



21st CENTURY

实用规划教材

21世纪全国高职高专
电子信息系列实用规划教材

电力电子技术

主 编 梁南丁

副主编 叶予光 王春莹



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

中国城市经济体制改革

中国城市经济体制改革，是继农村改革之后，中国改革开放的第二个重点。农村改革的成功，为城市改革积累了经验，提供了信心。城市改革的目标是建立社会主义市场经济体制，使企业成为自主经营、自负盈亏的法人实体和市场竞争主体。这一过程经历了从放权让利到股份制改革，再到现代企业制度的建立。改革过程中，政府逐步减少对企业的直接干预，转而通过宏观调控和法律法规来规范市场秩序。同时，国有企业改革成为城市改革的核心，通过抓大放小、兼并重组等方式，提高国有企业的竞争力。非公有制经济在改革过程中也得到了快速发展，成为城市经济的重要组成部分。城市改革的成功，不仅促进了生产力的解放和发展，也推动了城市经济结构的优化和人民生活水平的提高。

中国城市经济体制改革，是继农村改革之后，中国改革开放的第二个重点。农村改革的成功，为城市改革积累了经验，提供了信心。城市改革的目标是建立社会主义市场经济体制，使企业成为自主经营、自负盈亏的法人实体和市场竞争主体。这一过程经历了从放权让利到股份制改革，再到现代企业制度的建立。改革过程中，政府逐步减少对企业的直接干预，转而通过宏观调控和法律法规来规范市场秩序。同时，国有企业改革成为城市改革的核心，通过抓大放小、兼并重组等方式，提高国有企业的竞争力。非公有制经济在改革过程中也得到了快速发展，成为城市经济的重要组成部分。城市改革的成功，不仅促进了生产力的解放和发展，也推动了城市经济结构的优化和人民生活水平的提高。

中国城市经济体制改革，是继农村改革之后，中国改革开放的第二个重点。农村改革的成功，为城市改革积累了经验，提供了信心。城市改革的目标是建立社会主义市场经济体制，使企业成为自主经营、自负盈亏的法人实体和市场竞争主体。这一过程经历了从放权让利到股份制改革，再到现代企业制度的建立。改革过程中，政府逐步减少对企业的直接干预，转而通过宏观调控和法律法规来规范市场秩序。同时，国有企业改革成为城市改革的核心，通过抓大放小、兼并重组等方式，提高国有企业的竞争力。非公有制经济在改革过程中也得到了快速发展，成为城市经济的重要组成部分。城市改革的成功，不仅促进了生产力的解放和发展，也推动了城市经济结构的优化和人民生活水平的提高。

中国城市经济体制改革，是继农村改革之后，中国改革开放的第二个重点。农村改革的成功，为城市改革积累了经验，提供了信心。城市改革的目标是建立社会主义市场经济体制，使企业成为自主经营、自负盈亏的法人实体和市场竞争主体。这一过程经历了从放权让利到股份制改革，再到现代企业制度的建立。改革过程中，政府逐步减少对企业的直接干预，转而通过宏观调控和法律法规来规范市场秩序。同时，国有企业改革成为城市改革的核心，通过抓大放小、兼并重组等方式，提高国有企业的竞争力。非公有制经济在改革过程中也得到了快速发展，成为城市经济的重要组成部分。城市改革的成功，不仅促进了生产力的解放和发展，也推动了城市经济结构的优化和人民生活水平的提高。

21 世纪全国高职高专电子信息系列实用规划教材

电力电子技术

主 编 梁南丁
副主编 叶予光 王春莹
参 编 马桂荣 张荣花 王立亚



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书以培养高素质技能型专业人才为目标,系统地介绍了电力电子技术的基本理论及其应用。本书在注重基本理论、基本方法的基础上,突出了应用技术和实践性的教学,充分体现了高职高专教育的特点。全书共分7章,包括:电力电子器件,相控型整流和有源逆变电路,直流电压变换电路,交流电压变换电路,无源逆变电路,电力电子技术在工程中的应用,课程实训与实验。每章后都附有本章小结和习题与思考题,便于教师教学和学生自学。

本书可作为高职高专院校电气化、工业自动化、机电及相关专业的教材,也可作为成人教育和继续教育的教材,还可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/梁南丁主编. —北京:北京大学出版社, 2009.4

(21世纪全国高职高专电子信息系列实用规划教材)

ISBN 978-7-301-12390-4

I. 电… II. 梁… III. 电力电子学—高等学校:技术学校—教材 IV. TM1

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第083342号

书 名: 电力电子技术

著作责任者: 梁南丁 主编

策 划 编 辑: 赖 青

责 任 编 辑: 刘 颖

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-12390-4/TM·0014

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路205号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电 子 邮 箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 北京飞达印刷有限责任公司

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 17.75印张 420千字

2009年4月第1版 2009年4月第1次印刷

定 价: 28.00元

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

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

本教材是根据高等职业技术教育的特点,面向 21 世纪科技发展的需要以及电气化、自动化、机电、计算机控制技术等专业教学改革的要求而组织编写的。

本教材主要由三大部分构成:电力电子器件、电力电子电路和电力电子技术在工程中的应用。本教材重点介绍了:电力电子器件,相控型整流和有源逆变电路,直流电压变换电路,交流电压变换电路,无源逆变电路,电力电子技术在工程中的应用等基础理论、基本电路和应用。

