



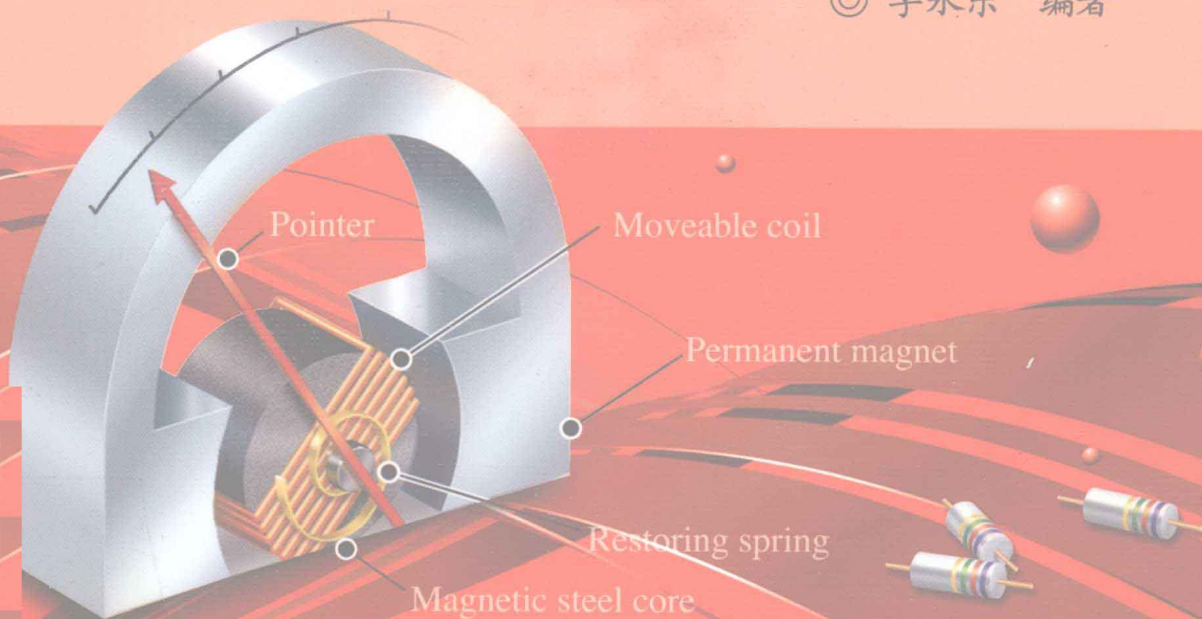
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
电气工程及其自动化专业精品教材

现代电力电子学

——原理及应用

Modern Power Electronics
Principles and Applications

© 李永东 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电气工程及其自动化专业精品教材

现代电力电子学

——原理及应用

李永东 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书主要论述了现代电力电子技术的基本原理、分析方法和典型应用。全书共 8 章,内容包括:现代电力电子器件,尤其是最新场控器件 IGBT,IGCT 等的开关特性;电力电子电路拓扑研究及综合,重点是在已知电源和负载特性的条件下,如何综合出最佳电力电子线路的系统方法;电力电子电路换流原理及分析方法,在分析二阶电路中引入相平面法,使其分析和计算大大简化;谐振式变换器及软开关技术,重点介绍零电流和零电压准谐振电路及推广应用;电力电子在交流电机控制传动系统中的应用;无功补偿、有源滤波及 PFC 技术。

本书可作为高等工科院校教师、高年级本科生、研究生的教材或参考用书,也可供有关科研和开发人员参考。

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。

图书在版编目(CIP)数据

现代电力电子学——原理及应用/李永东编著. —北京:电子工业出版社,2011. 11
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-121-13782-2

I. ①现… II. ①李… III. ①电力电子学-高等学校-教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 106630 号

策划编辑:陈晓莉

责任编辑:陈晓莉

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市桃园装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:18.25 字数:492 千字

版 次:2011 年 11 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:38.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

电力电子技术从晶闸管的发明算起已有 50 多年的历史。从笔者首次接触电力电子技术到现在也已经有 20 多年,但是其发展速度和应用领域至今仍看不到任何减缓和饱和的迹象。相反,自 20 世纪 80 年代,即可关断器件广泛应用以来,我们进入了一个现代电力电子技术的蓬勃发展时代。其核心在于利用功率半导体器件的开关作用,构成频率从零到兆赫兹、容量从几瓦到几十兆瓦之间任意组合的有功和无功电源,给各种负载供电,使电能的产生、传输和使用效率大大提高,并实现了用电装置的小型化、轻量化及原材料的大量节省,广泛地应用于电气传动、电力系统及各种电源系统等工业生产和民用部门。此外,电能质量的控制及新能源的开发,电气设备的自动化控制,都在很大程度上依赖于现代电力电子技术的进步和成就。

现代电力电子技术具有以弱电控制强电的特点,成为连接信息产业和传统产业的必要环节;还可以节约电能,缓解能源危机,减少环境污染;是典型的高技术及众多高新技术的支撑技术。相对于微电子技术来讲,有人称现代电力电子技术为第二次电子革命。了解和掌握这些现代电力电子器件和线路的工作原理和控制方法,不仅可以根据实际需要选择合适的结构和控制方案,以达到效率和成本最佳,而且对消化吸收国外先进技术不无裨益。同时,对进一步深入研究和发发展现代电力电子系统的控制和应用也是必不可少的。

近年来,关于现代电力电子技术及其应用的研究向着高频、高效(低开关损耗)、高功率密度(组合集成化)、高功率因数及高压大功率的方向迅速发展,积累了大量的文献,成果极为丰硕,国内外的著作也很多。自从十多年前清华大学设置现代电力电子学研究生课程以来,我们一直试图跟上技术进步的节奏,将一些新的内容引入课程的教学。但是,一些新的研究、新的应用层出不穷,已远远超出了一般读者的知识范围。因此,作者在教学过程中,一直盼望有一本系统地介绍现代电力电子器件、线路工作原理的书籍,为读者进一步深入研究该技术打下基础;另一方面,较为全面地介绍这类系统的控制方法和应用领域,以使读者在解决实际问题中加以利用。此外,对目前国际上较新的研究方向,如多电平变换器、新型 PWM 控制技术等内容,也应给予充分的重视。本书希望在这方面做一些尝试,内容涉及现代电力电子技术的一些基础知识和基本分析方法,并将结合我国实际对现代电力电子技术的需要和学科本身的发展规律,重点介绍以下内容:

1. 现代电力电子器件开关特性及对偶性原理。重点介绍 IGBT,IGCT 等最新场控器件的外特性和应用特点;同时应用对偶性原理求出各器件的对偶。

2. 电力电子电路拓扑研究及综合。在给出开关电路中理想电源的定义及其推论的基础上,进一步应用对偶原理求出电力电子电路的几种基本拓扑单元,并从中推出各种常用电路,如 Buck,Boost,Buck-Boost,Cuk,Zeta,Sepic,交直交及矩阵式变换器等。最后给出在已知电源和负载特性的条件下,如何综合出最佳电力电子线路的系统方法。

3. 电力电子电路换流原理及分析方法。首先从各种电力电子电路中抽出基本换流单元,并根据晶闸管及其对偶器件引出软换流的概念。在分析各种强迫换流电路中引入相平面法,使其分析和计算大大简化。

4. 谐振式变换器及软开关技术。从高频电力电子变换器和 PWM 变换器的限制引出谐

振开关技术,重点介绍零电流和零电压准谐振电路及推广应用,采用的分析方法仍是相平面法。最后给出零电压和零电流过渡软开关技术的概念和应用电路。

5. 高性能交流电机控制系统——电力电子在传动中的应用。介绍高性能交流电机控制系统的基本构成及对电力电子技术的要求;重点介绍各种 PWM 控制方法的原理及特点。最后提到异步电机控制和系统的原理和构成。

6. 多电平变换器。作为一种适用于高压、大功率变换的电力电子电路结构,它的出现为电力电子拓扑的发展开辟了一条新思路。至今已形成了几类多电平变换器结构:一类是箝位型变换器拓扑;第二类为级联型结构。

7. 无功补偿、有源滤波及 PFC 技术。首先介绍无功功率的产生、危害及其补偿办法,重点是动态无功补偿技术;其次分析低谐波电力电子装置即 PFC 的应用技术;最后给出谐波治理的基本方法,如并联式、串联式及混合式有源滤波器的基本特性和系统构成。

在本书的选题立项和出版过程中,得到了电子工业出版社陈晓莉编审的热情鼓励和大力支持,作者在这里深表感谢。我还要感谢我的老师——法国图卢兹国家理工学院电工与电力电子实验室(LEEI: Laboratoire d'Electrotechnique et Electronique Industrielle)前主任 H. Foch 教授,是他的精彩授课方式,使作者在 20 世纪 80 年代初对原先颇为头痛的半导体变流技术产生了浓厚的兴趣,他的研究小组目前在 T. Meynard 教授的带领下,在多电平变换器领域的开创性工作以及每次见面时的讨论,均使作者感觉受益匪浅。此外,作者在美国弗吉尼亚理工学院访问工作期间得到了电力电子系统中心(CPES: Center for Power Electronics Systems)主任李泽元(Fred C. Lee)教授的热情帮助和鼓励,该中心还包括著名的威斯康星大学电机及其控制研究中心和北卡罗莱纳州立大学电力电子器件研究中心,不仅代表美国大学电力电子领域研究的最高水平,在世界范围内也是屈指可数的。

在本书的写作过程中,本人的博士生和研究生也参与完成了部分章节的整理和编辑工作。他们是苑国锋、曹冬宇、高跃、郑泽东、饶建业、缪学进等同学;此外,孙毅、张猛、王琛琛、郑艳文、孟杰、顾春阳等同学也参与了一些章节的整理工作。本书初稿和最后的成稿由李永东完成。最后,我还要感谢我的父母和妻子,是他们给了我无条件的支持。

由于作者学识所限和时间的紧迫,在现代电力电子技术领域一定还有很多内容没有得到反映,恳请读者谅解。书中内容也难免有不当和错误之处,敬请有关专家和各位读者给予批评和指正。

李永东

2011 年 8 月 于清华大学

目 录

绪论	(1)
0.1 现代电力电子技术的基本概念	(1)
0.2 现代电力电子技术的发展和现状	(3)
0.2.1 电力电子器件的发展历程	(3)
0.2.2 电力电子应用技术的发展现状	(4)
0.2.3 现代电力电子技术的发展趋势	(6)
0.3 现代电力电子技术的基本特征	(7)
0.3.1 以弱电控制强电,成为连接信息产业和传统产业的必要环节	(7)
0.3.2 可以节约电能,缓解能源危机,减少环境污染	(8)
0.3.3 典型的高技术及很多高新技术的支撑技术	(9)
0.4 现代电力电子技术的应用领域	(9)
0.4.1 在电力传动系统中的应用	(10)
0.4.2 在工业和民用电源系统中的应用	(11)
0.4.3 在电力系统中的应用	(11)
0.4.4 在高新技术领域的应用	(12)
0.5 现代电力电子技术的研究方法和学术园地	(13)
第1章 现代电力电子器件的开关特性	(14)
1.1 概述	(14)
1.2 半导体物理基础及器件分类	(15)
1.2.1 硅和半导体	(15)
1.2.2 pn结和击穿原理	(15)
1.2.3 pn结的电容效应和反向恢复时间	(16)
1.2.4 非穿通、穿通和电场截止结构	(16)
1.2.5 电力电子器件的分类	(17)
1.3 电流控制型器件的开关特性	(18)
1.3.1 双极型晶体管	(18)
1.3.2 门级可关断晶闸管	(21)
1.4 电压控制型器件的开关特性	(24)
1.4.1 功率场效应晶体管	(24)
1.4.2 静电感应晶体管/晶闸管	(29)
1.4.3 绝缘栅双极型晶体管	(31)
1.4.4 集成门极换流晶闸管	(38)
1.5 缓冲吸收电路	(47)
1.5.1 基本原理	(47)
1.5.2 关断缓冲用RCD吸收电路	(48)

