



21世纪全国本科院校电气信息类**创新型**应用人才培养规划教材

电力电子技术及应用

主 编 张润和



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



中国电力出版社“十二五”规划教材
中国电力出版社“十二五”规划教材

电力电子技术应用



中国电力出版社

21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材

电力电子技术及应用

主 编	张润和	
副主编	郝整清	
参 编	田立欣	刘广忱
	田桂珍	刘 磊



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

电力电子技术是 20 世纪 70 年代发展起来的新兴技术,是高新技术产业发展的主要基础技术之一,也是传统产业改造的重要手段。本书主要从器件、电路和电力电子开关器件的辅助电路等方面介绍了典型电力电子装置在电气工程中的应用,并初步探讨了电力电子装置对电网的影响和可靠性问题。本书注重学科体系的系统性、完整性和教学所需的循序渐进性,各种变换电路的知识点相对集中,便于全面理解和掌握。重点和难点部分尽量内容翔实,便于自学。

本书可作为高等院校自动化、电气工程及自动化和相关专业的本科教材,也可作为从事电力电子技术应用领域的科研工作人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术及应用/张润和主编. —北京:北京大学出版社, 2008.8

(21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-13577-8

I. 电… II. 张… 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(2008)第 045122 号

书 名: 电力电子技术及应用

著作责任者: 张润和 主编

策 划 编 辑: 房兴华 李 虎

责 任 编 辑: 房兴华

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-13577-8/TM • 0023

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: 北京汇林印务有限公司

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 24.25 印张 564 千字

2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 38.00 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

电力电子技术是 20 世纪 70 年代发展起来的新兴技术,是高新技术产业发展的主要基础技术之一,也是传统产业改造的重要手段。随着各种新型电力电子器件的不断涌现,电力电子技术在国民经济发展中起着越来越重要的作用。各种新颖变换器的拓扑结构及控制方法层出不穷,使变换器的性能更加完善和提高。因此,为适应新时期对自动化专业“应用技术主导型”人才的培养要求,编者结合多年的教学经验、教改成果和科研积累,编写了本书。

本书注重学科体系的系统性、完整性和教学所需的循序渐进性。各种变换电路的知识点相对集中,便于全面理解和掌握。在系统学习理论知识的基础上,能正确运用到工程实际中去,注重理论与实际相结合,加强了工程意识。同时在内容上充分考虑了与后续课程的衔接,做到既打好基础,又尽量避免重复。重点和难点部分尽量翔实,便于自学。各章节内容既有联系,又相对独立。因此,在使用本教材时,可根据教学计划的要求进行适当的删减。本书授课学时一般为 40~64 学时,可根据课程体系需要调整,合理安排。为了取得更好的教学效果,每章后均有本章小结和习题,以便于巩固复习。全书在方法上力求简明,突出重点,强调基本概念和分析问题的思路。

本书主要介绍 3 方面的内容。在器件方面:除了传统的晶闸管器件之外,主要介绍各种全控型自关断器件和新型功率半导体器件,如 PIC、IPM 等;对电力电子开关器件的辅助电路重点介绍了常用的驱动电路、缓冲电路和保护电路。在电路方面:着重分析常见的 DC/DC, DC/AC, AC/DC 和 AC/AC 这 4 类基本变换电路的拓扑结构、基本工作原理、分析方法和工程设计方法,并且专门讨论了谐振软开关技术,以适应变换电路高频化的发展趋势。在应用方面:从组合变流电路的角度结合各种变换电路的具体应用,介绍了典型电力电子装置在电气工程中的应用,并就电力电子装置对电网的影响和可靠性问题作了初步的探讨。

本书可作为高等院校自动化、电气工程及自动化和相关专业的本科教材,也可作为从事电力电子技术应用领域的科研工作人员的参考用书。

本书由内蒙古工业大学张润和任主编。全书共分 10 章,绪论、第 4、6、8 章由张润和编写,第 1、2 章由内蒙古工业大学田立欣编写,第 3 章由内蒙古大学郝整清编写,第 5 章由内蒙古工业大学刘广忱编写,第 7、9 章由内蒙古工业大学田桂珍编写。全书由张润和统稿。内蒙古工业大学刘磊协助绘制了部分插图。在此对本书所引用的参考文献的所有作者一并表示衷心的感谢!