本教材在编写思路坚持理论“够用为度”,实践“突出能力”的培养原则,在教学内容上进行了较大的调整和压缩,如在电力电子器件中将传统的半控型器件——普通晶闸管部分仅作为基础内容,而以目前新型的全控型器件 IGBT、MOSFET 等为主要内容;在电力电子电路中四大类基本变流电路,即 AC-DC、DC-DC、AC-AC、DC-AC 变流电路的基础上,介绍了 PWM 控制技术、SPWM 控制技术和软开关技术;在电力电子技术在工程中的应用中对组合变流电路 AC-DC-AC 和 DC-AC-DC、变频器电路及电力电子技术在交、直流调速系统和电力系统中的应用进行了分析和讲解。本书的最后一章提供了通用变频器的维修,故障检查和处理方法,课程实训与实验,从实践能力培养方面培养学生的逻辑思维能力、综合运用能力和解决问题的能力。全书在基本理论的讲解上力求做到深入浅出,循序渐进,通俗易懂,在注重物理概念叙述的同时引入实例,做到理论联系实际。在教材结构上,每章都设置了“教学提示”、“本章小结”和“习题与思考题”,便于学生巩固所学知识及自学。

本教材由梁南丁担任主编,叶予光、王春莹担任副主编。参加本教材编写工作的有:河南平顶山工业职业技术学院梁南丁(绪论、第 1 章),马桂荣(第 2、3 章),张荣花(第 2、4 章),王立亚(第 1 章 1.7 节、1.8 节、1.9 节,第 5 章);平顶山学院叶予光(第 6 章),王春莹(第 7 章)。全书由梁南丁统稿。

本书较适宜的授课学时为 80 时左右,各章的参考教学时数见下表:

序号	内 容	建议学时	备 注
0	绪论	2	
1	电力电子器件	10	
2	相控整流电路和有源逆变电路	12	
3	直流电压变换电路	8	
4	交流电压变换电路	8	
5	无源逆变电路	8	

(续)

序号	内 容	建议学时	备 注
6	电力电子技术在工程中的应用	16	
7	课程实训与实验	14	实训可安排在课外进行,实验可根据各校情况选做4个

在本教材的编写过程中,查阅和参考了大量的文献资料,在此谨向参考文献的作者致以诚挚的谢意!

限于编者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请广大读者提出宝贵意见,以便修改。

编 者

2009年2月

目 录

绪论	1	1.6.2 过电流保护	44
第1章 电力电子器件	5	1.7 电力电子器件的串联与并联	46
1.1 电力电子器件概述	5	1.7.1 晶闸管的串、并联	46
1.1.1 电力电子器件的 发展与应用	5	1.7.2 可关断晶闸管的串、 并联	48
1.1.2 电力半导体器件的分类	6	1.7.3 双极型功率晶体管的串、 并联	49
1.1.3 电力半导体器件的 发展趋势	7	1.7.4 电力场效应晶体管的串、 并联	50
1.2 不可控器件——电力二极管	8	1.7.5 绝缘栅双极型晶体管的 串、并联	50
1.2.1 电力二极管的工作原理	8	1.8 本章小结	51
1.2.2 电力二极管的主要参数	8	1.9 习题及思考题	52
1.2.3 电力二极管的主要类型	9	第2章 相控型整流和有源 逆变电路	53
1.3 半控型器件——晶闸管	9	2.1 单相可控整流电路	53
1.3.1 晶闸管的结构	9	2.1.1 单相半波可控整流电路 ...	53
1.3.2 晶闸管的工作原理	11	2.1.2 单相桥式全控整流电路 ...	56
1.3.3 晶闸管的检测	12	2.1.3 单相全波可控整流电路 ...	60
1.3.4 晶闸管的伏安特性	12	2.1.4 单相桥式半控整流电路 ...	60
1.3.5 晶闸管的主要参数	13	2.2 三相可控整流电路	64
1.3.6 晶闸管的型号及简单 测试方法	15	2.2.1 三相可控整流电路	64
1.3.7 晶闸管的派生系列	15	2.2.2 三相桥式全控整流电路 ...	67
1.4 全控型电力电子器件	17	2.3 变压器漏感对整流电路的影响 ...	72
1.4.1 门极可关断晶闸管	17	2.4 电容滤波的不可控整流电路	74
1.4.2 电力晶体管	20	2.4.1 电容滤波的单相 不可控整流电路	74
1.4.3 电力场效应晶体管	29	2.4.2 电容滤波的三相 不可控整流电路	77
1.4.4 绝缘栅双极型晶体管	32	2.5 大功率可控整流电路	79
1.5 其他新型电力电子器件	38	2.5.1 带平衡电抗器的双反 星形可控整流电路	79
1.5.1 静电感应晶体管	38	2.5.2 多重化整流电路	82
1.5.2 静电感应晶闸管	40	2.6 整流电路的有源逆变工作状态 ...	84
1.5.3 MOS 栅控晶闸管	41	2.6.1 逆变的概念	84
1.5.4 集成门极换向晶闸管	42		
1.5.5 功率集成电路	42		
1.6 电力电子器件的保护	44		
1.6.1 过电压的产生及过 电压保护	44		

