



高等院校信息与电子技术类规划教材
University Textbooks of Information Technology

电力电子技术

程汉湘 编著



21st CENTURY

省级精品课程教材



科学出版社
www.sciencep.com

TM1/163

2007

省级精品课程教材

高等院校信息与电子技术类规划教材



电力电子技术

程汉湘 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在内容编排上围绕电力电子技术的实际应用,力图反映国内外电力电子技术方面的最新内容。本书首先介绍了电力电子技术的最新发展概况,然后简单叙述了常用的电力电子器件的特性及电磁方面的基础知识。在此基础上,按照传统的习惯,逐一讲述了整流、逆变和 PWM 的内容。在自换流电路部分,书中将直流斩波、直流-交流及全控型的整流电路等内容融合在一起,以反映电路控制的共同特点。考虑到实际应用的需要,本书还专门对电力电子器件在无功补偿中的应用,以及在实际应用中的热传导、热辐射和在较高开关频率作用下磁性材料有关损耗的分析和设计进行了较为全面的阐述,还介绍了设计的基本原理、思路和方法。

无论是从具体内容,还是从章节的编排上,本书都体现了由浅入深、由特殊到一般的特点。本书吸收了国内外优秀教材的精华,适合作为高等院校信息与电子技术类等专业的教材,也可作为电气工程技术人员参考资料。书中的部分章节还可作为研究生的学习内容。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/程汉湘编著. —北京:科学出版社,2007

(高等院校信息与电子技术类规划教材)

ISBN 978-7-03-019123-6

I. 电… II. 程… III. 电力电子学-高等学校-教材 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 087540 号

责任编辑:赵卫江/责任校对:柏连海

责任印制:吕春珉/封面设计:飞天创益

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 8 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2007 年 8 月第一次印刷 印张:19 1/2

印数:1—3 000

字数:445 000

定价:26.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62138017(HI01)

前 言

本人经过多年教学实践,多次到国外对有关内容进行了系统了解和综合分析,并广泛阅读了电力电子技术方面的有关文献,最终才形成了本书。《电力电子技术》课程于2005年被评定为广东省精品课程。经过多年的建设,并进行了综合比较和认真分析,本书主要吸收了 Ned. Mohan、Tore M. Undeland、William P. Robbins 三位大师合编的 POWER ELECTRONICS(1995 年第二版)、德国亚深大学 Hans Christoph Skudelny 教授编写的 Stromrichter-Antriebe-Batterien(1997 年)和王兆安、黄俊教授主编的《电力电子技术》(2000 年第四版)的关于 DC-AC 部分内容。此外,本书还吸收了作者博士论文的有关基础内容。作为对应用的实例分析,本书还介绍了电力电子技术在无功补偿方面的应用,同时也叙述了直流电容设计的有关计算方法。

全书共分为 10 章。第 1 章介绍电力电子技术的发展,主要反映了电力电子器件的发展历史和发展概况,同时也介绍了电力电子技术的实际应用。作者力图使该部分的内容尽量反映最新的发展情况,从而在此部分参考了大量的权威论文。第 2 章概述了主要的电力电子器件,考虑到整书的篇幅不宜过大,该章只介绍了电力电子器件的特性曲线,至于器件内部 PN 结的构造及导通、关断机理可配合其他相关书籍进行了解。第 3 章是全书的理论基础内容,介绍了电路和磁路的基本概念,主要叙述电路器件的基本工作原理和相关计算公式,特别是对谐波的有关定义和分析在本章也做了说明,同时还特别强调了在有谐波存在的系统中,有功功率和无功功率的基本定义。为了循序渐进地对电力电子电路进行分析,第 4 章主要阐述了线频二极管全波整流器,通过单相和三相电力系统中的应用分析了二极管整流电路的工作原理,以及相应的工作波形,对存在变压器漏感的情况也进行了说明和公式推导。第 5 章对基于晶闸管的电网换流的整流电路进行了分析,主要描述了晶闸管整流电路在不同控制角下的输出波形,同时还介绍了大功率整流器的典型电路,并对分段线性和整流计算公式进行了说明和推导。第 6 章对自换流型电路的原理进行了详细分析,其中包括直流斩波电路、全控型开关器件的整流电路及直流-交流的逆变电路。该章内容的重点放在全控型器件的应用上,它也是现代电力电子技术应用的一个重要方面,同时也体现了现代电力电子技术发展的一个重要方向。考虑到脉宽调制技术(pulse-width modulation)在电力电子技术的实际产品中已得到广泛的使用,因此,本书专门设置了第 7 章对脉宽调制技术进行了全面的介绍,并采用国际规范术语进行了原理分析和说明。由于电力电子技术的应用是研究和设计工作者的最终目标,本书的第 8 章对电力系统中静止型补偿器的应用进行了说明和分析,主要是对 SVC 和 StatCom 的工作情况和控制进行了叙述,该章的最后还对直流电容的设计原理进行了详细分析,有些电路模型和计算公式都是作者在长期研究工作中总结出来的。该章主要是通过应用实例