由于编者水平所限、经验不足,书中难免存在一些缺点和不足,殷切希望广大读者与同行们批评指正。

编 者

2008 年 6 月

北京大学出版社电气信息类教材书目(已出版)

欢迎选订

序号	标准书号	书名	编著者	定价
1	978-7-301-10759-1	DSP 技术及应用	吴冬梅 张玉杰	26
2	978-7-301-10760-7	单片机原理与应用技术	魏立峰 王宝兴	25
3	978-7-301-10765-2	电工学	蒋 中 刘国林	29
4	978-7-301-10766-9	电工与电子技术(上册)	吴舒辞 朱俊杰	21
5	978-7-301-10767-6	电工与电子技术(下册)	徐卓农 李士军	22
6	978-7-301-10699-0	电子工艺实习	周春阳	19
7	978-7-301-10744-7	电子工艺学教程	张立毅 王华奎	32
8	978-7-301-10915-6	电子线路 CAD	吕建平 梅军进	34
9	978-7-301-10764-1	数据通信技术教程	吴延海 陈光军	29
10	978-7-301-10768-3	数字信号处理	阎 毅 黄联芬	24
11	978-7-301-10756-0	现代交换技术	茅正冲 姚 军	30
12	978-7-301-10761-4	信号与系统	华 容 隋晓红	33
13	978-7-301-10762-5	信息与通信工程专业英语	韩定定 赵菊敏	24
14	978-7-301-10757-7	自动控制原理	袁德成 王玉德	29
15	978-7-301-11443-8	高频电子线路	宋述祥 周冬梅	31
16	978-7-301-11507-7	微机原理与接口技术	陈光军 傅越千	34
17	978-7-301-11442-1	MATLAB 基础及其应用教程	周开利 邓春晖	24
18	978-7-301-11508-4	计算机网络	郭银景	31
19	978-7-301-12178-8	通信原理	隋晓红 钟晓玲	32
20	978-7-301-12175-7	电子系统综合设计	郭 勇 余小平	25
21	978-7-301-11503-9	EDA 技术基础	赵明富 李立军	22
22	978-7-301-12176-4	数字图像处理	曹茂永	23
23	978-7-301-12177-1	现代通信系统	李白萍 王志明	27
24	978-7-301-12340-9	模拟电子技术	陆秀令	28
25	978-7-301-13121-3	模拟电子技术实验教程	谭海曙	24
26	978-7-301-11502-2	移动通信	郭俊强	22
27	978-7-301-11504-6	数字电子技术	梅开乡	30
28	978-7-301-10597-5	运筹学	徐裕生 张海英	20
29	978-7-5038-4407-2	传感器与检测技术	祝诗平	30
30	978-7-5038-4413-3	单片机原理及应用	刘 刚 秦永左	24
31	978-7-5038-4409-6	电机与拖动	杨天明 陈 杰	27

序号	标准书号	书名	编著者	定价
32	978-7-5038-4411-9	电力电子技术	樊立萍 王忠庆	25
33	978-7-5038-4399-0	电力市场原理与实践	邹 斌	24
34	978-7-5038-4405-8	电力系统继电保护	马永翔 王世荣	27
35	978-7-5038-4397-6	电力系统自动化	孟祥忠 王 博	25
36	978-7-5038-4404-1	电气控制技术	韩顺杰 吕树清	22
37	978-7-5038-4403-4	电器与 PLC 控制技术	陈志新 宗学军	38
38	978-7-5038-4400-3	工厂供配电	王玉华 赵志英	34
39	978-7-5038-4410-2	控制系统仿真	郑恩让 聂诗良	26
40	978-7-5038-4398-3	数字电子技术	李 元 张兴旺	27
41	978-7-5038-4412-6	现代控制理论	刘永信 陈志梅	22
42	978-7-5038-4401-0	自动化仪表	齐志才 刘红丽	27
43	978-7-5038-4408-9	自动化专业英语	李国厚 王春阳	32
44	978-7-5038-4406-5	集散控制系统	刘翠玲 黄建兵	25
45	978-7-5038-4402-7	传感器基础	赵玉刚 邱 东	23
46	978-7-5038-4396-9	自动控制原理	潘 丰 张开如	32
47	978-7-301-10512-2	现代控制理论基础 (国家级十一五规划教材)	侯媛彬	20
48	978-7-301-11151-2	电路基础学习指导与典型题解	公茂法 刘 宁	32
49	978-7-301-12326-3	过程控制与自动化仪表	张井岗	36
50	978-7-301-12327-0	计算机控制系统	徐文尚	28
51	978-7-5038-4414-0	微机原理及接口技术	赵志诚 段中兴	38
52	978-7-301-10465-1	单片机原理及应用教程	范立南	30
53	978-7-5038-4426-4	微型计算机原理与接口技术	刘彦文	26
54	978-7-301-12562-5	嵌入式基础实践教程	杨 刚	30
55	978-7-301-12530-4	嵌入式 ARM 系统原理与实例开发	杨宗德	25
56	978-7-301-13676-8	单片机原理与应用及 C51 程序设计	唐 颖	30
57	978-7-301-13577-8	电力电子技术及应用	张润和	38
58	978-7-301-12393-5	电磁场与电磁波	王善进	22
59	978-7-301-12179-5	电路分析	王艳红	40
60	978-7-301-12380-5	电子测量与传感技术	杨 雷	34