1.5.3	复合式 Snubber 电路	(49)
1.5.4	能量回馈式缓冲吸收电路	(51)
	参考文献	(53)
第2章	电力电子电路拓扑研究——综合与分析	(54)
2.1	概述	(54)
2.2	对偶原理及其在电力电子电路中的应用	(54)
2.2.1	对偶原理	(54)
2.2.2	开关器件的对偶	(55)
2.2.3	对偶原理在电力电子电路中的简单应用	(58)
2.3	开关电路中电源和负载的性质	(59)
2.3.1	理想电源定义及其引申	(59)
2.3.2	电力电子电路中的电源/负载	(60)
2.4	电力电子电路基本拓扑	(60)
2.4.1	电源和负载的性质不同的基本拓扑	(60)
2.4.2	电源和负载均为电压源的基本拓扑	(61)
2.4.3	电源和负载均为电流源的基本拓扑	(62)
2.5	电路拓扑综合应用举例	(64)
2.5.1	电路拓扑综合的具体步骤	(64)
2.5.2	电路拓扑综合应用举例	(64)
2.6	6种基本 DC-DC 电路的分析	(67)
2.6.1	Buck 变换器	(67)
2.6.2	Boost 变换器	(69)
2.6.3	Buck-Boost 变换器	(71)
2.6.4	Cuk 变换器	(72)
2.6.5	Zeta 变换器	(74)
2.6.6	Sepic 变换器	(78)
2.7	电力电子电路最小单元及 PWM 开关	(81)
2.7.1	电力电子电路最小单元	(81)
2.7.2	最小单元在电路拓扑中的应用	(82)
2.7.3	PWM 开关建模	(83)
	参考文献	(89)
第3章	电力电子电路换流原理与应用	(91)
3.1	基本换流单元	(91)
3.2	晶闸管换流方法分类	(92)
3.2.1	电压式换流(脉冲换流)	(92)
3.2.2	电流式换流(谐振换流)	(93)
3.3	强迫换流电路的分析方法——相平面法	(94)
3.3.1	电压源激励下的串联谐振回路	(94)
3.3.2	电流源激励下的并联谐振回路	(95)
3.3.3	电压源与电流源同时存在的谐振回路	(95)

3.4	用相平面法分析电路举例	(96)
3.4.1	电容充电电路	(96)
3.4.2	能量补充电路	(97)
3.4.3	Wagner 斩波器	(97)
3.5	典型应用	(103)
3.5.1	电压型逆变器	(103)
3.5.2	电流型逆变器	(107)
	参考文献	(111)
第4章	谐振变换器和软开关技术	(113)
4.1	概述	(113)
4.2	准谐振变换器	(114)
4.2.1	零电流开关准谐振变换器	(115)
4.2.2	零电压开关准谐振变换器	(118)
4.2.3	零电压开关多谐振变换器	(122)
4.2.4	准方波 ZVS 变换器	(125)
4.2.5	谐振开关技术在三相电路中的推广	(127)
4.3	软开关技术	(130)
4.3.1	ZVS-PWM 和 ZCS-PWM 电路	(130)
4.3.2	零过渡 PWM 变换器	(134)
	参考文献	(137)
第5章	电压型 PWM 变频调速控制	(140)
5.1	概述	(140)
5.2	变频调速的基本原理	(140)
5.2.1	变压变频(VVVF)控制原理	(140)
5.2.2	异步电机变压变频时的机械特性	(142)
5.3	电压型 PWM 变频器	(144)
5.3.1	电压型 PWM 变频器的主回路	(144)
5.3.2	PWM 控制技术分类	(145)
5.3.3	PWM 控制性能指标	(146)
5.4	正弦 PWM 控制技术	(147)
5.4.1	电压正弦 PWM 技术	(148)
5.4.2	电流正弦 PWM 技术	(152)
5.5	磁通正弦 PWM 技术	(156)
5.6	优化 PWM 技术	(164)
5.7	随机 PWM 技术	(167)
	参考文献	(170)
第6章	多电平变换器原理及其控制	(171)
6.1	概述	(171)
6.2	多电平变换器的基本模型和分析方法	(173)
6.2.1	多电平变换器的基本模型	(173)

6.2.2	多电平变换器的特点和应用	(173)
6.2.3	多电平变换器基本单元分析法	(174)
6.3	二极管箝位型多电平变换器	(176)
6.3.1	二极管箝位型三电平变换器原理及分析	(176)
6.3.2	三电平逆变器的空间电压矢量模型	(178)
6.3.3	三相箝位型多电平变换器工作原理及分析	(180)
6.4	电容箝位型多电平变换器	(184)
6.5	通用箝位型多电平变换器	(186)
6.5.1	通用型多电平电路结构	(186)
6.5.2	通用型五电平电路结构	(187)
6.5.3	通用型多电平电路的派生结构	(190)
6.6	级联型多电平变换器	(190)
6.6.1	级联型多电平变换器的典型结构	(191)
6.6.2	级联型多电平变换器结构扩展	(193)
6.7	多电平变换器载波 PWM 控制	(196)
6.7.1	三电平载波 PWM 控制技术	(197)
6.7.2	多电平载波 PWM 技术	(199)
6.8	多电平空间矢量 PWM 技术	(203)
6.8.1	三电平空间矢量 PWM 控制	(203)
6.8.2	多电平空间矢量 PWM 技术	(208)
6.9	多电平 SVPWM 和载波 PWM 的统一	(220)
6.9.1	三电平 SVPWM 的载波调制形式	(221)
6.9.2	多电平空间矢量 PWM 的载波调制形式	(222)
	参考文献	(225)
第 7 章	电力系统无功及谐波治理	(227)
7.1	概述	(227)
7.2	无功功率和谐波的产生	(228)
7.2.1	无功功率、功率因数的定义	(228)
7.2.2	谐波和无功功率的来源	(234)
7.2.3	谐波和无功功率的危害	(235)
7.2.4	谐波和无功功率的消除和补偿	(236)
7.3	高功率因数电力电子装置	(236)
7.3.1	功率因数校正电路	(236)
7.3.2	PWM 整流电路	(247)
7.3.3	矩阵式变换器	(254)
7.4	无功补偿和有源滤波	(262)
7.4.1	静止无功补偿装置	(263)
7.4.2	有源电力滤波器	(267)
	参考文献	(276)
附录 A	SVPWM 变频调速异步电机的开环控制	(278)