让读者对电力电子系统的控制有个感性认识,并对今后的研究工作能有一定的启发作用。电力电子技术的应用不仅仅是对器件本身的认识,同时它也包括了其相关知识的综合应用。例如,在 PWM 应用过程中,具有铁心物质的元器件的损耗如何? 电力电子器件在工作中的发热问题怎样处理? 这些都是在实际应用中需解决的问题。因此,在本书的第 9 章对电力电子器件的温度控制和散热技术进行理论说明和分析,并给出了设计步骤。第 10 章针对变压器和电感的物理模型,介绍了铁心材料的铁损,以及减少铁损的设计方法等,同时还给出了设计范例程。

本书在内容的总体排序上,主要是以电力电子器件的不可控型→半控型→全控型的思路进行编排的,并没有完全采用由单相电路到三相电路,最后再考虑变压器漏感的传统方式,这应该说是本书的一大特点。此外,无论是哪一章的内容,都包含了它的新颖性,不存在哪一章简单哪一章难的问题,每一章都有各自的特点和难点。在学时的分配上,可根据总学时的要求安排具体讲授的内容。一般来讲,前七章是本书的基本内容,对本科生而言是必须掌握的。40 个学时基本上可完成这些内容的讲授,其中,前两章可用 6 个学时,第 3 章一般需要约 6 个学时,第 4 章是后续两章的基础,大约需要 8~10 个学时,第 5 章可安排 6 个学时,第 6 章不少于 8 个学时,而第 7 章应保证有 6 个学时以上,若学时不够时,可根据实际情况对前七章的内容进行适当增减,或对部分章节的学时进行适当调整。一般来讲,总学时为 50 个学时最佳。后三章是扩展内容,也可作为研究生阶段的学习内容,它有利于研究生或工程研究人员掌握设计和应用的具体要求,并扩大他们的思路。该部分的教学大约需要 20 个学时。

本书全部内容均由作者本人编写,并绘制和修改了大部分图形。在本书的编写过程中,得到了许多其他同行的大力支持,主要有尹先锋、孙丹婷、王玲、罗其峰等人,其中尹先锋帮助整理和校对了书中第 7~10 章的内容,并对全书的符号统一进行了全面校核;王玲负责整理和校对了第 1~3 章的内容;孙丹婷负责整理和校对了第 4~6 章的内容;罗其峰对全书的部分图形进行了卓有成效的加工。此外,张森、曾岳南两位教授和周永旺老师对全书的内容进行了全面的审核,并提出了许多建设性的建议。作者也吸收了他们提出的改进思想。在此,作者对他(她)们所做出的努力表示由衷的感谢!

在本书出版的过程中一直得到了科学出版社的积极支持和帮助,特别是得到了赵卫江同志的积极配合,作者对他(她)们的辛勤劳动也表示真诚的谢意!

本书配有电子教案,读者可以直接与作者联系: chx@gdut.edu.cn。

目 录

第 1 章 电力电子技术的发展	1
第 2 章 电力电子器件概述	9
2.1 简介	9
2.2 二极管	9
2.3 晶闸管	10
2.4 可控开关的理想特性	13
2.5 双极结型晶体管和达林顿管	15
2.6 电力场效应晶体管	17
2.7 门极可关断晶闸管	18
2.8 绝缘栅双极晶体管	19
2.9 MOS 控制晶闸管	19
2.10 可控开关的比较	20
2.11 驱动和缓冲电路	21
2.12 半导体功率器件的选择	22
小结	22
习题	23
第 3 章 电路和磁路的基本概念	24
3.1 电路	25
3.1.1 正弦电压、电流似稳态过程的功率定义	25
3.1.2 正弦电压的似稳态过程	26
3.1.3 非正弦似稳态过程	28
3.1.4 电压换向的整流电路	31
3.1.5 稳态的定义	33
3.1.6 平均功率和电流有效值	33
3.1.7 稳态时交流正弦电压、电流波形	34
3.1.8 稳态下的非正弦波形	37
3.1.9 电感和电容的工作特性	41
3.1.10 稳态时的电感平均电压 U_L 和电容平均电流 I_C	42
3.2 磁路	43
3.2.1 安培定律	44
3.2.2 右手螺旋法则	44