电子书(PDF 版)、电子课件和相关教学资源下载地址: <http://www.pup6.com/ebook.htm>, 欢迎下载。

欢迎免费索取样书, 请填写并通过 E-mail 提交教师调查表, 下载地址: <http://www.pup6.com/down/教师信息调查表 excel 版.xls>, 欢迎订购。联系方式: 010-62750667, xufan666@163.com, lihu80@163.com, lipt2007@163.com, linzhangbo@126.com, 欢迎来电来信。

目 录

第 0 章 绪论	1
0.1 电力电子技术的形成及特点	1
0.2 电力电子技术的发展概况	2
0.3 电力电子技术的应用	5
0.4 电力电子技术研究的内容	7
0.5 电力电子技术课程的性质、任务及要求	10
习题	11

第 1 篇 电力电子开关器件和辅助电路

第 1 章 电力电子开关器件	12
1.1 电力电子开关器件概述	12
1.2 功率二极管	16
1.3 晶闸管	20
1.4 门极可关断晶闸管	25
1.5 电力晶体管	29
1.6 电力场效应晶体管	34
1.7 绝缘栅双极型晶体管	38
1.8 其他新型电力电子开关器件	41
本章小结	48
习题	48
第 2 章 电力电子开关器件的辅助电路	50
2.1 电力电子开关器件的驱动电路	50
2.2 电力电子开关器件的缓冲电路	60
2.3 电力电子开关器件的保护电路	64
2.4 电力电子开关器件的串联与并联	69
2.5 电力电子开关器件的散热	74
本章小结	78
习题	78

第 2 篇 电力电子变换电路

第 3 章 直流变换电路	80
3.1 直流变换电路概述	80
3.2 降压斩波电路	81

3.3 升压斩波电路	88
3.4 复合型直流变换电路	94
3.5 多象限直流变换电路	99
3.6 全桥式直流斩波电路	102
3.7 多相多重直流变换电路	106
3.8 带隔离变压器的直流变换电路	108
3.9 直流变换电路的设计	116
本章小结	121
习题	121
第4章 无源逆变电路	123
4.1 无源逆变电路概述	123
4.2 电压源单相方波逆变电路	126
4.3 三相方波逆变电路	133
4.4 脉宽调制型逆变电路	139
4.5 SPWM 的实现方法	148
4.6 SPWM 的优化技术	153
4.7 逆变电路的控制	156
4.8 电压空间矢量 PWM 控制	161
4.9 多电平逆变电路	166
4.10 多重逆变电路	168
4.11 无源逆变电路设计举例	172
本章小结	179
习题	180
第5章 整流电路	183
5.1 整流电路概述	183
5.2 桥式不可控整流电路	184
5.3 相控整流电路	189
5.4 带平衡电抗器的相控整流电路	214
5.5 交流侧电抗对相控整流电路性能的影响	218
5.6 相控整流电路的谐波和功率因数	222
5.7 相控整流电路的多重化	226
5.8 相控有源逆变电路	229
5.9 PWM 整流电路	234
5.10 相控整流电路设计举例	242
本章小结	246
习题	246
第6章 交流变换电路	249
6.1 交流变换电路概述	249
6.2 单相交流调压电路	252
6.3 三相交流调压电路	262

