

IGBT 驱动保护电路的设计与测试

胡 宇, 吕征宇

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 在分析了绝缘栅双极性晶体管 (IGBT) 动态开关特性和过流状态下的电气特性的基础上, 对常规的 IGBT 推挽驱动电路进行了改进, 得到了具有良好过流保护特性的 IGBT 驱动电路。实践应用证明该电路结构简单, 使用可靠, 易于操作, 配合数字信号处理器 (DSP) 等控制芯片能达到很好的驱动效果。

关键词: 绝缘栅双极性晶体管; 开关特性; 数字信号处理器; 过流保护; 场效应晶体管

中图分类号: TP211+.51

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2008)07-0058-03

Design and test of IGBT driving-protection circuit

HU Yu, LV Zheng-yu

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Based on the research of the dynamic switching and over-current characteristics of insulated gate bipolar transistor (IGBT), some improvements on the original push-pull driving circuit were made, a new IGBT driving circuit was obtained, which had a good over-current protection function. The practical application proves that the circuit is simple, reliable and easy to use. Combined with controlling chips such as digital signal processor (DSP), it will do a great job in driving applications.

Key words: insulated gate bipolar transistor (IGBT); switching characteristics; digital signal processor (DSP); over-current protection; metal oxide semiconductor field effect transistor (MOSFET)

0 前 言

绝缘栅双极性晶体管 (IGBT) 集功率、场效应晶体管 (MOSFET) 和双极型功率晶体管的优点于一体, 具有电压控制、输入阻抗大、驱动功率小、控制电路简单、开关损耗小、通/断速度快且通态压降低、易高压大电流等特点^[1-3]。在 IGBT 的应用中, 驱动和保护一直都是研究的关键技术, 特别是过流保护方面。IGBT 器件本身以及它在电路中运行条件的特点, 决定了其过流保护和其他开关器件相比有很大的差别。IGBT 的过流保护电路直接关系到整个系统的工作性能和运行安全。

本研究集中分析 IGBT 驱动保护电路的设计与测试。

1 IGBT 驱动电路

1.1 IGBT 的开关特性

IGBT 的等效电路和器件的内部结构, 如图 1 所示。由图 1 可知, IGBT 的开关控制是通过和 MOSFET 类似的栅极结构来完成的, 因此 IGBT 和 MOSFET 的

开关过程大致相似。IGBT 硬开关时 V_{GE} 、 I_{CE} 和 V_{CE} 的波形示意图, 如图 2 所示。开通时, 当 V_{GE} 达到开通门限后, 到 t_2 时间, I_{CE} 达到最大值, V_{CE} 下降过程中, 由于和 MOSFET 一样的密勒电容 C_{GC} 的作用, 栅极电压基本恒定, 延缓了 IGBT 的开通过程, 当 V_{CE} 下降结束, I_{CE} 达到稳态值, C_{GC} 作用消失, V_{GE} 以较快的上升率达到最大值。为了降低此效应, 应该使栅极驱动源的内阻足够小, 增加流经 C_{GC} 的电流, 加快开通速度^[4-6]。

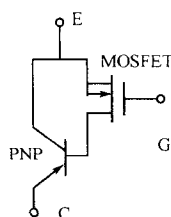


图 1 IGBT 等效电路

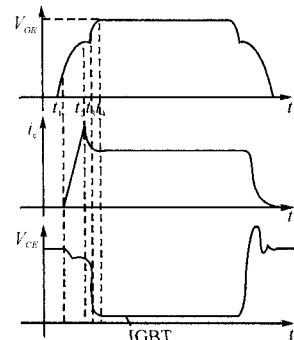


图 2 IGBT 开关波形示意图

关断时, 同样由于密勒电容的效应, 当 V_{CE} 上升的

过程中, V_{CE} 有一段近似恒定的时间, 影响关断的过程。另外, 由于 IGBT 是双极性器件, 在关断过程中有一个少子复合过程, 造成关断时的拖尾电流, 这是 IGBT 和 MOSFET 开关最大的不同点, 这也是影响 IGBT 工作频率的最主要原因。