3.2.3 磁通密度或磁感应强度 B	45
3.2.4 磁场和磁路	45
3.2.5 铁磁物质的磁化曲线	47
3.2.6 磁路的基本定律	48
3.2.7 恒定磁通磁路的计算	49
3.2.8 铁心线圈	51
小结	53
习题	54
第4章 二极管整流电路	55
4.1 简介	55
4.2 整流电路的基本概念	56
4.2.1 纯电阻负载	56
4.2.2 感性负载	56
4.2.3 含直流电压源的负载	58
4.3 单相桥式二极管整流电路	59
4.3.1 $L_s=0$ 的理想电路	59
4.3.2 L_s 对电流换流的影响	62
4.3.3 直流侧接恒定电压源的情况 $u_d(t)=U_d$	66
4.3.4 实际的二极管桥式整流电路	69
4.4 单相双重电压整流电路	74
4.5 单相整流电路对三相四线制系统的中线电流的影响	75
4.6 三相全桥整流电路	77
4.6.1 $L_s=0$ 的理想电路	77
4.6.2 L_s 对换流过程的影响	80
4.6.3 实际三相二极管桥式整流电路	84
4.7 单相整流电路与三相整流电路的比较	86
4.8 开通时的瞬间冲击电流和过电压	86
4.9 电流谐波和低功率因数的影响和改善措施	86
小结	87
习题	88
附录	91
第5章 基于晶闸管的电网换流型整流电路	96
5.1 单相桥式全控整流电路	96
5.1.1 单相桥式全控整流电路的结构及理想化分析	96
5.1.2 单相桥式全控整流电路的换流	98
5.1.3 单相桥式全控整流电路的工作原理分析	102
5.1.4 单相桥式全控整流电路的间断运行问题	103
5.1.5 不可控两脉冲整流电路	104

5.1.6 半控整流电路	107
5.1.7 半控整流电路的正常工作特性分析	108
5.2 三相整流电路	110
5.2.1 理想工作状态	111
5.2.2 一般条件下的整流	113
5.2.3 特殊运行状态	115
5.3 多脉冲整流电路	116
5.3.1 三相整流电路的串联	116
5.3.2 两整流电路的并联运行	118
5.4 其他电路结构	122
5.4.1 全波整流结构	123
5.4.2 半控整流结构	123
5.4.3 具有续流支路的整流结构	123
5.5 网络换流整流电路的应用	124
5.5.1 双向整流电路	124
5.5.2 交-交变频器	125
5.5.3 高压直流输电系统	128
小结	131
习题	131
第6章 DC-DC 和 DC-AC 变换器	133
6.1 直流斩波电路(DC-DC)	133
6.1.1 自换流的原理	133
6.1.2 直流输出电压的调整	133
6.1.3 升压斩波电路	135
6.1.4 斩波电路的吸收电路	136
6.1.5 斩波电路的控制	137
6.1.6 组合斩波电路	138
6.2 自换流整流电路	140
6.2.1 电流源型自换流整流电路	140
6.2.2 自换流整流电路的工作原理	140
6.2.3 整流电路的吸收电路	142
6.3 逆变电路(DC-AC)	142
6.3.1 换流方式	144
6.3.2 电压型逆变电路	147
6.3.3 电流型逆变电路	153
6.3.4 多重逆变电路和多电平逆变电路	160
小结	165
习题	166

第7章 开关型直流/交流逆变器	167
7.1 引言	167
7.2 开关型逆变器的基本概念	168
7.2.1 脉宽调制开关模式	170
7.2.2 方波输出方式	176
7.3 单相逆变器	177
7.3.1 单相半桥逆变器	177
7.3.2 单相全桥逆变器	178
7.3.3 推挽式逆变器	188
7.3.4 单相逆变器的开关利用率	189
7.4 三相逆变器	190
7.4.1 三相电压型逆变器的 PWM 控制方式	191
7.4.2 三相逆变器的方波工作方式	194
7.4.3 三相逆变器中开关利用率	195
7.4.4 三相逆变器输出电压的纹波	195
7.4.5 直流侧电流 i_d	197
7.4.6 三相逆变器中开关元件的导通	198
7.5 PWM 逆变器的空白时间对电压的影响	200
7.6 逆变器的其他开关模式	203
7.6.1 方波脉冲开关控制方法	203
7.6.2 可编程谐波消除模式	203
7.6.3 电流调节模式(电流模式)	205
7.6.4 调制方式结合变压器连接的谐波中和开关模式	206
7.7 整流方式的工作原理	206
小结	208
习题	209
第8章 电力电子技术在无功补偿装置中的应用	211
8.1 静止无功补偿的基本概念	211
8.2 SVC 的基本连接方式及控制说明	212
8.3 静止无功补偿器 SVC 的补偿原理	214
8.3.1 SVC 的电压调整作用	215
8.3.2 SVC 对提高电压稳定性的影响	217
8.4 StatCom 的工作原理及分析	217
8.4.1 控制系统及无功补偿数学模型的推导	218
8.4.2 StatCom 的运行性能与系统参数之间的静态关系	220
8.5 StatCom 和 SVC 的传输特性比较	224
8.6 控制系统的仿真分析	226
8.6.1 变流器的控制	226

