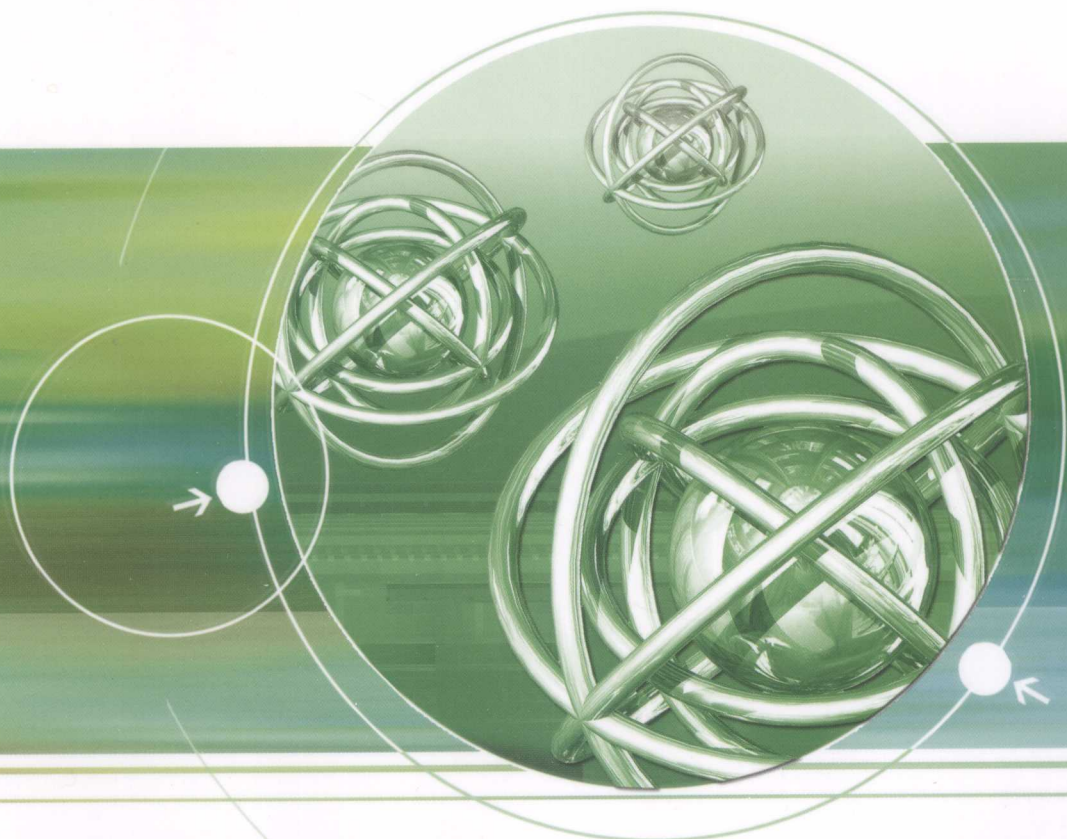


IGBT及其集成控制器 在电力电子装置中的应用



◎ 曲学基 曲敬铠 于明扬 等编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

IGBT 及其集成控制器在电力电子 装置中的应用

曲学基 曲敬锐 于明扬 等编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

功率开关管 IGBT 与集成控制器相配合,在电力电子装置中得到了广泛的应用,特别是 IGBT 智能化模块(IPM)的出现,更加扩展了其应用范围。

本书的特点是具有很强的实用性。在简单介绍 IGBT 和 IPM 的工作原理和主要技术参数后,重点介绍 IGBT 和 IPM 在电力电子装置中的应用。

本书可供从事开关电源、逆变电源、焊机电源、电机调速、变频电源、电力传动、电力有源滤波器和 UPS 等技术工作的人员参考,对于电力电子技术专业的师生也有参考价值。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

IGBT 及其集成控制器在电力电子装置中的应用/曲学基等编著. —北京:电子工业出版社,2010.1
ISBN 978-7-121-10070-3

I. I… II. 曲… III. ①绝缘栅场效应晶体管—应用—电力装置 ②功率晶体管—应用—电力装置
IV. TN7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 225304 号

策划编辑:魏永昌

责任编辑:胡丽华 特约编辑:李云霞

印 刷:北京冶金大业印刷有限公司

装 订:三河市万和装订厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:31 字数:795 千字

印 次:2010 年 1 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:65.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

近些年来,由于新型功率器件和集成控制器的大量涌现以及电力电子变换技术的进步,也因为 IGBT 相对于 GTR、SCR、MOSFET 等功率器件具有许多优点,使其在电力电子装置中的应用越来越占据了重要地位,成为主流器件,大有取代 SCR 和 GTR 之势,对电力电子变换技术及其应用带来了根本性的变革。

IGBT 在电力电子装置中的应用电路,主要集中在 DC-DC 变换和 DC-AC 变换两个方面。在开关电路中涵盖了 DC-DC 变换器结构拓扑,而在逆变电路中涵盖了 DC-AC 变换器结构拓扑。所以开关电路和逆变电路是 IGBT 应用的基本电路。将这些基本电路用于开关电源、逆变电源、焊机电源、电机调速、变频电源、电力传动、电力有源滤波器和 UPS 等领域,促进了相关技术的进步和发展。这些技术的进步和发展将给电力工业、交通运输、数控机床、信息产业和家电产业等带来革命性的变化,对国家的经济发展和每个人的日常生活产生深刻的影响。

从事电力电子技术的工程技术人员,对功率器件的应用很感兴趣,顺应他们的需求,本书不讲 IGBT 和 IPM 的制造工艺,而将重点放在 IGBT 及其集成控制器在电力电子装置中的应用。

