



普通高等教育“十三五”规划教材
电气工程、自动化专业规划教材

电力电子技术 (第4版)

◆ 王云亮 主编



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

电气工程、自动化专业规划教材

电力电子技术

(第4版)

王云亮 主 编

黄孙伟 岳有军 黄华芳 罗春丽 张静梅 参 编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

电力电子技术是自动化专业、电气工程及其自动化专业的重要专业基础课之一。本书主要包括电力电子器件、交流-直流变换器、交流-交流变换器、直流-直流变换器、直流-交流变换器、谐振开关电路、无功功率补偿、谐波抑制和 MATLAB/Simulink 在电力电子技术中的仿真应用等内容,对读者了解和掌握变换器特性,特别是设计新型变换器具有重要的作用。本书还增加了一些实际应用环节,具有较强的应用性和工程适用性。为了方便教学,本书提供电子课件,具体情况请查阅 <http://www.hxedu.com.cn>。

本书注重学科体系的完整性,强调工程概念,注重理论与实际相结合,可作为高等院校自动化、电气工程及其自动化和相关专业的本科教材,也可作为研究生和科研设计人员的参考书。

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

电力电子技术/王云亮主编. —4 版. —北京:电子工业出版社,2019.4

电气工程、自动化专业规划教材

ISBN 978-7-121-35903-3

I. ①电… II. ①王… III. ①电力电子技术—高等学校—教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 007393 号

责任编辑:凌 毅

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

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:15.25 字数:410 千字

版 次:2004 年 8 月第 1 版

2019 年 4 月第 4 版

印 次:2019 年 4 月第 1 次印刷

定 价:45.00 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,(010)88258888。

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

本书咨询联系方式:(010)88254528, lingyi@phei.com.cn。

第4版前言

电力电子技术是一门融合了电力技术、电子技术和控制技术的交叉学科,是利用电力电子器件进行电能转换的技术,近年来发展十分迅速。为了适应 21 世纪科技和经济发展对电气和电子信息类应用型人才的需求,在电子工业出版社的组织下,我们编写了本教材。

随着新型电力电子器件的出现和微型计算机技术的发展,电力电子技术在国民经济发展中起着越来越重要的作用。各种新颖的变换器拓扑结构及控制方法层出不穷,使变换器的性能价格比不断提高。因此,教材必须适应电力电子技术的发展,使学生不仅了解和掌握电力电子器件及变换器的原理,而且具有设计和仿真新型变换器的能力。本书介绍在自动化领域广泛应用的 MATLAB 软件在电力电子技术仿真中的应用,对学生更好地掌握电力电子技术和提高设计应用能力具有重要的作用。通过 MATLAB 仿真,可以解决实验设备短缺的困难,对提高教学效果起到事半功倍的作用。

本书主要包括电力电子器件、交流-直流变换器、交流-交流变换器、直流-直流变换器、直流-交流变换器、谐振开关电路、无功功率补偿、谐波抑制、MATLAB 仿真和一些应用实例等内容。本教材适用于 48~64 学时的教学安排,“*”部分为选学内容。

本书由王云亮教授主编,除绪论外共 7 章。本书的绪论、第 4 章、第 6 章、第 7 章由王云亮教授编写,第 1 章由黄孙伟副教授编写,第 2 章由岳有军教授编写,第 3 章由罗春丽老师编写,第 5 章由黄华芳副教授编写,每章的 MATLAB 仿真部分由张静梅老师编写,本书最后由王云亮教授统稿。本书由天津大学许镇琳教授主审,许教授在审阅中提出了许多宝贵的意见,在此谨致衷心的感谢。

此外,书中部分内容引用了国内外专家、学者的研究成果,在此谨向他们致以诚挚的谢意。本书在编写过程中,得到了电子工业出版社和凌毅编辑的大力支持,也得到了编者所在单位的老师和学生的热心帮助,在此一并对他们致以衷心的感谢。