8.6.2 两电平控制系统的仿真波形分析	229
8.6.3 三电平控制系统的仿真分析	229
8.7 StatCom 直流侧电容参数的选择	232
8.7.1 逆变器及换流数学模型的建立	232
8.7.2 电容参数的选择	240
小结	245
习题	245
第9章 器件的温度控制和散热	247
9.1 半导体器件的升温控制	247
9.2 热量的传导	248
9.2.1 热阻	248
9.2.2 暂态热阻抗	250
9.3 散热片	252
9.4 热量的辐射和对流	253
9.4.1 根据热量辐射定义的热阻	254
9.4.2 根据热量对流定义的热阻	254
9.4.3 散热片和周围环境之间的热量计算问题	255
小结	256
习题	257
第10章 器件的磁设计	258
10.1 磁性材料及磁芯	258
10.1.1 用作磁芯的磁性材料	258
10.1.2 磁滞损耗	259
10.1.3 趋肤效应的限制	261
10.1.4 叠片磁芯的涡流损耗	262
10.1.5 磁芯的尺寸和形状设计	263
10.2 铜线绕组	264
10.2.1 铜线填充系数	264
10.2.2 铜损	265
10.2.3 铜线导体的趋肤效应	265
10.3 发热问题	266
10.4 具体电感的设计	268
10.4.1 电感的参数	268
10.4.2 电感的特性	269
10.4.3 电感值 L	270
10.4.4 电感的温度	270
10.4.5 电感过载时的热点温度	271
10.5 电感设计程序	271

10.5.1 电感设计基础:电感的储能	271
10.5.2 电感设计例程	272
10.5.3 尝试性的电感设计程序	276
10.5.4 举例说明电感的设计	276
10.6 变压器设计的具体分析	279
10.6.1 变压器的参数	279
10.6.2 变压器的电气特性	279
10.6.3 变压器的温度	281
10.6.4 过载时的变压器温度	282
10.7 涡流	282
10.7.1 邻近效应	282
10.7.2 最佳导线尺寸和最小铜损	284
10.7.3 电感线圈损耗(铜损)的减少	284
10.7.4 变压器的绕组分段对减少涡流损耗所起的作用	285
10.7.5 绕线的优化	286
10.8 变压器的漏感	288
10.9 变压器的设计程序	289
10.9.1 变压器的设计基础:额定功率	290
10.9.2 变压器单向设计例程	290
10.9.3 举例说明变压器设计	294
10.10 电感和变压器的比较	298
小结	299
习题	299

第 1 章 电力电子技术的发展

1. 电力电子技术的含义

电是一种难以置信的能量形式。它是能量有效利用的一种方式,但更重要的是,它是一种易于转换的能量形式。如转换为任意频率的交流电、直流电、电磁辐射、激光束、任意形式和大小的脉冲、电弧以及电磁能等。电几乎能够服务于人们生活中的各个方面,熟知的典型应用有:信息技术、医疗电子、无线电、电视、扩音器、录音机、打印机、激光、机器人、自动生产线的驱动、混合型电力机车的拖动、空调、冰箱、冷柜以及其他方面等。所有这些技术如果没有电的话,人们的生活将会出现无法估量的混乱状态。甚至可以这样说,离开了电,今天社会的现代化设施将无法运转,所有的生活将在瞬间进入原始状态,当然也不可能有今天电力电子技术的发展,以及由此所产生的各种变化多样的电能形式。

电力电子类似于微电子技术,都是基于硅材料应用科学的一个分支,采用的是硅分子渗透技术。电力电子技术可以说是微电子技术发展的继续,它正在经历一场革命,同时它还处于它的青春期。即便如此,它已经在电能的发电、传输、配电,以及终端用户各方面正起着极其重要的作用,不难想像,将来也同样会发挥重要作用,而且,将会越来越成熟。目前,电力电子的传送功率等级从几瓦到数千兆瓦,已有各种相应产品或工业应用装置面世。

