



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

◎ 高锋阳 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气工程及其自动化系列规划教材

电力电子技术

主 编 高锋阳
参 编 王 黎 王保民 杨剑峰 任 刚
主 审 赵 峰



机械工业出版社

“电力电子技术”课程是高等院校电气工程类、自动化类及相关专业的一门重要的专业基础课。本书的编写针对本科生教学的特点,强调了基本概念、分析方法和基础知识的理解和掌握;在体现新技术的一些进展的同时,避免了新技术、新理论的简单罗列;按照从元器件、电路到系统的原则精选了内容,保持了体系的完整性。

本书详细介绍了 AC-DC 变换电路(整流和有源逆变电路)等应用广泛的电力电子变换电路,在保留一定的晶闸管相控变流技术内容的同时,较为突出地反映了以全控器件为主的 PWM 理论体系,并较为系统地介绍了电力电子器件。考虑到当前特色专业和卓越工程师人才培养模式的转变,增加了电力电子技术仿真、电力电子装置设计及行业应用的内容,为电力电子技术的应用与研究提供了理论和技术基础。本书有配套的电子课件,可赠送给任课教师使用。

本书可作为高等院校电气工程类、自动化类及车辆工程等相关专业的本科生教材,也可供从事电力电子技术和相关研究的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/高锋阳主编. —北京:机械工业出版社, 2015. 5
普通高等教育电气工程及其自动化系列规划教材
ISBN 978-7-111-49769-1

I. ①电… II. ①高… 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 058844 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
版式设计:霍永明 责任校对:张莉娟 任秀丽
封面设计:张 静 责任印制:刘 岚
北京京丰印刷厂印刷
2015 年 6 月第 1 版·第 1 次印刷
184mm×260mm·19.25 印张·477 千字
标准书号:ISBN 978-7-111-49769-1
定价:39.80 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

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

前 言

电能作为当今最重要的能源形式,使用最方便、应用最广泛。面对全球性的能源危机和环境问题,节约用电,减少电力生产和使用过程对环境的破坏,提高电能变换系统和装置的效率,减少它们的不良影响,已日益重要。因此,以电能变换为研究对象的电力电子技术学科应运而生,发展迅速,并成为了国民经济建设中的一个关键的基础性技术。“电力电子技术”课程是高等院校电气工程类、自动化类及相关专业的一门重要的专业基础课。课程的应用性、实践性很强,其教学对学生实践能力的提高、启发学生创新性思维具有重要意义。

本书是作者根据从事电力电子技术教学与科研工作的体会,并在学习、研究国内外本科和研究生相关教材及参考文献的基础上,针对目前专业基础课程教学需要而编写的教材。针对本科生教学的特点,本书强调基本概念、分析方法和基础知识的理解和掌握;在体现新技术的一些进展的同时,避免了新技术、新理论的简单罗列;按照从元器件、电路到系统的原则精选了内容,保持了体系的完整性。

本书具有以下特色:

1) 编写的理念上,以发展学生思考能力为本,注重分析电路能力的提高;坚持把工程科学基础和电力电子专业知识揉合在一起进行讲述。

2) 在系统讲述基本理论及基本概念的同时,重点阐述器件应用;仍然把晶闸管整流电路作为基础,后续突出反映以全控型器件为主的 PWM 理论体系。

3) 内容通俗易懂,文字流畅,概念清晰,叙述深入浅出;每章配有学习指导、本章小结和习题与思考题,内容体系完整、实用。

4) 教材配有多媒体课件和系统仿真技术章节,方便授课教师使用现代信息技术教学。

5) 理论结合实际,以工程师和教授的双重眼光认识和看待这些技术;既有概念清晰的原理介绍,又有切合实际的电力电子装置的设计及应用,还有作者在实践中得来的独特见解。

6) 应用内容突出行业特色。

由于 AC-DC 变换电路是应用最为广泛的一种电路,也是电力电子电路的基础,因此,本书在保留一定的晶闸管相控变流技术内容的同时,较为突出地反映了以全控器件为主的 PWM 理论体系,并较为系统地阐述了电力电子器件、AC-DC 变换电路(整流和有源逆变电路)、DC-AC 变换电路(无源逆变电路)以及 PWM 理论、DC-DC 变换电路、AC-AC 变换电路等基本内容。考虑到当前特色专业和卓越工程师人才培养模式的转变,本书增加了电力电子技术仿真、电力电子装置设计及行业应用的内容,为电力电子技术的应用与研究提供了理论和技术基础。

本书由高锋阳主编,并编写了第 1、2、3、5、6 章;任刚参与了编写提纲制定和统稿,并对应用部分进行审稿;王黎编写了第 4、7 章和第 5 章的 5.6 节;王保民编写了第 8、9 章;杨剑峰参与了第 3 章的编写。赵峰、田铭兴、张蕊萍对本书进行了详细、全面的审核,