2.6.2 三相桥式整流电路的 有源逆变工作状态	86	第4章 交流电压变换电路	124
2.6.3 逆变失败与最小逆变角 的限制	87	4.1 交流调压电路	124
2.7 晶闸管-直流电动机 (V-M)系统	89	4.1.1 相位控制的单相交流 调压电路	124
2.7.1 整流电路工作于 整流状态	89	4.1.2 交流斩波调压电路	127
2.7.2 整流电路工作于 有源逆变状态	92	4.1.3 相位控制的三相交流 调压电路	129
2.7.3 直流可逆电力拖动系统	93	4.2 交流调功电路和交流电力 电子开关	135
2.8 晶闸管相控电路的驱动控制	95	4.2.1 交流调功电路	135
2.8.1 同步信号为锯齿波的 触发电路	95	4.2.2 交流电力电子开关	136
2.8.2 集成触发器	99	4.3 交-交变频电路	136
2.8.3 触发电路的定相	100	4.3.1 单相交-交变频电路	136
2.9 本章小结	102	4.3.2 三相交-交变频电路	139
2.10 习题及思考题	102	4.4 晶闸管交-交变换器的应用	141
第3章 直流电压变换电路	105	4.4.1 晶闸管交流调压应用 电路	141
3.1 直流电压变换电路的基本 原理及控制方式	105	4.4.2 晶闸管交流调功器应用 电路	142
3.1.1 直流电压变换电路的 基本原理	105	4.4.3 晶闸管交流开关应用 电路	143
3.1.2 直流电压变换电路的 控制方式	106	4.5 本章小结	145
3.2 降压直流电压变换电路	106	4.6 习题及思考题	146
3.3 升压直流电压变换电路	109	第5章 无源逆变电路	148
3.4 直流变换降压-升压 复合型直流变换电路	111	5.1 逆变器的基本工作原理及分类	148
3.5 库克直流电压变换电路	112	5.1.1 逆变器的基本工作 原理	148
3.6 直流变换电路的 PWM 控制技术	115	5.1.2 逆变器的分类	149
3.7 直流开关电源的应用	118	5.2 单相桥式逆变电路	152
3.7.1 带有电气隔离的 直流-直流变换器	118	5.2.1 单相半桥逆变电路	152
3.7.2 直流电源的保护	120	5.2.2 单相全桥逆变电路	153
3.7.3 直流电源设计中的 一些问题	121	5.3 电流型逆变器	154
3.8 本章小结	122	5.3.1 电流型并联谐振式 逆变器	154
3.9 习题及思考题	123	5.3.2 三相串联二极管式 电流型逆变器	156
		5.4 电压型逆变器	160
		5.4.1 串联谐振式电压 逆变电路	161
		5.4.2 串联电感式电压型 逆变器	162

5.4.3 串联二极管式电压型 逆变器	164	6.3.3 典型变频调速系统	207
5.4.4 振荡换流的串联二极管式 电压型逆变器	165	6.3.4 高压直流输电	208
5.5 脉宽调制逆变电路	166	6.3.5 静止无功补偿	213
5.5.1 SPWM 原理	166	6.3.6 静止无功发生器	217
5.5.2 三相桥式 PWM 逆变 电路	169	6.3.7 有源电力滤波器	219
5.5.3 SPWM 控制的交-直-交 变频器	170	6.4 本章小结	221
5.6 软开关技术	170	6.5 习题及思考题	222
5.6.1 软开关的基本概念	170	第 7 章 课程实训与实验	223
5.6.2 软开关电路的分类	171	7.1 通用变频器维修及检查	223
5.6.3 典型的软开关电路	173	7.2 晶闸管单相半控桥式整流 电路的安装与调试训练	226
5.6.4 软开关逆变技术的 应用	178	7.3 晶闸管直流调速系统 主回路参数设计实训	228
5.7 本章小结	179	7.3.1 整流变压器参数计算	228
5.8 习题及思考题	180	7.3.2 平波电抗器参数计算	235
第 6 章 电力电子技术在工程中的 应用	181	7.3.3 脉冲变压器设计	238
6.1 交-直-交组合变流电路	181	7.3.4 课程设计及实训	243
6.1.1 交-直-交组合变流 电路原理	181	7.4 实验	256
6.1.2 交-直-交组合变流电路的 控制方式	184	7.4.1 晶闸管的简易测试及 导通关断条件实验	256
6.2 直-交-直组合变流电路	188	7.4.2 单相桥式半控整流电路 与单结晶体管触发电路 的研究	257
6.2.1 单端电路	188	7.4.3 三相桥式全控整流电路 的研究	260
6.2.2 双端电路	190	7.4.4 三相交流调压电路的 研究	264
6.2.3 开关电源	194	7.4.5 GTR 单相并联逆变器的 研究	266
6.3 电力电子技术的应用	194	7.4.6 IGBT 斩波电路的研究	268
6.3.1 典型的直流调速系统	194	参考文献	271
6.3.2 变频器	199		

