



普通高等教育 电气工程 自动化 系列规划教材

Power Electronics

电力电子技术

第2版

◎ 赵莉华 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育 $\frac{\text{电气工程}}{\text{自动化}}$ 系列规划教材

电力电子技术

第2版

主 编 赵莉华
参 编 舒欣梅



机械工业出版社

本书根据电气工程类、自动化类和通信类专业的教学大纲要求,针对强弱电结合的特点,在内容上满足各专业的共同需求,为读者学习电气工程、自动化等相关专业知识和从事相关领域工作奠定坚实的理论和应用基础。

全书内容共分7章,包括对电力电子技术课程学习需要的相关基础知识的复习,各种电力电子器件的结构、工作原理和主要技术参数及选用,重点讨论了AC-DC、DC-DC、AC-AC、DC-AC四种变换电路,最后对电力电子技术发展新技术及应用进行了介绍。

本书可作为普通高等学校电气工程类、自动化类和通信类专业电力电子技术课程的本科教材或参考书,亦可供相关工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/赵莉华主编. —2版. —北京:机械工业出版社, 2015.3

普通高等教育电气工程 自动化系列规划教材

ISBN 978-7-111-49488-1

I. ①电… II. ①赵… 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(2015)第041334号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:于苏华 责任编辑:于苏华 路乙达

版式设计:常天培 责任校对:闫玥红

封面设计:张静 责任印制:李洋

三河市国英印务有限公司印刷

2015年5月第2版第1次印刷

184mm×260mm·15.25印张·373千字

标准书号:ISBN 978-7-111-49488-1

定价:33.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

第2版前言

《电力电子技术》第1版自2011年出版以来,得到兄弟院校及同行们的认可,目前已发行近万册。根据对第1版教材的反馈信息,第2版教材在第1版基础上做了内容方面的增补及改动。为了同学更好地学习和理解,第2版增加了电力电子技术课程学习需要的相关基础知识复习内容。

目前国内各高校就电力电子技术课程教学内容选取方面存在较大的分歧,主要有两种意见:一种主张大量压缩传统的整流电路尤其是相控整流电路相关知识,加大电力电子新技术特别是新器件的使用、新的电路拓扑结构及电力电子技术新的应用等方面知识的介绍;另一种意见主张仍以传统的相控整流电路介绍为重点,对电力电子技术的新应用等仅作简单介绍,有兴趣的同学可以参考其他文献进行自学。笔者认为,这两种意见各有其道理,应该根据各学校各专业的具体情况而定。比如,电力电子与电力传动专业方向的学生将来主要从事电源设计、开发等相关行业工作,那么教学内容就必须以全控型器件及电路为重点。如果学生将来不是从事电力电子相关的工作,而是把本课程作为电气工程及其自动化、自动化大类专业的基础课程,则整流电路部分仍应为重点教学内容。本书仍以传统的晶闸管及其构成的相控整流电路作为重点进行介绍,希望学生在电路、电子学、电机学等课程学习基础上,能灵活应用所学的相关基础知识,定性及定量分析电力电子电路。

第2版教材在编写过程中,参考了较多国外的电力电子技术教材,更加重视电路分析方法及相关的基础理论应用。由于电力电子装置对电网电能质量的影响日益增大,尤其是整流装置在电力系统中的应用已非常广泛,所以对电力电子装置的谐波、功率因数等的分析显得更加重要。第2版更强调了对整流电路设计中的几个关键参数的分析和计算,如整流变压器容量、交流侧电流畸变率、交流侧功率因数、直流电压纹波因数等,便于同学们对于相关概念的理解,为后续电能质量相关课程的学习打下基础。第2版教材面向将电力电子技术课程作为专业基础课程的高校学生,强调基础理论的学习和基本分析方法的掌握。本书电路分析清楚,详尽易懂,方便同学们自学,也可作为相关工程技术人员的参考资料。

本书共分为7章,包括电力电子技术课程涉及的相关基础知识复习、电力电子器件及驱动和保护、可控整流及有源逆变电路、直流斩波电路、交流调压和变频电路、无源逆变电路及电力电子新技术及应用。本书绪言、第1~5章、第7.5.2小节、第7.6节的部分及第7.7节由四川大学赵莉华编写,其余部分由西华大学舒欣梅编写。全书由赵莉华统稿。

本书总教学学时为40~50学时,可根据学时情况调整教学内容。章节中,带有“*”号的内容为选学。本书在编写过程中,参考了很多同类教材,一部分在参考文献中列出,还有很多不能一一列出,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在缺点和错误,欢迎读者批评指正。

编 者

第1版前言

随着科学技术的不断发展,“电力电子技术”课程已经成为高等学校电气信息类专业的一门核心专业基础课程,它也是一门承上启下的平台课程,是多门后续专业课程的基础。近年来,电力电子技术得到了突飞猛进的发展,其应用领域也越来越广泛,几乎涉及国民经济和日常生活的各个环节。所以,“电力电子技术”课程的内容也非常繁杂。

