

高等院校电气工程系列教材

电力电子装置及系统

杨荫福 段善旭 朝泽云 编著

清华大学出版社

高等院校电气工程系列教材

电力电子装置及系统

杨荫福 段善旭 朝泽云 编著

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从实际应用出发,较全面地介绍了常用电力电子装置的基本组成、控制方式及其设计思想。本书包括开关电源、逆变器、UPS电源、DC-DC电源及电力系统用电力电子装置等内容,并对实际装置原理电路进行了分析,对很多工程实际问题进行了探讨,最后以一个实例说明电力电子装置及其系统的设计过程和方法,帮助读者提高科学研究的能力。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化、自动化及相关专业的本科生教材,对从事电力电子变换和控制技术工作的科技人员也很有实际参考价值。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

电力电子装置及系统/杨荫福,段善旭,朝泽云编著. —北京:清华大学出版社,2006.9

ISBN 7-302-12386-1

I. 电… II. ①杨… ②段… ③朝… III. ①电力装置 ②电子设备 ③电力电子学 IV. ①TM7 ②TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 003117 号

出 版 者: 清华大学出版社 地 址: 北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175 客户服务: 010-62776969

组稿编辑: 陈国新

文稿编辑: 曾德斌

印 刷 者: 北京密云胶印厂

装 订 者: 三河市新茂装订有限公司

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×260 印张: 14.25 字数: 354 千字

版 次: 2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-12386-1/TM·72

印 数: 1~3000

定 价: 22.00 元

前 言

《电力电子装置及系统》是高等院校电气工程及其自动化等专业的一门专业课教材。该书以电力应用为目标,介绍了各类常用的电力电子装置及系统,但因篇幅有限,仅从不同的角度介绍各类装置和部分实用电路,希望读者在学习能够举一反三,尽快地掌握电力电子装置的基本设计方法。

本书共 8 章:第 1 章绪论,概括地介绍了电力电子装置的主要类型、发展前景及电力电子器件的应用技术;第 2 章高频开关电源,简单概括了开关电源的各种拓扑电路,重点分析了单端反激变换器及其高频变压器的设计制作,最后讲述了高频整流器;第 3 章逆变器,介绍了恒频恒压、变频调速、感应加热逆变器的电路结构和工作原理,并讨论了实用电路;第 4 章不间断电源 UPS,讲述了各类 UPS 电源的工作原理,讨论了 UPS 电源的锁相和切换技术,并介绍了 UPS 电源模块化应用;第 5 章直流-直流变流装置,介绍直流斩波变换的调速系统、具有中间交流环节的直流电源和软开关直流电源;第 6 章晶闸管变流装置,介绍了晶闸管作为开关器件的交流调功器、交流调压器、相控调速系统和谐振逆变器,并给出了一个电源装置的完整电路图;第 7 章电力系统用电力电子装置,介绍了电力系统的无功补偿、有源滤波和直流输电系统的基本原理及其实用价值;第 8 章电力电子装置的研制与试验,通过实例说明了电力电子装置的研制过程和基本设计方法。为适合不同层次的学生学习,本书还简单概括介绍了电力电子技术的基础知识,另有标 * 号的内容是为优秀学生自学和扩大知识面提供的。

本书的第 4~6 章由段善旭教授编写,第 7 章由朝泽云讲师编写,其余各章节由杨荫福教授编写。杨荫福教授负责全书统稿。

李升元高工为本书的第 2、6 章提供了部分实用电路和资料,在编写过程中还得到华中科技大学陈坚、康勇、邹云屏、徐至新、熊蕊、李晓帆等教授的支持和帮助,在此一并向他们表示衷心的感谢。同时感谢杨莉莎高工、钟和清博士、李勋讲师、陈有谋老师为本书校对、编排付出的辛勤劳动。也感谢李勋讲师、硕士研究生唐军、扶瑞云、丁志亮为本书绘图和稿件整理所做的大量工作。