全书共 11 章。第 1 章为 IGBT 的特性及辅助电路。这一章是基础部分,对 IGBT 的工作原理、技术参数、栅极驱动电路、缓冲电路等予以简单介绍。这部分的知识对理解后面几章的内容是必不可少的。第 2 章介绍了 IGBT 及其集成控制器在开关电路中的应用。其中包括基本的开关电路,开关电路的 PWM 反馈控制,软开关变换器,变换器的多路输出,开关电源主电路、高频变压器和输出滤波器的设计,PWM 控制器集成电路等几部分。这几部分的内容在后面几章中也要用到,为了节省篇幅,在以后各章中不再赘述。该章最后给出 IGBT 及其集成控制器在开关电源中的应用实例。第 3 章介绍了 IGBT 及其集成控制器在逆变电路中的应用。其中包括逆变器电路的基本形式、并联逆变技术等内容。最后给出了 IGBT 逆变电路的应用实例。第 4 章为 IGBT 及其集成控制器在弧焊逆变电源中的应用。其中包括 IGBT 弧焊逆变电源的结构、逆变电源主电路的工作原理、控制电路的工作原理、驱动电路、保护电路和缓冲电路,并介绍了几种 IGBT 弧焊逆变电源产品。第 5 章介绍了 IGBT 及其集成控制器在交直流调速中的应用。在简单介绍了电力拖动控制技术和交直流调速系统后,给出了交直流电动机调速系统的应用实例。第 6 章为 IGBT 及其集成控制器在变频电源中的应用。本章在说明了变频器与变频电源的区别后,给出了 IGBT 变频器应用实例。第 7 章为 IGBT 及其集成控制器在有源电力滤波器中的应用。在介绍了有源电力滤波器的工作原理和并联型、串联型、串并联型和混合型有源电力滤波器的控制方式后,对这四种有源电力滤波器给出了应用实例。第 8 章介绍了 IGBT 及其集成控制器在 UPS 中的应用。本章的主要内容为 UPS 的分类和工作原理以及应用实例。第 9 章为 IGBT 及其集成控制器在电子镇流器中的应用。该章主要介绍了对电子镇流器的要求、电子镇流器中的逆变电路、电子镇流器用驱动集成电路、电子镇流器用功率因数校正集成电路和应用实例。第 10 章为 IGBT 及其集成控制器在电池充电电路中的应用。在介绍了蓄电池的类型、蓄电池的充放电方式和 IGBT 高频开关充电电源的工作原理后,重点给出几种电池充电集成电路,其中还介绍了智能化充电集成电路。最后为 IGBT 高

频开关充电电源的应用实例。第 11 章是 IGBT 及其集成控制器在再生能源技术中的应用。该章重点介绍了 IGBT 及其集成控制器在太阳能发电技术中的应用和 IGBT 及其集成控制器在风力发电技术中的应用。全书以应用电路和技术说明为主,具有较高的参考价值。

本书由曲学基、曲敬铠、于明扬等编著,参加本书编写的还有王仁贵、周和平、王春祥、宋玉杰、刘志勤、曲晓晖、吴志凯、许京春、刘明媛、周胜利、金亮、李清、张松晨、张铁斐、栾倩、秦学风等。由于编者能力有限,难免出现错误,请给予指正。

编著者

2009 年 7 月于北京

目 录

第 1 章 IGBT 特性及辅助电路	(1)
1.1 IGBT 的结构和技术参数	(2)
1.1.1 IGBT 的结构和基本特性	(2)
1.1.2 IGBT 的主要参数	(10)
1.1.3 IGBT 模块	(12)
1.1.4 功率集成模块(PIM)和智能化模块(IPM)	(20)
1.2 IGBT 驱动电路	(33)
1.2.1 IGBT 栅极驱动的要求	(33)
1.2.2 IGBT 栅极驱动电路	(34)
1.3 IGBT 的缓冲电路	(54)
1.3.1 关断缓冲电路和导通缓冲电路	(54)
1.3.2 无源无损缓冲电路	(58)
1.3.3 有源无损缓冲电路	(63)
第 2 章 IGBT 在开关电路中的应用	(69)
2.1 基本开关电路	(69)
2.1.1 串联开关电路	(69)
2.1.2 并联开关电路	(70)
2.1.3 串-并联开关电路	(71)
2.1.4 并-串联开关电路	(72)
2.2 开关电路的 PWM 反馈控制	(73)
2.2.1 电压模式控制 PWM	(73)
2.2.2 电流模式控制 PWM	(74)
2.2.3 滞环电流模式控制 PWM	(76)
2.2.4 相加模式控制 PWM	(76)
2.3 软开关变换器	(77)
2.3.1 ZVS 和 ZCS 变换器	(77)
2.3.2 ZVS-PWM 和 ZCS-PWM 变换器	(80)
2.3.3 ZVT-PWM 和 ZCT-PWM 变换器	(84)
2.3.4 PS 软开关变换器	(87)
2.3.5 有源钳位 ZVS-PWM 变换器	(90)
2.3.6 移相调宽 DC/DC 变换器	(95)
2.4 变换器的多路输出技术	(96)
2.5 开关电源主电路、高频变压器和输出滤波器的设计	(99)
2.5.1 主电路的设计	(99)
2.5.2 高频变压器的设计	(100)
2.5.3 输出滤波器的设计	(111)

2.6	PWM 控制器集成电路	(119)
2.6.1	部分 PWM 和 SPWM 控制器集成电路的主要性能和参数	(119)
2.6.2	电压型 PWM 控制器集成电路	(124)
2.6.3	电流型 PWM 集成控制器	(132)
2.6.4	电压/电流型 PWM 控制器集成电路	(141)
2.6.5	移相型 PWM 控制器集成电路	(143)
2.7	IGBT 开关电源的实例	(150)
2.7.1	TL494 控制的推挽式 IGBT 开关电源 ^[7]	(150)
2.7.2	SG3524 控制的 IGBT 开关电源 ^{[2][4][7]}	(151)
2.7.3	SG3525A 控制的 IGBT 开关电源 ^{[4][20][25][26]}	(153)
2.7.4	UC3842 控制的反激式 IGBT 开关电源 ^{[2][5]}	(157)
2.7.5	UC3828 控制的正激式 IGBT 开关电源 ^[2]	(160)
2.7.6	UCC3802 控制的反激式 IGBT 开关电源 ^[2]	(160)
2.7.7	UC3875 控制的全桥移相式 IGBT 开关电源 ^[20]	(161)
第 3 章	IGBT 及其集成控制器在逆变电路中的应用	(165)
3.1	逆变器电路的基本形式	(167)
3.1.1	双向型电压源高频链逆变器	(167)
3.1.2	电流源高频链逆变器	(171)
3.1.3	三相逆变器	(174)
3.1.4	多电平逆变器	(183)
3.2	并联逆变技术	(198)
3.2.1	逆变器的并联运行	(198)
3.2.2	逆变器并联运行的均流技术	(204)
3.2.3	逆变器并联运行的同步技术	(208)
3.2.4	逆变电源的并联运行	(209)
3.3	IGBT 逆变电路的应用实例	(211)
3.3.1	IGBT 高频加热逆变电源	(211)
3.3.2	IGBT 移相式逆变电源	(212)
3.3.3	IGBT 超声波逆变电源	(214)
3.3.4	IGBT 交流调压电源	(218)
3.3.5	车载 IGBT 逆变电源	(221)
3.3.6	脉冲换相电镀用整流器	(223)
第 4 章	IGBT 及其集成控制器在弧焊逆变电源中的应用	(225)
4.1	焊接电弧的电特性	(225)
4.2	IGBT 弧焊逆变电源的结构	(226)
4.3	IGBT 弧焊逆变电源主电路的工作原理	(227)
4.4	IGBT 弧焊逆变电源的数字化控制技术	(229)
4.5	IGBT 弧焊逆变电源驱动电路	(231)
4.6	IGBT 弧焊逆变电源的保护电路和缓冲电路	(231)
4.7	IGBT 弧焊逆变电源的应用实例	(232)