并提出了许多建设性的意见。本书编写时引用了众多国内外同行的著作、文献，在此表示衷心的感谢。

由于水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，恳请读者批评指正。

本书可作为高等院校电气工程类、自动化类、车辆工程等相关专业的本科生教材，也可供从事电力电子技术和相关研究的工程技术人员参考。

编 者

目 录

前言	
第1章 绪论	1
1.1 什么是电力电子技术	1
1.2 电力电子技术的发展史	2
1.3 电力电子技术的应用	3
1.4 电力电子技术的发展趋势	6
1.5 电力电子技术系统组成	7
第2章 现代电力电子器件	9
2.1 概述	9
2.1.1 电力电子器件的基本构成	9
2.1.2 电力电子器件的分类	10
2.1.3 电力电子器件的特点	10
2.2 电力电子器件基础	11
2.2.1 PN结的原理	11
2.2.2 MOS栅开关的原理	13
2.2.3 功率损耗的原理	13
2.3 功率二极管	14
2.3.1 结型功率二极管的基本结构和 工作原理	14
2.3.2 结型功率二极管的基本特性	15
2.3.3 肖特基势垒二极管	16
2.3.4 功率二极管的主要参数	17
2.4 晶闸管	18
2.4.1 晶闸管的基本结构和工作 原理	18
2.4.2 晶闸管的特性及主要参数	20
2.4.3 晶闸管的派生器件及应用	22
2.4.4 晶闸管的触发	23
2.4.5 晶闸管的应用特点	24
2.5 门极关断晶闸管	25
2.5.1 门极关断晶闸管的基本结构 和工作原理	25
2.5.2 门极关断晶闸管的特性	26
2.5.3 门极关断晶闸管的驱动	26
2.5.4 门极关断晶闸管的应用特点	27
2.6 电力晶体管	27
2.6.1 电力晶体管的基本结构和 工作原理	27
2.6.2 电力晶体管的特性及主要 参数	27
2.6.3 电力晶体管的应用特点	29
2.7 功率场效应晶体管	29
2.7.1 功率场效应晶体管的基本结 构和工作原理	29
2.7.2 功率场效应晶体管的特性及 主要参数	30
2.7.3 功率场效应晶体管的驱动	32
2.7.4 功率场效应晶体管的应用 特点	33
2.8 绝缘栅双极型晶体管	33
2.8.1 绝缘栅双极型晶体管的基本 结构和工作原理	33
2.8.2 绝缘栅双极型晶体管的特性 及主要参数	34
2.8.3 绝缘栅双极型晶体管的驱动	35
2.8.4 绝缘栅双极型晶体管的应用 特点	36
2.9 集成门极换向晶闸管	37
2.9.1 集成门极换向晶闸管的基本 结构和工作原理	37
2.9.2 集成门极换向晶闸管的特性 及主要参数	39
2.9.3 集成门极换向晶闸管的触发 原理	40
2.9.4 集成门极换向晶闸管的应用 特点	40
2.10 电力电子器件的发展趋势	40
本章小结	42
习题与思考题	43
第3章 整流电路	44
3.1 概述	44
3.2 单相可控整流电路	45
3.2.1 单相半波可控整流电路	45
3.2.2 单相桥式全控整流电路	50

3.2.3 单相桥式半控整流电路	55	电路	104
3.3 三相可控整流电路	57	4.2.3 单相桥式电流型方波逆变 电路	110
3.3.1 三相半波可控整流电路	57	4.2.4 三相桥式电流型方波逆变 电路	114
3.3.2 三相桥式全控整流电路	62	4.2.5 方波逆变电路存在的问题	116
3.4 带有滤波电路的不可控整流电路	68	4.3 多重逆变电路和多电平逆变电路	117
3.4.1 电容滤波的单相不可控整流 电路	68	4.3.1 多重逆变电路	117
3.4.2 电感滤波的单相不可控整流 电路	71	4.3.2 多电平逆变电路	119
3.4.3 带复式滤波电路的单相不可 控整流电路	71	4.4 逆变电路的脉宽调制 (PWM) 控制技术	120
3.4.4 电容滤波的三相桥式不可控 整流电路	72	4.4.1 综述	120
3.5 大功率可控整流电路	75	4.4.2 电压正弦 PWM (SPWM) 控制技术	121
3.5.1 带平衡电抗器的双反星形可 控整流电路	75	4.4.3 SPWM 逆变电路的谐波分析	128
3.5.2 整流电路的多重化	78	4.4.4 提高直流电压利用率和减 少开关次数的方法	130
3.6 相控整流电路的换流重叠现象	79	4.4.5 SPWM 模式优化	132
3.7 相控整流电路的有源逆变工作 状态	83	4.5 PWM 跟踪控制技术	134
3.7.1 相控有源逆变的原理及实现 条件	83	4.5.1 滞环跟踪控制技术	134
3.7.2 单相桥式全控整流电路的有 源逆变工作分析	84	4.5.2 固定开关频率型跟踪控制 技术	136
3.7.3 三相桥式全控整流电路的有 源逆变工作分析	85	4.6 空间电压矢量 PWM 控制技术	136
3.7.4 逆变颠覆与最小逆变角的 限制	87	4.6.1 电路结构、空间矢量及 其运动轨迹	137
3.8 整流电路的谐波和功率因数	88	4.6.2 期望空间电压矢量的合成	140
3.8.1 整流电路的谐波分析	88	4.6.3 三相 SVPWM 逆变电路的 特点	141
3.8.2 整流电路的功率因数	92	4.7 PWM 整流电路	141
本章小结	94	4.7.1 传统整流电路存在的问题	141
习题与思考题	95	4.7.2 电压型桥式 PWM 整流电路	143
第4章 逆变电路	97	4.7.3 电流型 PWM 整流电路	148
4.1 概述	97	4.7.4 PWM 整流电路的控制	149
4.1.1 逆变电路的概念	97	本章小结	150
4.1.2 逆变原理	98	习题与思考题	150
4.1.3 晶闸管电路的换流方式	98	第5章 直流-直流变换电路	152
4.1.4 逆变电路的分类	99	5.1 概述	152
4.1.5 逆变电路的性能指标	100	5.2 直流-直流变换电路的工作原理及 控制方式	153
4.2 方波逆变电路	101	5.2.1 工作原理	153
4.2.1 单相电压型方波逆变电路	101	5.2.2 控制方式	154
4.2.2 三相桥式电压型方波逆变 电路	104	5.3 直流-直流变换电路的基本电路	155
		5.3.1 降压斩波电路	156