中国电源学会副理事长陈坚教授在全书定稿前做了仔细的评阅,并提出了许多中肯的宝贵意见,在此表示衷心感谢。此外,对书末所列参考文献的作者也表示衷心的感谢。

由于电力电子装置及其系统包含的内容很多、范围很广,作者水平有限,难免有疏漏和错误之处,恳请广大的读者批评指正。

作 者

2006 年 7 月于华中科技大学

yinfu_yang@sina.com

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 电力电子装置及系统概述	1
1.1.1 电力电子装置及系统的概念	1
1.1.2 电力电子装置的主要类型	2
1.1.3 电力电子装置的应用概况	3
1.1.4 电力电子装置的发展前景	5
1.2 半导体电力电子开关器件	6
1.2.1 电力二极管	6
1.2.2 晶闸管	6
1.2.3 电力晶体三极管	7
1.2.4 电力场效应晶体管	8
1.2.5 绝缘门极双极型晶体管 IGBT	9
* 1.2.6 MCT 和 IGCT	10
1.2.7 半导体电力开关模块和电源集成电路	11
1.3 电力电子器件的应用技术	12
1.3.1 散热技术	12
1.3.2 缓冲电路	14
1.3.3 保护技术	16
习题及思考题	20
第 2 章 高频开关电源	21
2.1 高频开关电源概述	21
2.1.1 高频开关电源的发展状况	21
2.1.2 高频开关电源的基本组成	22
2.2 单端反激开关电源	26
2.2.1 单端反激电源的基本关系式	26
2.2.2 自激型单端反激开关电源	28
2.2.3 他激型单端反激开关电源	30
* 2.3 高频开关变压器	32
2.3.1 磁性材料的基本术语和定义	32
2.3.2 开关变压器常用的磁性材料	34
2.3.3 高频开关电源变压器的设计原则	36
2.3.4 单端反激式开关电源变压器计算	39

2.4 功率因数为 1 的高频整流器	46
2.4.1 非连续电流模式功率因数校正器	46
2.4.2 连续电流模式功率因数校正器	47
2.4.3 三相高频整流器	50
习题及思考题	54
第 3 章 逆变器	55
3.1 恒频恒压正弦波逆变器	55
3.1.1 逆变器概论	55
3.1.2 单相恒压恒频正弦波逆变器实例	61
3.1.3 三相恒压恒频正弦波逆变器	65
* 3.1.4 数字化波形控制技术	70
3.2 交流电动机变频调速系统	83
3.2.1 变频调速概论	83
3.2.2 智能功率模块变频调速装置	87
3.2.3 高压变频器	90
3.3 感应加热电源	90
3.3.1 高频谐振逆变器的工作原理	91
3.3.2 高频感应加热电源的控制	92
习题及思考题	93
第 4 章 不间断电源 UPS	94
4.1 UPS 的功能及原理	94
4.1.1 概述	94
4.1.2 UPS 的类型及其工作原理	94
4.1.3 典型 UPS 的性能对比	98
4.1.4 UPS 的发展方向	99
4.2 UPS 的组成和设计	105
4.2.1 蓄电池组	105
4.2.2 整流器和 PFC 电路	108
4.2.3 逆变器	109
4.2.4 逆变、市电的切换电路	111
4.2.5 滤波电路	113
4.2.6 旁路控制电源和系统辅助电源	114
4.2.7 接地装置、保护和报警系统	114
4.3 UPS 输出电压控制	116
4.3.1 UPS 输出电压波形控制	116
4.3.2 UPS 同步锁相技术	117
4.3.3 UPS 交流电压幅值快速检测	123
* 4.4 UPS 的模块化及串并联冗余技术	123

4.4.1 “冗余式”UPS 供电系统结构	124
4.4.2 UPS 的模块化系统设计	126
4.4.3 UPS 的并联控制策略	127
习题及思考题	132
第 5 章 直流-直流变流装置	133
5.1 应用直流斩波变换的调速系统	133
5.1.1 直流电动机无触点启动器	133
5.1.2 四象限斩波调速系统	135
5.2 滑差电机调速系统	136
5.3 具有中间变换环节的 DC/DC 变换器	139
5.3.1 主电路工作原理	139
5.3.2 控制电路工作原理	140
5.3.3 驱动电路及 IGBT 的短路保护	142
* 5.4 高频软开关变换	143
5.4.1 概论	143
5.4.2 移相控制全桥软开关 DC/DC 变换器	145
习题及思考题	153
第 6 章 晶闸管变流装置	154
6.1 晶闸管交流变换器	154
6.1.1 交流调功器	154
6.1.2 过零触发集成电路	158
6.1.3 移相控制交流调压	159
6.2 晶闸管相控调速系统	161
6.2.1 晶闸管相控整流直流电动机调速系统	161
6.2.2 晶闸管相控交流调压调速系统	163
6.2.3 绕线式异步电动机串级调速	165
6.3 交流净化型稳压电源	165
6.3.1 稳压电源类型	165
6.3.2 交流净化型稳压电源	166
6.4 晶闸管谐振型逆变器	167
6.4.1 谐振逆变器主电路结构	167
6.4.2 一个 400Hz 逆变器实例	168
习题及思考题	174
第 7 章 电力系统用电力电子装置	175
7.1 电力系统无功补偿	175
7.1.1 无功补偿装置概述	175
7.1.2 先进静止无功发生器 ASVG	177