目前,本科“电力电子技术”课程的教材种类繁多,主要涉及电力电子器件及应用、基本电力变换电路和电力电子技术的应用。本书是为适应国家对工程技术人才的培养要求,尤其是为适应宽口径、强基础的人才培养模式要求,针对强弱电结合的电气信息类专业编写而成。特点是“重基础,强分析,理论与应用结合”。编写过程中,对电力电子新技术及应用只做了简单介绍,有兴趣的读者可以通过其他相关专著学习。本书重点介绍了常用的电力电子器件结构、特性和选用,在此基础上阐述 AC-DC、DC-DC、AC-AC、DC-AC 四种变换的基本变换电路,本书还重点介绍了各种基本电路的工作原理和分析,让读者掌握电路的基本分析方法,为进行后续课程学习打好坚实的基础。本书可作为高等学校电气工程类、自动化类和通信类专业的教材或参考书,也可供相关工程技术人员参考使用。

全书共分为 6 章,包括电力电子器件及驱动和保护、可控整流及有源逆变电路、直流斩波电路、交流调压和变频电路、无源逆变电路、电力电子新技术及应用。本书绪言、第 1~4 章由四川大学赵莉华编写,第 5 章和第 6 章由西华大学舒欣梅编写,全书由赵莉华统稿。本书总教学学时为 40~50 学时,可根据学时情况调整教学内容。章节中,带有“*”号的内容为选学。

本书在编写过程中,参考了很多同类教材,一部分在参考文献中列出,还有很多不能一一列出,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在缺点和错误,欢迎读者批评指正。

编者

目 录

第2版前言

第1版前言

序言	1
0.1 电力电子技术的概念及研究领域	1
0.2 电力电子技术的发展历史	2
0.3 电力电子技术的应用	3
0.4 电力电子技术的发展趋势	7
0.5 电力电子电路的仿真	7
0.6 本教材主要内容	8
第1章 相关基础知识复习	9
1.1 非正弦周期函数的傅里叶级数分解	9
1.2 谐波	10
1.3 平均值和有效值的计算	11
1.3.1 平均值	11
1.3.2 有效值	11
1.4 瞬时功率和平均功率的计算	12
1.4.1 瞬时功率的定义	12
1.4.2 平均功率的定义及计算	12
1.5 有功功率、无功功率、视在功率 及功率因数	12
1.5.1 有功功率	12
1.5.2 无功功率	13
1.5.3 视在功率	13
1.5.4 功率因数	13
1.6 理想电感与理想电容	15
1.6.1 理想电感元件	15
1.6.2 理想电容元件	16
1.7 三相电路基本知识	17
1.7.1 对称三相电压	17
1.7.2 三相电路的联结方式	18
1.7.3 三相电路的功率计算	19
小结	19
思考题及习题	20
第2章 电力电子器件及驱动和保护	21
2.1 概述	21
2.1.1 电力电子器件的定义	21
2.1.2 理想的电力电子开关	21
2.1.3 电力电子器件的损耗	22
2.1.4 电力电子器件的分类	22
2.2 电力二极管	23

2.2.1 电力二极管的结构和 基本工作原理	23
2.2.2 电力二极管的基本工作特性	26
2.2.3 电力二极管的主要参数	27
2.2.4 电力二极管的主要类型	28
2.2.5 电力二极管的型号	28
2.3 晶闸管	29
2.3.1 晶闸管的结构	29
2.3.2 晶闸管的工作原理	30
2.3.3 晶闸管的基本工作特性	32
2.3.4 晶闸管的主要参数	34
2.3.5 晶闸管的型号	36
2.3.6 晶闸管的派生器件	37
2.4 门极关断晶闸管	39
2.4.1 GTO 的结构	39
2.4.2 GTO 的工作原理	40
2.4.3 GTO 的主要参数	41
2.5 电力晶体管	41
2.5.1 GTR 的结构	42
2.5.2 GTR 的工作特性	42
2.5.3 GTR 的主要参数	43
2.5.4 GTR 二次击穿现象及安 全工作区	44
2.6 电力场效应晶体管	45
2.6.1 电力 MOSFET 的结构和工 作原理	45
2.6.2 电力 MOSFET 的特性	46
2.6.3 电力 MOSFET 的主要参数	48
2.7 绝缘栅双极型晶体管	49
2.7.1 IGBT 的结构和工作原理	49
2.7.2 IGBT 的工作特性	49
2.7.3 IGBT 的擎住效应和安全工作区	51
2.7.4 IGBT 的主要参数	52
2.8 其他新型电力电子器件	52
2.8.1 静电感应晶体管	52
2.8.2 静电感应晶闸管	53
2.8.3 集成门极换流晶闸管	53
2.8.4 电子注入增强栅晶体管	54
2.8.5 基于新材料的电力电子器件	54
2.8.6 功率模块、功率集成电路与集 成电力电子模块	55

