



普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12.5" GUIHUA JIAOCAI

电力电子技术

杨卫国 肖冬 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材

电力电子技术

杨卫国 肖 冬 编著

北 京
冶金工业出版社
2011

内 容 简 介

本书系统地、全面地介绍了各种常用的电力电子器件、直流-直流变换电路、交流-直流变换电路(含有源逆变电路)、直流-交流变换电路、交流-交流变换电路、典型谐振软开关电路等。本书覆盖了电力电子学的主要内容,着重强调了电力电子学的基本理论和基本分析方法。本书力求概念清晰、结构严谨、深入浅出、内容新颖、理论联系实际、务求实用。

本书可作为普通高等院校自动化专业、电气工程及其自动化专业和相关专业的本科教材,也可供具有一定理论基础和实际经验的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/杨卫国,肖冬编著. —北京:冶金工业出版社,
2011. 10

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-5773-0

I. ①电… II. ①杨… ②肖… 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(2011)第 205693 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcb@cnmip.com.cn

责任编辑 卢 敏 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-5773-0

北京鑫正大印刷有限公司印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2011 年 10 月第 1 版, 2011 年 10 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 16 印张; 382 千字; 242 页

36.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010)64027932 投稿邮箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100010) 电话: (010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

电力电子技术是以电力为对象的电子技术，是利用电力电子器件进行电能转换的技术，是一门新兴的高新技术学科，近年来发展十分迅速，已成为信息产业和传统产业之间的重要桥梁，是当代高新技术的重要内容之一，成为支持多项高新技术发展的基础技术。

电力电子技术是本专业的基础平台课程，是电力电子装置、开关电源技术、自动控制系统、交流变频调速系统、柔性输电系统等课程的先行课程，同时，也是电气信息类其他相关专业的重要基础课之一。通过本课程的学习，学生可以了解电力电子学科领域的发展方向，理解并掌握电力电子学领域的相关基础知识，培养分析问题、解决问题的能力。学完本课程后，学生可以了解主要电力电子器件的特性和主要电力电子电路的基本性能，掌握电力电子电路的基本分析方法和基本理论。

本书是面向电气工程及其自动化专业和自动化专业的本科教材。本书对教学内容及所编章节顺序进行了合理规划与调整，覆盖了电力电子学的主要内容，着重强调了电力电子学的基本理论和基本分析方法。本书力求概念清晰、结构严谨、深入浅出、内容新颖、理论联系实际、务求实用。在本教材的第1章中，介绍了各种常用的电力电子器件，包括功率二极管、晶闸管及其派生器件、门极可关断晶闸管（GTO）、功率晶体管（GTR）、功率场效应晶体管（Power MOSFET）、绝缘栅双极型晶体管（IGBT）和其他新型电力电子器件，以及功率集成电路和功率模块。第2章介绍了直流-直流变换电路，包括降压斩波电路（Buck 电路）、升压斩波电路（Boost 电路）、升降压斩波电路和 Cuk 斩波电路、复合型 DC-DC 斩波电路，以及变压器隔离型直流-直流变换电路。第3章介绍了交流-直流变换电路（含有源逆变电路），包括不可控整流

电路、单相可控整流电路、三相半波可控整流电路、三相桥式全控整流电路、三相桥式半控整流电路、变压器漏感对整流电路的影响、晶闸管的相控触发电路与同步问题、有源逆变电路、整流电路的谐波和功率因数，以及其他形式的大功率可控整流电路。第4章介绍了直流-交流变换电路，包括电压型逆变电路、电流型逆变电路、脉宽调制型逆变电路等。第5章介绍了交流-交流变换电路，包括交流调压电路、交-交变频电路和矩阵式交-交变频电路等。第6章介绍了典型谐振软开关电路，包括零电压开关准谐振电路、零电流开关准谐振电路等。

本书由东北大学杨卫国、肖冬等共同编写。全书共分6章，其中，杨卫国负责拟定全书大纲，并编写了绪论、第3章、第4章和第5章第1节；肖冬编写了第1章、第2章和第6章；胡广浩编写了第5章第2节；杨菲编写了第5章第3节；全书由杨卫国统稿。书中的一些插图和文字校对工作由胡广浩、杨菲和研究生洪超、魏新明等人完成。