4.7.1	ZX7 系列 IGBT 弧焊逆变电源 ^[18]	(232)
4.7.2	MZ-1250 IGBT 弧焊逆变电源 ^[23]	(234)
4.7.3	脉冲 MIG 弧焊逆变电源 ^{[23][35]}	(235)
4.7.4	NBM-630 逆变式多功能弧焊电源 ^[23]	(237)
第 5 章	IGBT 及其集成控制器在交直流调速中的应用	(239)
5.1	电力拖动控制技术与交直流调速系统	(239)
5.2	应用实例	(239)
5.2.1	IGBT 及其控制器在直流电动机调速系统中的应用 ^{[31][52]}	(239)
5.2.2	IGBT 及其集成控制器在交流电动机调速系统中的应用	(251)
第 6 章	IGBT 及其集成控制器在变频电源中的应用	(286)
6.1	基于串联谐振式 IGBT 逆变的变频电源 ^[20]	(286)
6.2	基于并联谐振式 IGBT 逆变的变频电源	(293)
6.3	基于 SA08 的 400Hz/115V 的变频电源 ^{[9][18]}	(294)
6.4	高频加热电源	(296)
第 7 章	IGBT 及其集成控制器在有源电力滤波器中的应用	(299)
7.1	有源电力滤波器的工作原理	(299)
7.1.1	有源电力滤波器的主电路	(299)
7.1.2	有源电力滤波器的控制方式	(304)
7.2	有源电力滤波器的分类	(323)
7.2.1	并联型有源电力滤波器	(326)
7.2.2	串联型有源电力滤波器	(338)
7.2.3	串并联型有源电力滤波器	(346)
7.2.4	混合型有源电力滤波器	(352)
7.3	有源电力滤波器的应用实例	(367)
7.3.1	并联型有源电力滤波器的应用实例	(367)
7.3.2	串联型有源电力滤波器的应用实例	(370)
7.3.3	串并联型有源电力滤波器的应用实例	(373)
7.3.4	混合型有源电力滤波器的应用实例	(377)
第 8 章	IGBT 及其集成控制器在 UPS 中的应用	(379)
8.1	UPS 的分类和工作原理	(379)
8.1.1	后备式 UPS	(379)
8.1.2	在线式 UPS	(379)
8.1.3	UPS 的发展趋势	(387)
8.2	应用实例	(391)
8.2.1	基于 TMS320F2812 的后备式 UPS	(391)
8.2.2	基于单片机的后备式 UPS	(394)
8.2.3	基于 TMS320LF2407A 的在线式 UPS	(396)
8.2.4	基于 DPS 的 UPS 逆变器	(399)
第 9 章	IGBT 及其集成控制器在电子镇流器中的应用	(402)
9.1	对电子镇流器的要求	(402)

9.1.1	绿色照明与电子镇流器	(402)
9.1.2	电子镇流器的功能与基本结构	(403)
9.2	电子镇流器中的逆变电路	(404)
9.2.1	电子镇流器中常用的逆变器电路拓扑	(404)
9.2.2	电子镇流器中专用 IGBT ^[50]	(405)
9.3	应用实例	(408)
9.3.1	基于 IR2155 的电子镇流器 ^{[9][18][26][51]}	(409)
9.3.2	基于 IR2156 的电子镇流器	(414)
9.3.3	基于 IR2130 的 HID 电子镇流器 ^[9]	(418)
9.3.4	基于 IR2159 的可调光电子镇流器 ^{[50][51]}	(420)
9.3.5	照明用电子变压器电路	(428)
第 10 章	IGBT 及其集成控制器在蓄电池充放电电路中的应用	(436)
10.1	蓄电池的类型	(436)
10.2	蓄电池的充电方式	(436)
10.3	IGBT 高频开关充电电源的工作原理	(437)
10.4	电池充电集成电路	(438)
10.4.1	UC3906 电池充电集成电路	(439)
10.4.2	UC3909 电池充电集成电路	(442)
10.4.3	LM3621 锂离子电池充电集成电路 ^[32]	(446)
10.4.4	BQ2000 通用型电池充电集成电路 ^[32]	(449)
10.4.5	BQ2004H/E 快速充电集成电路 ^[32]	(450)
10.5	应用实例	(453)
10.5.1	高频开关直流充电电源	(453)
10.5.2	基于 MAX2003/2003A 的充电器电路 ^{[26][32]}	(457)
10.5.3	基于 UC3906 的蓄电池充放电电路 ^[33]	(459)
10.5.4	基于 UC3909 的蓄电池充放电电路	(464)
第 11 章	IGBT 及其集成控制器在再生能源技术中的应用	(468)
11.1	IGBT 及其集成控制器在太阳能发电技术中的应用	(468)
11.1.1	家用太阳能发电系统的要求	(469)
11.1.2	太阳能发电系统的结构	(469)
11.1.3	太阳能发电系统的控制方案	(471)
11.1.4	光伏并网	(472)
11.2	IGBT 及其集成控制器在风力发电技术中的应用	(475)
11.2.1	离网型风力发电机组	(475)
11.2.2	并网型风力发电机组	(476)
11.2.3	变速发电的控制 ^[20]	(478)
11.3	IGBT 及其集成控制器在燃料电池发电中的应用 ^[28]	(480)
11.3.1	燃料发电的特点	(480)
11.3.2	燃料电池发电站中的逆变器	(481)
	参考资料	(484)

