

普通高等学校自动化工程技术实践系列教材

现代电力电子技术

李媛媛 主 编

王宇嘉 张 颖 副主编

张莉萍 主 审

清华大学出版社

普通高等学校自动化工程技术实践系列教材

现代电力电子技术

李媛媛 主编

王宇嘉 张颖 副主编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书重点介绍电力电子器件的基本结构、工作原理和工作特性,同时详细介绍了电力电子技术中的四大类变换电路,分别是直流-交流、直流-直流、交流-直流、交流-交流变换电路,并辅以一系列计算机仿真实例。本书共7章,第1章绪论,第2章介绍各种不同类型的电力电子器件,随后第3~6章依次介绍四大类基本电力电子变换电路,第7章通过计算机仿真实例介绍开关稳压电源和SPWM逆变器的工作原理并进行波形分析。

本书重点突出,应用性强,适用于电气工程及其自动化专业、自动化专业及其他相关专业的本科生,并可用作相关专业研究生的参考书,也可供从事电力电子变换和控制的相关工程技术人员使用。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

现代电力电子技术/李媛媛主编.--北京:清华大学出版社,2014

普通高等学校自动化工程技术实践系列教材

ISBN 978-7-302-36034-6

I. ①现… II. ①李… 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(2014)第065935号

责任编辑:孙 坚 赵从棉

封面设计:傅瑞学

责任校对:刘玉霞

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市李旗庄少明印装厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:12

字 数:287千字

版 次:2014年5月第1版

印 次:2014年5月第1次印刷

印 数:1~2500

定 价:28.00元

产品编号:057813-01

前言

FOREWORD

电力电子学-电力电子变换和控制技术是高等工科院校电气工程及其自动化、自动化以及机电一体化等专业学生必修的一门专业基础课。

电力电子技术横跨电力、电子和控制三个领域,是现代电子技术的基础之一,是弱电对强电实现控制的桥梁和纽带,也是从事相关工作的专业技术人员所必须掌握的知识之一。

本书共7章。第1章绪论,主要介绍电力电子技术的概念,电能变换及控制的方法,电力电子技术的发展及特点。第2章讲述电力电子器件,介绍各类半导体电力电子器件的基本工作原理和工作特性。第3~6章分别介绍整流电路、直流斩波电路、逆变电路、交流调压和变频电路的基本工作原理和特性,包括单相三相可控整流电路、有源逆变电路、直流斩波电路、复合斩波电路、无源逆变电路、脉宽调制型(PWM)逆变电路、交流调压电路、交-交变频电路等,每章后面都应用MATLAB仿真软件对相关电路进行仿真,使广大读者能够清晰并直观地掌握电路特性。第7章电力电子技术的应用与实训,详细介绍开关稳压电源和SPWM逆变器的MATLAB设计与仿真。应用MATLAB仿真应用软件,读者能够建立模型并仿真,利用计算机观察电路的仿真运行状态,加深对理论分析结果的理解,同时增强对知识的吸收。

本书内容的选取原则是:以电工、电子学和控制理论最基本的原理为起点,完整、系统地讲述电力电子变换和控制技术的基本知识、新技术的发展和应用前景。

本书编写注意文字流畅、概念清晰、叙述深入浅出,便于学生阅读。除第1章及第7章外每章均有小结,有利于复习。

编写分工为:上海工程技术大学李媛媛副教授编写第1、2、6、7章,王宇嘉副教授编写第3、5章,张颖副教授编写第4章。上海工程技术大学张莉萍教授为本书的主审。在本书编写的过程中,得到了学院领导和相关教师的支持和帮助,编者对所有给予本书帮助的老师表示衷心的感谢,也向为本书编写整理付出辛勤劳动的硕士研究生闫华山、刘学晶同学,向进行仿真程序调试的魏然、黄牡丹、乔木、王晶晶等同学表示感谢。