本书可作为高等院校自动化、电气工程及其自动化和相关专业的本科教材,也可作为从事机电一体化的研究生和科研设计人员的参考用书。

本书提供配套的电子课件,可登录华信教育资源网:www.hxedu.com.cn,注册后免费下载。

由于作者的业务水平和教学经验有限,错误及不妥之处在所难免,殷切希望广大同行和读者给予批评指正。

作 者
2019.3

本书文字符号说明

A——晶闸管阳极;二极管阳极	I_{dT} ——开关管的电流平均值
B——晶体管基极	I_{EBO} ——双极型功率晶体管集电极开路时射基极电流
BU_{DS} ——功率场效应晶体管漏源击穿电压	I_{FR} ——功率二极管额定电流
BU_{GS} ——功率场效应晶体管栅源击穿电压	I_{GT} ——晶闸管门极触发电流
BU_{EBO} ——双极型功率晶体管集电极开路时射基极的 击穿电压	I_H ——晶闸管维持电流
BU_{CBO} ——双极型功率晶体管发射极开路时集基极的 击穿电压	i_L ——电感电流的瞬时值
BU_{CEO} ——双极型功率晶体管基极开路时集射极的击 穿电压;绝缘栅双极型晶体管集射极额定电 压	I_L ——晶闸管擎住电流;电感电流平均值
C——晶体管集电极;IGBT 的集电极	I_{LB} ——临界连续情况下的电感电流平均值
D——开关占空比	i_N ——中线上的电流瞬时值
D——MOSFET 漏极	i_o ——输出电流瞬时值
E——直流电源电压;反电势	I_{oB} ——临界连续情况下的输出电流平均值
E——晶体管发射极;IGBT 的发射极	i_T ——开关管的电流瞬时值
f_r ——参考波频率	I_T ——开关管的电流有效值
f_s ——开关频率	$I_{T(AV)}$ ——晶闸管额定电流/通态电流平均值
f_c ——滤波器的截止频率;载波频率	i_u, i_v, i_w ——三相交流电源相电流
G——晶闸管的门极;MOSFET 的栅极;IGBT 的栅极	K——晶闸管阴极;二极管阴极
I——电流有效值	L_B ——变压器漏感
i_1 ——变压器一次侧电流的瞬时值	P——功率;有功功率
I_1 ——变压器一次侧电流的有效值	P_{CM} ——双极型功率晶体管最大耗散功率
i_2 ——变压器二次侧电流的瞬时值	P_d ——直流输入功率
I_2 ——变压器二次侧电流的有效值	P_o ——输出功率
I_A ——二极管阳极电流;晶闸管阳极电流	p_T ——开关管的功率损耗瞬时值
I_{ATO} ——GTO 最大可关断阳极电流	Q——无功功率;电荷
I_B ——双极型功率晶体管基极电流	R_L ——电阻;负载
I_C ——双极型功率晶体管集电极电流;绝缘栅双极型 晶体管集电极电流	R_{on} ——功率场效应晶体管通态电阻
I_{CBO} ——双极型功率晶体管发射极开路时集基极电流	S——MOSFET 源极;开关器件符号
I_{CEO} ——双极型功率晶体管基极开路时集射极电流	S——视在功率
I_{CM} ——双极型功率晶体管集电极最大电流;IGBT 的 集电极最大电流	t_d ——开关管导通的延迟时间
i_d ——直流电流的瞬时值	t_f ——开关管关断的下降时间
I_d ——直流电流的平均值	THD _I ——电流谐波总畸变率
I_{DM} ——功率场效应晶体管漏极最大电流	THD _U ——电压谐波总畸变率
I_{dDR} ——续流二极管的电流平均值	T_{JM} ——双极型功率晶体管最大允许结温
I_{DR} ——续流二极管的电流有效值	t_{on} ——开关管通态的时间;开关管的导通时间
	t_{off} ——开关管断态的时间;开关管的关断时间
	t_r ——开关管导通的上升时间
	T_s ——开关周期
	t_s ——开关管关断的储存时间
	U——交流电压有效值
	u_1 ——变压器一次侧相电压的瞬时值

U_1 ——变压器一次侧相电压的有效值	U_{RRM} ——功率二极管反向重复峰值电压;晶闸管反向重复峰值电压
u_2 ——变压器二次侧相电压的瞬时值	u_T ——开关管的电压瞬时值
U_2 ——变压器二次侧相电压的有效值	U_{th} ——功率二极管门槛电压
U_{2L} ——变压器二次侧线电压的有效值	u_u, u_v, u_w ——三相交流电源相电压
u_{AK} ——晶闸管阳阴极电压瞬时值;功率二极管阳阴极电压瞬时值	u_{uv}, u_{vw}, u_{wu} ——三相交流电源线电压
U_{AK} ——晶闸管阳阴极电压稳态值;功率二极管阳阴极电压稳态值	V——小功率三极管、场效应管符号
$U_{CE(sat)}$ ——双极型功率晶体管集射极饱和压降;绝缘栅双极型晶体管集射极饱和压降	VD——功率二极管符号
u_d ——直流电压的瞬时值	VS——硅稳压管符号
U_d ——直流电压的平均值	VT——晶闸管及大功率电力电子器件符号
U_{DRM} ——晶闸管断态重复峰值电压	α ——触发角,触发延迟角或控制角
U_G ——触发电压	β ——逆变角;BJT 的电流放大倍数
U_{GES} ——绝缘栅双极型晶体管栅射极额定电压	β_{off} ——GTO 关断增益
U_{GT} ——晶闸管门极触发电压	θ ——导通角
$U_{G(th)}$ ——功率场效应晶体管栅极开启电压;绝缘栅双极型晶体管栅极开启电压	δ ——晶闸管停止导电角,晶闸管关断时间对应的电角度
u_L ——电感电压的瞬时值	γ ——换相重叠角
u_o ——输出电压的瞬时值	ω ——交流电角频率
U_o ——输出电压的平均值	φ ——负载阻抗角
u_r ——参考信号电压;给定信号电压	Φ ——磁场的磁通量
U_{RO} ——功率二极管反向击穿电压	$\tau = \frac{L}{R}$ ——时间常数
U_{RR} ——功率二极管额定电压	$\cos\phi$ ——电路功率因数

