压 V_{ge} 与 I_c 和允许过流时间 t_{cs} 的关系曲线。当 $V_{ge}=15V$ 时,该器件承受 250A 的过流冲击时间仅为 $5\mu s$ 。如果在过流开始时,将栅压降低到 10V,则承受过流的时间可延长到 $15\mu s$,并且过流幅值也由原来的 250A 下降到 100A。当然,由于 V_{ge} 的降低,将导致 IGBT 导通压降升高,这将使管子的瞬时热损耗急剧增大。为了防止热损坏,这个时间应足够短,不允许因此而引起热损坏。事实上,过流保护电路的整个响应时间通常小于 $10\mu s$ 。

文献^[2]给出了降栅压保护时 IGBT 的 I_c 动态轨迹,见图4。其中虚线为栅压不降低时的电流轨迹。流过 IGBT 的正常电流为 40A,瞬时过流时, I_c 迅速上升到 220A。图4a 为过流时,将

栅压由原来的 15V 下降到 10V,大约 $10\mu s$ 后撤除过流, I_c 恢复到原来状态, IGBT 恢复 15V 全栅压驱动时的电流轨迹。图4b 为过流条件下,栅压由 15V 下降到 8V,过流一直持续, $10\mu s$ 后关断 IGBT 时的电流轨迹。

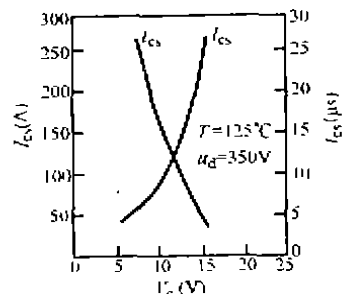


图3 IRGPC40F 的 IGBT V_{ge} 与 I_c 、 t_{cs} 的关系曲线

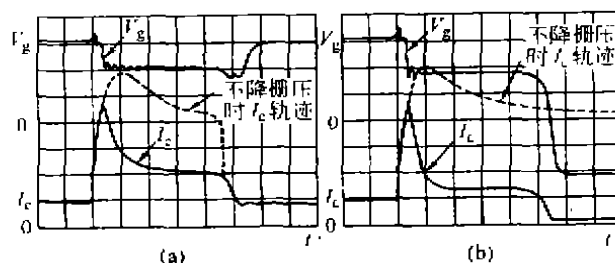


图4 降栅压保护的电流轨迹(1)和(2)

(a) 轨迹(1) (b) 轨迹(2)

($V_{ge}=5V/\text{格}$, $I_c=50A/\text{格}$, $t=2\mu s/\text{格}$)

由图4可看出,过流时,若仍保持全栅压驱动,则 IGBT 过流幅值大、持续时间长;若降低驱动电压,则 IGBT 过流幅值小、电流回落快、持续大电流时间短。

3.2 慢关断保护法

慢关断保护指出现过流关断 IGBT 时,关断速度不能太快。这是因为过流关断时,大电流迅速下降,很大的 di/dt 将在电路的感性元件(含布线电感)上产生很高的反电势,在 IGBT 和其它元件上造成强烈的电压过冲,文献^[3]讨论了关断速度和电压过冲的关系;另外,过流时关断速度过快,会使 IGBT 产生动态擎住,以致无法关断而造成损坏。

慢关断保护是 IGBT 过流保护的基本方法之一,富士公司的 IGBT 专用驱动块 EXB 系列就采用了该方法。

3.3 综合保护法

在 IGBT 过流保护电路中,我们采用了综合保护法。它指同时采用上述两种保护方法。这是因为 IGBT 通常工作在高压大电流工况下,仅采用降栅压保护法,虽延长了 IGBT 的允许过流时间,但在大电流状态下快速关断,会在感性元件和布线电感上产生很高的反电势,造成 IGBT 和其它元件的过压损坏,而且容易引发动态擎住,使 IGBT 失去栅极控制而损坏;慢关断保护法存在允许过流时间短等不足。综合保护法可取二者之长,并克服二者不足,是一种更完善的保护方法。我们在 IGBT 斩波系统中采用了综合保护法,通过数十次的过流试验和意外的过流故障,其结果表明,该法能使 IGBT 得到可靠保护。