绪 论

0.1 现代电力电子技术的基本概念

电力电子从英文的 Power Electronics 而来,最初译作功率电子学,相对于传统的模拟电子学和数字电子学来讲是一门后发展起来的崭新学科。在日语中电力这个词本身也代表着功率,因此,Power Electronics 被译作电力电子学(或技术)。在我国,开始有两种说法,搞电子出身的人喜欢用功率电子学,搞功率变换的人习惯用电力电子学,现在正慢慢统一于电力电子学(或技术)。

电力电子技术的历史可追溯到 1783 年伏特(Volta)对半导体现象的发现及 1897 年格雷兹(Graetz)发明的三相整流桥。随后,20 世纪 20 年代水银整流器的发明也是一大技术突破。但是真正现代意义的电力电子技术始于 1955 年美国通用电气(GE)公司发明的大功率硅整流二极管(SR;Silicon Rectifier)及 1957 年在此基础上进一步发明的晶闸管(Thyristor,也称 SCR;Silicon Controlled Rectifier)。

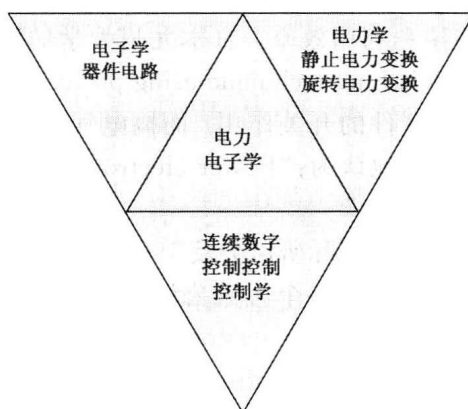


图 0.1 1973 年 Newell 博士给出的电力电子学的定义

在 1973 年的第四届国际电力电子专家会议上,Newell 博士首次给出了电力电子学的定义,即电力电子技术是电力(Power)、电子(Electronics)与控制(Control)技术之间的交叉学科(见图 0.1),它主要承担电能形式(电压、电流、频率、相位、相数等)的变换,其中的关键因素是电力半导体器件(Power Semiconductor Devices)日新月异的发展。随着微电子技术和控制技术的飞速发展,并与新型电力半导体器件,尤其是全控型可关断器件如可关断晶闸管(GTO; Gate Turn-off Thyristor)、大功率三极管(BJT; Bipolar Junction Transistor)、功率场效应晶体管(Power MOSFET)及其变换电路相结合,传统电力电子技术完成了向现代电力电子技术的飞跃。在 1980 年,美国田纳西大学 B. K. Bose 教授给出了一个电力电子技术的新定义(见图 0.2)。两种定义反映了传统电力电子技术和现代电力电子技术的巨大差别,以及现代电力电子技术的飞速发展,这些发展的结果是应用领域的在不断扩大。正是由于应用领域的这种

不断扩大,使人们对电力电子技术的认识及究竟什么是电力电子技术也产生了一定程度的差异,甚至产生了某种争论。

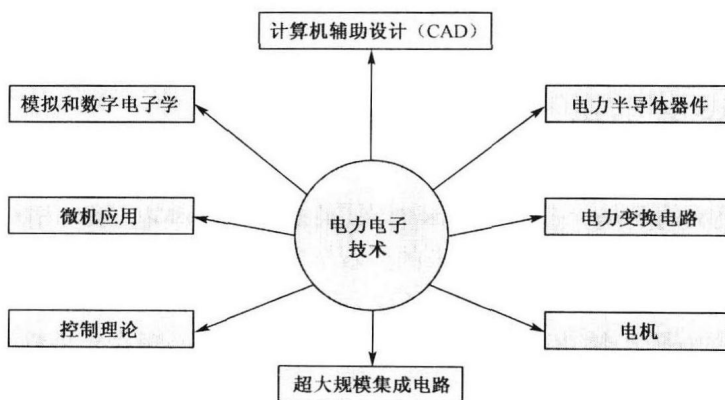


图 0.2 1980 年 B. K. Bose 教授给出的一个电力电子技术的新定义

如麻省理工学院(MIT)教授 Kassakian 认为:“The dominant application of electronics today is to **process information**. While all these applications require power. Power Electronics Circuits are principally concerned with **processing energy**. They convert electrical energy from the form supplied by the source to the form required by the load as efficiently as possible.” 这里强调的是电能的转换和利用效率。日本九州大学的原田耕介(Harada)先生则认为:“Power electronics is the switching technique using power semiconductor devices as switches.” 这里强调的是电力电子器件的开关作用。而搞电气传动出身的柏林工业大学 Heumann 教授则强调对电能的控制,他认为:“Power electronics covers the control of electrical energy using semiconductor devices.”

终于在 1998 年的西安电力电子国际研讨会及 1999 年的 IEEE APEC 会议上,美国杜克(Duke)大学的 T. Wilson 教授给出了一个大家公认的完整定义:“Power electronics is the technology associated with the efficient conversion, control and conditioning of electric power by static means from its available input form into the desired electrical output form. This technology encompasses the effective use of electrical and electronic components, the application of linear and nonlinear circuit and control theory, the employment of skillful design techniques, and the development of sophisticated analytical tools toward achieving the following purpose: The goal of power electronics is to control the flow of energy from an electrical source to an electrical load with high efficiency, high availability, high reliability, small size, light weight, and low cost.”