绪 论

1. 电力电子技术

电力电子技术是应用于电力领域的电子技术，是应用各种电力电子器件对电能进行变换和控制的技术。电力电子技术所变换的“电力”，功率可以大到吉瓦级，也可以小到1W以下。因此说，它既是电子学在强电(高电压、大电流)电子领域的一个分支，又是电工学在弱电(低电压、小电流)电子领域的一个分支，也是强弱电结合的新兴高新技术学科。通常所用的电力有直流(DC)和交流(AC)两大类。前者有电压幅值和极性的不同，后者除电压幅值和极性不同外，还有频率和相位的差别。在实际应用中，人们常常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。不难看出，这些变换共有4种类型，它们都可通过相应的变换器实现，见表0-1。

表 0-1 电力变换的类型与变换器

输出 \ 输入	交 流	直 流
直流	整流(整流器)	直流斩波(斩波器、脉宽调制器 PWM)
交流	交流调压(调压器)，交-交变频(变频器)	逆变(逆变器、变频器)

交流-直流(AC-DC)变换：即将交流电转换为直流电。这种变换也称为整流。所用的装置叫整流器。用于如充电、电镀、电解和直流电动机的速度调节等场合。

直流-交流(DC-AC)变换：即将直流电转换为交流电。这是与整流相反的变换，也称为逆变。当交流输出接电网时，称之为有源逆变；当交流输出接负载时，称之为无源逆变。无源逆变装置的输出可以是恒频的，用于如恒压恒频(CVCF)电源或不间断供电电源(UPS)；也可以是变频(这时变换器也称为变频器)的，用于各种变频电源、中频感应加热和交流电动机的变频调速等场合。

交流-交流(AC-AC)变换：即将交流电能的参数(幅值或频率)加以变换。其中，改变交流电压有效值称为交流调压，用于如调温、调光、交流电动机的调压调速等场合；而将50Hz工频交流电直接转换成其他频率的交流电，称为交-交变频，所用装置也称为周波变换器(Cycloconverter)，主要用于交流电动机的变频调速。

直流-直流(DC-DC)变换：即将直流电的参数(幅值或极性)加以转换，是将恒定直流变成断续脉冲输出，以改变其平均值，此种变换器也称为斩波器(Chopper)或脉宽调制(PWM)变换器，主要用于直流电压变换、开关电源、电车、地铁、矿山电动机车、搬运车等电气车上所用直流电动机的牵引传动等场合。

可见，电力电子技术在工农业生产、交通运输、通信以及家用电器等行业都有着广泛的应用。因此，电力电子技术是横跨“电子”、“电力”和“控制”3个领域的一门新兴工程技术。

2. 电力电子技术的发展

电力电子技术的发展是基于电力电子器件的发展。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第一只晶闸管为标志的。在晶闸管出现之前, 电能转换是依靠旋转机组来实现的。与这些旋转式的交流机组相比, 利用电力电子器件组成的静止电能变换器, 具有体积小、重量轻、无机械噪声和磨损、效率高、易于控制、响应快及使用方便等优点。因此, 自 20 世纪 60 年代开始电力电子技术进入了晶闸管时代。晶闸管是通过对门极的控制使其导通而不能使其关断的器件, 因而属于半控型器件。对晶闸管电路的控制方式主要是相位控制方式。晶闸管的关断通常依靠电网电压等外部条件来实现, 这就使得晶闸管的应用受到局限。

20 世纪 70 年代后期, 电力电子技术突飞猛进, 其特征是, 出现了通和断或开和关都能控制的全控型电力电子器件(亦称自关断型器件)。全控型器件的特点是通过了对门极(基极、栅极)的控制既可使其开通又可使其关断, 如门极可关断晶闸管(GTO)、双极型功率晶体管(BJT/GTR)、功率场效应晶体管(P-MOSFET)等。这些器件的开关速度普遍快于晶闸管, 可用于开关频率较高的电路。这些优越的特性使电力电子技术的面貌焕然一新, 把电力电子技术推进到一个新的发展阶段。

和晶闸管电路的相位控制方式相对应, 采用全控型器件的电路的主要控制方式为脉冲宽度调制(PWM)方式。PWM 控制技术在电力电子技术中占有十分重要的位置, 它在逆变、斩波、整流、变频及交流电力控制中均可应用。它使电路的控制性能大为改善, 使以前难以实现的功能也得以实现, 对电力电子技术的发展产生了深远的影响。

在 20 世纪 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异军突起。IGBT 是 MOSFET 和 BJT 的复合。它把 MOSFET 的驱动功率小、开关速度快的优点和 BJT 通态压降小、载流能力大的优点集于一身, 性能十分优越, 成为现代电力电子技术的主导器件。与 IGBT 相对应, MOS 控制晶闸管(MCT)和集成门极换流晶闸管(IGCT)都是 MOSFET 和 GTO 的复合, 它们也综合了 MOSFET 和 GTO 两种器件的优点。