第 1 章 IGBT 特性及辅助电路

绝缘栅双极晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor,IGBT)是 20 世纪 80 年代发展起来的新型功率器件。IGBT 是功率场效应晶体管(Power MOSFET)和双极型大功率晶体管(GTR)组合在一起的复合型功率器件。它既具有 Power MOSFET 的通断速度快、输入阻抗高、驱动电路简单和驱动功率小等优点,又有 GTR 的容量大和阻断电压高的优点。自从 IGBT 在 1982 年试制成功以来,得到了广泛应用,发展很快,大有取代 GTR 之势,特别是在开关电路和逆变电路中,被视为理想的开关器件。表 1-1 给出了各种大功率器件的性能比较。

表 1-1 各种大功率器件的性能比较

参数 \ 器件	GTO	GTR	Power MOSFET	IGBT	SIT	SITH	MCT
最高耐压 (V)	9000	1400	1000	4500	1500	4500	4500
最大额定电流 (A)	9000	800	700	2500	200	2200	4000
浪涌电流 (A)	$10I_m^*$	$3I_m$	$5I_m$	$5I_m$	$5I_m$	$10I_m$	—
驱动方式	电流	电流	电压	电压	电压	电压	电压
驱动功耗	中	高	低	低	低	中	低
关断时间的典型值 (μs)	几十	10	0.3	1	0.1	3	3
极限开关频率 (Hz)	10k	50k	20M	150k	100M	100k	50k
承受 du/dt 的能力	低	中	高	高	高	高	很高
承受 di/dt 的能力	低	中	高	高	高	中	很高
最高结温 ($^{\circ}C$)	125	150	200	200	200	200	200
抗辐射能力	很差	差	中	中	好	好	中
制造工艺	复杂	复杂	很复杂	很复杂	很复杂	很复杂	很复杂
使用难易程度	难	较难	很容易	中	容易	容易	容易

I_m^* 为器件的最大额定电流。

第一代 IGBT 在 1985 年投产,其容量为 25A/(500~600)V,但存在开关速度远低于 Power MOSFET 和电流擎住问题。

第二代 IGBT 在 1989 年投产,容量达到 400A/(600~1200)V,电流擎住问题已得到解决,开关速度接近 Power MOSFET 的水平。在这一时期已开始 IGBT 模块化的研发工作。

第三代 IGBT 是在 1994 年开始发展起来的。容量高达 1200A/3300V,并且智能化模块(IPM)已经相当成熟。

表 1-2 给出了几代 IGBT 的典型参数。

表 1-2 几代 IGBT 的典型参数

第几代	正式投产年代	容量(A/V)	通态电压降(V)	开关频率(kHz)	开关时间(μ s)	评 价
1	1985	25/600	2.3~3.0	5	1.0	开关速度低于 Power MOSFET, 存在电流擎住问题
2	1989	400/1200	2.5~3.5	20	0.5	容量提高 开关速度低于 Power MOSFET, 解决了电流擎住问题
3	1994	1200/3300	3.3~6.0	50	0.2	容量超过 GTR 开关速度进一步提高 IPM 达到应用阶段

1.1 IGBT 的结构和技术参数

1.1.1 IGBT 的结构和基本特性

1. IGBT 的结构和特点

IGBT 的内部结构、等效电路和电气符号如图 1-1 所示。图 1-1(a) 为 IGBT 的内部结构, 与 Power MOSFET 比较, IGBT 是在 Power MOSFET 的漏极下又增加了一个 P^+ 区, 多了一个 PN 结(J_1)。IGBT 的等效电路如图 1-1(b) 所示。它是由 Power MOSFET 和 GTR 复合而成的。IGBT 的电气符号如图 1-1(c) 所示。

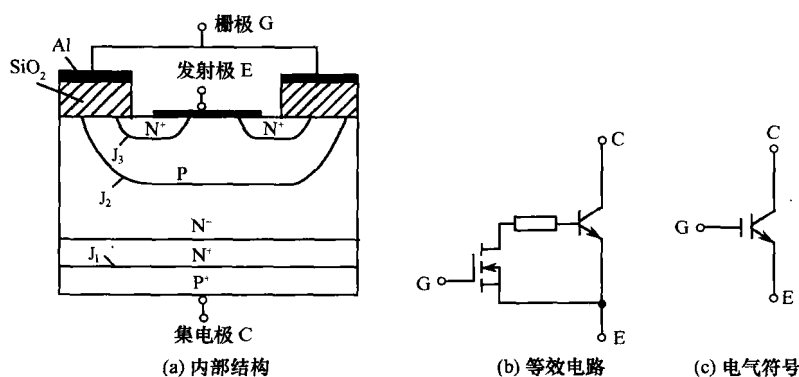


图 1-1 IGBT 的内部结构、等效电路和电气符号

由于 IGBT 是 Power MOSFET 和 GTR 的复合器件, 所以它具有以下特点:

(1) IGBT 的输入级是 MOSFET, 在 G 和 E 之间加上驱动电压时, MOSFET 便进入导通(或关断)状态。因此, IGBT 是一种电压控制器件。

(2) 在 IGBT 中, 输入级 MOSFET 的开关速度非常快, 所以 IGBT 的开关速度取决于等效晶体管的开关速度。在 IGBT 中, 通过对 N^+ 区厚度的最佳化来抑制过量载流子的注入, 并通

过引入寿命抑制机构,减小存储载流子的消散时间,来缩短等效晶体管的开关时间,从而提高了 IGBT 的开关速度,使其比双极型晶体管快得多。

(3) 当在 IGBT 的集电极-发射极之间施加负电压时,由于 P^+N 结(J_1 结)处于反向偏置,在集电极-发射极之间不可能有电流通过。由于 IGBT 比 Power MOSFET 多了一个 J_1 结,使 IGBT 比 Power MOSFET 具有更高的耐压。