1.2 IGBT 驱动电路的要求

1.2.1 开通正栅压

IGBT 静态特性曲线示意图, 如图 3 所示。IGBT 正栅压 V_{GE} 越大, 导通电阻越低, 损耗越小。但是, 如果 V_{GE} 过大, 一旦 IGBT 过流, 会造成内部寄生晶闸管的静态擎柱效应, 引起 IGBT 失效。相反, 如果 V_{GE} 过小, 可能会使 IGBT 的工作点落入线性放大区, 最终导致器件的过热损坏, 比较理想的 IGBT 驱动电压范围是 $12\text{ V} < V_{GE} < 18\text{ V}$ 。

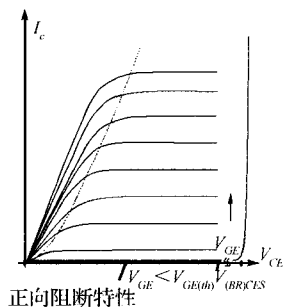


图3 IGBT 静态特性曲线

1.2.2 关断栅压选择

IGBT 的关断过程可能会承受很大的 dv/dt , 伴随关断浪涌电流, 干扰栅极的关断电压, 可能造成器件的误开通。为提高驱动电路的抗干扰能力, 在关断时栅极应加上适当的负偏压, 一般取为 $-10\text{ V} < V_{GE} < -5\text{ V}$ 。

1.2.3 栅极串联电阻 R_g 的选择

从 IGBT 的开关特性的分析可以看出, R_g 直接影响 IGBT 的工作情况。为提高开关频率, R_g 取值应该尽量小。但如果 R_g 取值过小, 会导致栅、射极之间的充放电时间常数小, 开通瞬间电流较大, 从而损坏 IGBT; 若 R_g 取值过大, 虽然在抑制 dv/dt 方面很有效果, 但增加了 IGBT 的开关时间和开关损耗, 严重影响 IGBT 的性能和工作状态。 R_g 的取值大概是十几欧到几百欧之间, 具体取值根据应用的实际情况选取最佳值。

2 驱动电路的保护

2.1 过流保护

2.1.1 过电流损坏原因

IGBT 内部有寄生晶闸管, 在规定漏极电流范围内, 其产生的正偏压不足以使晶体管导通, 当漏极电流

大到一定程度, 正偏压足以使晶体管导通, 进而使寄生晶闸管开通, 栅极失去控制, 发生擎柱效应。此时关断无效, 集电极电流很大, 致使 IGBT 损坏^[7,8]。当电流还未达到擎柱效应所需电流大小时, 如果 IGBT 运行指标超过 SOA 所限定的电流安全边界, 即工作在过流状态下, 其长时间过流运行会造成很高的功耗, 损坏器件。当最严重的过流情况, 即短路发生时, 电流很快达到额定电流的 4~5 倍, 此时必须尽快关断器件, 否则器件将很快损坏。

2.1.2 过电流的处理

根据 IGBT 的静态特性, 当发生过流时, V_{CE} 会随电流急剧变大, 则可以通过检测 V_{CE} 的大小来判断是否过流。当检测到过流发生时, 首先采取降栅压措施, 从图 3 的静态特性曲线可知, 栅压降低以后, 电流显著减小。这样一方面可以保护器件, 另一方面如果确定是短路需要关闭器件时, 不用在相当大电流的基础上执行关断, 反而引入 di/dt 。当降栅压运行一段时间后 (一般是 $10\text{ }\mu\text{s}$), 如果电流恢复正常, 可以再加上正常的栅压, 这样可以有效避免假过流造成的误保护。但如果电流仍然处于过流的状态, 则判断是短路故障, 应该马上对 IGBT 进行关断。此时, 绝对不能快速关断, 因为短路时电流非常大, 直接关断会在线路寄生电感上产生很大的电压, 进而损坏器件, 而应该保证电流变化率不会过大, 让栅极电压缓慢降低关断器件^[9,10]。