这也正是我们从 20 世纪 90 年代以来一直推倡的定义,即:现代电力电子技术乃是一种**电能处理技术**(Electrical Energy Processing Technique),即采用功率半导体器件和线路(Power semiconductor devices and circuitry)对电能进行**转换**(Conversion)、**控制**(Control)和**高效利用**(Efficient use)的一门技术。其核心在于利用功率半导体器件的开关作用,构成频率从零到兆赫兹、容量从几瓦到几十兆瓦之间任意组合的有功和无功电源,给各种负载供电,使电能的产生、传输和使用效率大大提高,并实现了用电装置的小型化、轻量化及原材料的大量节省,广泛地应用于电气传动,电力系统及各种电源系统等工业生产和民用部门。此外,电能质量的控

制及新能源的开发,电气设备的自动化控制,都将在很大程度上依赖于现代电力电子技术的进步和成就。

0.2 现代电力电子技术的发展和现状

0.2.1 电力电子器件的发展历程

现代电力电子技术和设备的发展是和电力电子器件的进步休戚相关的。电力电子器件即功率半导体器件,在 20 世纪 60 年代主要是指以晶闸管为代表的半控器件;80 年代后以可关断晶闸管(GTO)、大功率晶体管(BJT)、功率 MOSFET 为代表的自关断器件开始进入商品化阶段;到 90 年代初,传统功率半导体器件与微电子技术结合,生产出性能更高的复合器件,如绝缘栅双极晶体管(IGBT; Insulated Grid Bipolar Transistor)和集成门极换向晶闸管(IGCT: Integrated Gate-Commutated Thyristor)等,均以其高的开关频率和越来越大的功率获得广泛应用,占据今天电力电子器件发展和应用的主流地位。因此,可以将电力电子器件及设备制造技术的发展历程大致分为两个阶段:

1956—1979 年,以传统晶闸管(俗称可控硅/SCR)为代表的 AC-DC 整流及 AC-AC 变流器阶段。该阶段以 1957 年普通晶闸管的诞生为起点,传统电力电子器件(SCR 及其派生器件)占主导地位。该阶段电力电子装置主要是应用普通晶闸管或整流管将交流电整流为直流供给负载,以电化学、电解电源装置,电热冶金用电源及直流传动电力电子设备为三大支柱,直至今今天这些装置仍在大量生产和应用。

由于其他电力半导体器件的容量目前还无法与普通晶闸管竞争,因而以普通晶闸管为主功率器件的大型直流电动机调速、大功率同步电机传动及励磁、高压直流输电(HVDC: High-Voltage DC Transmission)、无功补偿(STATCOM: Static Var Compensator)等设备仍是目前电力电子行业重要的产品。优点是可用于大功率的场合中,多工作于自然换流状态,所以开关损耗小;缺点是工作频率低,电路功率因数低,对电网的污染严重。由于晶闸管只有导通可控,而关断不可控制,为典型的半控式器件,因而决定了在该阶段发展起来的强迫换相电压型逆变器体积庞大,控制复杂,很难实用化。

1980 年至今,现代电力电子器件(GTO, BJT/GTR, MOSFET, IGBT, IGCT)出现并商业化阶段。这些器件均为全控式器件,可以用于 DC-AC 逆变器及 DC-DC 斩波器中。优点是电路功率因数高,可工作在比较高的频率;缺点是器件常工作于 PWM 硬开关状态(与软开关相对应),因此开关损耗大。该阶段电力电子装置的核心技术是大功率交流传动,至今已发展成熟的有各种电压型、电流型、脉宽调制(PWM: Pulse Width Modulation)型逆变器供电的矢量控制调速方案,使得交流传动蓬勃发展,其调速性能可与直流传动相媲美,功率范围还可更大,在很多需要调速的场合,已替换了原来广泛应用的直流电机调速系统。

此外,现代电力电子变换设备不仅用于旋转装置,而且与日常生活开始密不可分,各种逆变技术的产品大大普及,并进入了家庭领域。除了交流调速装置以外,还包括 UPS、变频电源、微波炉、电磁灶及开关电源等。日本一位教授说过,离开了电力电子技术,我的生活将无法进行——上班时乘坐的是交流调速的地铁,下楼时乘坐的是交流调速的电梯,进屋后用的是变频调速的空调,照明用的是高频振荡的荧光灯,计算机用的是开关电源和不间断电源(UPS: Uninterrupted Power Supply)、厨房里用的是感应加热的电磁灶。

现代电力电子器件的发展和应用又包括单一型(GTO, BJT/GTR, MOSFET)和复合型器件(IGBT, IGCT等)两代。

单一型器件包括以门极关断(GTO)晶闸管、电力晶体管(GTR)为代表的电流型器件。随着GTO、GTR及各种形式的可关断器件的出现,电力电子设备从以SCR为代表的整流器阶段转向以GTO、GTR为代表的逆变器阶段。目前,GTO是容量仅次于普通晶闸管的电力半导体器件,所以它在电力电子设备中几乎垄断了大功率电压型逆变器和自换相电流型逆变器领域。如在电力机车的牵引系统中,GTO得到广泛应用,其制造及应用技术以日本三菱、瑞士ABB公司最为成熟,处于世界领先水平。GTO、GTR均是电流型控制器件,因而其开关增益均比较小,开关频率较低(一般在1~2kHz,最高不超过4kHz)。

以功率MOS场效应晶体管(MOSFET)为代表的电压型高频器件也是单一型器件的一种。功率场效应器件的兴起,为电力电子设备走向高频化领域奠定了重要的基础。由于材料及电力半导体器件工艺技术的限制,到目前为止,功率场效应晶体管的容量难以做得很大,因而功率MOSFET主要用来制作高频开关电源及其他小功率的变频电源。

复合型器件包括以绝缘栅双极型晶体管(IGBT)等为主的高频压控功率器件。为了解决器件高压与通态压降之间的矛盾,更为了解决GTR与GTO电流驱动的存储时间长、开关频率低、噪声大及大容量GTR和GTO需要较大的基(门)极驱动功率等问题,并克服功率MOSFET在目前电力半导体器件工艺技术及材料条件下难以制成高压大电流这一缺陷,人们研制成功了双机理复合器件,如IGBT、SIT(Static Induction Transistor)、SITH(Static Induction Thyristor)等。它们的出现,展示了广阔的应用前景。目前IGBT的开关频率可高达100kHz,很容易制成无噪声的IGBT变换器,以IGBT为功率器件的变换装置已进入大批量生产阶段,在家用电器、通信电源、电机驱动等各个领域得到广泛应用。