4 过流保护中的抗干扰

这里的干扰主要是指出现过流,但在 IGBT 允许的短时间内自行消失的现象。如果此时保护电路将 IGBT 关断,就相当于造成一次没有必要的扰动掉闸。因此,保护电路必须对真实的过流提供可靠的保护,而对尖峰等虚假的过流信号不与响应。采用以下两种方法可甄别过流的真假。

4.1 延时搜索法

指延长检测时间。若 IGBT 出现过流,且一直持续几个 μs ,则可判其为真过流;若过流迅速消失,则可判其为假性过流。延长检测的时间,意味着延长 IGBT 处于过流状态的时间,因此,延时搜索法通常与降栅压保护法兼用。

4.2 脉冲计数法

指过流信号一出现,保护电路就封锁本周期的驱动开通信号,在下一个周期开通信号到来时,封锁已撤除,IGBT 再次被驱动导通,若此时过流仍存在,再一次封锁这一周期的开通信号。这样,若连续几次超过预先设定的次数出现过流,则认为是真过流,保护电路将撤除驱动开通信号,直至过流故障被清除;如果连续检测到的过流信号次数少于预先设定的次数,则认为是假性过流而不与响应。与延时搜索法相比,脉冲计数法可避免 IGBT 处于较长的过流状

态,但实现电路较复杂。

5 过流试验及实验结果

在过流保护系统中,我们采用了综合保护法,并用延时搜索法进行抗干扰。

5.1 电源转换环节

如图 5 所示,正常情况下 A 点为低电平, V_Q 导通,稳压管 V_D 被旁路, S 点电压为 15V,即全栅压驱动;过流时 A 点为高电平, V_Q 截止, 5V 时, V_D 反向击穿, S 点电压 $V_s = 15V - 5V = 10V$,实现降栅压驱动。若过流故障消失, A 点恢复低电平, V_Q 重新导通而恢复全栅压驱动。

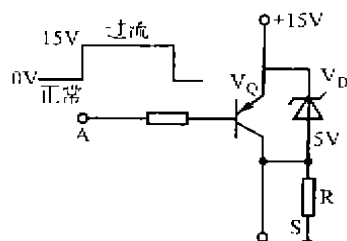


图 5 电源转换环节

5.2 慢关断环节

慢关断采用增大关断电阻的方法,此法的原理众所周知。如图 6 所示,正常工作时 B 点为高电平, V_P 导通,电阻 R_{off1} 被旁路,关断电阻为 R_{off1} ;过流时 B 点为低电平, V_P 截止,关断电阻为 $R_{off} = R_{off1} + R_{off2}$ 。

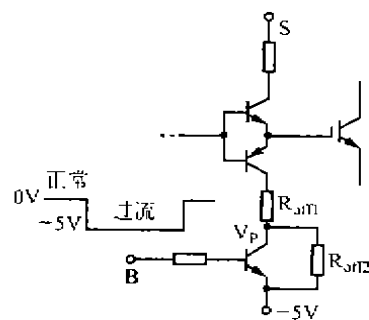


图 6 慢关断环节

5.3 过流检测及保护电路

图 7 示出 IGBT 过流检测及保护电路。通过检测 $V_{ce(sat)}$,判断是否过流,再用减栅压和慢关断实现保护。当驱动电压 V_g 为高电平,且 M 点电平 $V_M > \text{参考电平 } V_{ref1}$, $V_M = V_{ce(sat)} + 0.7V$

时, IGBT 出现过流, 与门输出高电平, V_T 导通。一方面, 电容 C_1 上的电平 V_{c1} 经 R_1 、 C_1 延时 $2\mu s$ (以甄别真假过流) 达到 V_{ref2} , 比较器 2 输出高电平, 使电源转换电路动作, 把驱动电压从 15V 减至 10V。若在 $2\mu s$ 内过流自行消失, 则与门变为低电平输出, V_T 关断, C_1 经 R_1 、 R_3 放电, 显然不再执行减栅压; 另一方面, 电容 C_2 上的电平 V_{c2} 经 R_2 、 C_2 延时 $8\mu s$ 达到参考电平 V_{ref3} , 比较器 3 输出高电平, D 触发器触发并保持 \bar{Q}