目 录

绪论	1
第 1 章 电力电子器件	6
1.1 引言	6
1.2 电力电子器件的结构、特性和主要参数	6
1.2.1 功率二极管	6
1.2.2 晶闸管及派生器件	9
1.2.3 可关断晶闸管	16
1.2.4 双极型功率晶体管	18
1.2.5 功率场效应晶体管	23
1.2.6 绝缘栅双极型晶体管	27
1.3 电力电子器件的驱动电路	30
1.3.1 晶闸管的门极驱动电路	30
1.3.2 可关断晶闸管的门极驱动电路	31
1.3.3 双极型功率晶体管的基极驱动电路	32
1.3.4 功率场效应晶体管和绝缘栅双极型晶体管的栅极驱动电路	33
1.3.5 集成驱动电路	33
1.4 电力电子器件的缓冲电路	34
1.4.1 缓冲电路的作用	34
1.4.2 缓冲电路的类型	35
1.4.3 缓冲电路元件的选择	36
1.5 全控型器件的过电压及过电流保护	37
1.6 电力电子器件的串联与并联技术	38
1.6.1 晶闸管的串并联	38
1.6.2 可关断晶闸管的串并联	40
1.6.3 双极型功率晶体管的串并联	41
1.6.4 功率场效应晶体管的串并联	41
1.6.5 绝缘栅双极型晶体管的串并联	42
* 1.7 MATLAB Simulink/Power System 工具箱及常用电力电子器件的仿真模型	42
1.7.1 MATLAB Simulink/Power System 工具箱简介	42
1.7.2 常用电力电子器件的仿真模型	47
小结	49
习题 1	49
第 2 章 交流-直流变换器	51
2.1 引言	51
2.2 单相整流器	52
2.2.1 单相半波可控整流器	52
2.2.2 单相全控桥式整流器	57
2.2.3 电容滤波的不可控整流器	61

2.3 三相整流器	62
2.3.1 三相半波共阴极可控整流器	62
2.3.2 三相半波共阳极可控整流器	66
2.3.3 三相全控桥式整流器	66
* 2.3.4 其他形式的大功率可控整流器	72
2.4 晶闸管触发电路	73
2.4.1 晶闸管对触发电路的要求	73
2.4.2 同步信号为锯齿波的触发电路	73
2.4.3 集成触发电路	77
2.4.4 触发电路的定相	78
2.5 变压器漏抗对整流器的影响	79
2.6 有源逆变器	82
2.6.1 逆变的概念	82
2.6.2 三相桥式有源逆变器	83
2.6.3 逆变失败与最小逆变角的限制	84
* 2.7 整流器的谐波分析	86
2.7.1 整流器输出电压和负载电流的谐波分析	86
2.7.2 整流器在电感性负载时交流侧电流的谐波分析	89
* 2.8 相控整流器的 MATLAB 仿真	91
2.8.1 电力电子变换器中典型环节的仿真模型	91
2.8.2 单相全控桥式整流器的仿真	93
2.8.3 三相桥式整流器的仿真	94
小结	97
习题 2	97
第 3 章 交流-交流变换器	99
3.1 引言	99
3.2 相控交流调压器	99
3.2.1 单相交流调压器	100
3.2.2 三相交流调压器	103
3.3 晶闸管交流调功器和交流开关	108
3.3.1 晶闸管交流调功器	108
3.3.2 晶闸管交流开关	108
3.4 交-交变频器	108
3.4.1 单相交-交变频器	109
3.4.2 三相交-交变频器	112
* 3.5 交流调压器的 MATLAB 仿真	113
3.5.1 单相交流调压器的仿真	113
3.5.2 三相交流调压器的仿真	114
小结	117
习题 3	117
第 4 章 直流-直流变换器	119
4.1 引言	119
4.2 直流斩波器的控制	120
4.3 降压变换器	122