7.2	电力系统有源滤波装置	180
7.2.1	概述	180
7.2.2	有源滤波器 APF	182
7.2.3	三相四线制有源电力滤波器	183
7.2.4	电力有源滤波装置	185
7.3	电力系统谐波与无功功率综合补偿	186
7.3.1	两类逆变器组成综合补偿系统	187
7.3.2	逆变器的控制策略	188
7.4	远距离直流输电系统	189
7.4.1	直流输电的基本原理	189
7.4.2	直流输电特点	192
7.4.3	直流输电的基本结构	192
7.4.4	直流输电的滤波装置	195
	习题及思考题	196
第 8 章	电力电子装置的研制与试验	197
8.1	电力电子装置的研制流程	197
8.2	研究对象的方案论证	197
8.2.1	研究对象的技术条件	197
8.2.2	文献检索	198
8.2.3	方案论证	199
8.3	主电路设计	201
8.3.1	输出滤波器	201
8.3.2	输出变压器设计	202
8.3.3	缓冲电路设计	203
8.3.4	直流滤波电路设计	204
8.3.5	主开关器件的选择	205
8.4	控制系统及辅助电源设计	205
8.4.1	抗冲击负荷的电路设计	205
8.4.2	调压环节	207
8.4.3	过温保护	207
8.4.4	辅助电源	207
8.4.5	驱动电路	207
8.5	电磁兼容技术和措施	207
8.5.1	电磁兼容性概念	207
8.5.2	常用的抑制电磁干扰的措施	208
8.5.3	电磁兼容性测试	210
8.5.4	电磁兼容设计	211
* 8.6	电路仿真	212
8.6.1	电路仿真的意义	212

8.6.2	计算机仿真方法简介·····	212
8.6.3	电路仿真实例·····	212
8.7	整机调试与电性能试验·····	215
8.7.1	印制板的调试·····	215
8.7.2	主机调试·····	215
8.7.3	整机调试·····	216
8.8	结构设计和例行试验·····	216
8.8.1	结构设计·····	216
8.8.2	三防处理·····	216
8.8.3	环境试验·····	216
	习题及思考题·····	218
	参考文献·····	219

第 1 章 绪 论

本章叙述了电力电子装置及系统的基本类型,简介了电力电子装置的应用情况,并归纳了电力电子器件的特性和应用技术。

1.1 电力电子装置及系统概述

1.1.1 电力电子装置及系统的概念

现代工业、交通运输、军事装备、尖端科学的进步以及人类生活质量和生存环境的改善,都依赖于高品质的电能,据统计 70% 的电能都是经过变换后才使用,而随着科技的发展,需要变换的比例将会进一步提高。电力电子技术为电力工业的发展和电力应用的改善提供了先进技术,它的核心是电能形式的变换和控制,并通过电力电子装置实现其应用。

电力电子装置是以满足用电要求为目标,以电力半导体器件为核心,通过合理的电路拓扑和控制方式,采用相关的应用技术对电能实现变换和控制的装置。

电力电子装置和负载组成的闭环控制系统称为电力电子控制系统。有的电力电子装置如各类稳压电源等,它们的输出采样设置在装置内部,本身就能够自成闭环控制系统,但是它们的工作状态仍同负载有关;在设计电路参数时,必须考虑负载因素,否则带上负载后系统不一定能稳定运行;另外在设计装置时,还必须全面考虑其运行的可靠性,电磁干扰的正确处理和结构设计的合理性都是装置可靠运行的必要条件。

电力电子装置及其控制系统的基本组成如图 1.1 所示,它是通过弱电控制强电实现其功能的。控制系统根据运行指令和输入、输出的各种状态,产生控制信号,用来驱动对应的开关器件,完成其特定功能。控制系统可以采用模拟电路或者数字电路来实现,具有各种特定功能的集成电路和数字信号处理器 DSP(digital signal processing)等器件的出现,为简化和完善控制系统提供了方便。由于用户的要求不同,所以在器件、电路拓扑结构和控制方式上,应有针对性地采用不同的方案,这就要求设计者灵活运用控制理论、电子技术、计算机技