在本书编写过程中，参阅了许多同行专家的论著和文献，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。此外，本书在编写过程中，得到了冶金工业出版社的大力支持和帮助，也得到了编者所在单位许多同志的关怀、支持和帮助，在此一并对他们致以衷心的感谢。

由于作者水平有限，本书中疏误之处，殷切希望同行专家和广大读者给予批评指正。

编著者
2011年6月

目 录

0 绪论	1
0.1 概述	1
0.2 电力电子器件	3
0.3 电力电子器件今后的发展方向	4
0.4 电能变换的基本类型	5
0.5 电力电子技术的发展	6
0.6 电力电子技术的应用	9
0.7 课程性质与学习方法	15
1 电力电子器件	16
1.1 电力电子器件的特点与分类	16
1.1.1 电力电子器件的特点	16
1.1.2 电力电子器件的分类	16
1.2 功率二极管	17
1.2.1 功率二极管的主要类型	17
1.2.2 PN 结型功率二极管基本结构、工作原理和基本特性	18
1.2.3 肖特基势垒二极管	20
1.2.4 功率二极管的主要参数	21
1.3 晶闸管及派生器件	21
1.3.1 晶闸管的结构和工作原理	21
1.3.2 晶闸管的工作特性及主要参数	23
1.3.3 晶闸管的触发	29
1.3.4 派生晶闸管器件	30
1.4 门极可关断晶闸管 (GTO)	31
1.4.1 GTO 的基本结构和工作原理	31
1.4.2 GTO 的特性及主要参数	33
1.4.3 GTO 的驱动电路	36
1.4.4 GTO 的最大可关断阳极电流和电流关断增益	38
1.5 功率晶体管 (GTR)	38
1.5.1 GTR 的结构与基本工作特性	38
1.5.2 GTR 的基本特性与主要参数	39
1.5.3 GTR 的驱动电路	41

1.5.4 GTR 的二次击穿现象与安全工作区	41
1.6 功率场效应晶体管 (Power MOSFET)	42
1.6.1 Power MOSFET 的基本结构和工作原理	42
1.6.2 Power MOSFET 的特性及主要参数	43
1.6.3 Power MOSFET 的驱动电路	45
1.6.4 Power MOSFET 的防静电击穿保护	46
1.7 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)	46
1.7.1 IGBT 的结构和工作原理	46
1.7.2 IGBT 的特性及主要参数	47
1.7.3 IGBT 的驱动电路	49
1.7.4 IGBT 的擎住效应和安全工作区	49
1.8 其他新型电力电子器件	50
1.8.1 静电感应晶体管 (SIT)	50
1.8.2 静电感应晶闸管 (SITH)	51
1.8.3 MOS 控制晶闸管	53
1.8.4 功率集成电路和功率模块	55
1.8.5 集成门极换流晶闸管 (IGCT)	59
本章小结	60
习题与思考题	60
2 直流 - 直流变换电路	61
2.1 降压斩波电路	61
2.1.1 电流连续模式时的工作情况	62
2.1.2 电流断续模式时的工作情况	63
2.2 升压斩波电路	65
2.2.1 电流连续模式时的工作情况	66
2.2.2 电流断续模式时的工作情况	66
2.3 升降压复合斩波电路	68
2.3.1 电流连续模式时的工作情况	68
2.3.2 电流断续模式时的工作情况	69
2.4 库克电路	71
2.4.1 库克电路稳态工作过程分析	71
2.4.2 库克电路基本输入输出关系	73
2.5 Sepic 斩波电路和 Zeta 斩波电路	74
2.6 复合型 DC - DC 斩波电路	75
2.6.1 二象限 DC - DC 斩波电路	75
2.6.2 四象限 DC - DC 斩波电路	77
2.6.3 多相多重 DC - DC 斩波电路	77
2.7 带隔离的直流 - 直流变换电路	79