4.3.1	电流连续模式时的工作情况	124
4.3.2	电流连续和断续模式的边界	124
4.3.3	电流断续模式时的工作情况	125
4.3.4	寄生元件的影响	127
4.3.5	输出电压纹波	127
4.4	升压变换器	129
4.4.1	电流连续模式时的工作情况	130
4.4.2	电流连续与断续模式的边界	131
4.4.3	电流断续模式时的工作情况	131
4.4.4	寄生元件的影响	133
4.4.5	输出电压纹波	133
4.5	降压-升压变换器	134
4.5.1	电流连续模式时的工作情况	135
4.5.2	电流连续和断续模式的边界	136
4.5.3	电流断续模式时的工作情况	137
4.5.4	寄生元件的影响	138
4.5.5	输出电压纹波	139
* 4.6	库克变换器	139
4.7	全桥式直流斩波器	143
4.7.1	双极性 PWM 控制方式	144
4.7.2	单极性 PWM 控制方式	146
4.7.3	两种控制方式的比较	151
4.8	直流斩波器的一般问题	152
* 4.9	直流开关电源的应用	154
4.9.1	带电气隔离的变换器	154
4.9.2	直流开关电源的控制	157
4.9.3	PWM 集成电路 UC1524A	158
4.9.4	直流电源设计中的一些问题	159
* 4.10	Boost 变换器的 MATLAB 仿真	160
小结		162
习题 4		162
第 5 章	直流-交流变换器	164
5.1	引言	164
5.2	逆变器的基本原理	164
5.3	电压型逆变器	165
5.3.1	单相电压型逆变器	165
5.3.2	三相电压型逆变器	168
5.3.3	电压型逆变器的特点	171
5.4	电流型逆变器	171
5.4.1	单相电流型逆变器	171
5.4.2	三相电流型逆变器	172
5.4.3	电流型逆变器的特点	173
5.5	正弦脉宽调制逆变器	174
5.5.1	SPWM 的基本原理	174

5.5.2	SPWM 的控制方法	175
5.5.3	SPWM 的调制方式	180
5.5.4	三相桥式 SPWM 逆变器	181
5.5.5	SPWM 的一般问题	183
5.5.6	SPWM 波的生成方法	183
* 5.6	逆变器的多重化和多电平化技术	190
5.6.1	多重化技术	190
5.6.2	多电平化技术	193
* 5.7	直流-交流变换器的 MATLAB 仿真	195
5.7.1	PWM 脉冲发生器(2 级)的仿真模型	195
5.7.2	单相双极性 PWM 逆变器的仿真	197
5.7.3	单相单极性 PWM 逆变器的仿真	199
5.7.4	三相电压型 PWM 逆变器的仿真	202
	小结	204
	习题 5	204
* 第 6 章	谐振开关电路	205
6.1	引言	205
6.2	开关模式与谐振变换器分类	205
6.2.1	硬开关模式与谐振开关模式	205
6.2.2	谐振开关变换器的分类	206
6.3	准谐振开关变换器	207
6.3.1	零电流开关准谐振变换器	207
6.3.2	零电压开关准谐振变换器	208
6.4	零开关 PWM 变换器	210
6.4.1	零电压开关 PWM 变换器	211
6.4.2	零电流开关 PWM 变换器	212
6.5	谐振直流环逆变器	215
	小结	218
	习题 6	218
* 第 7 章	电力电子装置应用中的一些问题	219
7.1	电力电子器件的换流方式	219
7.2	变换器的保护	221
7.2.1	变换器的过电压保护	221
7.2.2	变换器的过电流保护	225
7.2.3	电压上升率及电流上升率的限制	227
7.3	电力电子装置的谐波与无功功率	228
7.3.1	谐波的产生及其危害	228
7.3.2	谐波的定义及标准	229
7.3.3	无功功率的产生及其危害	231
7.3.4	谐波的抑制方法和无功功率的补偿方法	232
	小结	232
	习题 7	233
	参考文献	234

绪 论

1. 电力电子技术的内涵

电力电子技术是一门融合了电力技术、电子技术和控制技术的交叉学科,是使用电力电子器件、电路理论和控制技术对电能进行处理、控制和变换的技术。它既是电子学在强电或电工领域的一个分支,又是电工学在弱电或电子领域的一个分支,或者说是强弱电相结合的学科。电力电子技术也称为电力电子学,或功率电子学(Power Electronics)。

通常所用的电力有直流和交流两种。直流电的主要参数有电压幅值和极性,交流电的主要参数有电压幅值、极性、频率和相位。实际应用中,在某种场合得到的电源往往不能满足用户的要求,需要在两种电能之间或对同种电能的一个或多个参数(如电压、电流、频率和功率因数等)进行变换。

电力电子技术主要由 3 个部分组成:电力电子器件、变换器和控制技术。其中,电力电子器件是电力电子技术的基础,变换器是电力电子技术的核心和主体,控制技术是不可或缺的组成部分。变流不只是交直流之间的变换,也包括直流变直流、交流变交流等,完成这些变换的装置称为变换器。

(1) 电力电子器件

从 20 世纪 50 年代开始,电力电子器件发展非常迅速,迄今为止,已经研制出了很多类型的电力电子器件。

1) 按照控制特性分类

① 不可控型器件:器件不具有可控开关性能,如功率二极管。

② 半控型器件:器件的控制极只能控制器件导通而不能控制器件关断。晶闸管及其大部分晶闸管派生器件属于这一类器件。

③ 全控型器件:器件的控制极既能控制器件导通又能控制器件关断,也称为自关断器件。可关断晶闸管、双极型功率晶体管、功率场效应晶体管和绝缘栅双极型晶体管等都属于这一类器件。