2.9 电力电子器件的驱动要求	55	*3.9 整流装置的谐波抑制技术	131
2.9.1 晶闸管的触发要求	56	3.9.1 谐波污染	131
2.9.2 GTO 的驱动要求	56	3.9.2 网侧谐波电流的抑制技术	133
2.9.3 GTR 的驱动要求	57	*3.10 PWM 整流技术	134
2.9.4 电力 MOSFET 的驱动要求	57	小结	136
2.9.5 IGBT 的驱动要求	58	思考题及习题	136
2.10 电力电子器件的串并联技术	58	第4章 直流斩波电路	140
2.10.1 晶闸管的串联	58	4.1 概述	140
2.10.2 晶闸管的并联	60	4.1.1 直流斩波的基本工作原理	140
小结	60	4.1.2 直流斩波电路的基本控制方式	141
思考题及习题	61	4.2 非隔离型斩波电路	142
第3章 可控整流及有源逆变电路	62	4.2.1 降压型斩波电路的结构及工 作原理	142
3.1 概述	62	4.2.2 升压型斩波电路的结构及工 作原理	144
3.1.1 整流的概念	62	4.2.3 升降压型斩波电路的结构及工 作原理	146
3.1.2 整流电路的分类	62	4.2.4 Cuk 斩波电路的结构及工作 原理	147
3.1.3 整流电路的主要性能指标	63	*4.2.5 Sepic 斩波电路的结构及工 作原理	149
3.2 单相可控整流电路	64	*4.2.6 Zeta 斩波电路的结构及工作 原理	149
3.2.1 单相半波可控整流电路	64	4.3 隔离型斩波电路	150
3.2.2 单相桥式全控整流电路	72	4.3.1 正激型变换电路的结构及工 作原理	150
3.2.3 单相全波可控整流电路	79	4.3.2 反激型变换电路的结构及工 作原理	152
3.2.4 单相桥式半控整流电路	82	4.3.3 推挽型变换电路的结构及工 作原理	154
3.3 三相可控整流电路	87	4.3.4 半桥型变换电路的结构及工 作原理	155
3.3.1 三相半波可控整流电路	87	4.3.5 全桥型变换电路的结构及工 作原理	156
3.3.2 三相桥式全控整流电路	94	小结	157
3.3.3 三相桥式半控整流电路	101	思考题及习题	157
3.4 变压器漏抗对整流电路的影响	106	第5章 交流调压和变频电路	158
3.4.1 换相期间的整流输出电压	106	5.1 交流调压电路	158
3.4.2 换相压降的计算	107	5.1.1 概述	158
3.4.3 换相重叠角的计算	108	5.1.2 单相交流调压电路	159
3.4.4 可控整流电路的外特性	110	5.1.3 三相交流调压电路	165
3.5 电容滤波的不可控整流电路	111	5.2 交流无触点开关	170
3.5.1 电容滤波的单相桥式不可控整 流电路	111	5.2.1 晶闸管交流无触点开关	171
3.5.2 电容滤波的三相桥式不可控 整流电路	114	5.2.2 全控型器件交流无触点开关	172
3.6 整流电路的有源逆变工作状态	115	5.3 交流调功电路	172
3.6.1 逆变的概念	115	5.4 交-交变频电路	173
3.6.2 有源逆变产生的条件	116		
3.6.3 三相有源逆变电路	118		
3.6.4 逆变失败的原因分析及最小 逆变角的限制	122		
3.6.5 有源逆变的应用	124		
3.7 整流电路交流电源侧谐波电流分析	127		
*3.8 晶闸管直流电动机系统	128		
3.8.1 整流状态下电动机的机械特性	128		
3.8.2 逆变状态下电动机的机械特性	131		

5.4.1 单相交-交变频电路	173	7.2.1 矩阵式变换电路的特点	208
5.4.2 三相交-交变频电路	174	7.2.2 矩阵式变换电路的工作原理	209
小结	175	*7.3 有源滤波技术	211
思考题及习题	176	7.3.1 概述	211
第6章 无源逆变电路	177	7.3.2 有源电力滤波器的工作原理	212
6.1 概述	177	7.3.3 有源电力滤波器的分类	213
6.1.1 无源逆变电路的分类	177	7.3.4 有源电力滤波器的控制	213
6.1.2 换流方式	177	*7.4 功率因数校正技术	214
6.1.3 逆变电路的基本工作原理	179	7.4.1 功率因数校正的概念	214
6.2 电压型逆变电路	180	7.4.2 功率因数校正电路的分类	215
6.2.1 单相半桥电压型逆变电路	180	7.4.3 单极功率因数校正电 路的基本原理	216
6.2.2 单相全桥电压型逆变电路	181	7.4.4 有源功率因数校正的电流 控制方式	217
6.2.3 三相电压型逆变电路	184	*7.5 高压直流输电技术	219
6.3 电流型逆变电路	186	7.5.1 传统高压直流输电技术	219
6.3.1 单相电流型逆变电路	187	7.5.2 柔性直流输电技术	223
6.3.2 三相电流型逆变电路	189	*7.6 柔性交流输电技术	226
6.4 PWM 逆变电路	190	7.6.1 柔性交流输电技术的特点	226
6.4.1 PWM 控制的基本原理	190	7.6.2 柔性交流输电装置的分类及 其技术原理	227
6.4.2 SPWM 逆变电路的控制方法	191	*7.7 新能源发电技术	230
6.4.3 单相 SPWM 逆变电路	193	7.7.1 风力发电系统	230
6.4.4 三相 SPWM 逆变电路	196	7.7.2 光伏发电技术	232
小结	198	小结	233
思考题及习题	199	思考题及习题	233
第7章 电力电子新技术及应用	200	参考文献	234
*7.1 软开关技术	200		
7.1.1 软开关的概念	200		
7.1.2 软开关电路的分类和典型电路	202		
*7.2 矩阵式变换电路	208		