电力电子技术的市场基本上取决于它的成本、可靠性,以及电力应用中新技术的有效性。许多方面应用的推广都在期待它的成本降低。例如,若成本能够变得更低的话,它将能够大量进入家用变频空调的节能应用之中;高压直流输电(HVDC)、灵活交流输电系统(FACTS),以及电能质量控制装置等,都将需要大量的电力电子器件,只要它的成本能够降到合适的程度,电力电子技术的发展将会得到极大的推动。所以,完全有理由认为,电力电子器件的成本将会继续降低。

电力电子成本的核心是功率器件的特性,特别是它的导通损耗、开关损耗和开关速度。如果它的导通损耗为零,开关速度无穷大,那么,电力电子器件本身和组成变换器所需其他附属电路的体积将会大大缩小,那时将会出现一个全新变换器的概念,这种变换器的成本将会下降一个数量级。实际上,这种理想情况是不可能实现的,这中间还有大量的研究有待于科学工作者去拓展,他们的工作将会使电力电子技术的发展越来越接近理想条件。

“电力电子集成”是电力电子技术发展的一个新阶段,代表了一种一体化的概念,它对于降低成本、损耗、体积和重量都有着积极的意义,同时还能大大减少工程技术人员在应用电力电子技术过程中的设计和制作费用,更为重要的是,这一概念将器件驱动和器件本身“融合”在一起,这样在形成变换器时就能够进一步减小装置本身的体积,并将极大地增强整体的可靠性。

电力电子技术代表了新型电能控制发展的基本趋势和革命性的概念,可以预计,新一代基于电力电子技术的变换器将会变得更便宜,损耗更低,体积更小,重量也会更轻。

在最近 40 年里,电力电子技术得到了迅速的发展,其应用领域已扩大到工业、商业、民用、军事以及环境保护中。实际上,电力电子的发展历史比现在所意识到的时期还要长。为了更好地了解电力电子的历史以及目前电力电子工程师所从事的研究,本书采取以下定义:

电力电子技术是根据电力电子器件的特性,采用一种有效的静态变换和控制方法,将一种电能形式转换为另一种电能形式的技术。该技术包括电气和电子器件的有效使用、线性与非线性电路的理论分析、控制理论的应用,以及成熟设计方法的使用。要保证电力电子技术的正确应用,还应配合使用先进的分析工具,研究其控制系统的性能,使之达到体积小、重量轻、损耗低、效果好的目的,并能实现高效、可靠、实用的控制。

所谓高可靠性是指不使用那些质量不高、性能不稳定的时限很短的器件;高实用性是指避免使用需要周期性维护或替换的旋转器件,尤其是当这些器件在功率变换电路中作为关键部件接通或者中断电流时要特别注意。这就是在定义电力电子技术时使用静态这个词的原因。

2. 电力电子设备的特性

在提及电力电子设备时,一般都要提到电力电子控制器、静止功率变换器、功率调节器等,它们几乎都包含“功率”或“电力”这个词,这意味着这些装置主要用于处理电气意义上的功率。理想情况下,所有的负载都需要应用这些功能。

电力电子设备控制交流或直流电源与一个或者多个需要此交流或直流电源的负载之间的功率传输。功率的传输由接在变换器终端的电阻组成的一个或多个负载的需要来决定。

通常所用的电能有直流和交流之分。因此,电能的转换形式从传统上讲可以分为四大类:交流变直流(AC-DC)、直流变交流(DC-AC)、交流变交流(AC-AC)和直流变直流(DC-DC)。以下将简单描述一下它们的功能。

(1) AC-DC 变换

把交流电压变换成固定或可调的直流电压,即为 AC-DC 变换,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。

(2) DC-AC 变换

把直流电变换成频率、电压固定或可调的交流电,称为 DC-AC 变换。这是与整流相反的变换,又称为逆变。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(CVCF)电源或不间断供电电源(UPS),也可以是变频(这种变换器也称为变频器),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。

(3) AC-AC 变换

把固定或变化的交流频率、电压变换成可调或固定的交流频率、电压,称为 AC-AC 变换。这种变换电路通常称为变频器,也称为周波变换器(cycloconverter),主要用于交

流电动机的变频调速。

(4) DC-DC 变换

把固定或变化的直流电压变换成可调或恒定的直流电压,称为 DC-DC 变换,也称为直流斩波。此种变换器被称为斩波器(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、矿车等电气机车上所用的直流电动机的牵引传动以及计算机、通信和各类仪器仪表的电源等。