2.7.1 正激电路	79
2.7.2 反激电路	79
2.7.3 半桥式隔离的降压电路	80
2.7.4 全桥式隔离的降压电路	81
2.7.5 推挽电路	82
2.7.6 全波整流电路和全桥整流电路	83
本章小结	84
习题与思考题	85
3 交流-直流变换电路 (含有源逆变电路)	86
3.1 不可控整流电路	86
3.1.1 单相不可控整流电路	86
3.1.2 三相不可控整流电路	90
3.2 单相可控整流电路	92
3.2.1 单相半波可控整流电路	92
3.2.2 单相桥式全控整流电路	97
3.2.3 单相全波可控整流电路	101
3.2.4 单相桥式半控整流电路	102
3.3 三相半波可控整流电路	107
3.3.1 三相半波共阴极组可控整流电路带电阻性负载	107
3.3.2 三相半波共阴极组可控整流电路带阻感性负载	111
3.3.3 三相半波共阴极组可控整流电路带反电动势负载	112
3.3.4 三相半波共阳极组可控整流电路	113
3.4 三相桥式全控整流电路	114
3.4.1 三相桥式全控整流电路带电阻性负载	115
3.4.2 三相桥式全控整流电路带阻感性负载	118
3.5 三相桥式半控整流电路	120
3.5.1 三相桥式半控整流电路带电阻性负载	120
3.5.2 三相桥式半控整流电路带阻感性负载	121
3.6 变压器漏感对整流电路的影响	122
3.6.1 换流期间的电压电流波形	122
3.6.2 换相压降 ΔU_d 的计算	123
3.6.3 换相重叠角 γ 的计算	124
3.7 有源逆变电路	126
3.7.1 逆变的概念	126
3.7.2 三相半波有源逆变电路	127
3.7.3 实现有源逆变的条件	128
3.7.4 三相桥式有源逆变电路	128

3.7.5 有源逆变失败的原因与最小逆变角的限制	129
3.8 晶闸管的相控触发电路与同步问题	131
3.8.1 单结晶体管移相触发电路	132
3.8.2 同步信号为锯齿波的触发电路	136
3.8.3 集成触发电路	140
3.8.4 触发电路的定相	142
3.9 整流电路的谐波和功率因数	145
3.9.1 谐波和无功功率分析基础	146
3.9.2 带阻感性负载时可控整流电路交流侧谐波和功率因数分析	148
3.10 大功率可控整流电路	150
3.10.1 带平衡电抗器的双反星形可控整流电路	150
3.10.2 多重化整流电路	154
本章小结	158
习题与思考题	159
4 直流 - 交流变换电路	162
4.1 逆变电路的基本原理及换流方式	163
4.1.1 电网换流	163
4.1.2 负载谐振式换流	164
4.1.3 强迫换流	164
4.2 逆变电路的类型	166
4.3 电压型逆变电路	168
4.3.1 电压型单相逆变电路	168
4.3.2 电压型三相逆变电路	170
4.4 电流型逆变电路	174
4.4.1 电流型单相逆变电路	175
4.4.2 电流型三相逆变电路	178
4.5 多重逆变电路和多电平逆变电路	180
4.5.1 多重逆变电路	180
4.5.2 多电平逆变电路	183
4.6 正弦脉宽调制 (SPWM) 逆变电路	184
4.6.1 SPWM 基本原理	185
4.6.2 单极性调制与双极性调制	186
4.6.3 同步调制和异步调制	189
4.6.4 SPWM 波的生成	191
4.6.5 电流滞环控制 SPWM	194
本章小结	196
习题与思考题	197

5 交流 - 交流变换电路	198
5.1 交流调压电路	198
5.1.1 单相交流调压电路	200
5.1.2 三相交流调压电路	205
5.1.3 其他交流电力控制电路	208
5.2 交 - 交变频电路	211
5.2.1 三相输入 - 单相输出交 - 交变频电路	211
5.2.2 三相输入 - 三相输出交 - 交变频电路	218
5.3 矩阵式交 - 交变频电路	221
本章小结	225
习题与思考题	225
6 谐振软开关技术	226
6.1 谐振软开关的基本概念	226
6.1.1 谐振开关的基本概念	226
6.1.2 谐振开关的分类	228
6.2 准谐振电路	229
6.2.1 零电压开关准谐振电路	229
6.2.2 零电流开关准谐振电路	230
6.2.3 谐振直流环	231
6.3 PWM 软开关电路	233
6.3.1 零开关 PWM 软开关电路	233
6.3.2 零转换 PWM 软开关电路	237
本章小结	241
习题与思考题	241
参考文献	242