2) 按照内部载流子的工作性质分类

① 单极型器件:导通时只有空穴或电子一种载流子导电的器件,属于单极型器件的有功率场效应晶体管。该类器件的特点是工作频率高、导通压降较大,单个器件容量较小。

② 双极型器件:导通时的载流子既有空穴也有电子导电的器件,属于双极型器件的有功率二极管、晶闸管及派生器件、可关断晶闸管、双极型功率晶体管等。双极型器件通常功率较高,而工作频率较低。

③ 复合型器件:复合型器件既有单极型器件的结构,又有双极型器件的结构,通常其控制部分采用单极型结构,主功率部分采用双极型结构,属于复合型器件的有绝缘栅双极型晶体管、MOS 控制晶闸管等。复合型器件结合了两者的优点,具有卓越的电气性能,是电力电子器件的发展方向。

3) 按照器件驱动的参量分类

① 电流控制器件:由控制极电流驱动器件的通断,属于电流控制器件的有晶闸管、可关断晶闸管、双极型功率晶体管。该类器件对驱动波形要求高,驱动电路比较复杂。

② 电压控制器件:由控制极电压驱动器件的通断,属于电压控制器件的有功率场效应晶体管和绝缘栅双极型晶体管。该类器件对驱动波形要求低,驱动电路比较简单。

电力电子器件的电压、电流、开关频率是影响它们使用的关键参数,前面所述器件中,电压容量从低到高的顺序依次为功率场效应晶体管、绝缘栅双极型晶体管、双极型功率晶体管、可关断晶闸管、晶闸管,其中绝缘栅双极型晶体管、双极型功率晶体管的电压容量接近,可关断晶闸管、晶闸管电压容量接近。电流容量从低到高的顺序依次为功率场效应晶体管、绝缘栅双极型晶体管、双极型功率晶体管、可关断晶闸管、晶闸管,其中绝缘栅双极型晶体管、双极型功率晶体管的电流容量接近。开关频率从低到高的顺序依次为晶闸管、可关断晶闸管、双极型功率晶体管、绝缘栅双极型晶体管、功率场效应晶体管,其中绝缘栅双极型晶体管、双极型功率晶体管的开关频率接近。

2.1 变换器 (2) 变换器

所有变换器都可以按照电能变换功能分成如下 4 类。

① 交流-直流变换器(AC-DC Converter):将交流电变换为固定的或可调的直流电,也称为整流器(Rectifier)。

② 直流-交流变换器(DC-AC Converter):将直流电变换为频率和电压固定的或可调的交流电,这是与整流相反的变换,也称为逆变器(Inverter)。当交流输出接电网时,这种变换称为有源逆变;当交流输出接负载时,这种变换称为无源逆变。无源逆变主要应用在变压变频系统和恒压恒频系统中,前者称为变频器,应用于交流调速系统中;后者应用在不间断供电电源(UPS)和精密交流稳压电源中。

③ 交流-交流变换器(AC-AC Converter):将交流电直接变换为频率和电压固定的或可调的交流电。其中,只改变交流电压有效值的变换器称为交流调压器(AC Voltage Controller);将工频交流电直接转换成其他频率的交流电,称为交-交变频器,也称为周期变换器(Cycloconverter)。

④ 直流-直流变换器(DC-DC Converter):将固定的直流电变换为固定的或可调的直流电。其可改变直流电压幅值的大小,也可改变直流电压的极性,通过将恒定直流变成断续脉冲以改变输出电压的平均值,因此也称为直流斩波器(Chopper)。

2.2 变换器的辅助电路

变换器必须在一些辅助电路的支持下才能正常工作,这些辅助电路包括以下 4 个方面。

① 控制电路:控制电路的功能是根据输入和输出的要求产生主电路电力电子器件的通断信号。

② 驱动电路:驱动电路的功能是根据控制电路给出的通断信号,提供电力电子器件导通或关断要求的电流波形和电压波形,提供足够的驱动功率,以确保电力电子器件的迅速、可靠导通和关断。

③ 缓冲电路:缓冲电路的功能是在电力电子器件导通和关断的过程中减缓其电流或电压上升率,以降低电力电子器件的开关损耗和开关应力。

④ 保护电路:保护电路的功能是在电源或负载出现异常时,保护电力电子器件和装置免于损坏。

2.3 电力电子技术的发展

一般认为,电力电子技术的诞生是以 1957 年美国通用电气公司研制出的第一个普通晶闸管为标志的。多年来,电力电子技术的发展大体可划分为两个阶段:1957 年至 20 世纪 70 年代后期,称为传统电力电子技术阶段。在这个阶段,电力电子器件以半控型的晶闸管为主,变流电路以相控电路为主,控制电路以模拟电路为主。1980 年之后至今称为现代电力电子技术阶段。该阶段以全控型电力电子器件的使用和普及为标志,脉冲宽度调制(PWM)的变流电路广泛使用,