2.2 栅极过压的保护

2.2.1 栅极过压原因

IGBT 大多是工作于感性负载状态, 当其处于关断状态, 而反并二极管正在反向恢复过程时, 就会有很大的 dv/dt 加于 C、E 两端。由于密勒电容的存在, 该 dv/dt 将在电容上产生瞬间电流, 流向栅极驱动电路。该电流与 R_g 作用, 如果 R_g 值偏大, 使 V_{ge} 超过 IGBT 开通门限电压值, 器件就会被误触发导通。

2.2.2 栅极过压处理

在栅射间并接入一个栅射电阻可以解决栅极过压的问题。另外, 为了防止栅极驱动电路出现高压尖峰, 本研究在栅射间并接 2 只反向串联的稳压二极管, 其稳压值与正、负栅压相同。这样可以保证栅射电压的稳定, 并且能有效地将密勒电容产生的电流通过栅射电阻释放, 达到栅极过压保护的目的。

3 电路设计

3.1 电路说明

驱动电路原理图, 如图 4 所示。整个驱动端电路

采用 6N137 光耦隔离,单电源供电,通过一个 5 V 的稳压管 D_5 完成 0 V 和 -5 V 之间的转换,并用一个电源实现了正负电源的功能。图 4 中, D_6 、 D_7 、 R_2 构成栅极过压保护电路, D_3 、 D_4 是快恢二极管, D_1 、 D_2 是稳压值不同的齐纳稳压管。

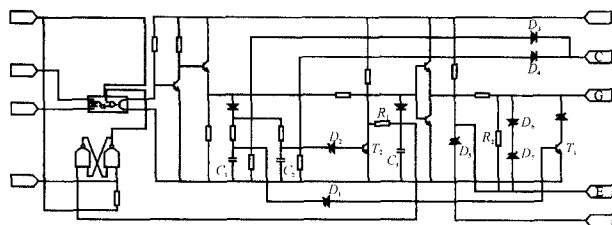


图 4 驱动电路原理图

3.1.1 正常工作时

驱动信号通过光耦送入驱动电路,通过 RS 触发器的置位引脚启动电路。开通时,两个过流保护的延时电路电容 C_1 、 C_2 开始充电,此时推挽电路也将 V_g 提高到正栅压,IGBT 导通, V_{CE} 很快下降为导通压降,当 C_1 、 C_2 电压高于 V_{CE} 时, D_3 、 D_4 导通, C_1 、 C_2 电压被钳位,不再上升,也就不会将 D_1 、 D_2 击穿,电路正常工作。关断时, C_3 已经被充电,与 C_3 串联的二极管截止,推挽电路输出低电平,由于 D_5 的原因,栅压变为 -5 V,将 IGBT 关断。

正常工作时最重要的是 C_1 、 C_2 及其充电电阻的选择,时间常数不能太小,否则会在 IGBT 开通前将 D_1 、 D_2 击穿进入过流保护状态,也不能过大,否则在过流时会因为动作时间过长而损坏器件。

3.1.2 过流降栅压运行

一旦 IGBT 过流, V_{CE} 急剧上升,超过了 C_1 、 C_2 的钳位电压, D_3 、 D_4 反向阻断, C_1 、 C_2 开始充电,当 C_1 的电压高于 D_1 的击穿电压(D_1 击穿电压低于 D_2)时, D_1 反向击穿, T_1 导通,与 T_1 串联的稳压管投入电路工作,将此时的栅压降低,实现降压运行。