0 绪 论

0.1 概 述

电力电子技术是利用电力电子器件及其电路进行电能变换的一门技术。它包括电压、电流、频率、相数等的变换。电力电子变流技术的应用,可以说是电能变换技术的一次“革命”,它使电能变换技术产生了一次飞跃。电力电子变流设备与老式的旋转变流机组相比,具有反应快、体积小、重量轻、噪声低、能量损耗小、容易驱动、可靠性高和易于使用微处理器实现高级自动控制(如自适应控制、最优控制和智能控制等)等优点。它主要应用于电化学、电冶炼、电动汽车和电动火车、船舶、轧钢机、辊道运输、纺织机、造纸机、中频感应加热、高压静电除尘、直流输电和无功补偿等领域。随着电力电子器件性能的不断提 高,与先进控制技术的有效结合,其应用已深入到工业生产、国防科技和社会生活的各个领域,正在向着应用面更广、应用水平更高的方向发展。

电子技术又称为电子学,是与电子器件、电子电路、电子设备和系统有关的科学技术,它的理论基础是电磁学。电子技术是研究电路中的电子器件及其电信号的产生、变换、处理、存储、发送和接收等问题的技术,又称为信息电子技术。

电力技术是一门涉及发电、输电及电力应用的科学技术,其理论基础也是电磁学(电路、磁路、电场、磁场),利用电磁学的基本原理处理发电、输配电及电力应用的技术称为电力技术。

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,也就是应用于电力领域的电子技术。目前所用的电力电子器件均由半导体制成,故也可称为半导体变流技术。它是由电力技术、电子技术和控制技术综合而成的一门新兴学科。

电子学可分为电子器件和电子电路两大分支,这分别与电力电子器件和电力电子电路相对应。电力电子器件的制造技术和电子器件制造技术的理论基础一样,大多数工艺也基本相同。特别是现代电力电子器件大都采用微电子制造技术和集成电路制造工艺,许多设备都和微电子器件制造设备通用,这说明两者同根同源。电力电子电路和电子电路的许多分析方法也是一致的,只是两者应用目的不同,前者用于电力变换和控制,后者用于信息处理。广义而言,电子电路中的功率放大和功率输出部分也可算做电力电子电路。在信息、电子技术中,半导体器件既可处于放大状态,也可处于开关状态;而在电力电子技术中,为避免功率损耗过大,电力电子器件总是工作在开关状态,这是电力电子技术的一个重要特征。

电力电子学(Power Electronics)这一名称是在20世纪60年代出现的。1974年,美国学者W. Newell用一个倒三角形对电力电子学进行了描述,认为电力电子学是由电力学、电子学和控制理论三个学科交叉形成的,这一观点被全世界普遍接受(图0-1)。

根据以上对“电力电子技术”的一般描述,可以将它定义为: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,将一种形式的电能转换为另一种形式的电能的技术。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、控制理论的应用和成熟设计方法的使用。

美国电气和电子工程师协会(IEEE)的电力电子学会曾对电力电子学有如下的阐述:“有效地使用电力半导体器件,应用电路和

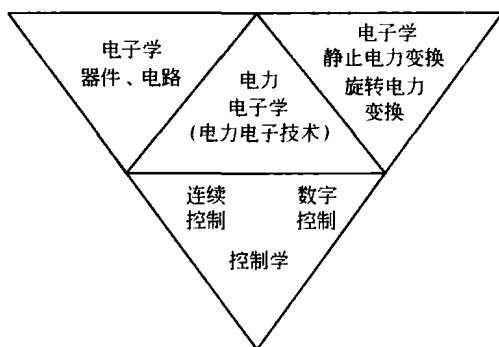


图 0-1 电力电子技术的 Newell 定义

设计理论及分析开发工具,实现对电能的高效能变换和控制的一门技术,它包括对电压、电流、频率和波形等方面的变换”。

电力电子学的内容主要包括电力电子器件、能量变换主电路和控制系统三个方面。电力电子学利用电路理论、现代微电子技术、计算机技术、现代控制理论、大规模集成电路技术、电力系统理论,实现各种形式电能之间的变换,从而满足不同的用电要求。

由于电力电子学是在电气工程领域其他学科的基础上发展起来的,因而电气工程领域的各个学科的发展也必将对电力电子学的发展起重要的推动作用,特别是功率半导体器件和大规模集成电路技术、电路拓扑、数字控制和现代控制理论、电力系统理论等学科的发展大大推动了电力电子学的应用及完善。