由于 IGBT 的 P^+ 区的存在,当 IGBT 导通时,正载流子从 P^+ 区注入,并积聚在 N 区中,这使 IGBT 在导通时呈现低阻状态,所以 IGBT 的电流容量要比 Power MOSFET 大。

(4) IGBT 导通时, U_{CE} 的大小能反映其过电流情况。因此,可以通过测量 U_{CE} 来识别过电流情况,一旦 U_{CE} 高于某一个数值表明出现过电流情况时,可以控制栅电压快速变为零或负电压,使 IGBT 快速关断,实现对 IGBT 的过电流保护。

通过以上分析可以看出,IGBT 具有正反向阻断电压高、通态电流大及通过电压来控制其导通或关断等特点。同时,由于采用 MOS 栅,其控制电路的功耗小,导通和关断时的静态功耗也很小,只是在状态转换过程中存在一定的动态损耗。这种动态损耗也可以通过软开关技术使其达到最小。由于 IGBT 具有这些特点,才使其被广泛地作为功率开关器件用于开关和逆变电路中。

2. IGBT 的基本特性

IGBT 的基本特性分为静态特性、动态特性和高温特性三个部分。

1) 静态特性

IGBT 的静态特性主要包括输出伏-安特性、转移特性和静态开关特性。

(1) 输出伏-安特性

IGBT 的输出伏-安特性也称为正向输出特性。

IGBT 的输出伏-安特性曲线如图 1-2 所示。它是表示以栅极-发射极间电压 U_{GE} 为变量的集电极电流 I_C 和集电极-发射极间电压 U_{CE} 的关系曲线。

IGBT 的输出伏-安特性曲线分为四个区域:

I 区——截止区。在此区域内,由于 U_{GE} 很小,随着 U_{CE} 的增加, I_C 很小,且变化不大。此时, I_C 基本上是 CE 间的漏电流 I_{CEO} 。

II 区——线性放大区。在此区域内,随着 U_{GE} 的增加,当 $U_{GE} \geq U_{GE(th)}$ ($U_{GE(th)}$ 称为 IGBT 的开启电压)时, I_C 开始增加,并且随 U_{GE} 的变化呈线性关系:

$$I_C = g_m \cdot U_{GE}$$

式中 g_m ——IGBT 的跨导。

当 IGBT 用于逆变电路的开关状态下时,要求尽快越过这个区域,以便减小通态损耗。因此, g_m 这个参数在实际应用中显得不是很重要了。

III 区——饱和区。在此区域内,当 U_{GE} 为某一定值时,随着 U_{CE} 的增加, I_C 基本不变,达到饱和。 I_C 达到饱和后的集电极-发射极电压称为 IGBT 饱和电压,记为 $U_{CE(sat)}$ 。一般情况下, $U_{GE(sat)} = 2 \sim 4V$ 。

IV 区——击穿区。当 U_{GE} 为某个确定值时,增加 U_{CE} 并达到 $U_{(BR)CEO}$ 后, I_C 会突然增大,发

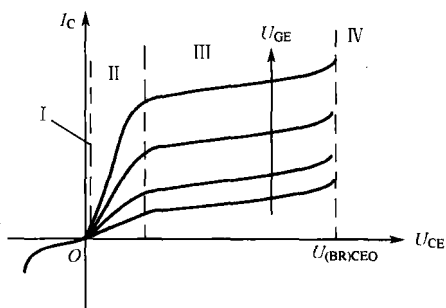


图 1-2 IGBT 的输出伏-安特性曲线

生过电压击穿。此时的 $U_{(BR)CEO}$ 称为 IGBT 的击穿电压。IGBT 绝对不能用于此区域内。

(2) 转移特性

IGBT 的转移特性曲线如图 1-3 所示。它表示在 U_{CE} 不变的情况下, I_C 与 U_{GE} 的关系曲线。在 U_{GE} 很小时, $I_C = I_{CEO}$ 。随着 U_{GE} 的增加, 在 $U_{GE} = U_{GE(th)}$ 且继续增加时, I_C 呈线性增加而进入放大区。我们把从截止区转移到线性放大器的转移点 $U_{GE(th)}$ 也称为 IGBT 的栅极开启电压。一般情况下, $U_{GE(th)} = 3 \sim 5V$ 。

(3) 静态开关特性

IGBT 的静态开关特性曲线如图 1-4 所示。IGBT 的静态开关特性实际上是表示 IGBT 瞬间从导通(关断)转移成关断(导通)的情况, 即瞬间越过线性放大区的特性曲线。

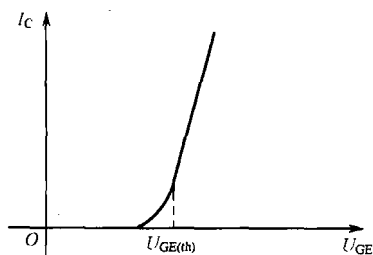


图 1-3 IGBT 的转移特性曲线

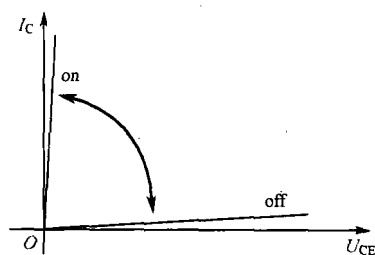


图 1-4 IGBT 的静态开关特性曲线

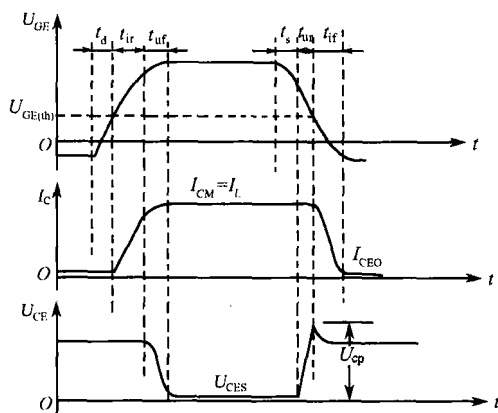


图 1-5 IGBT 的负载为感性时的动态特性曲线

2) 动态特性

前面讲述的静态特性, 只表明了 IGBT 从一个稳态变换到另一个稳态的特性, 而没有涉及状态变换的过程。IGBT 状态变换过程的特性为其动态特性。

IGBT 的动态特性与其负载有关。因为 IGBT 用于电力电子装置时的负载多半是感性负载, 所以将侧重介绍 IGBT 带感性负载时的动态特性。IGBT 的负载为感性时的动态特性曲线如图 1-5 所示。