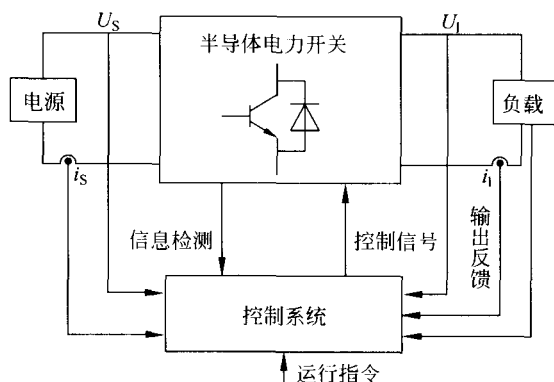


图 1.1 电力电子装置及其控制系统

术、电力电子技术等专业基础知识,将它们有机地结合起来进行综合设计。

随着新型电力电子器件的出现,功率变换技术也得到了发展,这些都为电力电子装置小型化、智能化、绿色化打下了技术基础。特别是近 30 年来各种自关断器件的应用、高频 PWM(pulse-width modulation)控制方法的实现、新型软开关拓扑结构的产生,都有力地促进了现代电力电子装置的发展,其应用范围从传统的工业、交通、电力等部门扩大到信息与通信、家用电器、办公自动化等其他领域,几乎涉及到国民经济的每个部门。

1.1.2 电力电子装置的主要类型

电力电子装置的种类繁多,根据电能转换形式的不同,基本上可以分为 5 大类:交流-直流变换器(AC/DC)、直流-交流变换器(DC/AC)、直流-直流变换器(DC/DC)、交流-交流变换器(AC/AC)和电力电子静态开关。

1. AC/DC 变换器

AC/DC 变换器又称整流器。用于将交流电能变换为直流电能。传统的整流器采用晶闸管相控技术,控制简单、效率高,但具有滞后的功率因数,且输入电流中的低次谐波含量较高,对电网污染大。采用自关断器件的高频整流器,能使输入电流波形正弦化,并且跟踪输入电压,做到功率因数接近 1,它正在逐步取代相控整流器。

2. DC/DC 变换器

DC/DC 变换器用于将一种规格的直流电能变换为另一种规格的直流电能。采用 PWM 控制的 DC/DC 变换器也称直流斩波器,主要用于直流电机驱动和开关电源。近年来发展的软开关 DC/DC 变换器显著地减小了功率器件的开关损耗和电磁干扰噪声,大大提高了开关电源的功率密度,有利于变换器向高效、小型和低噪方向发展。

3. DC/AC 变换器

DC/AC 变换器又称逆变器。用于将直流电能变换为交流电能。根据输出电压及频率的变化情况,可分为恒压恒频(CVCF)及变压变频(VVVF)两类,前者用作稳压电源,后者用于交流电动机变频调速系统。逆变器的产品以 SPWM(sinusoidal pulse-width modulation)控制方式为主,当前的研究热点在输出量控制技术、高频链技术、软开关技术和并联控制技术上。

4. AC/AC 变换器

AC/AC 变换器用于将一种规格的交流电能变换为另一种规格的交流电能。输入和输出频率相同的称为交流调压器,频率发生变化的称为周波变换器或变频器。AC/AC 变换器目前仍以控制晶闸管为主,主要用于调光、调温及低速大容量交流电机调速系统。对于中、小容量电机的驱动变频器大多应用全控器件,采用交-直-交间接变换方式。基于 PWM 理论的矩阵变换和许多高频链变换方式近年来相继被提出,目前正处在研究阶段。

5. 静态开关

静态开关又称无触点开关,它是由电力电子器件组成的可控电力开关。与传统的接触器和断路器开关相比,静态开关通、断时没有触点动作,从而消除了电弧的危害,并且接通、断开电路的时间极快,它由电子电路控制,自动化程度高。

根据需要,以上各类变换可以组合应用。此外,各类变换器正在向模块化发展,可方便地组成不同功率等级的变换器。

1.1.3 电力电子装置的应用概况

电力电子装置在供电电源、电机调速、电力系统等方面都得到了广泛的应用,各类实用装置的基本应用情况如下。

1. 直流电源装置

1) 通信电源

通信电源的一次和二次电源都是直流电源。一次电源将电网的交流电转换为标称值为48V的直流电;二次电源再将48V直流电变换成通信设备内部集成电路所需要的多路低压直流电。

2) 充电电源

充电电源的应用相当广泛,如便携式电子产品的电池、UPS的蓄电池、电动汽车和电动自行车用蓄电池以及脉冲激光器储能电容等都需要充电,不同的充电对象,对充电特性的要求也不同。

3) 电解、电镀直流电源

直流电的大用户是电化学工业,电解电镀低压大电流直流电源一般要消耗各个国家总发电量的5%左右,由电力半导体器件组成的直流电源效率高,有利于节能。

4) 开关电源

近年来通信设备、办公自动化设备和家用电器的巨大需求,更加促进了设备内部用的AC/DC、DC/DC开关电源的发展,全球市场规模已达100亿美元/年以上。DC/DC开关变流器采用高频软开关技术,其功率密度已达120W/立方英寸,效率达90%。