5.3.2 升压斩波电路	159	7.5 电力电子变换电路的仿真	219
5.3.3 升降压斩波电路和 Cuk 斩波 电路	162	7.5.1 交流-直流变换电路的仿真	219
5.3.4 Sepic 斩波电路和 Zeta 斩波 电路	164	7.5.2 直流-直流变换电路的仿真	226
5.4 带隔离的单管直流-直流变换 电路	165	7.5.3 直流-交流变换电路的仿真	227
5.4.1 正激电路	166	7.5.4 交流-交流变换电路的仿真	233
5.4.2 反激电路	168	本章小结	239
5.5 双向直流-直流变换电路和多相多 重斩波电路	169	第 8 章 电力电子装置中的磁元件及主 电路设计	240
5.5.1 电流双向直流-直流变换 电路	169	8.1 概述	240
5.5.2 桥式可逆斩波电路	170	8.2 磁性材料和电力电子装置中的常用 磁元件	241
5.5.3 多相多重斩波电路	172	8.2.1 磁性材料的工作状态	241
5.6 软开关技术	173	8.2.2 几种常用磁性材料	242
5.6.1 软开关的概念	173	8.2.3 电力电子装置中的常用磁 元件	242
5.6.2 软开关电路的分类	174	8.3 磁元件设计	246
5.6.3 典型的软开关应用电路	176	8.3.1 变压器的设计	246
本章小结	178	8.3.2 电抗器的设计	248
习题与思考题	179	8.3.3 磁元件的设计举例	250
第 6 章 交流-交流变换电路	181	8.4 相控整流主电路参数的计算和 设计	253
6.1 概述	181	8.4.1 整流变压器参数的计算	253
6.2 交流调压电路	182	8.4.2 整流器件的选择	257
6.2.1 相控单相交流调压电路	182	8.4.3 电抗器参数的计算	258
6.2.2 相控三相交流调压电路	186	8.5 交-直-交通用变频器主电路的 设计	261
6.3 斩控式交流调压电路	190	8.6 直-直变换器主电路参数的计算与 设计	265
6.3.1 单相斩控式交流调压电路	190	8.6.1 变压器的计算与设计	265
6.3.2 三相斩控式交流调压电路	191	8.6.2 输出滤波器的计算与设计	266
6.4 其他交流电力控制电路	191	8.6.3 开关器件及二极管的计算与 设计	267
6.4.1 交流调功电路	191	本章小结	268
6.4.2 交流电力电子开关	192	习题与思考题	268
6.5 交-交变频电路	193	第 9 章 电力电子技术的应用	269
6.5.1 单相相控交-交变频电路	194	9.1 在交流-直流传动电力机车牵引系 统中的应用	269
6.5.2 三相相控交-交变频电路	198	9.1.1 国产交流-直流传动电力机 车主电路的特征	269
6.5.3 矩阵式交-交变频电路	200	9.1.2 典型相控电力机车牵引传动 系统主电路的分析	270
本章小结	205	9.2 在交流-直流-交流传动电力机车	
习题与思考题	205		
第 7 章 电力电子技术的仿真	207		
7.1 概述	207		
7.2 Simulink 的模型库浏览器	207		
7.3 Simulink 仿真步骤	210		
7.4 驱动模块	216		