序 言

0.1 电力电子技术的概念及研究领域

电力电子技术 (Power Electronics) 是以电力电子器件 (Power Electronic Device) 为基础, 利用电路和控制理论对电能进行变换和控制的技术, 即应用于电力领域的电子技术。电力电子技术也称为电力电子学或功率电子学。电力电子技术由电力学、电子学和控制理论三个学科交叉形成, 是目前较为活跃的应用型学科。

电力电子技术通常分为器件的制造技术和电力电子电路的应用技术即变流技术两大部分。其中, 器件制造技术包括各种电力电子器件的设计、制造、参数测试、模型分析等。而目前所用的电力电子器件基本都采用半导体材料制成, 所以电力电子器件也称为电力半导体器件。电力电子器件的制造技术是电力电子技术的基础。

众所周知, 电能有交流 (Alternating Current, 简称 AC) 和直流 (Direct Current, 简称 DC) 两大类。交流电能有电压大小、相位、频率和相数的差别, 直流电能有大小和极性的差别。在电能的实际应用中, 常常需要在两种电能之间, 或是对同一种电能的一个或多个参数 (如电压、电流、频率等) 进行变换, 这就是电力变换 (Power Conversion), 也就是电力电子变流技术。

电力变换可总结为以下四种类型:

交流 - 直流 (AC - DC) 变换——整流, 将交流电能变为直流电能。

直流 - 交流 (DC - AC) 变换——逆变, 将直流电能变为交流电能, 是整流的逆过程。

交流 - 交流 (AC - AC) 变换——包括交流调压和交流变频, 即改变交流电能的参数。

直流 - 直流 (DC - DC) 变换——直流斩波, 是对直流电能的参数进行变换。

图 0-1 给出了常见的整流和逆变电路的图形符号。虽然电力变换只有这四种类型, 但一个具体的电力电子装置中可能涉及其中的一种或几种变换类型, 如图 0-2 所示为开关电源电路原理图, 开关电源是将交流市电变换为所需要的直流电, 包括了输入滤波、整流、逆变、隔离、再整流和输出滤波的过程。交流传动系统大量使用的交 - 直 - 交变频器中也包括了整流和逆变两种变换类型。

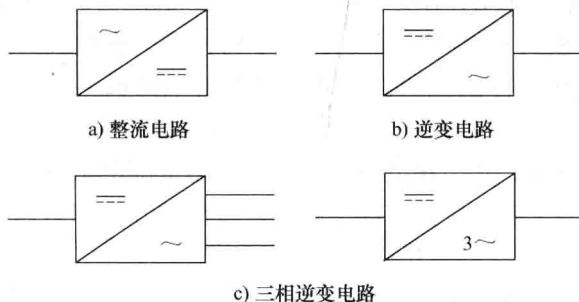


图 0-1 整流和逆变电路图形符号

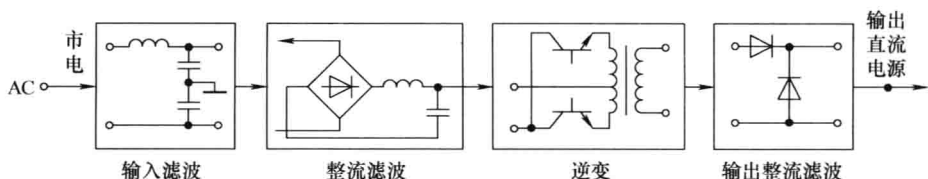


图 0-2 开关电源电路原理图

所以，电力电子技术对电能进行变换和控制的任务就是变换电能的形态和控制电能的流动，向用户提供满足性能要求的电能。

0.2 电力电子技术的发展历史

1. 电力电子器件的发展历史

电力电子技术的发展历史，与电力电子器件的发展历史密不可分。电力电子器件是电力电子技术的基础，也是电力电子技术发展的“龙头”。

1958 年，美国通用电气公司研制出世界上第一只工业用晶闸管（Thyristor），也称 SCR，这标志着电力电子技术时代的诞生，它表明电能的变换和控制技术由传统的直流发电机—电动机组成的旋转变流机组和静止的离子变流器时代进入了半导体变流技术时代。20 世纪 60 年代开始到 70 年代阶段，晶闸管得到了飞速发展，从低压小电流到高压大电流的各系列晶闸管产品广泛应用于各种变流装置，同时，逆导晶闸管、双向晶闸管、光控晶闸管等晶闸管派生器件也相继问世，电力电子技术的发展进入了晶闸管时代。

20 世纪 70 年代中后期，以门极关断（GTO）晶闸管、大功率晶体管（GTR）和电力场效应晶体管（Power MOSFET）为代表的全控型器件得到迅速发展。随着全控型器件的诞生和发展，推动了变换器装置的革命，将电力电子技术推进到一个新的发展阶段。