由于时间仓促,编者水平有限,殷切希望各校教师、学生、专业技术人员以及广大读者对本书的内容、结构及疏漏、错误之处给予批评、指正。

编者

2014年3月

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 电力电子技术概述	1
1.2 电能变换及控制的方法	1
1.3 电力电子技术的发展史	2
1.4 电力电子技术的特点	3
1.5 电力电子技术的应用	4
第 2 章 电力电子器件	7
2.1 电力电子器件概述	7
2.2 电力二极管	8
2.2.1 电力二极管的基本结构与工作原理	8
2.2.2 电力二极管的基本特性	10
2.2.3 电力二极管的主要参数	11
2.2.4 电力二极管的主要类型	12
2.3 电力晶体管	12
2.3.1 电力晶体管的基本结构与工作原理	13
2.3.2 电力晶体管的工作特性	13
2.3.3 电力晶体管的主要参数	16
2.4 晶闸管	17
2.4.1 晶闸管的基本结构与工作原理	17
2.4.2 晶闸管的工作特性	18
2.4.3 晶闸管的主要参数	21
2.4.4 晶闸管的主要类型	23
2.5 电力 MOS 场效应晶体管	26
2.5.1 电力 MOSFET 的基本结构与工作原理	26
2.5.2 电力 MOSFET 的工作特性	27
2.5.3 电力 MOSFET 的主要参数	29
2.6 绝缘栅双极型晶体管	29
2.6.1 IGBT 的基本结构与工作原理	29

2.6.2	IGBT 的工作特性	30
2.6.3	IGBT 的擎住效应	31
2.7	其他新型电力电子器件	33
2.8	电力电子器件驱动与保护电路	34
2.8.1	晶闸管 SCR 的触发驱动器	34
2.8.2	GTO 的触发驱动器	35
2.8.3	晶体管的驱动器	36
2.8.4	MOSFET 和 IGBT 的驱动器	37
2.8.5	电力电子器件的缓冲电路	38
2.8.6	过电流保护和过电压保护	40
2.9	初识 MATLAB 仿真模块中的电力电子器件	42
	本章小结	43
第 3 章	整流电路	44
3.1	概述	44
3.2	单相可控整流电路	44
3.2.1	单相半波可控整流电路	44
3.2.2	单相桥式全控整流电路	48
3.2.3	单相桥式半控整流电路	51
3.3	三相可控整流电路	54
3.3.1	三相半波可控整流电路	54
3.3.2	三相全波可控整流电路	65
3.4	有源逆变电路	72
3.4.1	整流与逆变的关系	72
3.4.2	电源间能量的变换关系	72
3.4.3	有源逆变电路的工作原理	73
3.4.4	三相半波共阴极逆变电路	75
3.5	整流电路的 MATLAB 仿真实例	77
3.5.1	感容滤波的单相桥式不可控整流电路	77
3.5.2	电感性负载单相桥式全控整流电路	79
3.5.3	三相全桥不可控整流电路	82
3.5.4	三相全桥全控整流电路	86
	本章小结	88
第 4 章	直流斩波电路	90
4.1	概述	90
4.2	直流斩波电路的工作原理	91
4.2.1	斩波电路的基本原理	91
4.2.2	基本直流斩波电路	92

4.3	复合斩波电路	104
4.3.1	电流可逆斩波电路	104
4.3.2	桥式可逆斩波电路	105
4.3.3	直流-直流变换电路的比较	110
4.4	斩波电路的 MATLAB 仿真实例	110
4.4.1	Buck 降压电路	110
4.4.2	Boost 升压电路	111
4.4.3	Buck-Boost 升降压电路	114
	本章小结	115
第 5 章	逆变电路	116
5.1	逆变电路概述	116
5.1.1	晶闸管逆变电路的换流问题	116
5.1.2	逆变电路的类型	119
5.2	无源逆变电路	124
5.2.1	无源逆变电路的工作原理	124
5.2.2	电流型逆变电路	125
5.2.3	电压型逆变电路	129
5.3	强迫换流式逆变电路	133
5.3.1	串联二极管式电流源型逆变器结构	134
5.3.2	工作过程(换流机理)	134
5.4	脉宽调制型(PWM)逆变电路	136
5.4.1	基本原理	137
5.4.2	正弦脉宽调制方法	140
5.4.3	电流滞环控制 PWM	143
5.5	逆变电路的 MATLAB 仿真实例	144
5.5.1	单相方波逆变电路	144
5.5.2	双极性 SPWM 单相逆变器	145
5.5.3	倍频 SPWM 逆变器	147
5.5.4	三相 SPWM 逆变器	148
	本章小结	150
第 6 章	交流调压和变频电路	151
6.1	交流调压电路	151
6.1.1	单相交流调压电路	151
6.1.2	三相交流调压电路	156
6.2	交-交变频电路	160
6.2.1	单相交-交变频电路	160
6.2.2	三相交-交变频电路	162