2. 交流电源装置

1) 交流稳压电源

由于各行业用电量的剧增以及电力变换带来的电力公害使得电网电压波动、波形失真,重要设备常需用交流稳压电源来得到高品质用电。如医疗设备通常使用电子交流稳压电源进行稳压,如果电源性能指标不符合要求,会影响医疗设备的使用效果。

2) 通用逆变电源

各类逆变电源广泛应用在航天、船舶工业、可再生能源发电系统等方面。例如特殊船舶上的基本电源是蓄电池,需要50Hz逆变器为计算机、无线电等供电,还需要400Hz逆变器为雷达、自动舵等供电。

3) 不间断电源 UPS

随着计算机及网络技术的发展,UPS近十年来得到了长足发展。采用绝缘门极双极型晶体管IGBT(insulated gate bipolar transistor)的UPS容量已达数百千瓦,DSP数字技术的引入,可以对UPS实现远程监控和智能化管理。

3. 特种电源装置

1) 静电除尘用高压电源

为了满足环保要求,通常选用除尘设备,减少烟尘对环境的污染。例如在煤气生产中用静电除尘清除煤气中的焦油,以保证煤气质量。除尘设备需要高压电源产生高压静电,利用高压静电吸收尘土。

2) 超声波电源

超声波可以用于工业清洗、超声波探伤、超声振动切削、石油探测、饮用水处理、医疗器械等方面。超声波装置由超声波电源和换能器组成。超声波电源实际上是交-直-交变频器,其输出频率在 20kHz 以上。换能器是一个谐振负载,它要求超声波电源具有高的频率稳定性和可调性。

3) 感应加热电源

感应加热技术因其热效率高、对工件加热均匀、可控性好、环境污染小等一系列优点近年来得到迅速发展,日常生活用的电磁炉是小型感应加热电源,感应加热装置需要高频交流电源。

4) 焊接电源

电焊是利用低压大电流产生电弧熔化金属的一种焊接工艺,目前应用较广的是模块化的 IGBT 电焊机。

4. 电力系统用装置

1) 高压直流输电

高压直流输电在线路上没有无功损耗又不存在系统稳定性问题,因此得到了推广应用。我国葛洲坝-上海、三峡-常州等异地输电都采用了高压直流输电方式,它的关键技术是高压大功率整流器和逆变器。目前采用晶闸管的高压直流输电系统已实现数字化控制,这就大大提高了装置的可靠性和自动化程度。

2) 无功功率补偿装置和电力有源滤波器

随着非线性负荷的大量使用,电网电能质量有所下降,无功功率补偿装置可以提高电网的利用率,有源电力滤波器可用于吸收电网谐波以提高电网的电能质量。有源电力滤波器具有动态响应快、补偿特性不受电网阻抗影响等优点,目前已得到实际应用。并联混合式电能质量调节器结合了有源电力滤波器和传统无功功率补偿装置的优点,在抑制电网谐波和补偿无功功率方面有着良好的应用前景。

3) 电力开关

大功率晶闸管常常作为电力开关控制电气设备,如晶闸管控制电容器组的投切来补偿无功功率等。

5. 电机调速用电力电子装置

我国电机的耗电量约占工业耗电量的 80%,使用调速装置可稳定速度并降低用电量,因此调速装置的推广应用和优化对推动生产和节约能源有着重大意义。调速装置除应用在舰船电力推进、机车电力传动、电动汽车、风机、水泵、机床传动、机器人运动控制、医疗手术机械、电动仪器仪表等外,中、高压变频器在发电、化工、冶金等行业中也得到日益广泛的应用,并取得明显的经济效益。

调速装置包括直流调速装置和交流调速装置。如在交通运输中,城市地铁、轻轨等的推进一般采用直流斩波调速系统;铁路机车、磁悬浮列车等的推进则采用变频调速的交流传动系统。

6. 其他实用装置

1) 电子整流器和电子变压器

我国在照明方面的耗电量占全国总发电量的 12%,国家专门设置了中国绿色照明工程

促进项目办公室。荧光灯用的电子整流器和霓虹灯专用电子变压器是新型照明电路的典型代表,它们采用高频化设计,电感体积大大缩小,消除了工频噪音和频闪现象,减少了耗能部件,提高了功率因数,具有较好的节能效果。

2) 空调电源

变频电源已普遍用于空调中,为节能降噪提供了条件。

3) 微波炉、应急灯等电源

微波炉、应急灯等电源的应用量也在不断增加。

1.1.4 电力电子装置的发展前景

国民经济的发展对电力电子装置在体积、容量、效率、功率因数及其对电网谐波干扰等方面提出了更高的要求,预示着本世纪电力电子技术将在下述研究热点取得重大突破。

1. 交流变频调速

中、小容量变频器将加快其智能化和集成化进展,可望实现变频逆变器的单片功率集成;大容量交-交变频调速将被 IGBT、GTO(门限可关断晶闸管)交-直-交变频器取代;多电平逆变器将成为高电压电动机调速的主流。