6.4 交流调功器和交流无触点开关.....	268
6.5 三相交流调压电路设计举例.....	271
6.6 相控式交交直接变频电路	274
6.7 矩阵式变频电路	284
本章小结	289
习题	290
第 7 章 谐振软开关技术	292
7.1 谐振软开关的基本概念	292
7.2 准谐振与多谐振变换电路	295
7.3 零开关 PWM 变换电路	302
7.4 零转换 PWM 变换电路	309
7.5 直流环节并联谐振型逆变电路.....	313
7.6 谐振软开关技术的发展	319
本章小结	322
习题	322
 第 3 篇 电力电子技术的应用	
第 8 章 电力电子技术在电气工程中的应用	323
8.1 直流电动机调速系统	323
8.2 晶闸管无换向器电动机	333
8.3 异步电动机调速系统	335
8.4 开关稳压电源	340
8.5 不间断电源	341
8.6 静止无功补偿装置	346
8.7 有源电力滤波器	351
8.8 有源功率因数校正电路	353
8.9 高压直流输电	356
本章小结	357
习题	358
第 9 章 电力电子装置对电网的影响和可靠性	359
9.1 谐波的特性及其抑制	359
9.2 电磁干扰及其抑制	363
9.3 电力电子装置的可靠性	366
本章小结	372
习题	372
部分习题参考答案	373
参考文献	375

第0章 绪 论

教学提示：电力电子技术是利用电力电子器件构成各种变换电路或装置，对电能进行控制和转换的新兴技术。近年来很多新技术的应用与发展都是以电力电子技术为基础的。本章主要介绍电力电子技术的形成和特点、发展概况、应用领域和所研究的内容，以及本课程的基本要求。

教学要求：通过本章的学习，要求明确什么是电力电子技术及所具有的特点；了解电力电子技术所研究的内容、应用领域及发展前景；明确本课程学习的基本要求。

0.1 电力电子技术的形成及特点

电力电子技术是现代电工技术中最活跃的一门边缘学科技术，其应用范围十分广泛。它能根据用电场合的不同而改变电能的应用方式，即所谓“变流”，使电能的应用更好地满足各种不同负载所期望的最佳能量供应形式和最佳控制，通过功能和性能的提高获得良好的节能效果，产生经济效益和社会效益。因此，电力电子技术被认为是电能应用的优化技术。国际电气和电子工程师协会(IEEE)的电力电子学会对电力电子技术的定义是：“有效地使用电力半导体器件、应用电路和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，它包括电压、电流、频率和波形等方面的变换。”因而，电力电子技术的发展是以电力电子器件为核心，并伴随着变换技术和控制技术而发展的。

电力电子技术是应用于电力领域中的电子技术，是一种电力变换技术，它所变换的功率从1W以下到数百MW甚至达到GW。电力电子技术是横跨电子技术、电力技术和控制技术的新型交叉学科，并随着科学技术的发展又与电磁学、固态物理学、电机工程、现代控制理论、仿真与计算、计算机科学等许多学科密切相关，已发展成为一门多学科相互渗透的综合技术学科。

电力电子学这一名词是20世纪60年代出现的。“电力电子学”和“电力电子技术”相比，其实际的内容并没有很大的区别，只是分别从学术和工程技术两个不同角度来称呼。1974年，美国的W. Newell用如图0.1所示的倒三角形对电力电子学进行了描述，这一观点被学术界普遍接受。

(1) 电力电子技术和电子技术有其相同之处，也有不同之处。电子技术也称为信息电子技术，它是与电子器件、电子电路以及由各种电子电路所组成的电子设备和系

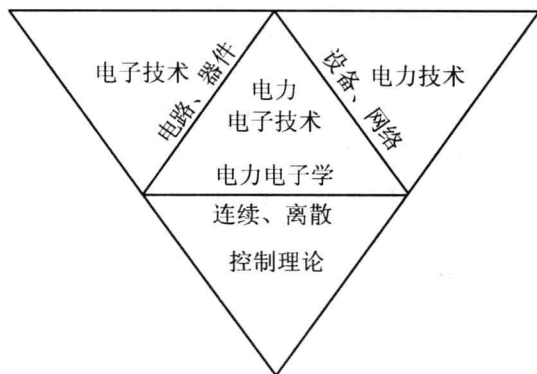


图 0.1 表征电力电子技术的倒三角形

统有关的科学技术。主要来研究电子器件, 以及利用电子器件来处理信息电路中电信号的产生、变换、处理、存储、发送和接收等问题。电力电子技术中的电力电子器件和电力电子电路分别与电子技术中的电子器件和电子电路相对应。从器件的制造技术上讲两者同根同源, 从电路的分析方法上讲也基本一致, 但电力电子技术主要用于电力变换和控制。在电子技术中的电子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了避免功率损耗过大, 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, 也是它们的本质区别。