6.3	MATLAB 仿真实例	167
	本章小结	170
第 7 章	电力电子技术的应用与实训	172
7.1	开关稳压电源的 MATLAB 设计与仿真	172
7.1.1	开关电源简介	172
7.1.2	开关电源的特点	172
7.1.3	整流稳压开关电源 MATLAB 仿真	173
7.2	SPWM 逆变器的 MATLAB 设计与仿真	177
7.2.1	SPWM 逆变器的基本原理	177
7.2.2	SPWM 调制的相关技术	177
7.2.3	SPWM 逆变器 MATLAB 仿真	178
	参考文献	181

第1章

绪 论

教学目标：

- 掌握电力电子技术的基本概念；
- 掌握电能变换的基本类型；
- 掌握电力电子技术的特点；
- 了解电力电子技术的发展过程。

1.1 电力电子技术概述

电子技术的发展有两大方向，一个是电子信息技术，一个是电力电子技术。电子信息的处理对象是信号和信息，即如何对信号和信息进行快速处理和真实传送。通常所说的模拟电子技术和数字电子技术都属于电子信息技术。电力电子技术是使用电力电子器件对电能进行变换和控制的技术。目前所用的电力电子器件均用半导体制成，故也称电力半导体器件。电力电子技术所变换的“电力”，功率可以大到数百兆瓦甚至吉瓦，也可以小到数瓦甚至 1W 以下。

电力电子学(power electronics)这一名称是在 20 世纪 60 年代出现的。1974 年，美国的 W. Newell 用一个倒三角形(如图 1-1 所示)对电力电子学进行了描述，认为它是由电力学、电子学和控制理论三个学科交叉而形成的。这一观点被全世界普遍接受。“电力电子学”和“电力电子技术”分别是学术和工程技术两个不同的角度来称呼的。

虽然作为新的学科领域只经过了三十多年的发展，但是已经取得了令人瞩目的成就，现在，电力电子技术已成为电气技术人员不可或缺的知识。

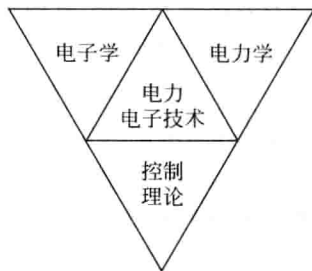


图 1-1 描述电力电子学的倒三角形

1.2 电能变换及控制的方法

我们已经知道电力电子是使用电力电子器件对电能进行高效变换和控制的技术。通常，表征电能状态的参数有电压、电流、频率、相位以及相数。电力电子技术中所说的电能变

换控制,就是将这些电能状态的一个或多个参数进行变换控制,理想的情况下,电能的变换可趋近于既无时间延迟也无电能损失的状态。

通常所用的电力有交流和直流两种。从公共电网直接得到的电力是交流的,从蓄电池和干电池得到的电力是直流的。从这些电源中得到的电力往往不能直接满足各种不同的需求,这时,就需要进行电力变换。如表 1-1 所示,电力变换的方式基本上可以分为四大类,即交流变直流(AC—DC)、直流变交流(DC—AC)、直流变直流(DC—DC)、交流变交流(AC—AC)。交流变直流称为整流,直流变交流称为逆变。直流变直流是指一种电压(或电流)的直流变为另一种电压(或电流)的直流,一般用直流斩波电路实现。交流变交流可以是电压或电力的变换,称为交流电力控制,也可以是频率或相数的变换。

表 1-1 电能变换的基本类型

输出 \ 输入		AC	DC
		DC	整流
AC	交流电力控制变频、变相	逆变	

1.3 电力电子技术的发展史

电力电子器件的发展决定了电力电子技术的发展,因此,电力电子技术的发展史是以电力电子器件的发展为纲的。

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晶闸管为标志的,电力电子技术的概念和基础也是由于晶闸管和晶闸管变流技术的发展而确立的。此前就已经有用于电力变换的电子技术,如 1904 年出现了电子管,1947 年美国著名的贝尔实验室发明了晶体管,这两种器件的出现在当时对电子技术的发展具有推动性的作用,所以晶闸管出现前的时期可称为电力电子技术的史前或黎明时期。