到了 20 世纪 80 年代后期，绝缘栅双极型晶体管（IGBT）、集成门极换流晶闸管（IGCT）等复合型器件相继问世，它们综合了 MOSFET、GTO 等器件的优点，性能更加优越。

为了使电力电子装置的结构更加紧凑、体积进一步减小，出现了将若干个电力电子器件及其控制、保护、驱动电路等功能集成的功率模块器件（PIC），这也代表了电力电子技术发展的一个重要方向。

到了 20 世纪末期和 21 世纪初期，新材料、新工艺的电力电子器件的研究和开发也如火如荼。其中，碳化硅（SiC）以其优良的物理化学特性和电特性成为制造大功率电子器件最重要的半导体材料。由碳化硅制成的肖特基二极管及 MOSFET 器件，与相同耐压的硅器件相比，其漂移电阻区厚度薄一个数量级，杂质浓度可为硅的两个数量级，其单位面积的阻抗仅为硅器件的 1/100。此外，其漂移电阻几乎是器件的全部电阻，所以碳化硅器件的发热量极低，可在 400℃ 的高温下正常工作。除了碳化硅器件的开发和研究外，其他各种新材料器件的研究也在广泛开展中。

在电力电子器件的研发和制造方面，我国一直处于较落后的状态。近年来，国内高校、科研单位及企业都投入了大量人力、物力，使我国在该方面取得了长足进展。2014 年 6 月

20 日,我国电力电子行业迎来了具有里程碑意义的时刻,中国南车集团自主设计建造的国内首条、世界第二条 8 英寸 IGBT 专业芯片生产线在湖南株洲全面建成,其生产的编号为 00001 的 IGBT 芯片被中国科技馆永久收藏。该生产线所生产的 IGBT 芯片工作电压可达数千伏,工作频率达 10kHz。这标志着我国大功率电力电子器件的研制和产业化取得重大突破,实现了我国 IGBT 技术从弱到强的转变,打破了国外垄断,表明我国在电力电子器件制造方面已跻身进入世界一流行列。

2. 电力电子电路的发展历史

和电力电子器件发展相适应,电力电子电路的发展经历了整流器时代、逆变器时代和变频器时代几个发展阶段。

20 世纪 60 ~ 70 年代,大功率工业用电由工频 (50Hz) 交流发电机提供,但是大约有 20% 的电能是以直流形式消费的,其中最典型的直流电能应用领域是电解 (有色金属和化工原料需要直流电解)、牵引 (电气机车、电传动的内燃机车、地铁机车、城市无轨电车等) 和直流传动 (轧钢、造纸等) 三大领域。与晶闸管的迅速发展相对应,大功率可控整流装置把工频交流电能高效转变为直流电能。当时国内掀起了各地大办硅整流器厂的热潮,目前全国大大小小的制造硅整流器的半导体厂家就是那时的产物。所以,当时进行的电能变换主要是整流变换,那个时代称为整流器时代。

20 世纪 70 年代开始,出现了世界范围的能源危机,交流电机变频调速因具有节能效果显著的特点而得到迅速发展。变频调速的关键技术是将直流电逆变为 0 ~ 100Hz 的交流电。在 70 ~ 80 年代,随着变频调速装置的普及,大功率逆变用晶闸管、大功率晶体管 (GTR) 和门极关断晶闸管 (GTO) 成为当时电力电子器件的主角,类似的应用还包括高压直流输电、静止式无功功率动态补偿等。这时的电力电子技术已经能够实现整流和逆变,电力电子电路的发展进入逆变器时代。但变频装置的工作频率还较低,主要局限在中低频范围内。

20 世纪 80 年代开始,随着大规模和超大规模集成电路技术的迅猛发展,为现代电力电子技术的发展奠定了基础。将集成电路的精细加工技术和高压大电流技术有机结合,出现了一批全新的全控型功率器件。新型电力电子器件的发展不仅为交流电机变频调速提供了较高的频率,使其性能更加完善可靠,而且使现代电子技术不断向高频化发展,为用电设备的高效节材节能,实现小型化和轻量化,实现机电一体化和智能化提供了重要的技术基础。电力电子电路的发展进入变频器时代。

0.3 电力电子技术的应用

在高度发达的今天,电能是国民经济和人们生活中非常重要的能源,而作为对电能进行变换和控制的电力电子装置也是无处不在,电力电子技术的应用领域已从传统的机械、石化、纺织、冶金、电力、铁路、航空、航海等领域,进一步扩展到汽车、通信、家用电器、医疗设备、照明等领域。对于电力电子技术的应用,主要可概括为以下几个方面:

1. 一般工业应用

工业领域是电力电子技术的传统应用领域。据不完全统计,在目前所有能源中,电能约占 40%,电能中 65% 以上是通过各种电机消耗的,而为各种电机供电的电源都是电力电子装置。此外,电化学、电解、电镀等所需要的整流电源,冶金工业中的中频、高频感应加热