(2) 电力电子技术广泛应用于电气工程中, “电力技术”这一名称在我国称为“电气工程”, 它是一门涉及发电、输电、配电及电力应用的科学技术。由于各种电力电子装置广泛应用于高压直流输电、电解、励磁、电力机车牵引、交直流电力传动、高性能的交直流电源等电力系统和电气工程中, 因此, 通常把电力电子技术归属于电气工程学科。随着电力电子技术的不断进步, 将大大推动电气工程实现现代化进程。

(3) 控制理论广泛应用于电力电子技术中, 它使电力电子装置和系统的性能日益优越和完善, 以满足人们的各种需求。电力电子技术实质上是将现代电子技术和控制技术引入到传统电力技术领域实现电力变换和控制, 可以看作弱电控制强电的技术, 是弱电和强电之间的接口。而控制理论则是实现这种接口的强有力的纽带。另外, 控制理论和自动化技术是密不可分的, 而电力装置则是自动化技术的基础元件和重要支撑技术。

0.2 电力电子技术的发展概况

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。按照电力电子器件的发展, 电力电子技术的发展大体可划分为两个阶段。

0.2.1 传统电力电子技术阶段

1957—1980 年为传统电力电子技术阶段。自从 1957 年美国通用电气公司研制出第一只晶闸管(也称可控硅), 电力电子学真正成了一门独立的学科。一方面由于其功率变换能力有了根本性的突破; 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, 使电子技术应用到电气工程领域中, 以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。以晶闸管为核心的电力电子电路, 在电能变换领域得到迅速而广泛的应用, 变流装置由旋转方式变为静止方式, 具有效率高、体积小、重量轻、寿命长、噪声小、便于维护、易于控制、响应快等优点。在随后的 20 年内, 随着晶闸管特性不断的改进和提高, 晶闸管已经形成了从低压小电流到高压大电流的系列产品。同时还研制出一系列晶闸管的派生器件, 如快速晶闸管、逆导晶闸管、双向晶闸管和光控晶闸管等器件, 大大地促进了各种电力变换器在冶金、交通运输、化工、机车牵引、矿山等行业的应用, 促进了工业技术的进步, 开创了电力电子技术的第一阶段, 即传统电力电子技术阶段。

尽管晶闸管及其派生器件在电压、电流方面仍有一定的发展余地, 但也存在很多不足, 阻碍了它的继续发展。

(1) 由于是半控型器件, 因此要想随时关断这些器件必须要有强迫关断电路, 使变换电路复杂、控制复杂、整机体积增大、效率降低、可靠性下降。

(2) 由于器件的开关速度偏低, 一般情况下低于 400Hz, 大大限制了它的应用范围。

(3) 相控运行方式会对电网造成严重的谐波污染, 而且电路功率因数降低。

因此, 随着工业生产的发展, 迫切要求新的器件和变换技术、控制技术的出现, 以改进和取代传统电力电子技术。

0.2.2 现代电力电子技术阶段

1980 年至今称为现代电力电子技术阶段。20 世纪 80 年代以后, 相继出现了各种高速、全控型电力电子器件(也称自关断器件), 如门极可关断晶闸管、双极型功率晶体管、功率场效应晶体管、绝缘栅双极型晶体管等。全控型器件的特点是: 通过对门极(基极、栅极)的控制既可使其开通又可使其关断, 它们的开关速度普遍高于晶闸管, 可用于开关频率较高的电路。新器件的出现推动了变换器的变革, 变换器中的普通晶闸管逐渐被这些器件所替代, 新型结构的变换电路随之出现, 把电力电子技术推到了一个新的发展阶段。采用全控型器件构成的变换电路, 其主要控制方式为脉冲宽度调制方式(PWM)。PWM 控制技术在电力电子技术中占有十分重要的地位, 它使电路的控制性能大大改善, 使以前难以实现的功能得以实现, 对电力电子技术的发展产生了深远的影响。另外, 电力电子学作为一门交叉学科, 反过来又向其邻近的学科渗透, 尤其是在电工技术领域中也出现了前所未有新的发展局面。