20 世纪 70 年代后期以门极可关断晶闸管(GTO)、电力双极型晶体管(BJT)、电力场效应管(power-MOSFET)为代表的全控型器件全速发展。全控型器件的特点是通过对其门极(栅极或基极)的控制既可以使其开通又可以使其关断,使电力电子技术的面貌焕然一新,从而进入了新的发展阶段。

80 年代后期,以绝缘栅极双极型晶体管(IGBT)为代表的复合型器件集驱动功率小、开关速度快、通态压降小、载流能力大于一身,优越的性能也使之成为现代电力电子技术的主导器件。

90 年代电力电子器件的研究和开发,已进入高频化、标准模块化、集成化和智能时代。为了使电力电子装置的结构紧凑、体积减小,也把若干个电力电子器件及必要的辅助器件做成模块的形式,之后又把驱动、控制、保护电路和功率器件集成在一起,构成功率集成电路(PIC)。这也代表了电力电子技术发展的一个重要方向。

经过半个多世纪的发展,电力电子技术已经取得了辉煌的成就,但与微电子领域的高度集成化相比,电力电子技术仍处于“分立元件”时代,现在电力电子模块(IPEM)的概念已经提出。概念化的 IPEM 为三维结构,包括主电路、驱动控制电路、传感器与磁性元件等无源

元件,并适合自动化生产。通过集成,可以将现有电力电子装置设计过程中所遇到的元器件、电路、控制、电磁、材料、传热等方面的技术难点问题和主要设计工作在集成模块内部解决,使应用系统设计简化为选择合适规格的标准化模块并进行拼装即可。

这一革命性的技术将使现在的电力电子技术领域分化为集成模块制造技术和系统应用技术两个不同的分支,前者重点解决模块设计和制造的问题,通过多个不同学科的紧密交叉和融合攻克电力电子技术中主要的难点;而后者解决针对各种广泛而多样的具体应用将模块组合成系统的问题。

随着这一技术的发展,集成模块的设计和制造技术将成为电力电子技术研究的主要内容,而系统应用技术则渐渐成为具备基本素质的各行业工程师所掌握和使用的一般技术。由此,电力电子产业也将出现分化的趋势,集成模块的制造将成为该产业的主要内容,与集成电路一样,电力电子产业将会更加蓬勃发展。

1.4 电力电子技术的特点

前面我们曾经说过,电力电子是以电力、电子以及控制三个学科的基本技术为基础的交叉学科领域,图 1-2 是电力电子装置一般组成的示意框图。

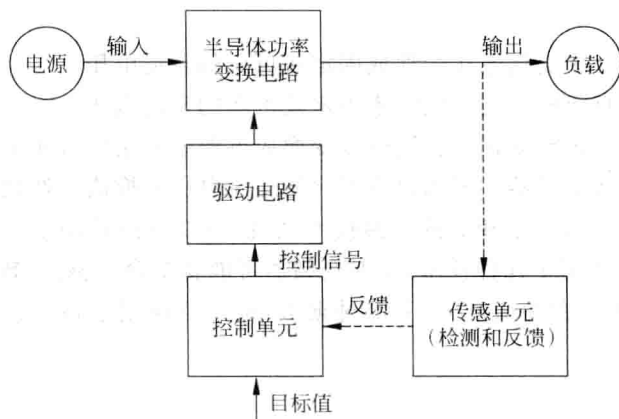


图 1-2 电力电子装置的组成

图 1-2 中的主电路是电源的电能通过半导体功率变换电路变为负载所需的形态,并提供给负载。变换电路的多种方式与表 1-1 相对应。

如果电能变换电路相当于人类的肌肉,负载相当于人所要做的各种动作,那么就要有控制其动作的神经系统,它相当于图 1-2 的控制单元、驱动电路和检测单元。根据外部的指令(目标值)、主电路中的各种状态量(电压、电流等)产生导通和关断的信号,并送到变换电路的开关器件。而驱动电路是将控制信号隔离放大后,驱动电力半导体器件的接口电路。