电源、直流电弧炉电源等都是电力电子装置，图 0-3 ~ 图 0-5 是电力电子装置在一般工业领域中的应用。



图 0-3 电解电镀电源



图 0-4 冶金工业



图 0-5 变频器

2. 交通运输中的应用

电力电子技术在交通运输行业中的应用日趋广泛。电动汽车的驱动系统、充电系统等都是电力电子变换装置，电动汽车产业将带动电机驱动、逆变器、直流变换、充电器等电力电子产品的发展。图 0-6 是充电中的电动汽车。纯电动汽车与燃油汽车的一次能源利用率之比为 1:0.6，大力发展电动汽车可以提高能源利用率，减少温室气体和有害气体排放。纯电动汽车目前需要解决的主要问题是电池问题。纯电动汽车普遍使用的铅酸电池价格低，但能量密度小，体积大，一次充电的持续里程短，可充电次数少。因此，开发能量密度大、价格低、体积小、寿命长的电池是目前的研究热点，电池问题研究一旦突破，电动汽车很可能取代传统的燃油汽车。在我国，已相继出台多项鼓励电动汽车发展的政策，国家电网公司也出台了电动车充电站建设的相关政策和规划。

轨道交通也是电力电子装置应用的重要领域，图 0-7 为运行中的高速列车。从 2004 年国务院批准第一个《中长期铁路网规划》以来，我国规划建设的“四纵四横”高速铁路网以及三个城际客运系统等都已初具规模，各大中城市的城市轨道交通也得到了迅猛发展。电力电子技术是轨道交通的核心技术，高压大功率电力电子器件、大容量变换装置、电力牵引传动控制技术等电力电子相关技术都取得了关键性突破。

此外，飞机、船舶等驱动所需的不同性能电源也与电力电子技术密不可分。



图 0-6 电动汽车

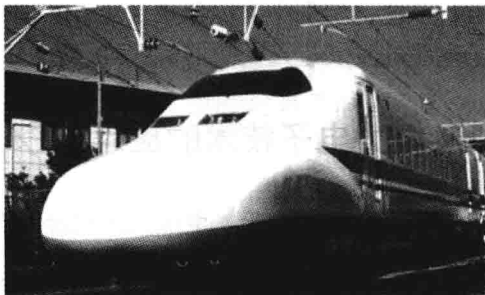


图 0-7 高速列车

3. 电力系统中的应用

电力电子技术在电力系统中的应用也非常广泛。我国提出的坚强智能电网发展规划，其核心技术之一即为电力电子技术。智能电网的目标是提高电力系统的安全性、可靠性，提高系统传输效率，提高系统对新能源的接纳能力，提高电网电能质量，这些目标的实现都需要

依赖电力电子装置。如柔性交流输电系统（FACTS），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提高电力系统电能质量具有重要意义，其中各种补偿装置，如晶闸管控制电抗器（TCR）、晶闸管投切电容器（TSC）、静止无功发生器（SVG）、有源电力滤波器（APF）等，都是电力电子装置。图 0-8 是未来电力系统组成示意图，未来电力系统将包括发电系统、用电系统、储能系统及电能质量管理系统，其中发电系统除了传统的水力发电站、火力发电站外，还有风力发电站、光伏发电站及分布式风力发电和分布式光伏发电等。在未来电力系统中，储能系统和电能质量管理系统将占有重要的地位。高压直流输电具有输电距离远、调节性能好、过电压水平低、线路损耗小的优点，高压直流输电及柔性直流输电技术都得到迅速发展，我国也已投建了多条特高压直流输电线路及柔性直流输电线路。图 0-9 是某 660kV 高压直流输电线路。传统的高压直流输电送电端和受电端的换流阀都采用晶闸管变流装置，柔性直流输电的换流阀采用的是全控型 IGBT 器件。此外，近年来随着风力发电、光伏发电的快速发展，直流配电技术也被提了出来，目前国内外已有大量专家学者开始进行直流配电网相关技术的研究，直流配电、用电也都离不开电力电子变换。