3.1.3 短路缓慢关断

控制 C_2 电压上升和 D_2 击穿电压之间的关系,调整 D_1 、 D_2 相继击穿的时间差约为 10 μ s,如果 10 μ s 内电流恢复正常,那 V_{CE} 会再降低, D_3 又导通, C_1 、 C_2 电压钳位到低电平,恢复正常工作。而如果是短路发生, C_2 的电压会持续上升,直至击穿 D_2 ,导通 T_2 , C_3 马上通过 R_1 和 T_2 放电,栅压开始缓慢降低,降低的速率由 C_3 和 R_1 的时间常数决定,当 C_3 的电压降低到低电平时,改变 RS 触发器状态,将 6N137 封锁,输出低电平,完全关断 IGBT,从而实现短路时栅极电压的缓慢降低,并缓慢关断 IGBT。

该过程中最关键的是两个保护电路的延时电路参数的选取。具体 IGBT 的保护时间设置有很多选择,可以改变电阻电容的组合,也可以改变稳压管的击穿电压。

3.2 短路保护实验

试验电路,如图 5 所示。先将电容充电,然后启动驱动电路,可以观察短路保护时的波形,如图 6 所示。

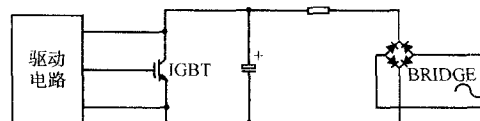


图 5 短路测试电路

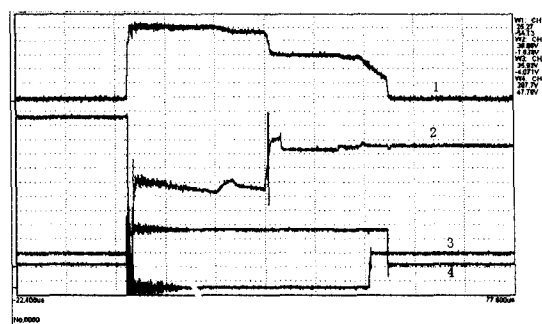


图 6 短路测试波形

1—栅极电压波形;2— V_{CE} 波形;3、4—RS 触发器 2 个输出的波形

由图 6 可见,向驱动电路发出启动信号后,RS 触发器输出反向,栅极电压上升到开通电压,而 V_{CE} 由于电容通过 IGBT 放电,电压猛降,此时,IGBT 中流过的电流相当大,处于过流的状态,经过大概 10 μ s 的时间,保护电路开始作用,IGBT 进入降压运行阶段,从图中看出,此时从 IGBT 流过的电流已经明显减小,从电阻流入的电流已经将电容的电压又补充回去,但此时的电流仍然很大,故再经过大约 10 μ s 的时间,电路进入关断阶段,栅极电压开始以一定的斜率下降,趋势很平缓,当栅极电压降到逻辑低的电压值时,触发器状态变化,驱动电路封锁,此时如果要重新开启电路,需要再给出启动信号。

从短路测试中可以看出,在过流的时候该电路能够有效地完成降压运行和缓慢关断的任务,为 IGBT 的正常工作提供保障。

4 结束语

该驱动电路具有隔离驱动、过流保护、过栅压保护等特点。如果希望电路能正常工作,重要元件的参数需要认真选择,特别是 R_g 值的选取,在电路上可对 R_g

(下转第 71 页)

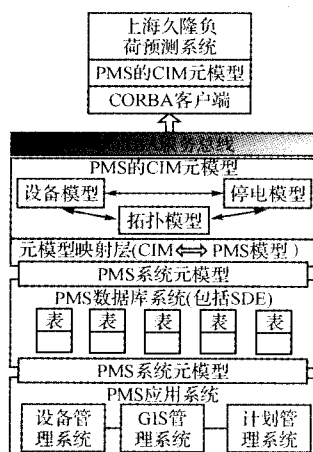


图 10 基于 PMS 数据源的负荷预测系统实施框架

4 结束语

本研究详细论述了在上海电力公司 PMS 中采用 CIM 封装异构数据的实施方案,着重讨论了在实践中解决问题的一系列措施。

研究结果表明:对 PMS 的 CIM 封装工程实践体现了 CIM 在解决异构系统信息交互难题中的优势,对电力企业信息化的进一步探索具有一定的借鉴意义。

参考文献 (Reference):

- [1] BECKER D, FALK H, GILLERMAN J. Standards-based approach integrates utility applications[J]. **IEEE Computer**

Applications in Power, 2000, 13(4): 13-20.