牵引系统中的应用	274	路的分析	289
9.2.1 在 CRH 系列动车组电力传动系统中的应用	274	9.3.3 城市轨道交通交流牵引系统的分析	292
9.2.2 在“和谐”系列电力机车中的应用	281	9.3.4 城市轨道交通辅助电源系统的分析	294
9.3 在城市轨道交通车辆中的应用	287	本章小结	297
9.3.1 斩波电路在城市轨道交通中的应用	288	习题与思考题	297
9.3.2 地铁车辆直流传动系统主电路的分析		参考文献	298

第1章 绪 论

1.1 什么是电力电子技术

1. 电力电子技术的形成

电力电子技术是一种应用功率半导体器件进行电能的变换及高效率利用的技术，是通过半导体器件把“粗电”加工成“精电”的技术，因此，电力电子技术的基础是功率半导体器件。功率半导体器件也称电力电子器件。1948 年美国贝尔实验室发明了能够放大电信号的晶体管（Transistor），开创了半导体电子学。目前已广泛使用的电力电子半导体器件都发展自晶体管，因此晶体管的诞生也标志着电力电子技术学科的发展基础建立。1957 年美国通用电气公司在晶体管的基础上发明了对电力电子技术学科的形成起关键作用的晶闸管（Thyristor）。晶闸管是一个可控的单向开关，可以实现大功率电路应用，而且可靠性比较高，因此很快被应用在整流电路，实现交流电能到直流电能的变换和调节。后来，晶闸管又被应用在直流电能到交流电能的变换，自此，采用晶闸管器件的变流装置得以迅速推广。1974 年美国学者 W. Newell 提出了电力电子技术的定义，并用倒三角形对电力电子技术做了描述。倒三角形的寓意是：电力电子技术是由电气工程与技术、控制理论、电子科学与技术三大学科交叉而形成的（见图 1-1），与相关学科的关系见表 1-1。电力电子技术已经成为现代工业社会中的支撑技术之一。

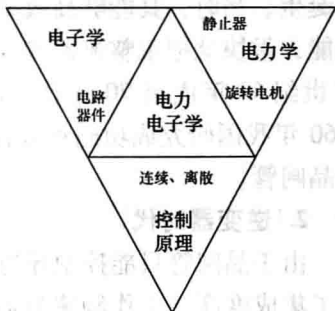


图 1-1 描述电力电子学的倒三角形

表 1-1 电力电子技术与相关学科的关系

与电子学的关系	与电力学的关系	与控制理论/自动化技术的关系
1) 都分为器件和应用两个分支 2) 电力电子器件工作在开关状态；电子学器件工作在开关、放大状态	1) 电力电子广泛应用于电力系统 2) 电力电子是电气工程学科中最为活跃的一个分支	1) 控制理论广泛用于电力电子系统中 2) 电力电子技术是弱电控制强电的技术，是弱电和强电的接口。控制理论是这种接口的有力纽带。电力电子装置是自动化技术的基础元件和重要支撑技术

2. 电能变换的类型

不同负载对电源有着不同的要求，而从电网获得的交流电和从蓄电池获得的直流电往往不能满足要求，这就需要电能变换。电能变换的类型可分为交流变直流、直流变交流、直流变直流和交流变交流。交流变直流称为整流，直流变交流称为逆变。直流变直流是指将一种直流电压变为另一种直流电压，可用直流斩波电路实现。交流变交流可以是电压的变换，也可以是频率或相数的变换。

1.2 电力电子技术的发展史

电力电子器件的发展对电力电子技术的发展起着决定性作用, 电力电子技术的发展史是以电力电子器件的发展史为纲的。自 20 世纪 50 年代末开始, 在应用需求的推动下, 电力电子技术沿着“整流器→逆变器→变频器”的轨迹成功地发展起来。

1. 整流器时代

1904 年出现了电子管 (Vacuum Tube), 能在真空中对电子流进行控制, 并应用于通信和无线电中, 从而开了电子技术之先河; 20 世纪 20 年代末出现了汞整流器 (Mercury Rectifier), 其性能与后来的晶闸管很相似。在 30 年代到 50 年代, 是汞整流器发展迅速并大量应用的时期。它广泛用于电解 (铜、铝、镍等有色金属和氯碱等化工原料都离不开大功率直流电解)、牵引 (电力机车、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、铝材轧制等) 三大领域, 甚至用于直流输电。但是, 汞整流器所用的汞对人体有害, 另外, 汞整流器的电压降落很高。1947 年美国贝尔实验室发明晶体管, 引发了电子技术的一场革命。1957 年美国通用电气公司研制出第一个晶闸管, 标志着电力电子技术的诞生。当时, 其能够高效率地把工频交流电转换为直流电, 由于其优越的电气性能和控制性能, 很快就把汞整流器和庞大的电动机-直流发电机组即旋转变流机组逐出了历史舞台。20 世纪 60 年代至 70 年代, 应用大功率硅整流管和晶闸管的整流装置得到了广泛应用。1960 年我国研究成功硅整流管 (Silicon Rectifying Tube/Rectifier Diode), 1962 年我国研究成功晶闸管。