电力电子电路与其他的电力电路相比并没有多么显著的不同,其特点可归纳为以下几条。

(1) 使用开关动作。

其目的是对大功率电能进行高效转换,具体内容将在第2章中进行详述。

(2) 伴随换流动作。

电流从某一器件切换到其他器件的现象称为换流(commutation)。图1-3是用开关电路来表示的示意图,通过开关动作,电流从一侧支路转移到另一侧支路。

根据换流方式的不同分为电网换流(line commutation)和器件换流(device commutation),又称自然换流(natural commutation)和强制换流(forced commutation)。

(3) 由主电路和控制电路构成,两者间的接口技术同样重要。

(4) 是电力、电子、控制、测量等的复合技术。

(5) 会产生谐波电流和电磁噪声。

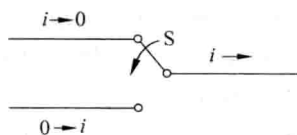


图1-3 开关电路的换流示意图

1.5 电力电子技术的应用

应用电力电子技术构成的装置,按其功能可分为以下四种类型,它们对应了四大类电能变换技术:

(1) 可控整流器 把交流电压变换成固定或可调的直流电压。

(2) 逆变器 把直流电压变换成频率固定或可调的交流电压。

(3) 斩波器 把固定或变化的直流电压变换成可调或恒定的直流电压。

(4) 交流调压器及变频器 把固定或变化的交流电压变换成可调或固定的交流电压。

这些装置是单独的应用了相关的变换技术,它们可以直接适用于某些特定场合。但也有不少其他装置综合运用了多种技术,比如变频器可能就结合了整流、斩波及逆变技术。可以说,电力电子装置及产品是五花八门、品种繁多,被广泛应用于各个领域。其主要领域包括以下几个方面。

1. 工矿企业

电力电子技术在工业中的应用主要是过程控制与自动化。在过程控制中,需要对泵类和压缩机类负载进行调速,以得到更好的运行特性,满足控制的需要。自动化工厂中的机器人由伺服电动机驱动(速度和位置均可控制),而伺服电动机往往采用电力电子装置驱动才能满足需要。另外,电镀行业要用到可控整流器作为电镀槽的供电电源。电化学工业中的电解铝、电解食盐水等也需要大容量的整流电源。炼钢厂里轧钢机的调速装置运用了电力电子技术的变频技术。工矿企业中还涉及电气工艺的应用,如电焊铁、感应加热等都应用了电力电子技术。

2. 家用电器

运用电力电子技术的家用电器越来越多了。洗衣机、电冰箱、空调等采用了变频技术来控制电动机。电力电子技术还与信息电子技术结合,使这些家用电器具有智能和节能的作

用。如果离开了电力电子技术,这些家用电器的智能化、低电耗是无法实现的。另外,电视机、微波炉甚至电风扇也都应用电力电子技术。照明电器在家庭中大量使用。现在家庭中大量使用的“节能灯”、“应急灯”、“电池充电器”就采用了电力电子技术。

3. 交通及运输

电力机车、地铁及城市有轨或无轨电车几乎都运用电力电子技术进行调速及控制。斩波器在这一方面得到大量的应用。在中国上海,世界上首次投入商业运作的磁悬浮列车运行系统涉及到配电、驱动控制等。毫无疑问,电力电子技术在其中占有重要地位。还有像在工厂、车站短途运载货物的叉车、电梯等,也用到斩波器和变频器进行调速等控制。

4. 电力系统

电力电子技术在电力系统中有许多独特的应用,例如高压直流输电(HVDC),在输电线路的送端将工频交流变为直流,在受端再将直流变回工频交流。电力电子技术和装置已开始逐渐在电力系统中起重要作用,使得利用已有的电力网输送更大容量成为可能。电力电子装置还用于太阳能发电、风力发电装置与电力系统的连接。电网功率因数补偿和谐波抑制是保证电网质量的重要手段。晶闸管投切电抗器(TCR)、晶闸管投切电容器(TSC)都是重要的无功补偿装置。近年来出现的静止无功发生器(SVG)、有源电力滤波器(APF)等具有更为优越的补偿性能。此外,电力电子装置还可用于防止电网瞬时停电、瞬时电压跌落、闪变等。这些装置和补偿装置的应用可进行电能质量控制、改善电网质量。