2. 绿色电力电子装置

一般称具有高功率因数和低谐波的电力电子装置为绿色电力电子装置。

1992 年美国环保署制定了能源之星标准方案,将提高电源的效率作为绿色化的一个重点,得到了世界多数国家的认同。因此,电源系统的绿色化有两层含义:首先是节电;其次电源要减少对电网及其他电器设备所产生的污染。各种功率因数补偿及零电压或零电流开关等技术的研究,为各种绿色电源产品奠定了基础。

近几年来,减小开关电源空载时的待机功耗已成为重要议题,美国、欧盟等很多国家和地区都提出待机功耗的要求,15W 以下的开关电源要求待机功耗应小于 0.3W,75W 以下开关电源待机功耗应小于 0.75W,所有大于 70W 的开关电源都应有功率因数校正装置。

3. 电动车

电动车是一种高效清洁的环保型城市交通工具,它将给电力电子技术带来巨大的市场。电动车的推广不仅要求研究先进的电动机及先进的驱动电源,还需要研究先进的电动机控制方法,电动车的兴起还会带动充电装置等专用电力电子设备的发展。

4. 新能源发电

可再生能源的应用有利于社会的可持续发展,太阳能、风能、燃料电池、潮汐发电等新能源发电是世界性研究热点,尤其是太阳能发电,备受各国重视。太阳能发电可利用电网蓄能并调节用电,即白天向电网送电,晚间由电网供电,而连接太阳能电池与电网的则是高效的逆变电源装置。

5. 信息电源

当今信息产业的发展是有目共睹的,微电子对电源有其独特的要求,例如通信系统中大量的 DC-DC 低压电源,计算机用 1V、100A 的低压大电流快响应电源等。这些都对功率半导体器件及电力电子技术提出了特殊要求,成为电力电子研究的新方向。

现代电力电子技术是信息产业和传统产业之间的重要接口,电力电子技术的发展,对加速发展我国的科学技术和国民经济必将产生积极影响。

电力电子装置及系统是理论和实际紧密结合的专业课程,为电气与电子工程专业学生

打下相关设计和研究的基础。要求学生在学好计算机原理、程序设计、系统仿真、自动控制理论、电子技术基础、电力电子学等理论课程的基础上,掌握各类电力电子装置及系统的工作原理、设计思想和基本调试方法,并且具备初步的设计能力和试验能力。

1.2 半导体电力电子开关器件

半导体电力电子器件在各种运行工况中所承受的电压、电流、稳态和瞬态功耗、运行温度都不应超过允许值,否则将发生电击穿或者过热、过流损坏。在使用器件前,应查明产品额定参数。单个半导体电力开关器件都只有单向导电性,但是控制它们导电的方法和工作特性各有不同,本节仅从应用角度出发,概括其最基本的原理及特性。

1.2.1 电力二极管

半导体二极管(diode)是不可控单向导电器件,符号如图 1.2(a)所示。用于电力变换中的大功率二极管称为电力二极管,其电压、电流的额定值都比较高,对电力二极管来说,尽管正向导电时电压降不大,但大电流时的功耗及发热却不容忽略。

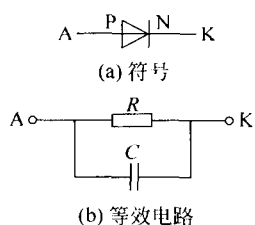


图 1.2 半导体二极管

电力二极管的重要参数主要用来衡量二极管使用过程中是否会过热烧毁,是否被过压击穿,以及开关特性。二极管应用在高频电路时,PN 结的电荷效应不能忽略,高频等效电路如图 1.2(b)所示, R 表示 PN 结的等效电阻, C 表示 PN 结的结电容,它们都具有非线性特性,通态时阻值小、容值大,断态时则相反。由于存在结电容 C ,二极管从通态转到阻断状态时,需要一定的反向恢复时间 t_{rr} 才能释放完所存储的电荷,恢复其反向阻断电压的能力,而处于完全截止状态。二极管在未恢复阻断能力之前,相当于短路状态,

在设计高频开关电路时应该充分考虑此特点。普通二极管反向恢复时间 t_{rr} 为数微秒,快速恢复二极管 t_{rr} 为几百纳秒,超快恢复二极管 t_{rr} 仅几十纳秒甚至几纳秒。