端输出低电平, 使慢关断环节动作, 同时反馈到控制电路, 封锁控制输出。触发器的 Q 端输出高电平, 用以给出声、光报警。按钮 K 用以过流故障排除后的人工复位。采用触发器可避免“打嗝”式的保护。同样, 如果在 $8\mu s$ 之内过流故障自行消失, 则 C_2 通过 R_2 、 R_3 放电, 不再执行保护关断, 同时 C_1 通过 R_1 、 R_3 放电, 比较器 2 恢复低电平输出, 通过电源转换环节, 使驱动电路恢复 15V 全栅压驱动。

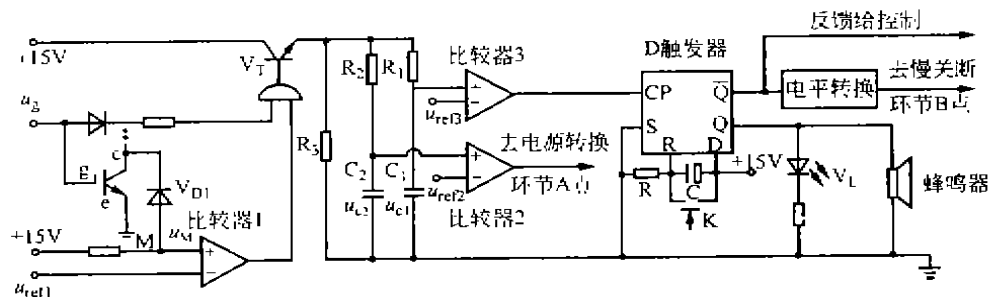


图 7 过流检测及保护电路

5.4 过流保护系统的工作流程

图 8 示出过流保护时 IGBT 驱动电压的波形。图中, t_0 时出现过流, 延时时间间隔 $t_{d1} = t_1 - t_0$, 持续过流, 将栅压由 15V 降至 10V, 延时时间间隔 $t_{d2} = t_2 - t_1$, 两次延时用以甄别真假过流。若持续过流, 则开始慢关断; 若过流被清除, 则恢复全栅压驱动(虚线所示)。图 9 示出过流保护的工作流程。

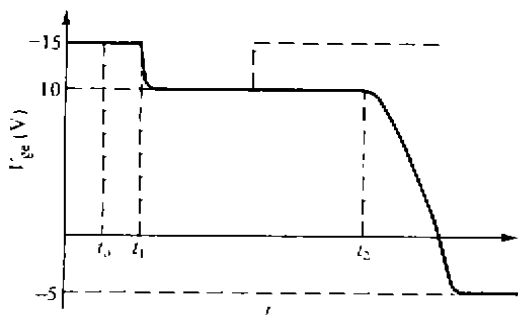


图 8 过流保护时驱动电压的波形

5.5 过流试验

如图 10 所示, 正常工作时, K 断开, 负载为 R_1 ; K 闭合, 负载变为 R_1 与 R_2 并联, IGBT 急剧过流。实验中, IGBT 的额定容量为 25A (型号为 BUP304), 过流时电流幅值过冲到 75A 左

右, 是其额定容量的 3 倍^[4]。

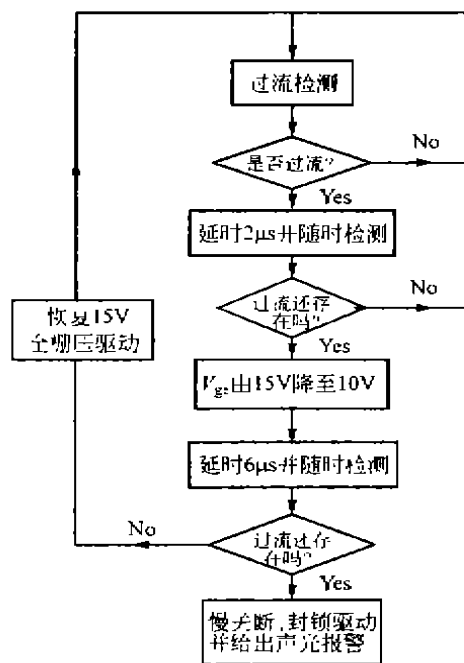


图 9 过流保护的工作流程

图 11 示出过流保护动作时, IGBT 管子上的电流、电压实验动态波形。经过数十次过流试
(下转第 102 页)