为了使电力电子装置的结构紧凑、体积减小, 人们常常把若干个电力电子器件及必要的辅助元件做成模块的形式, 这给应用带来了很大的方便。后来, 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)。目前功率集成电路的功率都还较小, 但这代表了电力电子技术发展的一个重要方向。

随着全控型电力电子器件技术的不断进步, 电力电子电路的工作频率也不断提高, 电力电子器件的开关损耗也随之增大。为了减小开关损耗, 软开关技术便应运而生, 零电压开关(ZVS)和零电流开关(ZCS)就是软开关最基本的形式。从理论上讲, 采用软开关技术可使开关损耗降为零, 可以提高效率。另外, 它也使得开关频率可以进一步提高, 从而提高了电力电子装置的功率密度。

3. 电力电子技术的应用

电力电子技术的应用十分广泛。它不仅用于一般工业, 也广泛用于交通运输、电力系统、通信系统、计算机系统、新能源系统等, 在电灯、空调等家用电器及其他领域中也有着广泛的应用。以下分几个主要应用领域加以叙述。

(1) 交直流电动机调速。工矿企业中大量应用的各种直流电动机具有良好的调速性

能,为其供电的可控整流电源或直流斩波电源都是电力电子装置。近年来,由于电力电子变频技术的迅速发展,使得交流电动机的调速性能可与直流电动机相媲美,交流调速技术大量应用并占主导地位。大至数兆瓦的各种轧钢机,小到几百瓦的数控机床的伺服电动机,以及矿山机械牵引等场合都广泛采用电力电子交直流调速技术。一些对调速性能要求不高的大型风机、水泵等近年来也采用了变频装置,以达到节能的目的。还有些不需要调速的电动机为了 avoid 启动时的电流冲击而采用了软启动装置,这些软启动装置也是电力电子装置。

(2) 电源技术。各种电子装置一般都需要不同电压等级的直流电源供电。以前的直流电源大多用晶闸管整流电源,现在多改为采用全控型器件的高频开关电源,如通信设备中的程控交换机用的直流电源、计算机的电源等。

在冶金工业中的高频或中频感应加热电源、淬火电源及直流电弧炉电源等,在电化学工业中所使用的直流电源、电解铝、电解食盐水、电镀等都需要大容量整流电源。

在交通运输电气化铁道中也广泛采用电力电子技术。电气机车中的直流机车采用整流装置,交流机车采用变频装置。直流斩波器也广泛用于铁道车辆。在未来的磁悬浮列车中,电力电子技术更是一项关键技术。除牵引电动机传动外,车辆中的各种辅助电源也都离不开电力电子技术。

电动汽车的电动机靠电力电子装置进行电力变换和驱动控制,其蓄电池的充电也离不开电力电子装置。一台高级汽车中需要许多控制电动机,它们也要靠变频器和斩波器来驱动和控制。

飞机、船舶需要很多不同要求的电源,因此航空和航海都离不开电力电子技术。

由于电力电子装置可以提供给负载各种不同的直流电源、恒频交流电源和变频交流电源,因此也可以说电力电子技术研究的就是电源技术。

(3) 电力系统自动化。电力电子技术在电力系统中有非常广泛的应用。据估计,发达国家在用户最终使用的电能中,有60%以上的电能至少经过一次电力电子交流装置的处理。电力系统在通向现代化的过程中,电力电子技术是关键技术之一。可以毫不夸张地说,如果离开电力电子技术,电力系统的现代化是不可想象的。

直流输电在长距离、大容量输电时有很大的优势,其送电端的整流间和受电端的逆变间都采用晶闸管变流装置。近年发展起来的柔性交流输电(FACTS)也是依靠电力电子装置才得以实现的。

无功补偿和谐波抑制对电力系统有重要的意义。晶闸管控制电抗器(TCR)、晶闸管投切电容器(W)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)等新型电力电子装置具有更为优越的无功功率和谐波补偿的性能。在配电网系统中,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,以进行电能质量控制,改善供电质量。

(4) 家用电器。电灯在家用电器中占有十分突出的地位。由于电力电子照明电源体积小、发光效率高、可节省大量能源,通常被称为“节能灯”,目前正在逐步取代传统的白炽灯和日光灯。

家用变频空调器、电视机、音响设备、计算机、全自动洗衣机、电冰箱、微波炉等家用电器都不同程度地应用了电力电子技术。

4. 电力电子技术的重要作用

综合以上所述可知,电力电子技术在现代社会的重要作用如下。

(1) 优化电能使用。通过电力电子技术对电能的处理,使电能的使用合理、高效和节约,实现了电能使用最佳化。例如,在节电方面,针对风机水泵、电力牵引、轧机冶炼、轻工造纸、工业窑炉、感应加热、电焊、化工、电解等 14 个方面的调查报告显示,潜在节电总量相当于 1990 年全国发电量的 16%。所以,推广应用电力电子技术是节能的一项战略措施,一般节能效果为 10%~40%。我国已将许多装置列入到节能的推广应用项目之中。