2. 逆变器时代

由于晶闸管只能控制导通, 不能控制其关断, 其应用受到限制。20 世纪 70 年代后期出现了集成度高、工作频率较高、功能强的全控型电力电子器件, 如大功率晶体管 (GTR)、门极关断晶闸管 (GTO)、功率场效应晶体管 (功率 MOSFET) 及静电感应晶体管 (SITH) 等, 俗称第二代电力电子器件。当时正处于世界范围内的“能源危机”, 由于交流电动机变频调速具有显著节能效果, 使能胜任这种情况的大功率逆变电源的全控功率器件得到了大力发展和应用。其中, 关键的技术在于“交-直-交”变换中的“直-交”变换, 即把直流电逆变为 0~100Hz 左右的交流电。类似的应用还有高压直流输电 (HVDC) 和静止式无功功率动态补偿等。这时的电力电子技术, 已经既可完成整流, 又可实现逆变。不过, 其工作领域还是局限于较低的频率。

3. 变频器时代

20 世纪 80 年代, 大规模、超大规模集成电路 (VLSI) 得到突飞猛进的发展, 这对功率半导体器件提供了很好的借鉴, 即把其成熟的微细加工技术和高电压大电流设计制造方法有机地结合起来, 促使 20 世纪 80 年代后期至 90 年代初期生产出以绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 和功率场效应晶体管为代表的功率场效应晶体管家族器件。这一代器件的发展不仅为交流电机调速提供了广泛的应用, 还使其性能更加完善可靠, 开辟了电力电子技术向高频化进军的道路。用电设备的高频化和高频设备的固态化, 带来了高效、节能、节材, 并为实现小型轻量化、机电一体化和智能化提供了重要的技术基础。

随着全控型器件工作频率的提高和应用的拓展, 人们针对不同电力电子装置应用开发了

各种二极管：在高频应用中的肖特基二极管和场效应晶体管（按同步整流方式工作）加入了续流二极管行列，专门用于门极关断晶闸管吸收回路的二极管（快导通，快速软恢复）、专门用于钳位的二极管（超快恢复）和用于高频隔离的 BOOST 二极管等，均已进入市场。

当前，作为节能、自动化、智能化、机电一体化的基础，电力电子技术正在实现硬件结构的模块化、控制系统的数字化和产品性能的绿色化，使新一代的电力电子产品更加可靠、经济、实用，性能大大提高。

1.3 电力电子技术的应用

电力电子技术的应用范围十分广泛，不仅用于一般工业，也用于交通运输、电力系统、通信系统、计算机系统、新能源系统等，在照明、空调等家用电器及其他领域中也有着广泛的应用。

1. 电气节能

电力电子技术在电气节能方面的应用包括采用变频调速、提高电能质量、进行有源滤波等，其中，以变频调速为主要应用。变频调速节能涉及我国主要的基础工业，在这些工业企业的设备中，各类电动机总装机容量约为 4.2 亿 kW，年耗电超过 1 万亿 kW·h，约占全国工业用电量的 60% 以上，如果采用变频调速，其节约的能量是相当可观的。变频调速系统主要是采用电力电子变频器作为电动机驱动电源，技术已经比较成熟，市场量大面广，并且可持续发展（设备需要更新换代周期约为 10 年）。目前在低压电机系统中，有约 30% 采用了变频调速技术，高压电机系统中也有约 15% 采用了变频调速技术，发展的空间很大。变频调速应用存在的主要问题仍然是变频器可靠性需进一步提高，价格还是偏贵，操作复杂，现场操作人员掌握程度参差不齐等。

2. 电力牵引

电力牵引主要包括高铁、地铁、城市轻轨、电动汽车等，正成为世界各国交通发展的重点。我国纯电动、充电式混合动力和普通型混合动力等新能源汽车都已进入市场。美国也把电动汽车作为国家战略的重要组成部分，计划到 2015 年普及 100 万辆插入式电动汽车。

电力牵引的核心部分是牵引变流装置，其主要组成部分包括 AC-DC 整流器、控制器，DC-DC 直流变换器和 DC-AC 逆变器等多个电力电子变换环节。如图 1-2 所示，整流器将牵引变压器二次侧输入的单相交流电变为直流电；中间直流电路为逆变器提供稳定的直流电；逆变器将直流电逆变为牵引电动机所需要的可调频调压的三相交流电。电力牵引运行的主要特点是：变换器装置四象限运行，恒转矩控制，高温、强振动环境等，这些特点对电力电子设备要求较高。目前，我国用在电力牵引的电力电子变换器仍以进口产品为主，国产产品的主要问题仍然是适应性差、动态性能不够、可靠性差。当前电力牵引中的电力电子技术主要发展方向如下：