数字控制已逐渐取代了模拟电路。

以功率二极管和晶闸管为代表的第一代电力电子器件,以其体积小、功耗低等优势首先在大功率整流电路中迅速取代旋转机组和老式的汞弧整流器,取得了明显的节能效果,并奠定了电力电子技术的基础。功率二极管也称硅整流管,产生于 20 世纪 40 年代,是电力电子器件中结构最简单、使用最广泛的一种器件。1957 年美国通用电气公司开发出了世界上第一只晶闸管产品,从此开辟了电力电子技术迅速发展和广泛应用的崭新时代。截至 1980 年,传统的电力电子器件已由普通晶闸管衍生出了快速晶闸管、逆导晶闸管、双向晶闸管、光控晶闸管等,从而形成了一个“晶闸管大家族”。同时,各类晶闸管的电压、电流等额定参数均有很大提高,开关特性也有很大改善。由晶闸管及其派生器件构成的各种变换器在工业应用中主要解决了传统的电能变换装置中所存在的能耗大和装置笨重等问题,具有体积小、质量小、无机械噪声和磨损、效率高、易于控制、响应快等优点。

伴随着关键技术的突破及需求的发展,自 20 世纪 70 年代后期起,可关断晶闸管(GTO)、双极型功率晶体管(BJT/GTR)、功率场效应晶体管(功率 MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)等全控型器件相继问世,不仅实现了开关控制的灵活性,而且提高了开关频率,可用于开关频率较高的电路。一般将这类具有自关断能力的器件称为第二代电力电子器件,也称为全控型电力电子器件。全控型器件在逆变、斩波、整流、变频及交流电力控制中均有应用,使电路的控制性能得到改善,使以前难于实现的功能得以实现,对电力电子技术的发展起到了重要的作用。

进入 20 世纪 90 年代以后,电力电子器件的研究和开发进入高频化、模块化、集成化和智能化时代。功率集成电路(PIC)将全控型电力电子器件与驱动电路、控制电路、传感电路、保护电路、逻辑电路等集成在一起,形成高度智能化的功率集成电路。它实现了器件与电路的集成,强电与弱电、功率流与信息流的集成,成为机和电之间的智能化接口,是机电一体化的基础单元。功率集成电路的出现使电力电子技术进入了全新的智能化时代。

变换器的控制也从最初的由分立元件组成的控制电路发展到集成控制器,再到如今的旨在实现高性能和复杂控制的计算机控制系统。模拟控制电路存在控制精度低、参数整定不方便,以及元件温漂严重、容易老化、元件参数的精度和一致性差等缺点。专用模拟集成控制芯片的出现大大简化了控制电路,提高了电路的可靠性。但是,模拟控制电路的固有缺陷仍然存在。此外,专用模拟集成控制芯片还存在控制不灵活、通用性不强等问题。随着微处理器和微型计算机的位数成倍增加、运算速度不断提高、功能不断完善,控制技术发生了根本的变化,可利用软件编程实现不同的控制方式,既方便灵活,有利于参数整定、变参数调节、方便地调整控制方案和实现多种新型控制策略,同时又可减少元器件的数目、简化硬件结构,从而提高系统的可靠性。此外,计算机控制系统可以方便地实现系统监测和故障自诊断,有助于实现电力电子装置的智能化。自适应控制、多变量控制、模糊控制等新颖的控制理论的应用,大大提高了变换器的性能。

综上所述可以看出,微电子技术、电力电子器件和控制理论是现代电力电子技术的发展动力。

3. 电力电子技术的典型应用

经过几十年的发展,电力电子技术已经渗透到了许多应用领域中。大到电力系统,小到家用电器,上到航空航天,下到勘探钻井,各行各业都有电力电子技术的应用。下面仅列举一些典型应用。

(1) 在电动机调速系统中的应用

可控整流器或斩波器与直流电动机组成的调速系统有着优良的动态性能。由于电力电子器件和变频技术的发展,特别是直接转矩和向量控制系统的应用,使得交流电动机变频调速系统的

性能得到很大的提高,各种交、直流电动机调速系统在以下工业领域中有着广泛的应用:无轨电车、城市地铁、电动汽车及机车牵引等交通运输系统,可逆热轧机、热连轧机、可逆冷轧机、带钢冷连轧机、飞剪机等电动机调速系统,各类起重机械、矿井提升机、调速电梯、供水系统、堆料机、输送机、机床及各种自动化生产线,造纸、印染、纺织等工业系统。风机、泵类负载采用变频调速后,节能效果也很显著。软启动控制可以减少交流电动机启动时的电流冲击,从而被广泛应用。

(2) 在电力系统中的应用

在电力系统中,发电机的直流励磁与交流励磁系统是由电力电子装置控制的,可以达到节能和提高电力系统稳定性的目的。静止无功补偿器、有源电力滤波器、动态电压恢复器等电力电子装置,有效地减少了传统变流装置形成的电网公害,提高了电网功率因数,抑制了电网谐波,防止了电网电压瞬时跌落、闪变,有效地改善了电力系统中电能的质量。