1.2.2 晶闸管

晶闸管(thyristor)又称可控硅 SCR(silicon controlled rectifier),是半控开关器件,控制电路只能控制其开通,其电路符号如图 1.3(a)所示。接法如图 1.3(b)所示,阳极 A 接在电路中的正极,阴极 K 接负极,触发电流(脉冲电流)流入门极 G。如果门极触发电流 I_G 合适,晶闸管从断态转为通态,一旦晶闸管阳极电流 I_A 大于某一临界值 I_L (掣住电流)后,即使撤除门极电流 I_G ,晶闸管仍继续处于通态,因此只要控制脉冲电流就可以控制晶闸管开通。如果脉冲电流的大小超过对应器件的规定值,脉冲宽度应能够使电路中阳极电流大于掣住电流,对于阻感负载应该考虑阳极电流上升的过渡过程。

当晶闸管的电流 I_A 小于某临界值时,晶闸管才转为断态,该临界电流值称为维持电流 I_H 。若要关断晶闸管,

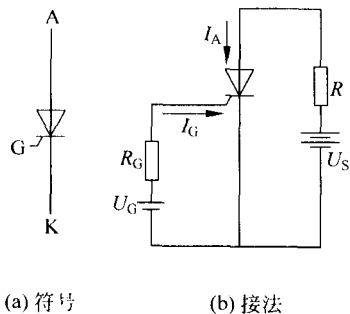


图 1.3 晶闸管符号及接法

必须使 I_A 小于维持电流 I_H , 因此晶闸管靠主电路关断。

晶闸管的开通时间 t_{on} 约为 $3\mu s \sim 5\mu s$, 关断时间 t_{off} 约几十微秒, 快速晶闸管的 t_{off} 约在 $20\mu s$ 以下。

双向晶闸管额定电流是按照有效值定义的, 但是普通晶闸管和电力二极管的额定电流 I_R 均根据早期的应用情况定义为: 在阻性负载、单相、工频正弦半波导电时所对应的通态平均电流值。可是, 引起它们损坏的是与发热对应的电流有效值 I_{rms} , 对于单相和工频正弦半波, $I_{rms} = 1.57 I_R$ 。选择器件时, 应计算实际电流波形的电流有效值除以 1.57 后, 才是晶闸管额定电流值, 再考虑 1.5~2 倍的安全裕量, 如果安全裕量选择 1.57 倍, 则可以直接按照有效值选择器件。

晶闸管的饱和压降低, 电流、电压耐量大, 主要应用在低频开关和主电路有条件关断晶闸管的场合。利用 8kV/3.5kA 的光控晶闸管所构成的电力变换装置, 容量可达到 300MVA。

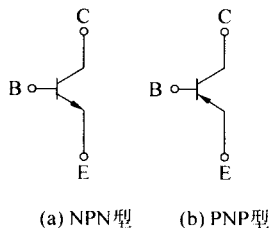
门极可关断晶闸管 GTO (gate turn-off thyristor) 可以用正向和反向脉冲电流控制开通和关断, 但反向关断的触发电流比较大, 它的符号如图 1.4 所示。GTO 饱和压降和开关速度在开关器件中属于中等, 它能控制的电流、电压较大, 目前额定电流电压为 6kA/6kV 的 GTO 已在 10MVA 以上的大型电力电子变换装置中得到应用。



图 1.4 GTO 的符号

1.2.3 电力晶体三极管

电力晶体管 BJT (bipolar junction transistor) 是一种双极型大功率高反压晶体管, 也称为巨型晶体管 GTR (giant transistor)。BJT 是电流型全控器件, 在开关工作模式下, 晶体管工作在饱和导通或截止两种状态, 控制基极电流就可控制电力三极管的开通和关断。GTR 饱和压降较低, 有二次击穿现象。由于电力三极管受到结构限制其耐压很难超过 1500V, 现今商品化的电力三极管的额定电压和额定电流大都分别不超过 1200V 和 800A。晶体管 BJT 有 NPN 和 PNP 两种型号, 它们的符号如图 1.5 所示。基本工作条件是基极电流的方向和符号的箭头方向一致, 集电极 C 和发射极 E 的电位高低也应该和符号的箭头方向一致。



(a) NPN型 (b) PNP型
图 1.5 BJT 的符号

1. 晶体管的二次击穿

晶体管有负阻特性, 即温度升高, 等效电阻减小, 因此, 容易发生二次击穿。晶体管的集电极-发射极电压 U_{CE} 超过集电极额定电压 U_{CEM} 后, 将发生正向雪崩击穿, 集电极电流 I_C 剧增, 称为一次击穿现象; 一次击穿后, 如不及时限流, 大的集电结功耗会造成局部过热, 导致三极管等效电阻减小, I_C 再次急剧上升, 三极管会因瞬时过热烧坏, 这个现象为二次击穿 SB (secondary broken)。限制三极管的功耗是防止二次击穿的最有效方法。