广泛且大量的需求成为电力电子学发展的牵引力,有力地拉动了电力电子学的迅速成长,使其成为电气工程领域内极为重要的独立学科。而现代科学技术又为电力电子学的发展提供了巨大的推动力,极大地促进了电力电子学的迅速发展。目前,美国等发达国家均设有国家电力电子研究中心,我国也成立了相关的国家电力电子工程及研究中心,而且国内各著名大学均设有相关的专业方向。电力电子学已成为全球的研究热点。可以预料在今后的发展中,随着我国及世界经济的发展,电力电子学必将与现代控制理论、材料科学、微电子技术、计算机技术及电机工程等领域发生更加密切的关系,必将在电气工程领域中占据越来越重要的地位。

随着科学技术的进步和经济水平的日益提高,电力电子学的应用领域已扩大到工业、农业、商业、办公自动化、交通运输、航空航天、国防现代化、医疗器械、环保和人民生活的各个领域。据技术发达国家的有关专家统计,经过电力电子技术处理的电能已达到总电能的百分之九十以上。经济社会的需要说明,对电力电子学的掌握已变得十分迫切和异常的重要。

现代电力电子技术的主要特点表现在以下几个方面。

(1) 全控化。由半控型的晶闸管到全控型的电力电子器件,是电力电子器件在功能上的重大突破。无论是双极型器件 GTO、GTR、SITH 或单极型器件 P-MOSFET、SIT,还是混合型器件 IGBT、MCT 等都实现了全控化,从而避免了采用晶闸管关断时所需要的复杂强迫换流电路,使电路大为简化。

(2) 集成化。集成化与传统电力电子器件的分立方式完全不同,所有的全控型器件

都是由许多单元器件并接在一起,并集成在一个基片上。

(3) 高频化。高频化是指随着器件集成化后的高频化,它能有效提高整体集成器件的工作速度。例如,高电压大电流的 GTO,其工作频率为 $1 \sim 2\text{kHz}$, GTR 可达 $2 \sim 5\text{kHz}$, IGBT 的工作频率可达 20kHz , P-MOSFET 可达数百 kHz , SIT 可达 10MHz 以上。

(4) 高效率化。高效率化体现在器件本身和器件换流技术这两个方面。由于电力电子器件的导通压降不断减小,降低了导通损耗;器件开关时的上升和下降过程加快,也降低了开关损耗。器件处于合理的运行状态,提高了运行效率;变流器中采用软开关技术,有效降低了电路中的开关损耗和开关噪声,使得运行效率得到进一步提高。

(5) 小型化。高频全控型器件的应用使得开关频率大幅度提高,取得了变流装置小型化与轻量化的直接效果。电力电子器件的多单元集成化,减小了主电路的体积。控制器和功率半导体器件等采用微型化的表面粘贴技术,使得变流器的体积进一步减小。控制电路的高度集成化和微型化,使得滤波电路和控制器的体积大大减小。

(6) 绿色化。电力电子技术中广泛采用 PWM 脉宽调制技术、正弦波脉宽调制和多重化技术等,使变流器的谐波大为降低,功率因数得到提高,进而使电源绿色化。PWM 控制技术已成为电力变换的核心技术,在逆变、斩波、变频、整流及交流电力控制中均得到了广泛的应用。静止无功补偿器(SVC)、有源电力滤波器等新型电力电子装置,具有优越的无功功率和谐波补偿的性能,因此大大提高了电网的供电质量。

(7) 控制技术数字化与智能化。目前电力电子器件正向着大容量、高频、易驱动和智能化方向发展。功率集成电路 PIC 和智能模块 IPM,集电力电子器件、驱动电路、传感器和诊断、保护、控制电路于一身。智能化功率集成电路的应用预示着电力电子技术与计算机控制技术已密不可分,自然结合在一起,走向一体化的时机已逐步成熟。

(8) 新型化。近年来,新型半导体材料的研究正在取得不断的突破,碳化硅、金刚石等材料用于电力电子器件。特别是金刚石器件与硅器件相比,功率极大提高,频率可提高 50 倍,导通压降低一个数量级,最高结温可达 600°C 。

基于上述八大特点,现代电力电子技术应用领域将会有更大的延伸和扩展。现在经过变换处理后再供用户使用的电能,占全国总发电量的百分比值的高低,已成为衡量一个国家技术进步的主要标志之一。据有关资料显示,20 世纪末发达国家中有 75% 左右的电能是经过电力电子技术变换或控制后再使用的。而美国预计到 21 世纪二三十年代,由发电站生产的全部电能都将经过变换处理后再供负载使用。