电力电子技术与能源利用的关系:在过去 100 年中,能源消耗增长很快,对环境造成了严重的污染。如果这个趋势继续下去,将来会造成很严重的后果,会出现能源匮乏、环保等问题。那么电力电子技术在这个方面起什么作用呢?目前在所有的能源中,电力方面的能源约占 40%,而电力能源中有 40%是经过电力电子设备的转换才到使用者手中的。其中的 55%以上是在电动机和电动机控制方面,20%是照明方面。在这两个主要方面,如果用先进的电力电子技术去转换,人类最少可节省约 1/3 的能源,而这 1/3 的能源相当于 840 个发电厂发出的电能。由此可以看出,电力电子技术与环保密切相关,是环保的重点之一。预计 10 年后,电力能源中的 80%要经过电力电子装置的变换,电力电子技术在 21 世纪将起到更大的作用。

(2) 改造传统产业和发展机电一体化等新兴产业。据发达国家预测,今后将有 95%的电能要经电力电子技术处理后再使用,即工业和民用的各种机电设备中,将有 95%与电力电子产业有关。特别是,电力电子技术是弱电控制强电的媒介,是机电设备与计算机之间的重要接口。它的发展为传统产业和新兴产业采用微电子技术创造了条件,成为发挥计算机作用的基础和保证。

(3) 电力电子技术高频化和变频技术的发展,将使机电设备突破工频传统,向高频化方向发展。实现最佳工作效率,将使机电设备的体积减小为原来的几分之一,甚至几十分之一,响应速度大大加快,并能适应任何基准信号,实现无噪声且具有全新的功能和用途。

(4) 电力电子智能化的发展,在一定程度上将信息处理与功率处理合二为一,使微电子技术 with 电力电子技术一体化,其发展有可能引起电子技术的重大改革。有人甚至提出,电子学的下一项革命将发生在以工业设备和电网为对象的电子技术应用领域,电力电子技术将把人们带到第二次电子革命的边缘。

5. 本课程的学习要求

电力电子技术是机电一体化技术、自动化技术等专业的专业技术基础课,也是一门实用性很强的课程,因此本课程对学生的学习要求如下。

(1) 熟悉和掌握常用电力电子器件和装置的工作原理、特性和参数,能正确选择和使用它们。

(2) 熟悉和掌握各种基本变换器的工作原理,特别是各种基本电路中的电磁过程,掌握其工作波形分析方法和常见故障的分析与处理方法。

(3) 了解各种开关元件的控制电路、缓冲电路和保护电路。

(4) 了解各种变换器的特点、性能指标和使用场合。

(5) 重视实验与实训,掌握基本实验和实训方法,提高实践技能。

本课程的选修课程是电工学、电子技术基础等课程,后续课程主要是自动控制原理及应用、电力拖动自动控制系统等专业课程。

第 1 章 电力电子器件

教学提示：电力电子器件是电力电子电路的基础，本章主要讲述电力电子器件的概念、特点和分类。电力电子器件种类繁多，按其开关控制性能可分为不控型器件(如电力二极管)、半控型器件(如晶闸管)和全控型器件(如可关断晶闸管 GTO、电力晶体管 GTR 及绝缘栅双极晶体管 IGBT 等)。通过控制信号既可以控制其导通，又可以控制其关断的电力电子器件被称为全控型器件。这类器件的品种很多，目前常用的有门极可关断晶闸管(GTO)、大功率晶体管(GTR)、电力场效应晶体管(Power MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)、静电感应晶体管(SIT)及静电感应晶闸管(SJTH)等。根据器件内部载流子参与导电的种类不同，全控型器件又可分为单极型、双极型和复合型 3 类。器件内部只有一种载流子参与导电的称为单极型，如 P-MOSFET 和 SIT；器件内有电子和空穴两种载流子导电的称为双极型，如 GTR、GTO 和 SITH 等；由双极型器件与单极型器件复合而成的新器件称为复合型器件，如 IGBT 等。本章重点分析这 3 类电力电子器件的工作原理、基本特性、主要参数、电力电子器件的驱动、保护、串并联使用以及选择和使用中应注意的问题等。

1.1 电力电子器件概述

1.1.1 电力电子器件的发展与应用

1. 电力电子器件的发展

在电力系统或电气控制系统中，用以实现主电路电能的变换或控制的电力半导体器件称为电力电子器件。自 1958 年世界上第一支晶闸管(早期称为可控硅整流管，300V/25A)研制成功以来，电力半导体技术在工业领域的应用发生了革命性的变化，有力地推动了大功率(高电压、大电流)电子器件多样化应用进程的发展。在随后的二十多年里，电力半导体器件在技术性能和应用类型方面又有了突飞猛进的发展，先后分化并制造出功率逆导晶闸管、三端双向晶闸管和可关断晶闸管等。在此基础上为增强功率器件的可控性，还研制出双极型大功率晶体管、开关速度更高的单极 MOS 场效应晶体管和复合型高速、低功耗绝缘栅双极晶体管等，从此电力半导体器件跨入了全控开关器件的新时代。进入 20 世纪 90 年代，单个器件的容量明显增大，控制功能更加灵活，价格显著降低，派生的新型器件不断涌现，电力全控开关器件模块化和智能化集成电路已经形成，产品性能和技术参数正不断改进和完善。电力电子技术的不断发展及广泛应用又将反过来促进现代电力半导体器件制造技术的成熟与发展。