(1) 导通特性

一般情况下, IGBT 的栅极加有一个负偏压以保证 IGBT 可靠地处于关断状态。当栅极电压 U_{GE} 由这个负偏压开始往正方向变化时, 由于栅极电容有个充电过程, 在经过一段时间后, U_{GE} 达到栅极开启电压 $U_{GE(th)}$, IGBT 的集电极电流 I_C 才由漏电流 I_{CEO} 开始增加。这段时间称为导通延迟时间 t_d 。再经过一段时间 t_{ir} 后, I_C 达到 $I_{CM} = I_L$ (I_L 为流经感性负载的电流)。此时, U_{CE} 开始下降, 在 t_{uf} 时间内下降到饱和电压 $U_{CE(sat)}$ 。 t_{uf} 称为电压下降时间。

IGBT 的导通时间 t_{on} 为 t_d 、 t_{ir} 、 t_{uf} 之和, 即

$$t_{on} = t_d + t_{ir} + t_{uf}$$

(2) 关断特性

在 IGBT 处于导通状态时, 栅极电容上充有正电压 U_{GE} , 当 U_{GE} 向负方向变化时, 由于栅极电容有个放电过程, 在经过一段时间后, U_{GE} 减小到栅极开启电压 $U_{GE(th)}$, 集电极电流开始下降。这段时间称为存储时间 t_s 。 t_s 过后, I_C 开始从 $I_{CM} = I_C$ 下降, 由于感性负载的 di/dt 的作

用, U_{CE} 在上升过程中会产生电压过冲 U_{cp} , 这段时间称为电压上升时间 t_{ur} 。在 t_{ur} 过后, I_C 继续下降, 最后达到 I_{CEO} , 这段时间称为电流下降时间 t_{if} 。

IGBT 的关断时间 t_{off} 为 t_s 、 t_{ur} 、 t_{if} 之和, 即

$$t_{off} = t_s + t_{ur} + t_{if}$$

第二代 IGBT 的导通时间 $t_{on} = 0.3 \sim 0.8 \mu s$, 关断时间 $t_{off} = 0.6 \sim 1.5 \mu s$; 第三代 IGBT 的 t_{on} 和 t_{off} 则更小。

3) 高温特性

IGBT 具有优良的高温通态特性, 在环境温度 (散热片温度) 达到 $200^\circ C$ 左右时, 仍能正常工作。特别值得一提的是, 随着温度的增高, IGBT 的正向压降反而略有下降, 并且还可以在某个特定的通态电流下, 随着温度的变化, 其通态正向压降保持基本不变。当通态电流高于此值时, 随着温度的增高, 其正向压降略有增加。这个特性显示了 IGBT 在高温情况下的应用要优于 Power MOSFET 器件。但是随着温度的升高, IGBT 通态特性的改善, 却带来了对其动态特性的不良影响。例如, 在室温下, 关断时间小于 $18 \mu s$ 的 IGBT 器件, 当温度升高到 $150^\circ C$ 时, 其关断时间增加到 $25 \mu s$, 如图 1-6 所示。

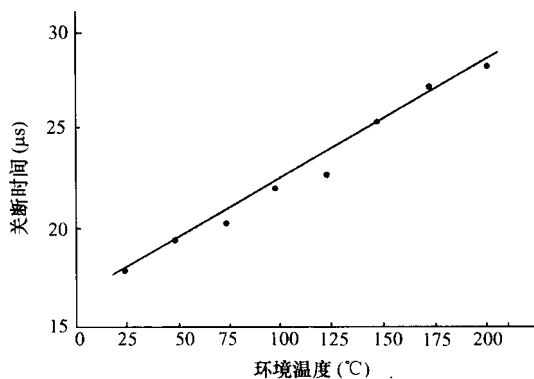


图 1-6 IGBT 的关断时间与环境温度的关系曲线

当环境温度升高时, 有可能造成 IGBT 的栅极控制失灵。在室温下, IGBT 的擎住电流一般为其平均工作电流的 $5 \sim 10$ 倍, 但随环境温度的升高, 擎住电流会大幅度地下降。因此, 在高温下, IGBT 会因擎住电流太小而产生自锁, 从而栅极失控。IGBT 的擎住电流在高温下严重下降的主要原因是两个等效晶体管的放大倍数在高温下增大。另外, P 基区的电阻随环境温度的升高而增大, 也会对自锁起一定作用。IGBT 的擎住电流与环境温度的关系曲线如图 1-7 所示。

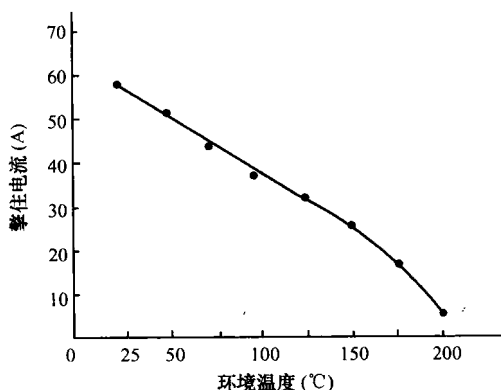


图 1-7 IGBT 的擎住电流与环境温度的关系曲线

从图 1-7 可知, 当环境温度为室温 ($25^\circ C$) 时, 某型号的 IGBT 的擎住电流约为 $58 A$ 。而环境温度增至 $200^\circ C$ 时, 擎住电流减小到约 $6 A$, 仅为室温时擎住电流的 $1/10$ 。虽然这种栅极失控的现象已受到器件设计者的重视, 并采取了一些措施来防止这种栅极失控的产生, 但在实际应用中, 还是应该注意器件的散热问题, 以避免器件工作在高温环境中。

4) IGBT 的保护

本节仅对有关 IGBT 的保护做简单的介绍, 有关缓冲电路的内容见 1.3 节。

(1) 过电流保护

过电流现象产生在 IGBT 的导通状态。IGBT 的导通状态是正向偏置状态, 所以 IGBT 的导通状态安全工作区也称正向偏置安全工作区, 简称 FBSOA。IGBT 的 FBSOA 是由额定电