0.2 电力电子器件

电力电子器件是电力电子设备的灵魂和心脏。1948 年,普通晶体管的发明引起了一场电子工业革命。晶体管首先应用于小功率领域,如信息处理、通讯等。10 年后,即 1958 年,美国通用电气公司研制成功了世界上第一只工业用普通晶闸管。从那时起,电子技术的应用开始迈入强电领域并得到了迅猛发展。电能的变换和控制从旋转变流机组、离子变流器时代进入了电力电子变流时代。

同水银整流器相比,晶闸管具有体积小、重量轻、功耗低、效率高、无污染、噪声低、响应快和易于驱动等特点,且晶闸管的开通时间可以控制,加上组成装置后具有综合

性能高、寿命长等优点,因此很快在电能变换领域占据了主导地位,并得到了迅猛发展。虽然近年来由于全控型器件的迅速发展和广泛应用,使晶闸管的应用领域受到一定程度的冲击,但其在整流领域、大功率电能变换领域的主导地位仍然是相当稳固的。本书仍以较大篇幅详细介绍晶闸管器件及其组成的各种电能变换电路的工作原理和分析方法。

传统的功率二极管和普通晶闸管(Thyristor)曾经一度是电力电子电能变换的主角。随着电能控制技术的不断发展和一些用电设备对电能变换质量的要求进一步提高,使得功率二极管、普通晶闸管的应用受到严重挑战。为克服功率二极管和普通晶闸管应用中存在的问题,迫切呼唤着开关频率更高、导通和关断都可控的电力电子器件,于是全控型器件便应运而生了。

20世纪70年代后期,相继研制成功了电力双极型晶体管(Bipolar Transistor, BJT)、电力场效应晶体管(Power-MOSFET)和门极可关断晶闸管(Gate Turn-off Thyristor, GTO)。它们可称为第一代全控型电力电子器件,其共同特点是可通过门极(基极、栅极)控制其导通和关断,而且其开关频率明显高于晶闸管,适用于开关频率较高的电路,因此它们得到了迅速推广,使电力电子技术进入了一个新的、更高的发展阶段。第一代全控型电力电子器件虽然在高性能电能变换领域(如交流变频调速、计算机不间断电源等)获得了广泛应用,但也存在一些不足,如驱动功率大、导通压降大、损耗大、关断困难和开关频率不够高等。如电力双极型晶体管(BJT)驱动功率大,但导通压降低,而电力场效应晶体管(Power-MOSFET)恰好与BJT相反,本着扬长避短,优势互补的原则,将两者组合起来,就可以达到克服缺点发挥长处的目的。绝缘栅双极型晶体管IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)便是在电力双极型晶体管(BJT)和电力场效应晶体管(Power-MOSFET)基础上复合而成的新的全控型器件。它兼有电力场效应晶体管输入阻抗高、驱动功率小和电力双极型晶体管导通压降低的双重优点,使之成为了现代电力电子的主导器件。与IGBT相对应,MOS控制晶闸管(MOS Controlled Thyristor, MCT)和集成门极换流晶闸管(Integrated Gate Commutated Thyristor, IGCT)都是MOSFET和GTO的复合,它们综合了MOSFET和GTO的优点。IGBT、MCT、IGCT等可称为第二代全控型器件。它们都有驱动功率小、导通压降低、开关频率高等优点,广泛应用于当今高性能电能变换场合。

实际使用中,为使电能变换主电路体积尽可能小,接线尽可能简单,往往按照典型接线方式,将几只元件封装在一个模块内,如双管、单相桥式和三相桥式模块等。器件的模块化不仅缩小了装置体积,降低了装置成本,同时提高了装置可靠性,也方便了用户。

在模块化和复合化的基础上,很自然的发展是功率集成电路(Power Integrated Circuit, PIC)。在功率集成电路中,是在模块化基础上,把主电路功率元件、驱动电路、过压过流保护、电流检测、温度检测等电路都集成到一起,形成一个整体,称为智能型功率模块(Intelligent Power Module, IPM)。智能型功率模块可以称为第三代全控型器件。它的应用使控制电路进一步简化,整个电能变换设备进一步小型化,设备可靠性进一步提高。

0.3 电力电子器件今后的发展方向

早期的电力电子器件主要追求高电压、大电流,也就是大功率器件,以适应大功率场合需要。

今后的发展将主要在以下方面:

(1) 由半控型器件向全控型器件转移。由于全控型器件组成装置后的综合性能明显优于半控型器件,同时,在全控型器件生产成本降低以后,由于组成装置的成本也会有很大降低,因此,无论在电性能方面,还是价格方面,都将显示出优势,使器件使用逐渐由半控型器件转向全控型器件。

(2) 向高频快速方向发展。第一,有些用电设备要求变流装置输出高频,如快速压缩机、储能飞轮、机床主轴、研磨机等的调速和高频感应加热以及超声波发生装置等,都需要高频输出,一般可达几兆至几十兆赫。这就要求开关频率大大提高;第二,有些装置虽然要求输出频率不高,如变频调速装置等设备,但要求内部高频,一般内部调制频率可达几十千赫到几百千赫。装置内部高频有利于改善输出波形,降低电机的运行噪声,减小电机的脉动转矩和改善系统性能。这也要求器件具有较高的开关频率。

(3) 向高电压、大电流、快速、易驱动、复合化和智能化方向发展。

(4) 随着器件应用频率的不断提高,开关损耗也随之增加,为减小开关损耗,软开关技术便应运而生,软开关技术就是以谐振为主的辅助换流手段,重点解决电力电子电路中的开关损耗和开关噪声问题。

(5) 新型半导体材料(如碳化硅等)和新型半导体工艺的应用。

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,换句话说,电力电子技术的发展是以电力电子器件的发展为基础的。随着微电子技术、电力电子技术、大规模集成电路制造技术,以及计算机技术的发展,必将不断涌现出更多新型的高性能电力电子器件。

0.4 电能变换的基本类型

电力电子变流装置主要完成各种电能形式的变换,以电能输入-输出变换的形式来分,主要包括以下四种基本变换。

(1) 交流-直流(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。交流-直流变换一般称为整流,完成交流-直流变换的电力电子装置称为整流器(Rectifier)。交流-直流变换常应用于直流电动机调速、蓄电池充电、电镀、电解以及其他直流电源等。

(2) 直流-交流(DC-AC)变换。把直流电变换成频率可变、电压固定或可调的交流电,称为DC/AC变换。直流-交流变换一般称为逆变,这是与整流相反的变换形式,完成直流-交流变换的电力电子装置称为逆变器(Inverter)。当逆变器的交流输出与电网相连时,其直流-交流变换称为有源逆变;当逆变器的交流输出与电机等无源负载连接时,其直流-交流变换称为无源逆变。有源逆变实际上是整流器的逆运行状态,主要用于电能的连网馈电,如交、直流调速系统四象限运行中的电能回馈和太阳能、风能等新能源的并网发电等;无源逆变装置的输出可以是恒压恒频(CVCF)的电源或不间断供电电源(UPS),也可以是变压变频输出的电源,这种变流器也称为变频器。它广泛应用于各种变频电源中,如在中频感应加热和交流电动机的变频调速等方面的应用。

(3) 交流-交流(AC-AC)变换。交流-交流变换主要有交流调压和交-交变频

两种基本形式,其中,交流调压只调节交流电压而频率不变,常应用于调温、调光、交流电动机的调压调速等场合;交-交变频则是电压和频率均可调节,完成交-交变频的电力电子装置也称为周波变换器(Cycloconverter),主要用于大功率交流变频调速等场合。

(4) 直流-直流(DC-DC)变换。将一种幅值固定或变化的直流电压变换成幅值可调或恒定的另一个电压等级的直流电压,称为直流-直流(DC-DC)变换,也称为直流斩波。直流-直流变换主要包括升压、降压和升-降压变换等。采用脉宽调制(PWM)技术实现直流-直流变换的电力电子装置一般称为斩波器(Chopper)或脉宽调制(PWM)变流器。直流-直流变换常应用于升降压直流变换器、直流电压变换、开关电源和仪表电源、电池管理、电动汽车、地铁和电力机车等。

0.5 电力电子技术的发展

电力电子技术是伴随着电力电子器件的出现和发展而发展的。目前广泛应用的电力电子器件大都从晶体三极管发展而来。1948年美国贝尔实验室的肖克莱等人发明了能够放大信号和功率的晶体三极管,开创了半导体电子学的新时代。晶体三极管的诞生也标志着电力电子技术学科发展基础已经建立。一般认为,电力电子技术学科的诞生是以1957年美国通用电气公司在晶体三极管的基础上研制出的第一个晶闸管(Thyristor)为标志的。由于和先前发明的各种器件比较,其功率处理能力有了根本性的突破,实现了弱电对强电变换电路的控制,它具有效率高、体积小、重量轻、寿命长、噪声小、便于维修等优点以及优越的电气性能和控制性能,因而以晶闸管为核心的电力电子电路在电能变换领域得以迅速而广泛的应用,很快取代了水银整流器和旋转式变流机组,使电力电子技术进入了大功率控制领域,进而从电子技术中分离出来,形成了电力电子学。