1) 提高电力电子变换器装置的效率和功率密度。这方面主要是发展集成技术和冷却技术。

2) 实施精确控制。应用高性能的闭环控制，特别是针对低速和高速下的矢量控制和直接转矩控制一直是热点研究课题。

3) 保证可靠运行。采用冗余控制以及能量综合管理技术等。

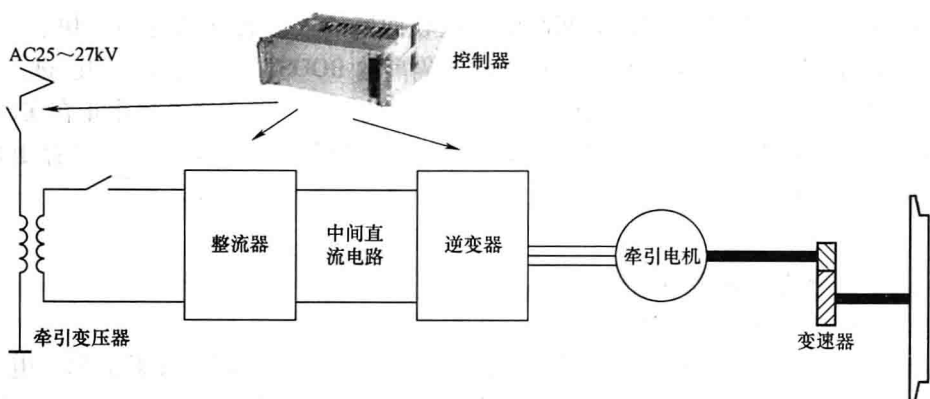


图 1-2 电力牵引交流传动系统

3. 新能源发电

新能源的应用正受到世界各国的普遍关注。新能源发电主要包括太阳能、风能、生物质能发电等。新能源发电已经成为电力电子技术的主要应用领域。

新能源发电系统与电力电子应用技术密切相关。例如，太阳能光伏并网发电系统，如图 1-3 所示，除了光伏阵列之外，其他部分都与电力电子技术有关；风力发电系统，包括发电机侧 PWM 变换器、网侧 PWM 变换器、系统控制器、变桨控制器等多个电力电子变换环节。

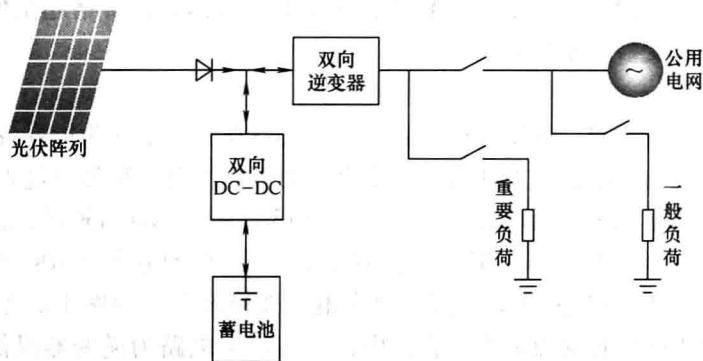


图 1-3 光伏并网发电系统

新能源发电中的电力电子技术应用特点如下：一次能源的供给随机性大，如风能、太阳能都随天气情况而有很大变化；并网发电要求高，电网侧要求输入电能波动小，电能质量高等。我国的现状是，并网变换器以进口产品为主，普遍运行经验不够，国产产品仍在摸索中前进，其中主要的问题是装备可靠性差，有关功能和性能还满足不了要求，标准不统一；风力发电系统单机容量已经达到 5MW，且正在向更大容量发展；光伏并网发电系统也开始向兆瓦级方向发展。风力发电系统已呈现以下特点：

- 1) 直接变换。如双馈式风机系统正在向直驱式或混合式系统方向发展。
- 2) 高性能。主要体现在高效率、高可靠性，以及为适应电网需求的低电压穿越和孤岛

保护等。

4. 智能电网

智能电网在技术上的驱动力应该主要源于电力电子技术、新能源发电技术、传感技术、通信技术（尤其是无线通信技术）以及相应的电网控制技术等。在智能电网的新型储能、灵活输电、先进的信息、控制、传感等环节，以及承载大规模可再生能源并网发电，最终实现电网高效、稳定、安全运行等方面，电力电子技术起着关键性的作用。智能电网中的电力电子技术特点是：容量大、电压高、组合结构、分布广。目前智能电网正在发展之中，主要作为示范工程，大部分要与变压器组合。电力电子技术在智能电网中应用存在的主要问题是：功率半导体器件性能需要提升，主要是在承压和通流能力方面，期待有新的功率半导体器件的出现，现有器件和装置的功能和性能尚不能满足要求。智能电网目前正在向更大容量、直接变换、更高可靠性、更好保证电能质量等方向发展。