5. 航空航天和军事

航天飞行器的各种电子仪器和航天生活器具都需要电源。在飞行时,为了最大限度地利用飞行器上有限的能源,就需要采用电力电子技术。即使用太阳能电池为飞行器提供能源,充分转换及节省能源是非常重要的。军事上一些武器装备也需要用到轻便、节电的电源装置,自然也就要用到电力电子技术。

6. 通信

通信系统中要使用符合通信电气标准的电源和蓄电池充电器。新型的通用一次电源,是将市电直接整流,然后经过高频开关功率交换,再经过整流、滤波,最后得到48V的直流电源。在这里大量应用了功率MOSFET管,开关工作频率广泛采用100kHz。与传统的一次电源相比,其体积、重量大大减小,效率显著提高。国内已先后推出48V/20A、48V/30A、48V/50A、48V/100A、48V/200A等系列产品,以满足不同容量的需求。

7. 新能源应用

风力发电中常用到三种运行方式:独立运行、联合供电方式、并网型风力发电运行方式,这些都离不开电力电子技术。并网光伏发电系统中太阳能电池方阵发出的直流电力经过逆变器转换成交流电,此外,在新能源汽车中使用的蓄电池、太阳电池、燃料电池、高速飞轮电池、超级电容、电机及其驱动系统、能源管理系统、电源变换装置、能量回馈系统及充电器中,电力电子技术发挥着重要的作用。

从上述例子可以看出,电力电子技术的应用已经渗透到国民经济建设和国民生活各个领域。这些例子也说明:在工业、通信及人民生活等方面,所用到的电能许多并不是直接取自于市电,而是要通过电力电子装置将市电转换成符合用电设备所要求的电能形式,而这种需求促进了电力电子技术的广泛应用。事实上,一些发达国家 50% 以上的电能形式都是通过电力电子装置对负载供电,我国也有接近 30% 的电能通过电力电子装置转换。可以预见,现代工业和人民生活对电力电子技术的依赖性将越来越大,这也正是电力电子技术的研究经久不衰及快速发展的根本原因。

电力电子技术的应用已经渗透到国民经济建设和国民生活各个领域。这些例子也说明:在工业、通信及人民生活等方面,所用到的电能许多并不是直接取自于市电,而是要通过电力电子装置将市电转换成符合用电设备所要求的电能形式,而这种需求促进了电力电子技术的广泛应用。

事实上,一些发达国家 50% 以上的电能形式都是通过电力电子装置对负载供电,我国也有接近 30% 的电能通过电力电子装置转换。

可以预见,现代工业和人民生活对电力电子技术的依赖性将越来越大,这也正是电力电子技术的研究经久不衰及快速发展的根本原因。电力电子技术的应用已经渗透到国民经济建设和国民生活各个领域。这些例子也说明:在工业、通信及人民生活等方面,所用到的电能许多并不是直接取自于市电,而是要通过电力电子装置将市电转换成符合用电设备所要求的电能形式,而这种需求促进了电力电子技术的广泛应用。事实上,一些发达国家 50% 以上的电能形式都是通过电力电子装置对负载供电,我国也有接近 30% 的电能通过电力电子装置转换。

可以预见,现代工业和人民生活对电力电子技术的依赖性将越来越大,这也正是电力电子技术的研究经久不衰及快速发展的根本原因。

电力电子技术的应用已经渗透到国民经济建设和国民生活各个领域。这些例子也说明:在工业、通信及人民生活等方面,所用到的电能许多并不是直接取自于市电,而是要通过电力电子装置将市电转换成符合用电设备所要求的电能形式,而这种需求促进了电力电子技术的广泛应用。

事实上,一些发达国家 50% 以上的电能形式都是通过电力电子装置对负载供电,我国也有接近 30% 的电能通过电力电子装置转换。

可以预见,现代工业和人民生活对电力电子技术的依赖性将越来越大,这也正是电力电子技术的研究经久不衰及快速发展的根本原因。电力电子技术的应用已经渗透到国民经济建设和国民生活各个领域。这些例子也说明:在工业、通信及人民生活等方面,所用到的电能许多并不是直接取自于市电,而是要通过电力电子装置将市电转换成符合用电设备所要求的电能形式,而这种需求促进了电力电子技术的广泛应用。