一般可以将电力电子技术的发展划分为三个时期。

20世纪50~60年代为形成期,在这一时期,电力电子技术的关键技术得以完善,电力电子技术学科就是在这—时期建立起来的。电力电子技术的进步与半导体器件的发展是密不可分的。在晶闸管出现以后的20年里,晶闸管的性能不断得到提高,并从低电压、小电流逐渐过渡到高电压、大电流的系列产品,采用的电力电子器件主要是晶闸管及其派生器件,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。由于其优越的电气和控制性能得以广泛应用,主要应用于直流传动、各类大容量电源等方面。所有这些都极大地推动了各种电力变流器在冶金、电化学、电力工业、交通及矿山等行业中的应用,也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。

20世纪70~80年代为发展期,门极可关断晶闸管(Gate Turn-off Thyristor, GTO)、电力双极型晶体管(Bipolar Transistor, BJT)、电力场效应晶体管(Power-MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)等全控型器件迅速发展。由于这些器件既可以通过控制极控制其导通,也可以控制其关断,因此,它们的应用将电力电子技术推向了一个崭新的阶段。控制方式不再全是相控方式,而主要是以全控型器件为电力电子电路基础的脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)方式。PWM控制技术

的应用,使电路的控制性能得以改善,使电力变换的各种形式都得以很好的实现。

20 世纪 90 年代以后为繁荣期,在这一时期各种全控型器件有了极大发展,各种结构的全控型器件大量涌现,种类繁多,如静电感应晶体管 (Static Induction Transistor, SIT)、静电感应晶闸管 (Static Induction Thyristor, SITH)、MOS 控制晶闸管 (MOS Controlled Thyristor, MCT)、集成门极换流晶闸管 (Integrated Gate Commutated Thyristor, IGCT)、注入增强型门极换流晶体管 (Injection Enhanced Gate Transistor, IEGT) 等代表了新一代全控型器件的复合型器件。它们综合了其他器件的优点,在电压、电流容量上有了较大的突破,由全控型器件构成的电力电子装置的容量大大提高,在中小功率领域已基本取代了晶闸管。整个装置呈现出了全控化、集成化和高频化的特点。一些集驱动、控制、保护电路和功率器件为一身的功率集成电路也相继产生,并应用于小功率装置。

电力电子学发展过程中的重要事件如下:

- 1803 年 整流器的发明;
- 1876 年 硒整流器的发明;
- 1896 年 单相桥式整流电路的发明;
- 1897 年 三相桥式整流电路的发明;
- 1902 年 水银整流器的发明;
- 1903 年 相控整流原理的提出;
- 1911 年 金属封装水银整流器的发明;
- 1922 年 周波变换器原理的提出;
- 1923 年 电子晶闸管的发明;
- 1924 年 斩波器原理的提出;
- 1925 年 逆变器换流原理的提出;
- 1926 年 热阴极电子晶闸管的发明;
- 1931 年 铁路牵引用周波变换器的发明;
- 1935 年 高压直流输电系统的提出;
- 1939 年 电机驱动概念的引入;
- 1942 年 20MW, 25/60Hz 频率变换器的发明;
- 1948 年 普通晶体管的发明;
- 1953 年 100A 锗功率二极管的发明;
- 1954 年 硅功率二极管的发明;
- 1957 年 半导体晶闸管的发明;
- 1958 年 半导体闸流管的商业化;
- 1961 年 小功率门极可关断晶闸管 (GTO) 的发明;
- 1964 年 三端双向可控开关元件用于直流电机驱动;
- 1965 年 光激硅可控整流器的发明;
- 1967 年 用于高压直流输电系统的晶闸管的发明;
- 1970 年 500V/20A 硅双极型晶体管 (BJT) 的发明;
- 1971 年 磁场定向原理的提出 (矢量控制);
- 1973 年 用周波变换器实现的无齿轮传动球磨机的发明;