以集成门极换向晶闸管(IGCT)、注入增强栅晶体管(IGET)为代表的大功率电力电子器件也是复合型器件的一种。为进一步解决可控器件上高压大容量的问题,IGCT与IEGT得到迅速发展,其容量已与GTO相当,并开始大量使用。十几年前,人们还普遍认为,在电力半导体器件中最有前途的是MOS控制晶闸管(MCT; MOSFET-Controlled Thyristor)。MCT是一个MOS门控制的PNPN晶闸管,它可以在MOS门上加一个窄脉冲使其导通和关断。与其他电力半导体器件不同的是,MCT具有小单胞结构,而且器件具有大量并联而匹配的单胞。为了使器件有较高的成品率,必须具有高纯度、均匀性好的硅片和精细工艺技术。它的开关频率与IGBT差不多,但其低的通态压降是一个明显的优点,器件不存在二次击穿问题,其 dv/dt 与 di/dt 耐量可达 $2000V/\mu s$ 与 $20000A/\mu s$ 以上,故应用它可制成无缓冲电路的变换器。当时美国GE公司已有产品,Harris公司并已向市场供货。但是由于工艺和材料的限制,MCT的成品率极低、成本高昂,导致其应用前途渺茫,后来,GE和Harris公司相继放弃了MCT的研究和生产。

功率集成电路(PIC; Power Integrated Circuit)在小容量应用领域也得到迅速发展。由于其容量还非常小,所以要广泛使用还需要一定的时间,到目前为止,以PIC作为主功率器件的电力电子设备所占比重还比较小。

0.2.2 电力电子应用技术的发展现状

电力电子控制技术是将电的五大参量(电压、电流、频率、相数及相位),根据用电对象的不同要求进行变换的技术,在国民经济的各个部门中得到应用,其发展现状可概括为:

(1) 整流管及晶闸管自 20 世纪 50 年代发明至今,由于自身容量的不断增大和性能的不断完善,已经在交流调压、调功、电解、电镀、冶金、直流调速、交流调速等电力电子设备中广泛应用。其派生的半控器件在过去几乎渗透到电力电子技术应用的所有领域,其功率之大是其他电力半导体器件所无法比拟的。单机容量愈来愈大,如大型铝电解装置已达几十万甚至几百万千瓦,用于加热的大功率中频电源至今仍以晶闸管为主功率器件,交—交变频装置其单台容量已达数万千瓦,直流输电已达几千万千瓦。光控晶闸管因触发回路与阳、阴极间电位隔离,故在直流输电这一类大容量电力电子设备中得到了广泛的使用,是其他电力半导体器件无法在短期内取代的。

(2) GTO 和 GTR 及达林顿晶体管(DT; Darlingtong Transistor)的应用已趋成熟和饱和,在 IGBT 出现之前,它们进入了很多电力电子技术应用领域,如交流调速、直流调速、机车牵引、开关电源和中小功率 UPS 等。国外应用 GTO 变频技术最多的领域是轧钢和铁路,如矢量控制的 GTO 三电平逆变器已用于连轧及工业卷绕生产线,日本东京电力公司应用多重化技术制作的 GTO 变换器已达 11000kVA。GTO 斩波器用于电力机车传动系统后,改善了电力机车的工作性能,省掉了制动过程中的庞大电阻。在 GTR 变频器方面,过去从事生产的公司(或厂家)很多,目前无论国内还是国外,GTR 变频器多已被 IGBT 变频器所替代。

(3) 功率 MOSFET、IGBT 等高频器件得到广泛应用,使变频器的输出波形大为改观,谐波含量大为减小,且解决了 GTR、GTO 变频器工作时产生的噪声问题。高频电力半导体器件及配套件的出现,使电力设备的工作频率最高已达几兆赫兹,体积成倍缩小。据估计,我国 1997 年变频器市场销售额接近 10 亿元,2005 年变频器市场销售额接近 50 亿元,2010 年变频器市场销售额接近 90 亿元。变频器的大量采用使我国的能源得到了很大的节约,对改进生产工艺水平、提高产品质量、降低能耗起到了很大的作用。除通用变频器外,中频磨床电动机用逆变器及高频逆变器亦获得了批量应用。为了进一步提高变频器的性能,无速度传感器矢量控制技术 & 死区时间补偿技术获得了广泛使用。高频无噪声变频器已进入家用电器领域及军工兵器领域,尤其在小容量领域,PIC 也开始得到应用,应用 PIC 技术的电力电子装置已用于如电视机、音响、洗衣机等家用电器,复印机等办公设备,实现了高效化、高频化、无噪声化及智能化。应用高频器件制成了高效无噪声开关电源取代了传统的线性电源,应用于程控交换机等领域,改善了通信系统的质量。此外,高频电力电子应用技术及高频传感器、高频电容、高频抗干扰技术等配套件的迅猛发展和日趋完善,使电力设备的高频化应用已成为现实,其应用领域迅速扩大。

(4) IGCT、IEGT 已在大容量电力电子设备中得到应用。20 世纪 90 年代中后期 IGCT 和 IEGT 的诞生,对高压大电流电力变换控制系统是一个突破,至今已获得了飞速的发展。目前,国内外均有成套装置应用到轧钢、造纸、水泥、煤炭等工业领域和电动汽车、城市轻轨、机车牵引、船舶推进等交通工具中。

(5) 可关断电力半导体器件的驱动和保护技术日趋完善,为电力电子设备的广泛应用奠定了坚实的基础。自关断器件的基极(或门极、栅极)的驱动和快速保护在应用中是一个关键问题,为解决这些问题,世界上许多著名的公司在生产可关断器件的同时,开发生产了配套的驱动和保护电路,如日本富士电机公司生产的 GTR 厚膜驱动电路(EXB356、357)、IGBT 厚膜驱动电路(EXB840、841、850、851),日本三菱电机公司生产的 GTR 厚膜驱动电路(M572XX 系列)、IGBT 厚膜驱动电路(M579 系列),东芝公司生产的 MOSFET 及 IGBT 混合驱动电路(TLP250),国产的 GTR、IGBT、MOSFET 及 GTO 厚膜驱动和保护电路(HL 系列)。还有以