根据公布数据的计算会准确反映电路的运行。

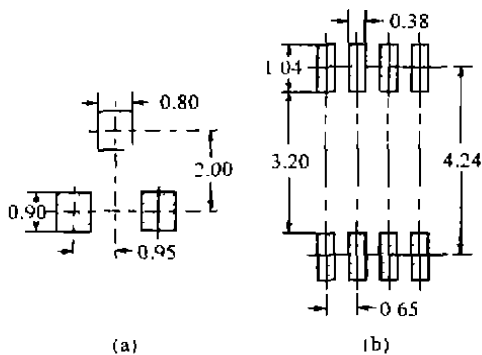


图4 所推荐的接近实际应用的印刷电路板图

(a)Micro3 (b)Micro8

第三步是施加功率加热结到 T_{jmax} , 施加标准栅极电压(即:额定 I_D 的 V_{GS})时,漏极电流慢慢增加。根据漏极电压和电流计算功耗和 $R_{DS(on)}$ 。漏极电流持续增加直至器件的 $R_{DS(on)}$ 达到校准值,器件处于热平衡态(即结在 150°C 保

持几分钟)。在这一点,如图2曲线所测,连续的功率损耗使结温维持在 150°C 。

第四步是计算 R_{thja} 。一旦被测器件达到热平衡,即测量环境温度和功率损耗。当结温处于其校准值 150°C 时,就可根据上式计算热阻。

2 结论

热阻特性必须在稳态条件下测量。它是一个器件处于热平衡态下的连续的、稳态的测量。脉冲电流特性提供了有关瞬态热阻抗的有用信息,但不应将瞬态热阻抗与 R_{thja} 相混淆。特殊用途中表面装贴器件的实际热阻主要取决于漏极台面的尺寸。因为 IR 公司测量时就采用了推荐的印刷电路条,所以它所公布的值准确地反映了实际工作情况。

收稿日期:1995.09.13

(陈军安译 郭彩霞校)

(上接第73页)

验,保护电路都能可靠动作,它使 IGBT 得到可

靠保护而免遭损坏。

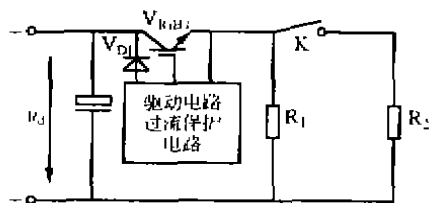


图10 过流保护实验电路

参考文献

- 1 Lsrry Rinehart. Designing Short Circuit Protection into PWM Transistor inverters. Power Conversion '90 Proceedings, 1990
- 2 G. Castino, A. Dubashi, S. Clemente et al. Protecting IGBTs Against Short Circuit. International Rectifier Application Note, AN-984

作者简介

王正仕:1965年生,硕士,讲师。主要研究方向为电力电子技术及其应用。

吴益良:1961年生,硕士,讲师。主要从事电力电子技术及控制技术的研究。

向群:1934年生,教授。主要研究方向为电力电子器件的动态特性参数测试及分析。

陈辉明:1963年生,博士,副教授。主要研究方向为电力电子技术的应用。

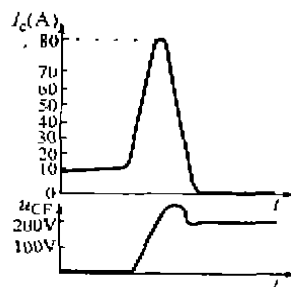


图11 过流保护动作时,IGBT上电流、电压动态波形

3 沈国桥,林渭勋. 绝缘栅晶体管(IGBT)驱动电路的研究. 电气自动化,1993,15(5):34~37

4 王正仕. IGBT 高频斩波器[硕士论文]. 浙江大学,1994

收稿日期:1994.10.11

收修改稿日期:1995.10.31