特别是在 20 世纪 80 年代中期诞生了功率集成电路(PIC), 它将电力电子器件与驱动、保护、检测电路集成在一块芯片上, 开辟了电力电子器件智能化的方向, 使应用电路的结构大为简化。不仅方便了电力电子系统的设计, 而且也有利于提高系统的可靠性, 使电力电子技术和应用范围进一步拓宽。不同的功率集成电路由于侧重的性能、要求不同, 有的被称为高压集成电路(HVIC)、有的被称为智能功率集成电路(SPIC)或智能功率模块(IPM), 目前这类型器件发展得非常迅速。

电力电子技术的发展还与控制技术的发展紧密相关。控制电路经历了由分立元件到集成电路的发展阶段, 现在已有专为各种控制功能而设计的专用集成电路, 使变换器的控制电路大为简化。特别是微处理器和微型计算机的引入使控制技术发生了根本性的变化, 数字控制逐步取代模拟电路的控制, 使变换电路的控制不只依赖于硬件电路, 还可利用软件编程。避免模拟信号的传递畸变失真, 减小杂散信号的干扰, 既方便又灵活, 使各种新颖、复杂的控制策略和方法得到实现, 并具有自诊断和智能化功能, 使变换电路的性能更为完善。目前, 采用计算机控制的全数字化智能型电力电子产品已得到广泛应用。将新的控制理论和方法应用在变换电路中, 也是电力电子技术的一个重要内容。

随着全控型电力电子器件的不断进步, 它的应用领域也日益广泛, 电力电子电路的工作频率也不断提高。同时, 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。从理论上讲, 采用软开关技术可使开关损耗降为零, 使效率得以提高。另外, 软开关技术也使得开关频率进一步提高, 从而提高电力电子装置的功率密度。

现代电力电子技术阶段的主要特点如下。

1. 全控化

电力电子器件实现全控化, 是电力电子器件在功能上的重大突破, 取消了传统电力电子器件关断时所需的强迫关断电路, 使电路的结构大大简化。

2. 模块化

把几个开关器件封装在一个模块内, 构成一个系统的部分(如一个桥臂)或全部(如三相逆变桥), 有的甚至把驱动和保护电路等也和器件组合在一起, 成为一个完整的整体功能模块, 还有的几乎把一个整机的所有硬件都以芯片的形式安装到一个模块中, 经过严格、合理的热、电、机方面的设计, 达到优化完善的境地。这不仅缩小了整机的体积, 方便了整机的设计; 更重要的是取消了传统的连线, 把寄生参数降到最小, 从而把器件承受的电应力降至最低, 进一步提高了系统的可靠性。

3. 集成化

(1) 器件的集成。传统的电力电子器件采用分立的方式, 而绝大部分全控型器件都是由许多单元胞器件并联在一起, 并集成在一个基片上。例如, 一个 40A 的功率 MOSFET 由上万个单元器件并联而成。集成化使电力电子器件单管容量增大。

(2) 专用芯片的集成。把不同功能的控制单元集成在一个芯片中, 构成具有特殊控制功能的专用集成芯片。这样既减小控制电路的体积, 又大大提高了控制电路的可靠性。

(3) 系统集成。在变换功率较小的场合, 把控制电路、驱动电路、保护电路和电力电子主电路集成在一起, 构成一个完整的系统。

4. 高频化

高频化是指电力电子器件的工作频率提高了。例如, GTO 的工作频率可达几千赫兹, IGBT 的工作频率可达几十千赫兹, 功率 MOSFET 的工作频率可达到数百千赫兹以上。理论分析和实践表明, 电气产品的体积和重量会随供电频率的增加而减小。这不仅节省材料, 还可节约电能。

5. 高效率化

高效率体现在器件和变换技术两个方面。由于电力电子器件的导通压降在不断减小, 降低了导通损耗; 器件的开关过程加快, 也降低了开关损耗。同时, 由于器件处于合理的运行状态, 进而提高了运行效率。变换器中采用了软开关技术也使运行效率得到进一步提高。

6. 变换器小型化

随着器件的高频化, 控制电路的高度集成化和微机化, 使得滤波电路和控制器的体积大大减小。电力电子器件的模块化, 使主电路的体积大大减小, 这给各种领域的应用提供了方便。