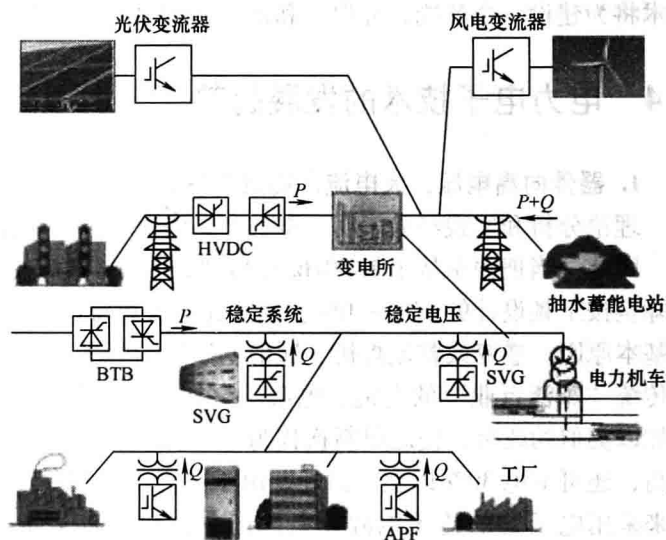


图 1-4 电力电子技术在电力系统中的应用

电力电子技术在电力系统中的应用如图 1-4 所示。

5. IT 产业

由于 IT 技术的迅速普及，计算机、网络设备、办公设备的电力消耗日益增加，如何提高 IT 设备能源利用效率变得越来越重要。电源效率的提高，轻载或待机损耗下降，以及提高电源的功率密度，将是未来重要的研究课题。电源的标准化、智能化、与新能源的融合将是计算机、网络电源发展的方向。传统数据中心电源系统的电能利用效率分析如图 1-5 所示。

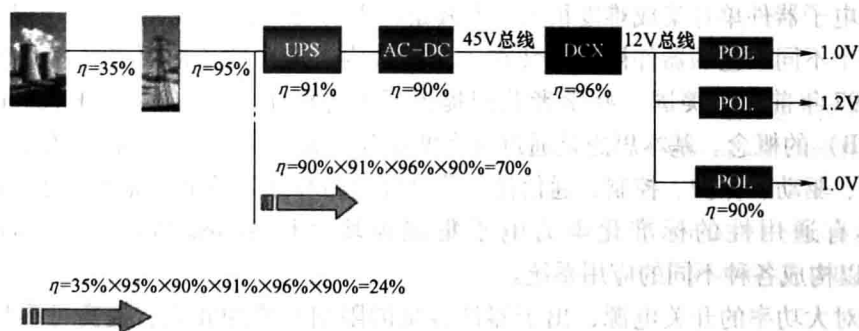


图 1-5 传统数据中心电源系统的电能利用效率分析

6. 其他

电解、电镀等电化学工业采用的直流电源，冶金工业中广泛应用的中频感应加热电源、淬火电源及直流电弧炉电源，都是电力电子技术的典型应用。

电力电子新技术的发展，反过来又促进了一系列新应用领域的不断开拓。电力电子技术已经渗透到现代社会的各个方面，未来 90% 的电能均需通过电力电子技术处理后再加以利用，以便提高能源利用的效率、提高工业生产的效率、实现再生能源的最大利用。电力电子技术将为建设一个节能、环保、和谐的人类家园发挥重要的作用。

1.4 电力电子技术的发展趋势

1. 器件向高电压、大电流、高频化发展

理论分析和实践经验表明，电气产品的体积和重量随其供电频率的二次方根成反比地减小。因此，当把频率从工频 50Hz 提高到 20kHz，频率提高 400 倍时，用电设备的体积大概可降至按工频设计的 5% ~ 10%。这正是开关电源新技术实现功率变频并带来明显经济效益的基本原因。逆变或整流焊机、通信电源用的开关式整流器等，都是基于这一原理。同样，对传统“整流行业”的电镀、电解、电加工、充电、浮充电、电力合闸等各种直流电类整机加以类似的改造，使之更新换代为“开关变换类”电源，其主要材料可以节约 90% 甚至更高，还可节电 30% 以上。另外，由于电力电子器件工作上限频率的逐步提高，促使许多原来采用电子管的传统电源设备固态化，也带来了显著节能、节水、节约材料的经济效益。

2. 电力电子装置向集成化发展

由于电力电子装置的复杂度随着使用要求的提高越来越高，因此面向不同应用需要，应采用不同的电路和结构设计，以及相应的热设计和电磁兼容设计。但是，在实际功能上这些电路并没有显著的区别，这不但造成了大量的重复劳动，而且对电力电子系统的广泛应用也形成了发展障碍。