2. 电力电子器件的应用范围

随着电力半导体器件制造水平的不断提高和电力电子技术的迅速推广,越来越多的电气设备采用了电力变换和控制器件,其应用范围非常广泛,从家用电器、商业运营系统、一般工业设备、电气化机车,到大型电力行业等领域都有许多独特的应用。

从应用类型的实际要求和电力器件的技术性能(例如,器件容量、开关频率以及器件尺寸大小等)进行综合选择,各种电力半导体器件的适用范围大致如下。

(1) 三端双向晶闸管:适用于可控电抗器、电容器投切电子开关、电子洗衣机、微波炉、真空清洗器等。

(2) 晶闸管:适用于高压直流输电(HVDC)、电动机车牵引、直流电动机传动、制造行业焊机和化工业电解直流电源等。

(3) 可关断晶闸管:适用于静止无功补偿(SVC、SVG)、电力机车、不间断电源(UPS)、电动机调速控制、超导磁储能控制(SMES)等。

(4) 大功率晶体管:适用于UPS、电动机控制、空调、普通逆变器、电冰箱等。

(5) 场控器件和功率模块:适用于工业用大功率逆变器、有源电力滤波器(APF)、电动机驱动控制、铲叉车斩波器、机器人焊接器、UPS、电动汽车、恒压恒频(CVCF)和变压变频(VVVF)装置、视频音频设备、微波炉、电子烤箱等。

1.1.2 电力半导体器件的分类

电力半导体器件一般有下面两种分类方法。

1. 按照器件的可控性分类

按照器件的可控性进行分类,可将电力半导体器件分为不可控型、半控型和全控型3种。

(1) 不可控型:如电力二极管,其特点是由电源主回路控制其通断状态。

(2) 半控型:如普通晶闸管,其特点是由触发信号控制其导通,但需由主回路的外部条件(负电压和小于维持电流)控制关断,通常采用换相电压的自然关断或强迫关断方法。

(3) 全控型:如电力开关器件,其特点是由触发信号控制导通和关断两种状态。包括可关断晶闸管(GTO)、大功率双极型晶体管(BJT)、MOS场效应晶体管(MOSFET)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)、MOS控制晶闸管(MCT)以及静电感应晶闸管(SITH)和静电感应晶体管(SIT)等。

2. 按照器件的物理结构和功能特点分类

按照器件的物理结构和功能特点进行分类,可将电力半导体器件分为二层二端结构、四层三端结构、多重台面三端结构和多芯片模块结构。

(1) PN 二层二端结构:如二极管,主要用于电源整流和逆变器续流。

(2) PNP 四层三端结构:如晶闸管,用于可控整流器和逆变器,以及其他电气设备的电子开关等。其主要包括普通晶闸管(SCR)、三端双向晶闸管(TRIAC),以及派生的可关断晶闸管等。

(3) NPN 多重台面三端结构:如电力晶体管等,是一种自关断功率器件,作为高速开关广泛用于逆变器。其主要包括双极型晶体管、MOS场效应晶体管和绝缘栅双极晶体管等。

(4) 多芯片模块结构:如电力模块,由数块电力半导体器件按照应用电路的要求集成

或封装在单一模块中。根据所含器件芯片的种类,又可分为二极管模块、晶闸管模块、晶体管模块和智能功率模块等。

1.1.3 电力半导体器件的发展趋势

电力半导体器件技术的进步是与工业市场的需求密不可分的。虽然不同的应用系统和电气设备对电力器件的要求不尽相同,但从利用电力电子技术促进节能和提高电能转换效率、免除换流电路系统的复杂设计过程等社会效益和经济效益考虑,电力半导体器件技术正向着大容量、高开关速度、高集成度和低价格方向迅猛发展,主要发展趋势如下。

1. 高电压、大电流、低损耗和高速开关的全控器件

可以预言,除了在数兆伏安等级的电力电子换流器中仍会使用传统的自然关断或强迫换相晶闸管外,未来的换流器设计中都将采用可控开关器件,或者说电力器件的结构和类型主要将在低频大容量晶闸管、可关断晶闸管和高开关频率、电压触发型 MOS 复合型晶体管两个方面发展。例如:目前已有 4.5kV、3kA 可关断晶闸管用于 80MVA 电力静止无功发生器和 20MVA 电力有源滤波器,正在开发研制 8kV、4kA 晶闸管和 6kV、6kA 可关断晶闸管,并把它用于工频高压直流输电换流器以及静止无功发生器中。在高频开关应用领域里,越来越多地采用 MOS 场控器件。目前正在开发研制 1.4kV、1kA、工作频率为 20kHz,并带有续流二极管的单开关 IGBT 模块;1.4kV、300A 的三相逆变桥模块以及 1.2kV、30A 具有制动回路的三相整流和逆变桥一体的 IGBT 模块。不久将有 1.2kV、600A 的达林顿双极晶体管产品出现。