- [2] 张慎明,刘国定. IEC61970 标准系列简介[J]. **电力系统自动化**, 2002, 26(14): 1-6.
- [3] International Electro-technical Commission (IEC). IEC 61970 TC53 Energy Management System Application Program Interface (EMS-API) part 301: Common Information Model (CIM) base[S]. USA: IEC, 2003.
- [4] International Electro-technical Commission (IEC). IEC 61970 TC57 Energy Management System Application Program Interface (EMS-API) part 302: Common Information Model (CIM) financial energy scheduling, and reservation [S]. USA: IEC, 2003.
- [5] BOGGS W, BOGGS M. UML with Rational Rose 从入门到精通[M]. 北京:电子工业出版社, 2000.
- [6] DEVOS A, WIDERGREN S E, ZHU J. XML for CIM model exchange [C]//Power Industry Computer Applications, 2001. PICA 2001. 22nd IEEE Power Engineering Society International Conference on Innovative Computing for Power-Electric Energy Meets the Market, 2001: 31-37.
- [7] W3C. Resource Description Framework (RDF) Model and Syntax Specification [EB/OL] [2004-02-10]. <http://www.w3.org/TR/REC-rdf-syntax>.
- [8] 刘崇茹,孙宏斌,张伯明,等. 基于 CIM XML 电网模型的互操作研究[J]. **电力系统自动化**, 2003, 27(14): 45-48.
- [9] 叶 锋,叶清华,顾 全. 关于组件接口规范的应用研究及实现[J]. **电力自动化设备**, 2006, 26(7): 47-51.

[编辑:张 翔]

(上接第 60 页)

部分进行改进,利用二极管分别在开通和关断时得到不同 R_g 值。另外,该驱动电路只能对过流和栅极过压起保护作用,对 V_{CE} 的过压保护需要在主电路中加入缓冲保护电路,才能保证器件的可靠工作。

参考文献 (Reference):

- [1] 林渭勋. 现代电力电子电路[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2002.
- [2] 华 伟,周文定. 现代电力电子器件及其应用[M]. 北京:北方交通大学出版社, 2002.
- [3] BISWAS S K, BASAK B, RAJASHEKARA K S. A Modular Gate Drive Circuit For Insulated Gate Bipolar Transistors [C]// Conference Record of IEEE IAS 1991. Dearborn: [s. n.], 1991: 1490-1496.
- [4] SHIMIZU Y, NAKANO Y, KONO Y, et al. A High per-

formance intelligent IGBT with overcurrent protection [C]// Proceedings of ISPSD 1994: [s. n.], 1994: 37-41.

- [5] 王 永,沈颂华. 一种简单的 IGBT 驱动和过流保护电路[J]. **电测与仪表**, 2004, 41(4): 25-27.
- [6] 倪红军,李 明,赵绍刚. 三电平逆变器 IGBT 驱动和保护电路的实现[J]. **电子设计应用**, 2004(4): 75-77.
- [7] 盛祖权,张 立. IGBT 模块驱动及保护技术[J]. **电焊机**, 2000, 6(4): 4-8.
- [8] 李 明. IGBT 特性曲线解读[J]. **电焊机**, 2000, 30(11): 21-25.
- [9] 王正仕,徐德鸿. 一种 IGBT 的实用驱动电路[J]. **电气传动**, 1999, 29(6): 54-55.
- [10] 王正仕,吴益良. IGBT 的过流保护[J]. **电力电子技术**, 1996, 30(3): 70-73.

[编辑:张 翔]