事实上,一些发达国家 50% 以上的电能形式都是通过电力电子装置对负载供电,我国也有接近 30% 的电能通过电力电子装置转换。

可以预见,现代工业和人民生活对电力电子技术的依赖性将越来越大,这也正是电力电子技术的研究经久不衰及快速发展的根本原因。电力电子技术的应用已经渗透到国民经济建设和国民生活各个领域。这些例子也说明:在工业、通信及人民生活等方面,所用到的电能许多并不是直接取自于市电,而是要通过电力电子装置将市电转换成符合用电设备所要求的电能形式,而这种需求促进了电力电子技术的广泛应用。

第2章

电力电子器件

工程应用案例与实训

教学目标:

掌握各种电力电子器件的结构及工作原理;

掌握电力电子器件的工作特性及参数定义;

掌握电力电子器件的驱动控制电路;

熟悉电力电子器件的保护电路;

了解 MATLAB 仿真模块中的电力电子器件。

2.1 电力电子器件概述

电力电子技术的基础是由电力电子器件、电力电子电路和电力电子系统控制三个层次构成的。电力电子器件(power electronics device)是指可直接用于处理电能的主电路中,实现电能的变换或控制的电子器件。从广义上讲,电力电子器件应该分为电真空器件和半导体器件两类。目前电力电子技术中使用的器件绝大多数都是半导体器件。因此,通常所说的电力电子器件都是指电力半导体器件,目前使用的电力半导体器件大多是用单晶硅制成的。

按照能够被控制电路信号所控制的程度,常用的电力电子器件分类如表 2-1 所示。

表 2-1 常用的电力电子器件分类

类别	不控型	半控型	全控型
代表性器件	二极管	晶闸管 光触发晶闸管	GTO 晶闸管 电力晶体管 电力 MOSFET IGBT
动作	导通和关断都不可控	只能控制导通	可以控制导通和关断

电力电子器件按照驱动电路加在电力电子器件控制端和公共端之间信号的性质,可以分为电流控制型器件和电压控制型器件。

(1) 电流驱动型(电流型): 通过从控制端注入或者抽出电流来实现导通或者关断的控制,如晶闸管、门级可关断晶闸管、电力晶体管等。

(2) 电压驱动型(电压型): 通过在控制端和公共端之间施加一定的电压信号来实现导通或者关断的控制, 如功率场效应管和绝缘栅双极晶体管等。

图 2-1 是主要的可控器件的功率容量(电压 \times 电流)和开关频率的示意图。晶闸管(SCR)的容量最大, 6000V、2500A 规格的器件已经制造出来了, 但是开关频率不能够很高, 只能用在工频变换电路上。

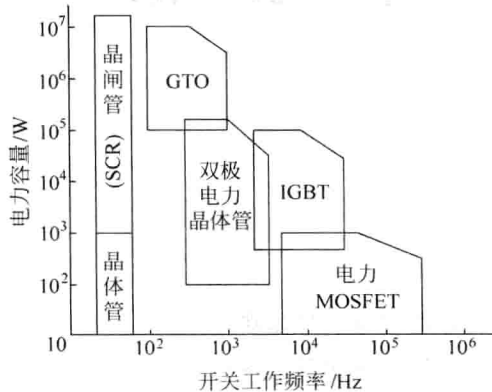


图 2-1 功率器件的开关频率和功率容量

2.2 电力二极管

电力二极管(power diode)自 20 世纪 50 年代初期就获得应用, 当时也被称为半导体整流器(semiconductor rectifier, SR), 是电力电子装置中应用最多的电力电子器件之一。虽然它是不可控器件, 但其结构和原理简单, 工作可靠, 所以, 直到现在电力二极管仍然大量应用于许多电气设备当中。

2.2.1 电力二极管的基本结构与工作原理

电力二极管的基本结构和工作原理与信息电子电路中的二极管是一样的, 都是以半导体 PN 结为基础的。电力二极管实际上是由一个面积较大的 PN 结和两端引线以及封装组成的, 电力二极管的外形、结构和电气图形符号如图 2-2 所示。A 和 K 分别代表阳极和阴极。