提高电力器件的开关工作频率对于降低工作环境的噪声,减小和减轻器件的体积与重量,增强控制精度以及改善变换性能的作用是十分显著的。由于半导体器件结构和特性等因素的影响,提高电力器件的开关工作频率在器件的类型上正从晶闸管向双极晶体管方面转变。晶闸管的工作频率通常在 0~1kHz 范围内(实际上主要用于工频条件),对应人类的听觉有最大噪声感受度。随着电力器件半导体物理结构设计和制造技术的进步,大功率晶体管的最高工作频率已达到 5kHz, MOS 双极晶体管的工作频率已达到 50kHz,其中 IGBT 工作频率范围很宽,可达 20kHz,而 MOSFET 的工作频率甚至接近于 100kHz。许多制造厂家都把如何进一步提高电力器件的开关工作频率作为重要的研究方向,因此可以说,无论从器件的功率容量或是开关工作频率等技术参数上来说,IGBT 器件都将取代 BJT 器件。

2. 功率器件的智能模块化和系统模块化

电力半导体器件技术发展的另一个重要方面是功率器件的智能模块化和系统模块化。除了上述提到的大容量、低噪声、高集成度和小型化外,从实际应用角度考虑,还希望功率器件高效低损耗,有较大的安全工作区,坚固耐用,便于稳定控制,并且易于进行复杂换流电路系统设计和实际使用。随着电力半导体构造技术和工艺制造技术的发展,在充分发挥 IGBT 模块的技术性能的基础上,20 世纪 90 年代利用新兴 IGBT 芯片和优化集成电路,并通过封装新技术将器件驱动功能、信号传感、自保护和自诊断功能(过电流及掉负载保护、过热保护、短路保护和控制电源欠电压闭锁保护等)与功率器件或开关主电路集成一体,生产出智能功率模块(IPM)。与一般功率模块相比,它的抗干扰性能进一步改善,器件功耗减少了 20%~30%,应用电路设计工作量节省约 50%,功率器件的可靠性大大提高,加快了电力电子技术在各个领域的推广和应用。

1.2 不可控器件——电力二极管

电力二极管属于不可控器件，由电源主回路控制通断状态。由于其结构和工作原理简单，性能可靠，因而在需要将交流电变为直流电且不需要调压的场合仍广泛使用电力二极管，如交-直-交变频的整流、大功率直流电源等。特别是快速恢复二极管和肖特基二极管，仍在中、高频整流和逆变以及低压高频整流场合广泛应用。

1.2.1 电力二极管的工作原理

电力二极管是以PN结为基础的，实际上就是由一个面积较大的PN结和两端引线封装组成的，其外形主要有螺栓型和平板型两种。电力二极管的外形、结构和电气图形符号如图1.1所示。

电力二极管和电子电路中二极管的工作原理一样，即若二极管处于正向电压作用下，则PN结导通，正向管压降很小；反之，若二极管处于反向电压作用下，则PN结截止，仅有极小的可忽略的漏电流流过二极管。电力二极管的伏安特性曲线如图1.2所示。

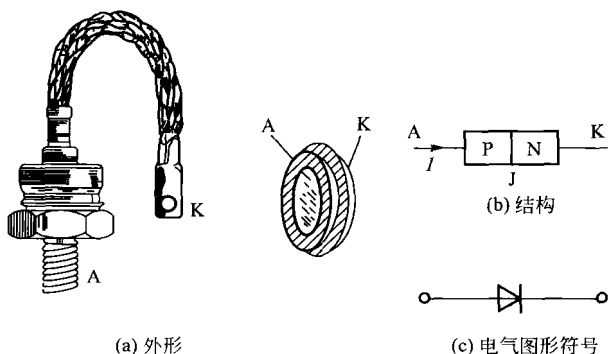


图 1.1 电力二极管的外形、结构和电气图形符号

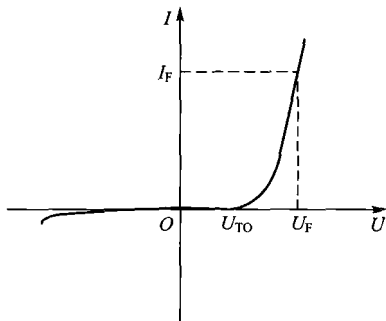


图 1.2 电力二极管的伏安特性曲线

1.2.2 电力二极管的主要参数

1. 正向平均电流 $I_{F(AV)}$

电力二极管的正向平均电流 $I_{F(AV)}$ 是指在规定的管壳温度和散热条件下允许通过的最大工频正弦半波电流的平均值。元件标称的额定电流就是这个电流。实际应用中，电力二极管所流过的最大有效电流为 I ，则其额定电流一般选择为

$$I_{F(AV)} \geq (1.5 \sim 2) \frac{I}{1.57} \quad (1-1)$$

式中：系数 $1.5 \sim 2$ 是安全系数。

2. 正向压降 U_F

正向压降 U_F 是指在规定温度下，流过某一稳定正向电流时所对应的正向压降。