流线 I_{CM} 、额定电压线 U_{CER} 和最大允许功耗线围成的,如图 1-8 所示。某个特定型号的 IGBT,其额定电流 I_{CM} 和额定电压 U_{CER} 由厂家给出的参数表中列出,而 IGBT 实际工作在导通状态下的功耗与导通时间有关。导通时间越短,功耗越小,则 FBSOA 就越宽。当 IGBT 的集电极电流超过 I_{CM} 时,极易产生过电流故障,造成 IGBT 的损坏。但在 IGBT 导通时,其集电极-发射极电压 U_{CE} 的大小能反映过电流情况,可用检测 U_{CE} 来识别过电流信号。过电流检测的原理图如图 1-9 所示。当 IGBT 导通时,栅极电压一般为 12~15V,与门的输入端 1 处于高电平“1”,而此时 IGBT 的集电极-发射极电压 U_{CE} 约在 3V 以下,与门输入端 2 处于低电平“0”,与门的输出端 3 为低电平“0”。当 IGBT 发生过电流现象时, U_{CE} 会增加,达到与门高电平时,与门的输出变为高电平。该高电平既可作为 IGBT 出现过电流现象的识别信号,又可用来控制 IGBT 的栅极电压 U_{GE} 变为 0V 或负偏置,使 IGBT 关断,避免 IGBT 被损坏。

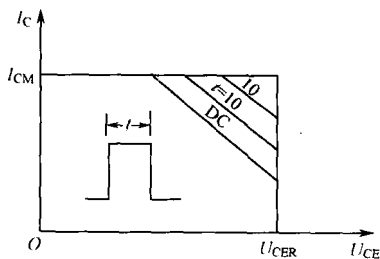


图 1-8 IGBT 的 FBSOA

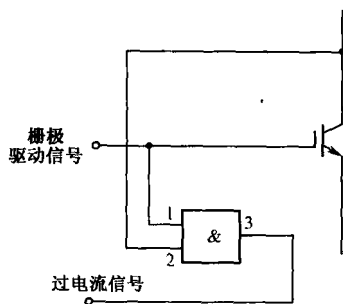


图 1-9 IGBT 过电流检测原理图

(2) 过电压保护

IGBT 用于电力电子装置时,通常负载均为感性。当 IGBT 处于开关过程中时,会产生开关浪涌电压,幅值过大或持续时间较长的浪涌电压,会损坏 IGBT。为保护 IGBT,除尽量减小感性负载(如高频变压器等)的漏感和分布电感外,还应考虑采用过电压抑制电路来对 IGBT 进行过电压保护。

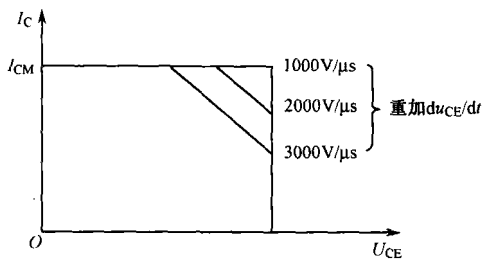


图 1-10 IGBT 的 RBSOA

IGBT 关断状态安全工作区(又称反向偏置安全工作区,简称为 RBSOA)如图 1-10 所示。IGBT 的 RBSOA 是由额定电流线 I_{CM} 、额定电压线 U_{CER} 和 du/dt 耐量限制线围成的。当 IGBT 关断时产生的浪涌电压超出了 RBSOA 的范围,IGBT 就会损坏。

把 IGBT 的工作波形控制在 RBSOA 范围以内的电路为过电压抑制电路。IGBT 的过电压抑制电路如图 1-11 所示。图 1-11(a)适用于 50A 以下的 IGBT;图 1-11(b)适用于 200A 以下的 IGBT;图 1-11(c)适用于 300A 以下的 IGBT。

(3) 短路保护

在电力电子设备中,往往要求输出发生短路时,功率开关器件不会损坏。对于 IGBT 来说,输出短路基本上有两种情况,一种是在开通时的输出短路,另一种是开通以后的输出短路。

IGBT 的短路安全工作区表示 IGBT 承受短路电流的能力,简称为 SCSOA。它与工作电压、栅极电压、栅极触发脉冲的宽度、栅极串联电阻、管芯结温等诸多因素有关。不同耐压的

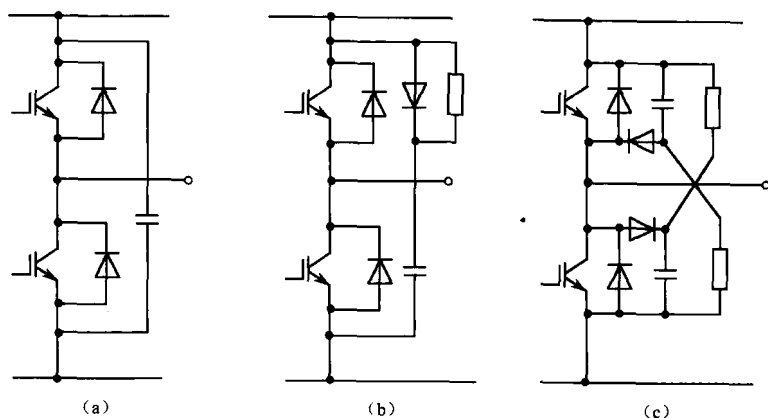


图 1-11 IGBT 的过电压抑制电路

IGBT,其 SCSOA 也不相同。图 1-12 给出了耐压为 600V 和 1200V 的 IGBT 的 SCSOA。图中的白色区域为第一种短路情况的 SCSOA,阴影区域为第二中短路情况的 SCSOA。前者的 SCSOA 比后者的 SCSOA 小得多,这是因为 IGBT 在开通时所能承受的短路电流要比 IGBT 在开通以后所能承受的短路电流小得多。