7. 绿色化

现代电力电子技术中广泛采用 PWM 控制技术和多重化技术, 使得变换器的谐波大为降低, 同时也使变换器的功率因数得到提高, 尤其是近年来出现的各种无功补偿器、有源电力滤波器等新型电力电子装置, 大大提高了电网的供电质量。

8. 智能化

传感器、数字芯片、通信和网络等技术的发展, 给电力电子开关器件注入了新的活力。开关器件中植入传感器、数字芯片等, 并通过通信和网络的手段使其功能不断扩大。单元器件或模块不但具有开关功能, 还有控制、驱动、检测、通信、故障自诊断, 甚至工作状

态判定等功能。随着集成工艺的提高和突破,有的还具有放大、调制、振荡及逻辑运算的功能,使用范围大大拓宽,线路结构更加简化。

0.2.3 电力电子技术的发展展望

电力电子技术是20世纪后半叶诞生的一门崭新的技术,在21世纪仍将以迅猛的速度发展。从目前来看,硅基器件已没有什么可突破的发展空间了,今后研究的方向是碳化硅(SiC)等下一代半导体材料。这些新材料做成的器件,导通损耗小,承受的电压等级高,承受的温度也较高。

综上所述,电力电子技术的发展有赖于电力电子器件的发展,其每一次飞跃都是以新器件的出现为契机的。一代器件孕育着一代装置,一代装置产生一批新的应用领域,在应用的同时对器件提出新的要求,推动器件的研制。器件和电路的发展相辅相成、互相促进。而微电子技术、电力电子器件和控制理论是现代电力电子技术的发展动力。

有专家认为,21世纪有两项技术占主导地位:一是以计算机为核心的信息科学技术,它将提供所需做事情的智能;二是含信息电子技术在内的电力电子技术,它将提供想要去做的手段。它们将成为未来科学技术的两大支柱。电力电子技术的应用具有十分广阔的前景。

0.3 电力电子技术的应用

电力电子技术的应用范围十分广泛。在工业生产、交通运输、电力系统、通信系统、计算机系统、国防军事、新能源系统及日常生活等方面均获得广泛的应用。

0.3.1 电源

在各种电控装置及用电设备中所使用的电源,大多采用了电力电子技术。然而电源的要求是千差万别的,因此电源的种类非常之多。下面介绍几种特殊电源。

(1) 弧焊电源,由于采取了高频逆变整流技术,体积和重量都有明显的减小,既节能,又便于使用。

(2) 电解、电镀等应用领域中的低压大电流可控直流电源,在现代社会中的作用越来越重要,用量也越来越大。

(3) 各类高性能的不间断供电电源(UPS),主要用于某些极其重要的设备,既不允许停电,又要求供电质量非常好。

(4) 各种恒频、恒压通用逆变电源,广泛应用于航空、航天、车辆、军事装备等特殊应用领域中作为独立的通用电源。

(5) 各类低压直流开关电源。在电源领域,当前的发展方向是采用有源功率因数校正技术,使之功率因数为1,并成为对电网无谐波污染的“绿色”电源。同时采用软开关技术,提高电源的变换效率,广泛应用于通信、办公自动化设备、计算机设备、电子仪器 and 仪表等。由于运用了高频技术,去掉了工频变压器,大大减小了电源的体积和开关损耗,提高了效率,节省了有色金属,实现了电源的小型化。

(6) 蓄电池充电电源。

(7) 中频或高频感应加热电源。

(8) 大功率脉冲电源、激光电源。

(9) 抽水储能发电站、超导磁体储能、磁悬浮运载工具等高压特大容量电力电子变换电源。

除此以外,在军事、航天、航海及科学研究等领域都离不开各种电源,所以也离不开电力电子技术。

0.3.2 电力传动

全国的电动机每年要消耗约 62% 的电能。在电力传动领域中应用电力电子技术,不仅能完成良好的调速性能,还能大大节能。以下 4 种类型是电力电子技术在传动领域中的典型应用。

1. 工艺调速传动

它能按一定的工艺要求实施运动控制,以保证最终产品的质量、产量和劳动生产率。早期直流电动机具有良好的调速性能,由可控整流电源和直流斩波电源供电。随着电力电子变频技术的迅速发展,使交流电动机的调速得到广泛应用,并且占据主导地位。

2. 节能调速传动

风机、泵类负载其用电量占全国总发电量的 30% 左右。用电动机变频调速来取代传统的风挡、阀门来调节风量和水流量,节约电能 30% 左右,这样在我国每年可节电数百万度。