法国汤姆森(THOMSON)公司生产的智能晶体管驱动电路(UAA4002、UAA4003)及美国国际整流器(IR)公司生产的 MOSFET 和 IGBT 集成驱动电路(IR21 系列)。

0.2.3 现代电力电子技术的发展趋势

20 世纪 80 年代以来,以各种新型电力半导体器件组成的电力电子装置得到了广泛的应用,从而使得现代电力电子技术开始向着**高频,高效(低开关损耗),高功率密度(组合集成化),高功率因数及高压大功率**的方向迅速发展,如图 0.3 所示。在中功率范围内,各种新型可关断器件如 GTO,BJT,IGBT 等已完全取代过去传统的半可控器件 SCR,在此基础上发展起来的新型 PWM 技术,谐振软开关技术及全数字化控制技术已成功地应用在各种电源系统及电机调速系统中。

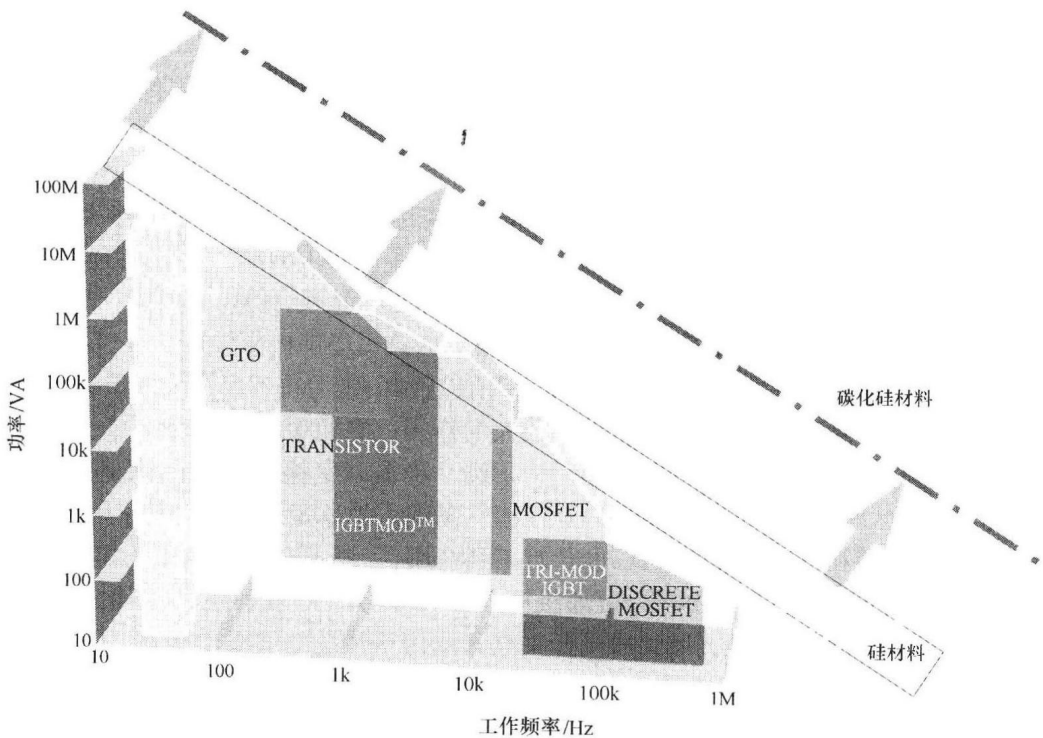


图 0.3 各种功率半导体器件的应用范围及发展趋势

(1) 高频化：高频化是电力电子设备技术含量高低的重要标志,提高开关频率降低了功率器件和配套元件及整个装置的体积和重量,同时还消除了低次谐波,以实现高质量的电能控制。SCR、GTO 的工作频率一般为 50~500Hz,而 IGBT、MOSFET 则可达 10k~1MHz。

(2) 高效率：由于开关频率越来越高,导致开关损耗增大,需要采用谐振开关及软开关技术以减少器件的开关损耗。这些新的控制技术大大提高了电力电子设备的能量转换效率及性能,在高频电源中得到广泛应用。

(3) 高电压大功率：电力电子器件的耐压越来越高、容量越来越大,加上高压多电平变换器(Multi-level Converter)的出现,使得电力电子装置的容量可以做到几十兆瓦,应用于高电压大功率的场合,带来巨大的经济效益。目前一些器件已达到的容量如下。

GTO: 4500V/4500A, 6000V/6000A 已商品化,目前研制水平已达 8000V/8000A;

IGBT: 3300V/2400A, 6500V/1200A 已商品化,目前研制水平已达 6500V/2500A;

IGCT: 4500V/4000A,已商品化,目前研制水平已达 6000V/6000A。

(4) 高功率密度(集成化):现代电力电子器件集合了多种器件优点,功率密度大大提高,功能更全面。如 BJT 与 MOSFET 组合成 IGBT,在电动机驱动装置、中频电源领域,IGBT 已取代达林顿晶体管(DT)。使用 IGBT 的整流器和逆变器可提高效率、减小噪声,并将电力电子设备的重量和体积大大减少;而 SCR、GTO(电流大但开关频率低)加上 MOSFET(高频)构成了 MCT、IGCT,它们将逐步的取代 SCR,并逐步成为超大容量电力电子设备的首选器件;而 IGBT 加上驱动保护电路就构成智能模块(IPM: Intelligent Power Module),IPM 再加上控制、软开关技术就构成集成电力电子模块(IPEM: Integrated Power Electronics Module)。各种电力电子设备的小型化,超大规模集成化、模块化大大减轻了成套装置设计的工作量,为批量化生产带来了很大方便。

(5) 高功率因数:可以减少系统的无功流动,提高电能系统的质量。如传统的 SCR 相控整流功率因数(PF: Power Factor = $\cos\varphi$)很低,谐波污染较大;而二极管不控整流则功率因数较高,但仍有谐波污染;目前大力研究的 PWM 整流技术具有功率因数校正(PFC: Power Factor Correction)作用, $\cos\varphi = 1$,谐波污染或者说谐波总畸变率(THD: Total Harmonics Distortion)可以做得很低。