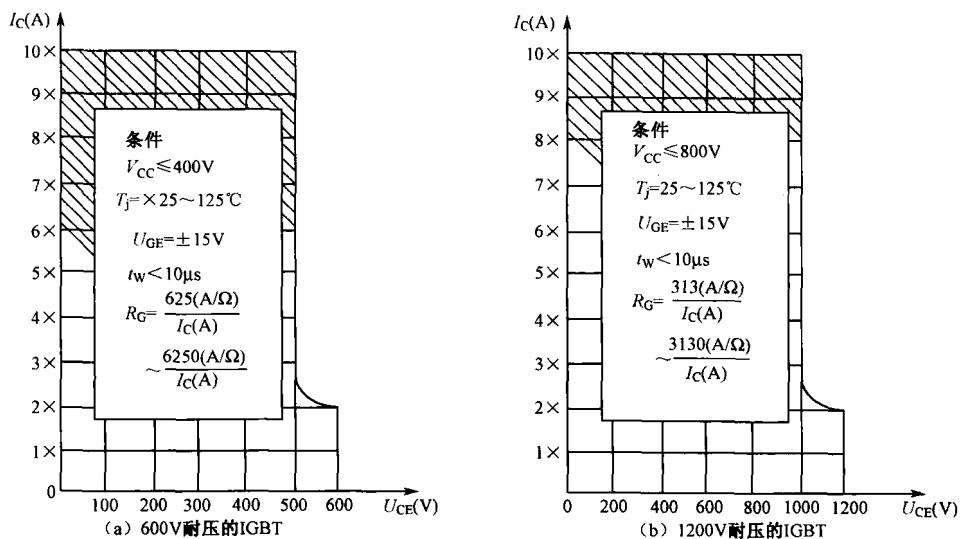


图 1-12 耐压为 600V 和 1200V 的 IGBT 的 SCSOA

为了保护 IGBT 在短路时不被损坏,要求在规定的时间内必须切断短路电流,这个规定时间称为短路时间 t_w ,一般要求 $t_w < 10\mu s$ 。切断短路电流的方法是,在 $10\mu s$ 的时间间隔内,将栅极电压由正向偏置变为反向偏置或零电压。

(4)防止 IGBT 的静电击穿

IGBT 与 Power MOSFET 相似,其栅极都是绝缘栅,所以,对 Power MOSFET 实施的静电防护措施都适用于 IGBT。IGBT 具有相当高的输入阻抗,在处于静电场较强的情况下,很容易引起静电击穿。为了防止静电击穿应注意以下几点:

① 包装 IGBT 管时,应用金属箔将各引脚包在一起,并放在抗静电的包装袋或金属容器中,不能放在塑料盒或塑料袋中;

② 取用 IGBT 管时,应拿着管壳部分,而不能拿着引脚部分,操作人员应通过导电的金属腕带良好接地;

③ 操作台和烙铁应良好接地。若烙铁没有良好接地时,在焊接 IGBT 管的引脚时,烙铁应事先断电;

④ 在测试时,测试台和测试仪器应良好接地;

⑤ 应防止栅极电压超过限值。栅极-发射极间的电压 U_{GE} 任何时候都不能超过 $\pm 20V$ 。有些 IGBT 管的内部有并联的齐纳二极管,此时,栅极-发射极间的反向电压不能超过 $0.3V$ 。内部没有并联齐纳二极管的 IGBT 管,应在栅极-发射源极间并联一个齐纳二极管或外接保护电路,例如在栅极-发射极间加一个 $5.1 \sim 20k\Omega$ 的电阻和双向稳压管,也可以在栅极-发射极间并联一个 $0.5\mu F$ 的电容器。

5) IGBT 的电流容量

由于 IGBT 通常用于脉冲电路或开关电路,所以在讨论 IGBT 的电流容量时,不太关心连续电流,重点考虑的是脉冲电流 I_{CM} 和最大开关电流 I_{LM} 。当 IGBT 用于开关电路时,峰值脉冲电流同于最大开关电流。

(1) 脉冲电流 I_{CM}

在脉冲工作条件下,IGBT 的瞬时功耗 P_{CM} 为

$$P_{CM} = \frac{T_{jM} - T_C}{Z_{th-jA}} \quad (1-1)$$

式中 T_{jM} ——最高结温;

T_C ——管壳温度;

Z_{th-jA} ——结与管壳间的瞬态热阻, Z_{th-jA} 与脉冲宽度 τ 和占空比 D 有关,如图 1-13 所示。

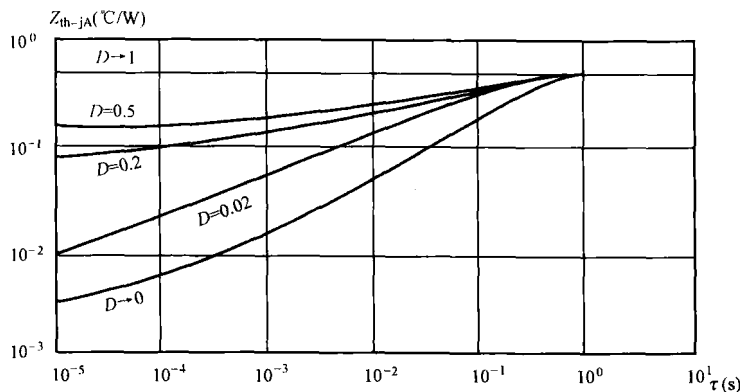


图 1-13 Z_{th-jA} 与脉冲宽度 τ 和占空比 D 的关系

续工作状态下的连续电流 I_C 。

(2) 最大开关电流 I_{LM}

最大开关电流 I_{LM} 的定义是在规定条件下可以安全地重复开关的最大电流值。该规定条件与 IGBT 的工作状态有关。从图 1-10 可以看出, I_{LM} 即为 RBSOA 的电流界限 I_{CM} ,安全区的面积与 IGBT 关断时重加于器件的电压上升率 du_{CE}/dt 有关, du_{CE}/dt 越高,安全区的面积越小。线路电感中存储的能量是产生 du_{CE}/dt 的主要原因。线路电感中存储的能量越大,过冲电压越高, du_{CE}/dt 越高。可以利用缓冲电路来限制 du_{CE}/dt 。有关缓冲电路的内容将在

而在连续工作状态下,IGBT 的稳态功耗 P_C 为

$$P_C = \frac{T_{jM} - T_C}{R_{th-jA}} \quad (1-2)$$

式中 R_{th-jA} ——结与管壳间的稳态热阻。

从图 1-13 可以看出, $Z_{th-jA} < R_{th-jA}$,所以 $P_{CM} > P_C$ 。从功耗的角度来考虑电流容量,在脉冲工作状态下的脉冲电流 I_{CM} 要远远大于连