3. 牵引调速传动

轨道交通电传动组、城市无轨电车、电梯、矿业卷扬机等,既提高运输效率,显著节能,又减少污染,保护环境。

4. 精密调速和特种调速

数控机床的主轴传动和伺服传动、雷达和火炮的同步联动等都要求电动机有足够的调速范围(1:10000)和控制精度。

0.3.3 电力系统

电力电子技术在电力系统中的应用是一个极其重要的领域。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值的高低,已成为衡量一个国家技术进步的主要标志之一。在发达国家,电能的 75% 左右要经过电力电子装置的处理,预计在 21 世纪将发展到 95% 以上。电力系统在通向现代化的进程中是离不开电力电子技术的。

最早成功应用于电力系统的大功率高压直流输电(HVDC)使输电线路的造价降低,线路只有较小的电阻压降而无电抗压降,同时直流输电又不存在电力系统的稳定性问题,所以尽管增加了电力变换环节(交流电—直流电—交流电),但在技术经济意义上仍是当今远距离输电的最佳方案。

20 世纪 80 年代中后期,美国电力科学研究院提出了柔性交流输电(FACTS)和用户定制电力技术,它们都以电力电子技术为手段。前者的基本作用是控制输电系统中的潮流和提高输电线路的输送能力,后者是加强供电的可靠性和提高电能质量。它们代表了电力系统的一个重要发展方向,其应用将会越来越广泛。

在发电环节的应用,有大型发电机的静止励磁控制,水力、风力发电机的变速恒频励磁控制等。

无功补偿和谐波抑制对电力系统有重要意义。人们应用电力电子技术研制出了有源电力滤波器,减小或消除了电网的公害,大大地改善了供电质量,使得电网得到净化。

0.3.4 交通运输

在电气化铁道中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供电,交流机车采用变频装置供电。直流斩波器也广泛应用于铁道车辆。磁悬浮列车中电力电子技术更是一项关键技术。

新型环保绿色电动汽车和混合动力电动汽车正在积极发展中。传动的机械开关和继电器用电力电子开关器件替代,用电力电子控制系统对车上负载进行精密控制,使用适合电力电子控制的、更先进的驱动电机。从小功率的车窗、座椅控制到大功率电传动系统都蕴涵着电力电子应用技术的最新成就。显然,未来的电动车将取代燃油汽车。

0.3.5 照明

在我国照明用电约占总发电量的 10%~12%。过去人们大量使用白炽灯和日光灯。20 世纪 80 年代,随着电力电子变频技术的发展成熟,高频技术的应用促成了新一代电光源的诞生,如紧凑型节能灯和电子镇流器的问世,吹响了以照明节能为中心的绿色照明前奏曲。采用不同成分的稀土荧光粉可制成各种色温的气体放电节能灯,发光率比常规荧光灯提高一倍,节电可达 75%~80%。电子镇流器实际上就是一个电子变频器(从 50Hz 变换到 30kHz 以上)加一个高频电感整流器。电子镇流器比普通的电感式镇流器的重量轻几十倍,节省材料 80%左右,灯管的实际工作寿命延长 3~5 倍,可节电 50%,同时能提高亮度,减小无功和有功损耗。另外,采用电力电子技术可实现照明的电子调光,也可节约能源。

0.3.6 新能源的开发和利用

传统的发电方式是火力、水力以及后来兴起的核能发电。在世界石油、煤炭等化石能源日益紧缺的今天,低耗高效和寻找开发新能源是根本出路。因而各种新能源、可再生能源及新型发电方式越来越受到世界各国的高度重视。从燃料电池、微燃气轮机、风能、太阳能和潮汐能等所得到的一次电能,难以直接被标准的电气负载使用。利用电力电子技术进行能量转换、输送、储存和缓冲等,可以大大改善电能的质量,可直接供给标准电气负载使用,或将电能馈入市电与电力系统联网。发展和利用绿色能源是洁净生态环境、改善电力结构的重要措施,它不仅是近期能源的补充,也是未来能源的基础。

总之,大力推广电力电子技术具有广泛的现实意义和潜在而又巨大的经济及社会意义。

0.4 电力电子技术研究的内容

电力电子技术所研究的内容包括 3 个方面:电力电子器件、电力电子变换电路和控制电路。