3. 电力电子技术的发展史

电力电子技术之所以发展迅速,和全球的能源与环境问题息息相关。两百年以前,也就是在工业文明出现以前,人们主要依靠手工劳动。生活是简单而且单调的,周围环境也是相当清洁的。从大约两个世纪以前的工业革命开始,全球的能源消费迅速增加,这大大提高了人类的生活标准,特别是在世界工业化国家中。实际上,每人的能源消费已经是一个国家经济繁荣程度的标准。美国在全球的生活水平最高,它只占全球人口的 5%,却消费了世界 25% 的能源;日本 2% 的人口消费了总能源的 5%;印度和中国占有世界 38% 的人口,消费的能源却仅仅是美国的十分之一。

在全球范围内,87% 的总能源来自于化石燃料(煤,石油,天然气),6% 来自于核装置,其余的 7% 来自于可再生资源(主要是水能和风能)。美国 42% 的能源来自于石油,这些石油主要消费在汽车运输业。目前,美国 37% 的总能源是以电的形式产生,其中 55% 的电来自煤,20% 来自核装置。中国和印度大部分发电来自于煤(分别是 74% 和 71%)。

但是,世界上的化石燃料和原子能是有限的。世界上储藏量最多的是煤,接着分别是石油,天然气和铀燃料。天然的铀燃料预计仅仅能持续 50 年。当然,增殖反应堆可以产生更多的核燃料。尽管这样,石油预计仅仅可以用 100 多年,天然气可以用 150 年,煤可以用 200 多年。

目前能源消耗的增加所带来的环境污染和安全问题正成为社会的主要问题。燃烧化石燃料会产生很多气体,例如二氧化碳、二氧化硫、X 氧化氮、碳化氢、臭氧及一氧化碳,这些气体产生了环境污染问题,例如全球变暖(温室效应)、酸雨以及城市污染。另外,煤还会产生很多飞尘。全球变暖会使得两极的冰川融化,洪水会淹没世界上地势较低的地方。酸雨主要是由煤燃烧产生的二氧化碳、氮氧化合物产生的。世界气候的变化对农业和植被产生不利的影响。环境问题仍然是一个全球问题。

利用电力电子技术可以有效地节约能源,如荧光灯与白炽灯相比可以提高 2~3 倍的能源利用率,利用高频的电力电子镇流器可以使荧光灯的效率再提高 20%。值得一提的是,节约能源不仅可以带来经济效益,而且由于减少了发射物的含量,也就减少了环境污染。从而,电力电子技术成为研究热点。

电力电子器件的发展对电力电子技术的发展起着决定性的作用,因此,电力电子技术的发展是以电力电子器件的发展为基础的。电力电子技术的发展史,如图 1.1 所示。

一般认为,电力电子技术的开始是以 1957 年第一个晶闸管的诞生为标志的。但在晶闸管出现之前,电力电子技术就已经用于电力变换了,主要应用的是几种电真空器件。1876 年出现了硒整流器。1904 年出现了电子管,它能在真空中对电子流进行控制,并应

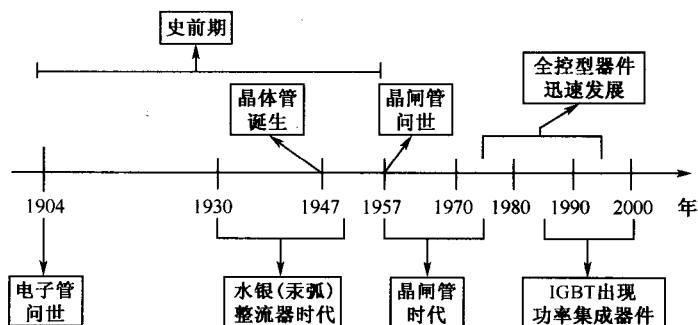


图 1.1 电力电子技术的发展史

用于通信和无线电,从而开创了电力电子技术的先河。1911年出现了金属封装水银整流器,它把水银封装于管内,利用对其蒸气的电弧可对大电流进行有效控制,其性能与晶闸管类似。此外还有闸流管,它利用弧光放电原理做成具有控制栅极的热阴极离子管,亦属于电真空器件,其栅极控制作用也和晶闸管很相似。20世纪30~50年代,是水银整流器发展迅速并广泛应用的时期,它广泛应用于电化学工业、电气铁道直流变电以及轧钢用直流电动机的传动。因此,晶闸管出现前的时期称为电力电子技术的史前期。