电力电子集成技术被认为是解决电力电子技术发展障碍的重要途径。电力电子集成早期的思路是单片集成，即将主电路、驱动、保护和控制电路等全部制造在同一个硅片上。由于大功率的主电路器件和其他控制电路器件的制造工艺差别较大，还有高压隔离和传热的问题，故电力电子器件单片集成难度很大，尤其是在中大功率范围内，只能采用混合集成的办法，即将多个不同工艺的器件裸片封装在一个模块内。现在广泛使用 IPM 模块就体现了这种思想。1997 年前后，美国一些学者共同提出了电力电子积木（Power Electronic Building Block, PEBB）的概念。基本思想是通过高密度混合集成和多层互连，将电力电子系统中主电路、传感、驱动、保护、控制、通信接口等全部电路和部分乃至全部无源器件都集成到一起，形成具有通用性的标准化电力电子集成模块（Integrated Power Electronic Module, IPEM），用以构成各种不同的应用系统。

另外，对大功率的开关电源，出于器件容量的限制和增加冗余、提高可靠性方面的考虑，一般采用多个独立的模块单元并联工作。即采用均流技术，使所有模块共同分担负载电流，而且一旦其中某个模块失效，其他模块还可再平均分担负载电流。这种通过增加相对整个系统来说功率很小的冗余电源模块的方法，可以使系统出现个别模块故障时，不会影响正

常工作。

3. 控制系统数字化

在 20 世纪 60 年代至 70 年代，电力电子技术的控制部分是完全按模拟电路信号来设计和工作的。如今已经普遍使用数字控制技术，该技术具有许多独特的优越性，如抗噪声能力强、对器件老化和环境因素变化不敏感、具有可编程性等，这些特性使其可以很容易通过数字芯片的相互通信对于多电源供电的数字系统实现系统级的协调，可以实时、在线地对控制器参数进行调节，可以方便地实现各种复杂的控制算法，也便于自诊断、容错等技术的植入等。

4. 装置趋向绿色化

绿色电器有两层含义：首先是显著节电，这意味着发电容量的节约，而发电是造成环境污染的重要原因；其次，这些电器还应满足不对（或少对）电网产生谐波污染。国际电工委员会（IEC）对此制定了一系列标准，如 IEC555、IEC917、IEC1000 等。事实上，许多功率电子节电设备，往往会变成对电网的污染源，向电网注入严重的高次谐波电流，使总功率因数（包括基波位移无功，特别是谐波的畸变无功）下降，同时也使电网电压耦合许多毛刺尖峰，甚至出现缺角和畸变。20 世纪末，各种有源滤波器和有源补偿方案的诞生，有了多种修正功率因数的方法，这些方法为批量生产各种绿色开关电源产品奠定了基础。

1.5 电力电子技术系统组成

电力电子技术的基本工作框图如图 1-6 所示。电力电子技术在实际应用中的系统组成如图 1-7 所示，一般由控制电路（Control Circuit）、驱动电路（Driving Circuit）和以电力电子器件为核心的主电路（Main Circuit）组成。

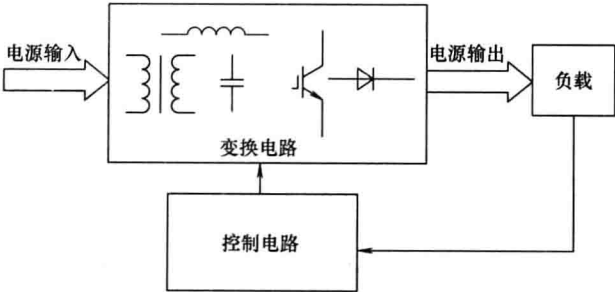


图 1-6 电力电子技术的基本工作框图

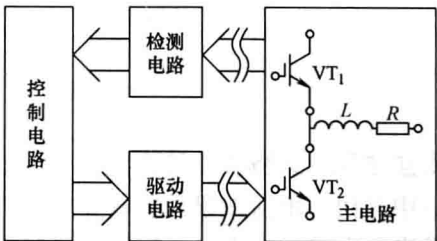


图 1-7 电力电子技术在实际应用中的系统组成

控制电路（Control Circuit）按系统的工作要求形成控制信号（Control Signal），通过驱动电路（Driving Circuit）去控制主电路（Main Circuit）中电力电子器件的通或断（Turn-on or Turn-off），来完成整个系统的功能。

有的电力电子系统中，还需要有检测电路（Detect Circuit）。广义上往往将和驱动电路等主电路之外的电路都归为控制电路，从而粗略地说电力电子系统是由主电路和控制电路组成的。

主电路中的电压和电流一般都较大，而控制电路的元器件只能承受较小的电压和电流，因此主电路和控制电路连接的路径上，如驱动电路与主电路的连接处，或者驱动电路与控制信号的连接处，以及主电路与检测电路的连接处，一般需要进行电气隔离（Electrical Isolation）。通常是通过光、磁器件等来传递信号。

由于主电路中往往有电压和电流的过冲，而电力电子器件一般比普通的元器件要昂贵，且承受过电压和过电流的能力却要差一些，因此，在主电路和控制电路中需附加一些保护电路，以保证电力电子器件和整个电力电子系统的正常可靠运行。