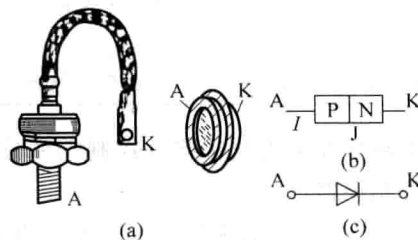


图 2-2 电力二极管的外形、结构和电气图形符号

图 2-3 中表示出了 P 型半导体的代表符号,其中大圆 \ominus 表示不能移动的负离子,小圆 \circ 表示可以运动的带正电的空穴;图中也表示出了 N 型半导体的代表符号,其中大圆 \oplus 表示不能移动的正离子,小圆 \cdot 表示可自由运动的带负电的自由电子。

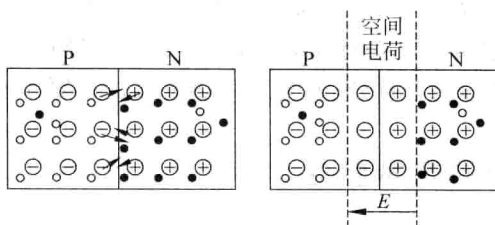


图 2-3 PN 结的形成

从图 2-3 中可以看出,在 N 型半导体和 P 型半导体结合后构成 PN 结。由于 N 区和 P 区交界处电子和空穴的浓度差别,N 区电子浓度大,P 区空穴浓度大,因此造成了 N 区电子要向 P 区扩散与 P 区空穴复合,同时在边界 N 区侧留下正离子层 \oplus ,P 区的空穴正粒子要向 N 区扩散与 N 区电子复合,同时在边界 P 区侧留下负离子层 \ominus 。随着电子、空穴的扩散,在界面两侧分别留下了带正、负电荷但不能任意移动的杂质离子。这些不能移动的正、负电荷被称为空间电荷。空间电荷建立的电场被称为内电场或自建电场,其方向是阻止扩散运动的。此时 N 区侧带正电,P 区侧带负电,半导体内部出现内电场,方向从 N 区指向 P 区。

内电场的出现使带正电的空穴和带负电的自由电子在内电场的作用下产生漂移运动,带负电的电子逆电场方向漂移运动,带正电的空穴顺电场方向漂移运动,因此内电场要迫使到达 P 区的电子返回 N 区,迫使到达 N 区的空穴返回 P 区,这就是漂移运动。扩散运动和漂移运动既相互联系又相互矛盾,最终达到动态平衡,正、负空间电荷量达到稳定值,形成一个稳定的由空间电荷构成的区域,被称为空间电荷区,按所强调的角度不同也被称为耗尽层、阻挡层或势垒层。

PN 结具有单向导电性。当 PN 结外加正向电压时,外电场将多数载流子推向空间电荷区,使其变窄,削弱了内电场,原来的平衡被打破,使扩散运动加强,而漂移运动减弱。由于外加电源的作用使得扩散运动源源不断进行,从而形成正向电流,如图 2-4(a)所示,此时 PN 结处于正向导通状态。当 PN 结外加反向电压时,外电场与内电场的方向一致,加强了内电场,扩散运动减弱,而漂移运动加强,形成反向电流,如图 2-4(b)所示,此时 PN 结处于反向截止状态。这就是 PN 结的单向导电性。

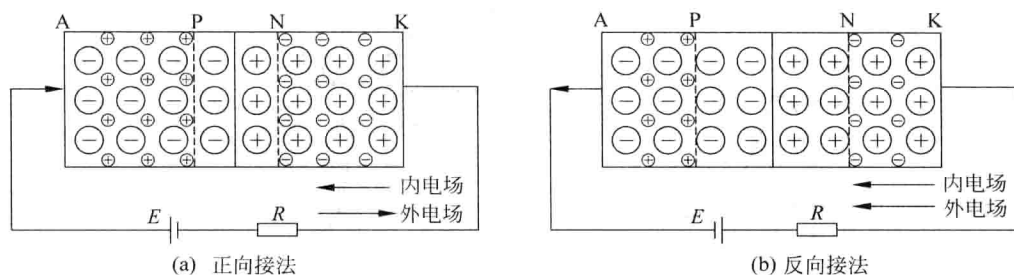


图 2-4 半导体二极管的正、反接法