1947年美国著名的贝尔实验室发明了晶体管,引发了电子技术的一场革命。20世纪50年代初,1953年出现了锗功率二极管,最先用于电力领域的半导体器件是1954年出现的硅二极管,普通的半导体整流器开始使用。1957年诞生了晶闸管,一方面由于其变换能力的突破,另一方面实现了弱电对以晶闸管为核心的强电变换电路的控制,使之很快取代了水银整流器和旋转变流机组,进而使电力电子技术进入了功率领域。变流装置由旋转方式变为静止方式,并具有提高效率、缩小体积、减轻重量、延长寿命、消除噪音、便于维修等优点。因此,其优越的电气性能和控制性能,在工业上引起了一场技术革命。工业技术的迅速发展也有力地推动了晶闸管的进步。电力电子技术的概念和基础就是由于晶闸管及晶闸管变流技术的发展而确立的。同时也确立了电力电子学科的地位,晶闸管为电力电子学科的建立立下了汗马功劳。即使是在今天,在低频应用中,晶闸管仍然是处理高功率所不可缺少的器件,如高压直流输电(HVDC)中的换流器、静止相控无功补偿器、周波变流器、负载换流逆变器。资料表明,晶闸管在高功率处理方面的统治地位在近期之内不会改变。

电力电子技术的进步主要是由于半导体器件的发展。除了器件的发展之外,变换器拓扑结构、PWM技术和分析以及仿真方法、控制和估算技术、计算机、数字信号处理、集成电路芯片、硬件和软件控制等的出现也促进了电力电子技术的发展。在以后的20年内,随着晶闸管特性的不断提高,晶闸管已经有从低电压、小电流到高电压、大电流的系列产品。同时研制出一系列晶闸管的派生器件,如快速晶闸管(FST)、逆导晶闸管(RCT)、双向晶闸管(TRIAC)、光控晶闸管(LTT)等器件,大大推动了各种电力变换器在冶金、电化学、电力工业、交通及矿山等行业中的应用,促进了工业技术的进步,形成了以晶闸管为核心的第一代电力电子器件,这一阶段也称为传统电力电子技术阶段。

晶闸管通过对门极的控制可以使其导通,而不能使其关断,因此属于半控型器件。对晶闸管电路的控制方式主要是相位控制方式。即使在电流、电压这两个方面,晶闸管系列器件仍然有一定的发展余地,但因下述原因阻碍了它们的继续发展:一是由于它是半控型器件,要想关断它必须用强迫换相电路,结果使得电路复杂、体积增大、重量增加、效率较低以及可靠性下降;二是由于器件的开关频率难以提高,一般低于 400Hz,大大限制了它的应用范围;三是由于相位运行方式使电网及负载上产生严重的谐波,不但电路功率因数降低,而且对电网产生“公害”。随着工业生产的发展,迫切需要新的器件和变流技术的出现,以便改进或取代传统的电力电子技术。

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(GTR)、电力场效应晶体管(power MOSFET)为代表的第二代自关断全控型器件迅速发展。全控型器件的特点是,通过对门极(基极、栅极)的控制既可以使其开通,又可以使其关断。另外,这些器件的开关速度普遍高于晶闸管,可以用于开关频率很高的电路。全控型器件优越的特性使其逐渐取代了变流装置中的晶闸管,把电力电子技术推进到一个新的发展阶段。

为适用于多功率电压反馈和电流反馈(具有反向模块)的变换装置,电力电子器件的功率等级(大部分接近 6000V, 6000A)不断增大。在高功率装置的应用中,开关损耗大的装置,开关频率被限制在一个小的范围内(几百赫兹)。使用 GTO 的变换器必须使用很高的缓冲驱动。MOSFET,不像其他的大多数器件,它是一个多数载流子器件。在高压装置中,它的导通压降大,但是开关损耗很低。因此广泛应用于低压高频电路中,如开关电源(SMPS)及其他依靠电池操作的电力电子装置。最近,出现了导通压降较低的沟槽栅结构的器件。

20 世纪 70 年代,大型达林顿双极型晶体管(BJT)的出现给电力电子学带来很大发展。但是最近,这些装置全部被电力场效应晶体管(低压范围内)以及绝缘栅双极型晶体管(IGBT)所代替。20 世纪 80 年代,IGBT 的发明在半导体器件的发展史上是一个重要的里程碑,是第三代复合型场控半导体器件的代表。另外还有静电感应式晶体管(SIT)、静电感应式晶闸管(SITH)、MOS 晶闸管(MCT)等。这些器件不仅有很高的开关频率,一般为几十到几百千赫兹,而且有更高的耐压性,电流容量大,可以构成大功率、高频的电力电子电路。

IGBT 的开关频率比 BJT 要高很多,在正向偏置安全工作区内可以不需要缓冲器。这种装置的额定功率(当前为 3500V, 1200A)和电气特性在不断地提高。IGBT 智能模块(IPM)已经应用在内置门极驱动器中,可以控制和保护几百千瓦的额定功率。具有沟槽栅技术的现代(第四代)IGBT 模块比二极管的导通压降稍高,并且具有较快的开关速度。