采用换流器实现电能的交流-直流、直流-交流的变换和传输技术在高压直流输电系统中得到广泛的应用;基于电力电子技术与现代控制技术的柔性交流输电技术,可以大幅提高电力系统的稳定性。

太阳能、风能作为可再生能源,具有很大的发展空间。太阳能、风能发电受环境条件的制约,发出的电能质量较差。利用电力电子技术进行能量存储和变换,可以有效地改善电能质量。同时,可以将以上的新能源与电力系统联网向用户输送电能。

(3) 在交、直流电源中的应用

大功率直流电源在电解和电镀设备中被广泛使用。近年来,整流焊机由于采用高频逆变,体积和质量都有明显减小,既节能,又便于使用。

开关电源在办公自动化设备、计算机设备、电子产品、通信电源、工业测控、电子仪器 and 仪表中被广泛采用。由于采用了高频技术,大大减小了电源体积、质量和开关损耗,同时可以得到高精度稳压稳流电源。

不间断电源(UPS)被广泛应用于计算机机房、医院、宾馆等重要的用电场所。目前,UPS在现代社会中的作用越来越重要,在电力电子产品应用中已占有相当大的份额。

工业感应加热电源主要应用于钢水精炼及电磁搅拌改进结晶状态和金属表面的淬火热处理等场合。

据估计,在发达国家,用户使用的电能中至少有 60% 经过一次以上电力电子装置的处理。在各个国家,照明用电的数量也是比较大的。白炽灯发光效率低、热损耗大,而日光灯必须由镇流器启辉,电流要流过镇流器的线圈,因而无功电流较大,不节能。在相同功率的情况下,采用 AC-DC-AC 变换技术的电子镇流器比普通镇流器的体积小,可减少无功损耗和有功损耗。采用交流调压实现照明的电子调光,也可节约能源。在节能照明灯具中,目前推广使用的 LED 灯、无极灯等,也必须采用变换器供电,才能达到要求的电压和电流。

4. “电力电子技术”课程的学习要求

“电力电子技术”是自动化、电气工程及其自动化和机电一体化等专业学生必须掌握的一门重要的课程,既是后续课程“电力拖动及自动控制系统”的专业基础课,它还自成体系,是一门独立的、实用性很强的专业课,直接应用在生产实际中。“电力电子技术”的学习将为培养具有开拓性和创造性的人才打好基础、拓宽知识面。

该课程对本专业学生的学习要求是:

- ① 了解电力电子技术的发展动向;
- ② 熟悉和掌握常用电力电子器件的工作机理、特性和参数,能正确选择和使用它们;
- ③ 熟悉和掌握各种变换器的工作原理、工作波形分析和各种负载对电路工作的影响;

- ④ 了解各种开关元件的控制电路、缓冲电路和保护电路;

- ⑤ 了解各种变换器的特点、主要性能指标和使用场合;

- ⑥ 掌握基本变换器的实验方法与基本实验技能;

- ⑦ 掌握使用 MATLAB 软件实现电力电子变换器设计和仿真的方法。

作为一种应用技术,电力电子技术的特点是:综合性强、涉及知识面广、与工程实践联系密切。因为电力电子技术发展迅速,变换器类型越来越多,所以,本书仅对一些常见的基本变换器进行介绍和分析,为学生进一步的学习打下基础。

本课程的教学学时为 48~64 学时。在学习本课程前,学生应该已经学过“电路”和“电子技术基础”两门课程。

第 1 章 电力电子器件

电力电子器件是构成电力电子装置的基本单元,是电力电子技术的基础。其驱动电路、缓冲电路和保护电路对电力电子器件及其装置的可靠运行有着重要的作用。本章介绍常见电力电子器件的基本结构、工作原理、基本特性、主要参数和安全工作区;介绍电力电子器件的驱动电路、缓冲电路、保护方法和串并联技术。本章要求掌握电力电子器件的分类,常用电力电子器件的结构、原理、特性,以及它们的基本驱动电路、缓冲电路、保护方法和串并联技术。

建议本章教学学时数为 6 学时,其中除 1.6 节为选修内容外,其余各节为必修内容。

1.1 引 言

电力电子器件是电力电子技术的基础,每一新器件的诞生或器件特性的新进展,都带动了电力电子应用技术的新突破,或导致出现新的电路拓扑。同样,电力电子应用技术的发展又对电力电子器件提出了更新、更高的要求,进一步推动了高性能器件的研制。电力电子器件在电力电子电路中一般都工作在开关状态,在通态时应能流过很大的电流而压降很低;在断态时应能承受很高的电压而漏电流很小;断态与通态间的转换时间很短且功率损耗较小。

电力电子器件发展非常迅速,品种也非常多,但目前最常用的主要有:功率二极管、晶闸管(SCR)及晶闸管派生器件、可关断晶闸管(GTO)、双极型功率晶体管(BJT/GTR)、功率场效应晶体管(功率 MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT),以及新型的功率集成模块 PIC、智能功率模块 IPM 等。