2. 晶体管的开关过程

晶体管的开关速度比晶闸管快, 但是对于开关频率较高的工作方式, 必须考虑开关过程的影响。图 1.6 给出了 NPN 型晶体管带负载时开通与关断的波形。定义图中 t_d 为延迟时间, t_r 为集电极电流上升时间, t_{stg} 为存储时间, t_f 为集电极电流下降时间, $t_d + t_r$ 称为开通时间 t_{on} , $t_{stg} + t_f$ 称为关断时间 t_{off} 。

延迟时间 t_d 是基极电流向发射结电容充电的时间, t_r 是积累基区载流子的时间, 存储

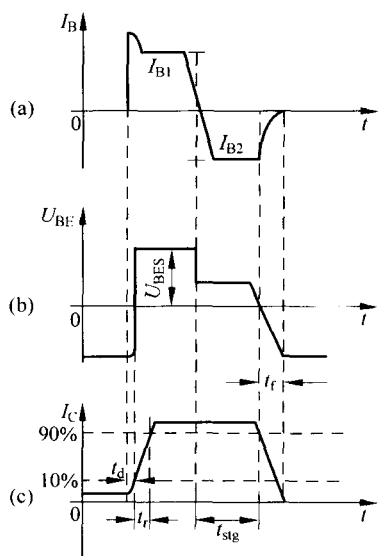


图 1.6 双极性晶体管开通、关断波形

时间 t_{stg} 是基区过剩存储电荷抽走的时间, 过剩存储电荷的多少依饱和程度而定。 t_f 是基区电荷继续抽走和管内载流子复合时间, 也是管压降上升时间, 它随 I_{B2} 的值增大而减小。

上述 4 个时间段中 t_{stg} 最长, 达微秒数量级, 它是影响开关频率的主要因素。利用基极驱动电流反向和抗饱和技术(使开关管导通时处于准饱和状态), 可以使存储时间减小。

3. 基极驱动电路

基极驱动电路应使驱动电流波形尽可能达到最佳, 并注意隔离和保护问题。最佳基极驱动电流波形如图 1.6(a)所示, 波形的前沿陡峭, 可加快 BJT 的开通过程, 导通后驱动电流降低到维持准饱和状态的正常值; 关断时, 反向基极电流 I_{B2} 可以加速抽走基极存储的过剩载流子, 缩短存储时间 t_{stg} 和管压降上升时间 t_f 。驱动方式有直接式和隔离式, 直接式指驱动的

功率放大电路直接与主电路相接, 电路简单, 但有些电路结构要求驱动必须同主电路隔离, 可用脉冲变压器或光电耦合元件隔离。

用分立元件组成的驱动电路存在元件多、电路复杂、稳定性差、保护欠佳的缺点。大规模集成化基极驱动电路的出现, 使这些问题迎刃而解。功率晶体管 BJT(GTR)的集成驱动芯片有 UA4002、M57956 等, 应用方法可查阅产品说明书。

1.2.4 电力场效应晶体管

场效应晶体管 MOSFET(metal oxide semiconductor field effect transistor)是一种电压驱动的全控型器件。为了提高功率等级, 电力场效应晶体管(P-MOSFET)往往采用垂直导电结构, 又称为 V-MOSFET(vertical-MOSFET)。采用垂直导电结构后, 源极与漏极间寄生了一个体内二极管, 如图 1.7 所示。图 1.7(a)中 N 型管箭头由源极指向栅极, 表示载流子电子从源极出发, 栅极电位高于源极电位时导电沟道才能形成; P 型管则相反, 如图 1.7(b), 箭头由栅极指向源极, 表示载流子空穴从源极出发, 栅极电位低于源极电位时, 导电沟道才能形成。

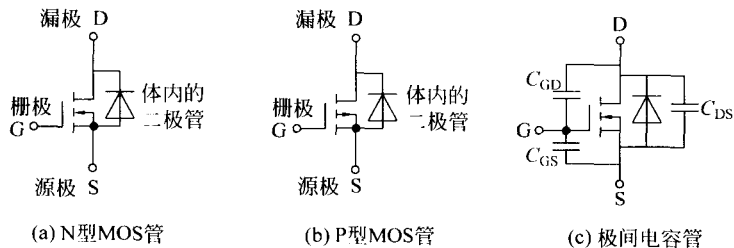


图 1.7 P-MOSFET 的符号和等效电容