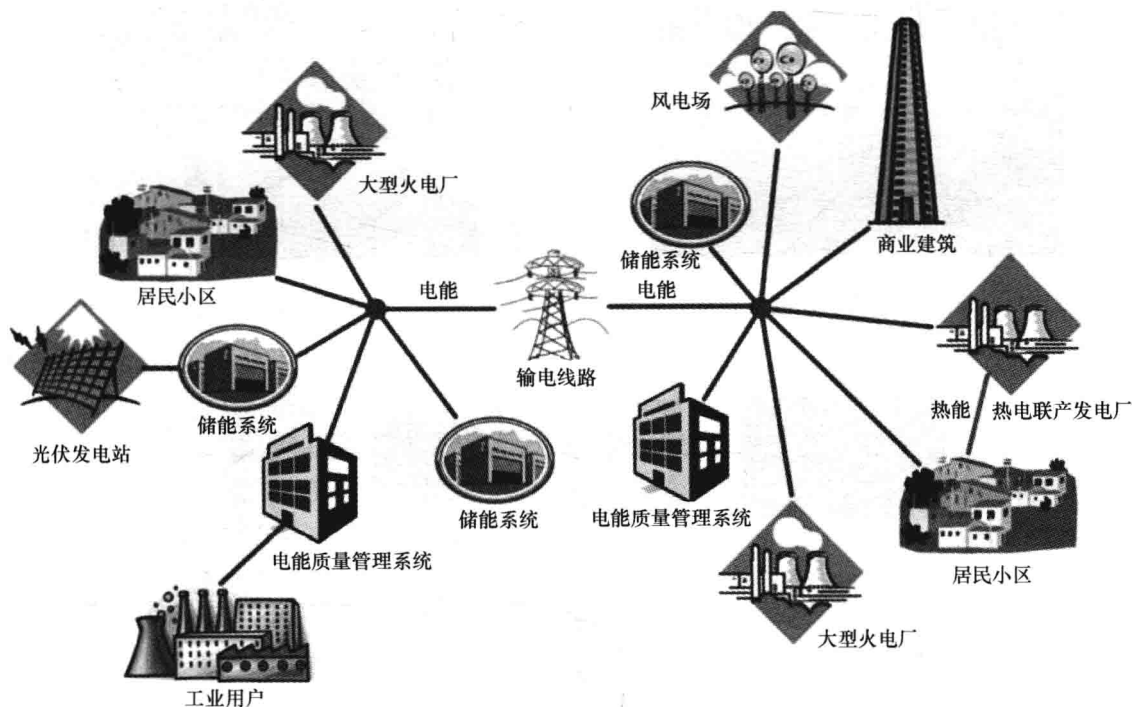


图 0-8 未来的电力系统

4. 新能源中的应用

近年来，世界范围的能源危机及环境污染问题，使得风力发电、太阳能发电、生物质发电、潮汐发电等各种可再生能源的应用越来越受到重视，如图 0-10、图 0-11 所示分别为海上风电场、光伏发电站。在我国，国家能源局及相关部门相继出台了各种鼓励和支持新能源开发的政策，尤其是分布式发电及微电网。这些新能源发电方式都需要电力电子技术参与调节和控制。同时，这些发电方式发出的电能并网和储能时也离不开电力电子装置。图 0-12



图 0-9 660kV 高压直流输电线路

为并网光伏发电系统,从图中可以看出,太阳能电池阵列输出的直流电需经过并网逆变器转换为交流电才能提供给用户或送入交流电网。

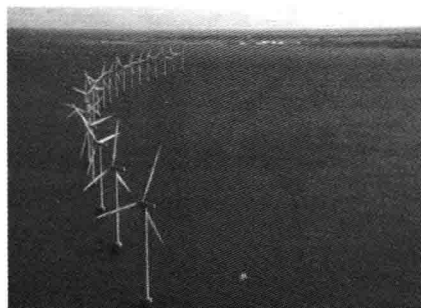


图 0-10 海上风电场



图 0-11 光伏发电站

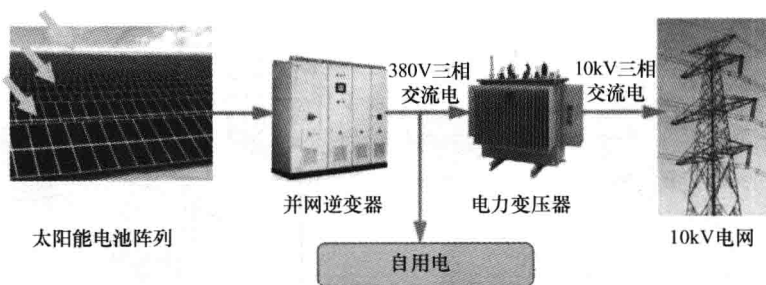


图 0-12 并网光伏发电系统

5. 电子装置与家用电器

各种电子装置都需要不同电压等级的直流电源供电,近年来高频开关电源因其具有体积小、重量轻、效率高的特点,已经取代了传统的线性稳压电源。

家用电器中,各种节能灯的镇流器、电视机、变频空调、变频冰箱等,都采用了电力电子技术。

总之,电力电子技术在国民经济各行各业和人们的日常生活中都必不可少。

0.4 电力电子技术的发展趋势

电力电子技术的发展趋势主要包括电力电子器件的发展趋势、电力电子电路的发展趋势和控制技术的发展趋势几个方面。

电力电子器件的发展方向主要是高频化、集成化、模块化和智能化。随着电力电子器件频率的提高,电力电子装置的性能得到大力改善,体积减小、重量降低、效率提高,所以电力电子器件的高电压、大电流和高频化是今后电力电子技术创新的主导方向。而硬件结构的标准模块是器件发展的必然趋势,集成化和模块化可以提高系统的可靠性和功率密度,降低成本,如采用半导体集成电路的加工方法将电力电子电路中的功率器件、驱动、控制和保护电路制作在同一硅片上将具有深远的意义,是电力电子技术应用领域最有希望的出路之一。

从电力电子电路的发展来看,电力电子主电路方面仍然是以单相和三相全桥的 AC-DC、AC-AC、DC-DC 和 DC-AC 四种变换结构为主。为了实现高压大容量逆变器,多电平、多重化复合逆变器结构取得了很大发展。为了提高电压等级而采用 IGBT 的直接串联或逆变器级联的方式也已经用于高压变频器和轻型直流输电装置中。伴随着有源滤波器和电能质量控制器而发展起来的 BTB (Back to Back) 的电路拓扑结构也得到了广泛的应用。