1.2 电力电子器件的结构、特性和主要参数

1.2.1 功率二极管

1. 功率二极管的结构

功率二极管的外形、结构和符号如图 1-1 所示,功率二极管的核心部分就是一个 PN 结,在 PN 结两端加上电极引线 and 管壳后就制成了功率二极管。

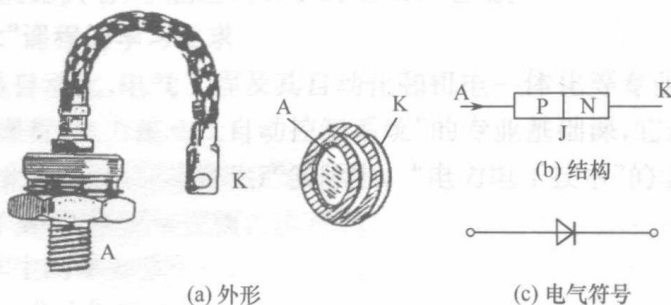


图 1-1 功率二极管的外形、结构和符号

2. 功率二极管的工作原理

由 P 型半导体和 N 型半导体结合一体,其中,N 型半导体区电子浓度大,P 型半导体区空穴浓度大,因此, N 区电子要向 P 区扩散与 P 区空穴复合,在 N 区边界侧留下正离子层, P 区空穴要向 N 区扩散与 N 区电子复合,在 P 区边界侧留下负离子层,在交界处渐渐形成空间电荷区,正、负离子层形成内电场,促进少数载流子漂移运动,即 N 区空穴漂移到 P 区,P 区电子漂移到 N 区,同时,阻碍多数载流子的扩散运动。最终,扩散运动和漂移运动达到动态平衡,形成 PN 结。

当外加正向电压(与内电场方向相反)时,多数载流子的扩散运动得到增强,少数载流子漂移运动受到抑制,形成正向电流。当外加反向电压(与内电场方向相同)时,多数载流子的扩散运动受到抑制,少数载流子漂移运动得到增强,形成很小反向电流,因此 PN 结具有单向导电性,二极管是一个正方向导电、反方向阻断的电力电子器件。

3. 功率二极管的特性

(1) 伏安特性

功率二极管的伏安特性如图 1-2 所示,二极管具有单向导电能力,二极管正向导电时必须克服一定的门槛电压 U_{th} (又称死区电压),当外加电压小于门槛电压时,外电场还不足以克服 PN 结内电场,因此正向电流几乎为零。硅二极管的门槛电压约为 0.7V,当外加电压大于 U_{th} 后,内电场被大大削弱,电流才会迅速上升。当外加反向电压时,二极管的反向电流是很小的,但是当外加反向电压超过二极管反向击穿电压 U_{RO} 后,二极管被电击穿,反向电流迅速增加。若无特殊的限流保护措施,二极管被电击穿后将造成 PN 结的永久损坏。为防止二极管出现电击穿,施加于二极管的最高反向工作电压不允许大于功率二极管的额定电压。

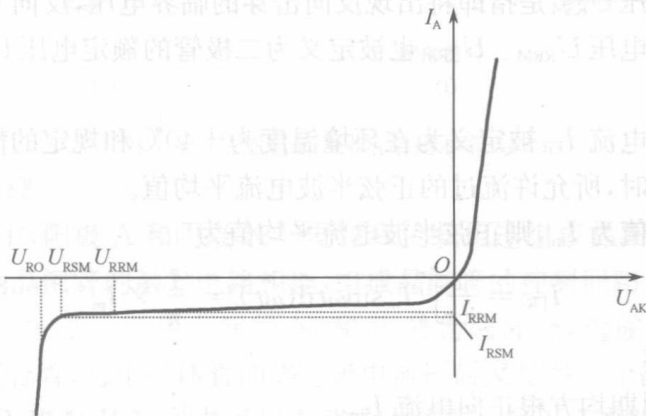


图 1-2 功率二极管的伏安特性

(2) 开关特性

功率二极管的开关特性如图 1-3 所示。因结电容的存在,功率二极管在通态和断态之间转换时有一个过渡过程,这个过程特性为功率二极管的动态特性。

功率二极管由断态转为通态时,功率二极管的正向压降也会出现一个过冲 U_{FP} ,然后逐渐趋于稳态压降值 U_F ,并达到稳态电流值 I_F 。这一动态过程的时间,称为正向恢复时间 t_{fr} 。当原处于正向导通的功率二极管的外加电压突然变为反向时,功率二极管不能立即关断,其电流逐渐下降到零,然后有较大的反向电流达到反向峰值电流 I_{RP} 和反向过冲电压 U_{RP} 出现,经过一个反向恢复时间才能进入截止。其中, t_d 为延迟时间, t_f 为电流下降时间,通常定义延迟时间与电流下降时间之和为反向恢复时间 t_{rr} 。

普通二极管的 t_{rr} 为 2~10 μ s,快速恢复二极管的 t_{rr} 为几十至几百纳秒(ns),超快恢复二极管