MOS 控制晶闸管(MCT)是另一种 MOS 门极驱动装置,1992 年在商业上使用。最新的 MCT(P 型 1200V, 500A),却受到 RBSOA(反向偏置安全工作区)的限制,而且开关频率也比 IGBT 模块低得多。MCT 模块应用到软开关变流器中时,并没有受到这种限制。

对普通 GTO 的结构、门极驱动、封装、集成的反并联二极管做出重大改进,并且改变关断过程,极大地改善了 GTO 的性能,从而产生一种新型元件——集成门极换流晶闸管(IGCT),本质上它是一个硬开关特性的 GTO,最近被应用到商业中(当前为 4500V,

3000A)。它比 GTO 有更多优势,较低的导通压降,较快的开关速度,带有旁路二极管的单片集成电路,不用缓冲器操作,还很容易实现连续运行。

近期发展起来的新型大功率半导体器件 3.3kV、4.5kV、6.5kV 绝缘栅双极晶体管(IGBT)和 4.5kV、5.5kV 电压等级的集成门极换流晶闸管(IGCT)改进了变换电路的设计,在三电平拓扑结构中广泛采用,迅速增加了 PWM 型可控电压源变换器所占的市场份额。同时,这些变换器的容量在 0.5~10MVA 之间,与普通的基于晶闸管的三相逆变器 and 交-交变频电路相比,价格上会更具竞争力。PWM 可控 VCS(电压源型变换器)的优势在于,可以降低线路中的谐波含量,提高功率因数,实质上减小了滤波性能,提高了系统的效率,从而降低在冶炼、船舶、采矿、电解和高压直流输电等行业中的能耗。尽管近 5 年来,GTO 的价格下降,但是在牵引和工业领域中,以 IGCT 或 IGBT 作为开关器件的 PWM 型 VSC,正在迅速取代普通 GTO 作为开关器件的 VSC 和电流源型变换器(CSC)。

相控晶闸管、快速晶闸管、门极可关断晶闸管(GTO)、集成门极换流晶闸管(IGCT)都有擎柱结构,其中载流子从阳极和阴极注入。普通晶闸管已经发展得非常成熟,但它不能自行关断,基本上不会有什么大的创新。近年来,通过对现有技术的改进,出现了双向控制晶闸管(bidirectional control thyristor, BCT)。这种器件是由在一个晶片上的两个反并联晶闸管组成,两个门极相互独立,这就极大地保留大功率变换器的钳位、内部结构和技术。带有集成过电压保护的光控晶闸管(light triggered thyristor)的发展,极大地简化了门极控制,提高了晶闸管应用在大功率、高电压中(如高压直流输电)的可靠性。

尽管在很长的一段时期内功率半导体器件的主要元素是硅,但是其他的元素,如碳化硅(SiC)和石墨,正在显示出在将来应用中的重要地位。由于碳化硅所具有的特殊的物理性质,如功率范围大、击穿场强高、导热性高、饱和电子漂移速率高、对化学反应或高气压呈高惰性、辐射电阻高等特点,可以应用在高压、高温、高频及低导通压降场合。所以,碳化硅将会成为未来功率半导体器件的主要材料。通过对碳化硅器件电气特性和热性能的计算测量,说明这种材料可以极大地降低通态和开关损耗,并且在结温上升到 600℃时也能够运行。已经做出碳化硅材料的肖特基和结势垒肖特基(JBS)二极管,其测试阻断电压达到 2000V。而 PIN 二极管可以达到 5kV。因为即使在很高的 di/dt 和很高的换相电压时,反向恢复电流也极低,所以在硬开关 IGBT 和 MOSFET 电路上,碳化硅二极管可以大大减少二极管的关断损耗和开通损耗。碳化硅器件有望在 21 世纪初期得以商业化。可以预见,硅材料功率器件将退出市场。但是,碳化硅晶片的密度是大功率器件的限制因素,对这些材料的处理是非常复杂的。目前,利用碳化硅反向二极管对 IGBT 模块进行改进,是一个重要研究课题。

新型电力电子器件呈现的诸多优势,使得电力电子技术发生了突变,进入了现代电力电子技术阶段。现代电力电子技术的主要特点表现在以下几方面。

(1) 全控化

全控化是由半控型普通晶闸管发展到各类自关断器件,是电力电子器件在功能上的重大突破。自关断器件实现了全控化,取消了传统电力电子器件的复杂换相电路,使电路大大简化。