而电力电子控制技术的发展与脉冲宽度调制 (PWM) 控制技术是密不可分的,各种现代控制技术广泛应用于电力电子装置中。目前最流行的 PWM 技术可以分为开环和闭环控制、线性 and 非线性控制。随着现代控制理论、微电子技术、计算机技术的飞速发展,现代电力电子装置正在向高电压、大容量、高频化、易驱动、高功率密度和全数字化、智能控制方向发展。

0.5 电力电子电路的仿真

由于电力电子电路中的电力电子器件具有非线性特性,给电力电子电路讨论和分析带来了一定的困难,使电路计算的复杂程度增加。对于电力电子电路的分析,一般采用波形分析和分段线性化的处理方法。现代计算机仿真技术为电力电子电路和系统的分析提供了崭新的方法,使复杂的电力电子电路分析和设计变得更加容易和简单。

所谓仿真,指的是在计算机平台上虚拟实际的物理系统,用数学模型代替实际的物理器件和电路,从而实现对实际电路的工作过程的研究和讨论。随着数值算法的不断完善,已经出现了大量的通用数字仿真语言和软件。现代仿真软件已经模块化,更适合工程上的应用,各种仿真软件已经成为科研、设计及学生学习的必备工具和好助手。

电力电子电路的仿真软件有很多,目前最常用的主要有 PSPICE 软件和 MATLAB 的 Simulink 平台。通过仿真软件的使用,电力电子电路设计人员可以在进行电路实验前,先进行电路仿真分析,确定合理应用的主电路和控制方式,大大减小了电力电子装置开发和设计的工作量,缩短了开发和设计时间。所以,电力电子仿真软件的学习对于从事电力电子装置开发和应用的工程技术人员来说是非常重要的。

0.6 本教材主要内容

本教材内容共有7章,第1章对电力电子技术学习需要用到相关基础知识进行简单的复习,包括数学知识、电路知识等。第2章主要介绍常用电力电子器件的基本结构、工作原理和特性、主要技术参数和选用。介绍是从应用的角度出发,并对各种器件驱动和保护及串并联做了简单介绍。第3章~第6章介绍了4种基本变换电路(整流电路、斩波电路、交流调压和变频电路、无源逆变电路),重点介绍各种电路的基本组成结构、工作原理、波形分析和定量计算。第7章介绍了电力电子技术中的一些新技术,如PWM控制技术、软开关技术,以及电力电子技术的应用技术,如有源滤波技术、功率因数校正技术、高压直流输电技术和交流柔性输电技术、新能源发电技术等。为了便于读者更好地学习和理解,了解各种变换电路的应用场合,每章中重要的电路设计和计算都有例题,每章后有小结和思考题及习题。

电力电子技术是一门理论性和实践性都很强的课程,本教材在进行理论讲述时力求做到深入浅出、通俗易懂。内容选取上力求做到科学、先进、系统,便于读者自学。为了便于读者阅读相关英文文献,教材中对一些常用名词概念给出了英文翻译。

第1章 相关基础知识复习

1.1 非正弦周期函数的傅里叶级数分解

正弦函数 (Sinusoidal Function) 是一种常见而简单的周期函数, 电气工程领域中, 理想的三相交流电压 (Three-phase Alternating Voltage) 和电流 (Current) 均为正弦函数。而实际中, 经常会遇到非正弦的周期函数, 如周期为 T 的矩形波。对于这些非正弦的周期函数, 为了分析研究方便, 可以将其展开成由简单的周期函数如三角函数组成的级数。在电工领域中, 常常是将非正弦的周期函数展开为傅里叶级数 (Fourier Series)。

设 $f(x)$ 是周期为 2π 的周期函数, 即有 $f(x) = f(x + n \cdot 2\pi)$, 其中 n 为自然数。如果函数 $f(x)$ 在 $[-\pi, \pi]$ 区间有定义, 并且满足狄利克雷 (Dirichlet) 收敛条件, 即①在一个周期内函数连续或只有有限个第一类间断点; ②在一个周期内至多有有限个极值点, 则 $f(x)$ 可以展开为傅里叶级数, 且傅里叶级数收敛。

周期性函数 $f(x)$ 的傅里叶级数表达式为

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos nx + B_n \sin nx) \quad (1-1)$$

式中 $a_0, A_1, B_1, \dots$, ——函数 $f(x)$ 的傅里叶系数, 其值为

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx dx \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx dx \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

如果周期函数为 $f(t)$, 周期用时间 T 表示, 即 $f(t) = f(t + nT)$, 则傅里叶级数表达式为

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t) \quad (1-2)$$

式中 ω ——角频率, $\omega = 2\pi/T$;

$a_0, A_1, B_1, \dots$, ——函数 $f(t)$ 的傅里叶系数, 其值为

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega t dt \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \sin n\omega t dt \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

傅里叶级数是一个无穷三角级数, 其中第一项 a_0 称为周期函数的恒定分量, 或直流分