(6) 全数字化控制:由单片机全面向 DSP(数字信号处理器)过渡。现代电动机控制器的基本要求是信号处理快而精确,实时完成复杂的控制算法,DSP 精确而快速的 A/D 转换及 PWM 信号输出,为全数字化控制的实现提供了可能。如 TI 公司的 TMS320-F240/F2407/F2812/F28335,就是专为电力电子、电机控制设计的 DSP 芯片,功能强大,集成度高,非常适于做电力电子和电机控制。作为实现信号处理和外设控制的硬件核心,DSP 的应用领域将不断的拓展。

0.3 现代电力电子技术的基本特征

0.3.1 以弱电控制强电,成为连接信息产业和传统产业的必要环节

21 世纪高新技术迅速发展,方兴未艾,最突出的特点是:① 巨型计算机取得惊人的突破;② 微型计算机迅速进入我们日常生活及工业生产的各个方面;③ 微电子技术取得重大进展;④ 通信技术正在走向数字化和个人化;⑤ 多媒体技术日新月异;⑥ 生物技术、航天技术、激光技术、超导技术等新技术正在蓬勃发展。

所有这一切表明:如果说 19 世纪是个蒸汽时代,20 世纪是电气和内燃机时代的话,那么 21 世纪无疑将进入一个“信息时代”。信息社会的特点是信息的大量存储和快速传递。但由于信息不能直接产生能源、制造产品,故在信息社会中传统产业将继续存在下去。因为作为信息时代重要标志的计算机是第一次电子革命——大规模集成电路(VLSI: Very Large Scale Integrated Circuit)的产物。但是集成电路本身是弱电,不能直接控制和驱动电气时代工业革命的主力——电机及各种电力设备。以功率集成器件(IPM: Integrated Power Module)为代表的电力电子技术所具有的独特的弱电控制强电的作用,使其成为信息产业和传统产业之间的一个必不可少的接口,必将形成一个庞大的产业。在器件、线路或控制技术任一领域出现突破,均会使系统性能进一步提高,成本进一步下降,从而产生巨大的经济效益,有人称其为第二次电子革命。正如工业社会中的拖拉机使从事农业生产的人数大大减少一样,电力电子技术

加计算机控制构成的交流电机变频调速传动系统已广泛应用在数控机床,加工中心及机器人生产线中,实现了整个工厂的全面自动化,使人类从繁重的传统工业劳动中解放出来。

可以说:电力电子技术是信息产业与传统产业之间的桥梁或接口。信息产业要发展,传统产业要改造,都离不开电力电子。离开电力电子技术,信息社会将成为空中楼阁;同时,离开电力电子技术,传统产业将走进能源枯竭和污染环境的绝路。

0.3.2 可以节约电能,缓解能源危机,减少环境污染

当我们展望未来,目睹工业革命给人类带来巨大进步的同时,不能忘记事物的另一方面,我们生活的这个星球将面临着两个严重的危机和挑战:即能源的日益枯竭和环境的不断恶化。能源给人类带来巨大的财富,然而,在对大自然贪婪的索取中,在为大自然的恩赐而死命的拚搏中,人类已经陷入了自己设置的重重陷阱之中。世界石油储备只够使用 30~50 年,我国剩余的可采量只有世界人均量的 1/10,我国煤炭的人均储量占世界平均值的 1/2。我国能源生产和消费已列世界第二,但仍远远满足不了工业生产和人民生活发展的需要。由于缺电,拉闸限电成为常事,正常的生产秩序被打乱,造成巨大的经济损失;另一方面,在能源十分紧张的情况下,浪费现象却十分严重。而且大量的煤炭和石油没有经过任何深加工就被烧掉,不但热利用率低,还造成环境的极度污染。目前城市大气污染总量的半数以上来自燃油汽车系统,汽车废气排放过度,已造成全球性的温室效应。解决交通拥挤、环境污染问题和节约能源的重要途径之一是发展高速公共交通工具(地铁,城市轻轨)及电动汽车和电力机车,其核心技术就是 20 世纪 80 年代以来飞速发展起来的现代电力电子及交流电机传动技术。此外,在轧钢、造纸、水泥制造、矿井提升、轮船推进器等工业和民用领域中也广泛使用大中容量交流电机调速系统。此时,交流调速系统的应用不但可达到节能的目的,还可实现整个系统的性能最佳,改善工艺条件,并大大提高生产效率和产品质量。

我国国民生产总值已进入世界前茅,但是单位产值能耗非常大,是工业发达国家的几倍,造成能源的很大浪费。根据国家经贸委 1995 年的全面调查统计,我国发电量的 60%~70% 左右用于推动电动机做功,其中 90% 的电机是交流电动机,大部分为直接拖动。由于采用直接恒速拖动,每年造成大量的能源浪费。再考虑到电力从发出,到传输和使用中,如调峰、励磁、网损、无功及各种用电设备上的浪费,全国总的数量加起来十分惊人。如占工业用电 30% 以上的各种风机、泵类负载全国约 4700 万台,1.3 亿千瓦(kW)。由于此类负载工况变化较大,如采用现代电力电子及交流调速技术实现变速运行,节能效果明显。以平均节电 20% 计算,对全国来说年节电 500 亿度(kW·h),相当于 1500 万 kW 发电站的年发电量,其投资仅为电站增容投资的 1/3~1/2,并且由用户承担,一般 1 年多即可收回。既节约了国家几百亿元的电力建设投资,还可为制造企业带来 700~1000 亿元的市场,同时可以相应减少 2000 万吨发电用煤,万吨二氧化硫和 1200 万吨二氧化碳的污染排放,有很好的经济效益和社会、环境效益。总之,能源资源的开发,投资大、周期长、见效慢;而节约能源的技术工艺改造,却投资少、周期短、见效快。电能是一种二次能源,节电必然节约一次能源,如煤炭、石油、水能等,节电必然节约大量的投资,可以相对少建电厂,少修铁路,少开煤矿,是事半功倍的好事。节电既能有效解决能源短缺,又能节约煤炭,还可保护环境。在城市供水及污水处理、电厂降耗、减少废气污染的环保工程中,交流电机变频调速技术发挥着巨大作用,带动了环保产业的发展。