

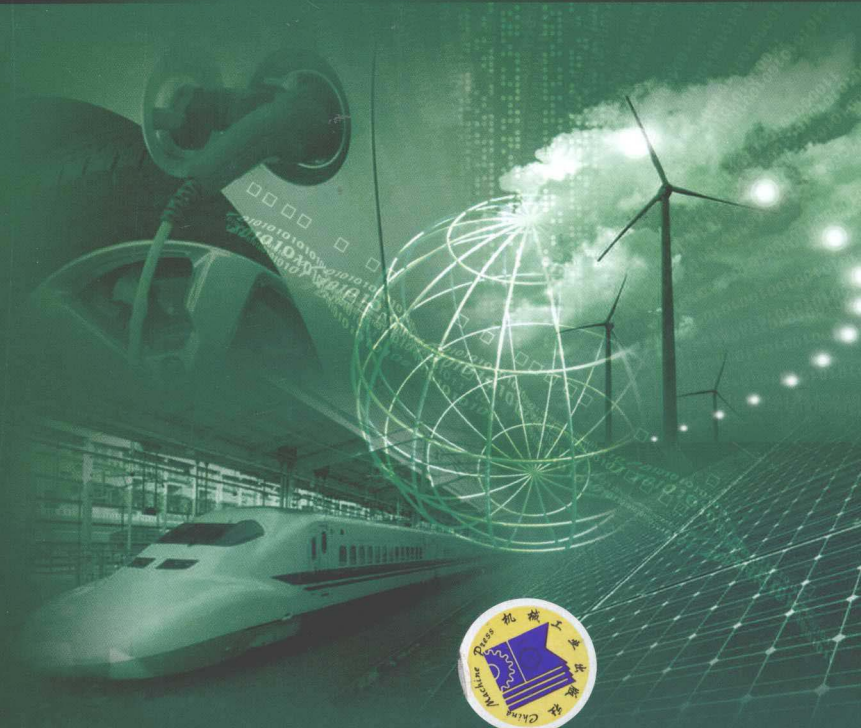


研究生教学用书

现代电力电子学

徐德鸿 陈治明 李永东 编著
康 勇 阮新波 陈 敏

MODERN POWER ELECTRONICS



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

研究生教学用书

现代电力电子学

徐德鸿 陈治明 李永东 编著
康 勇 阮新波 陈 敏



机械工业出版社

本书供已具备电力电子技术初步知识的读者进一步学习之用，是一本电力电子技术的高级教程。本书内容包括电力电子技术中常用的数学方法，电力电子器件原理与应用基础、宽禁带器件，软开关、三电平、同步整流、交错并联等功率变换技术，DC/DC 变换器的动态建模方法，多电平逆变器拓扑及 PWM 调制，SPWM 逆变器的动态建模与控制，有源功率因数校正等内容。

本书可作为电力电子与电力传动专业及相关专业的研究生教材，也可作为从事开关电源、UPS、变频器、新能源变流器等开发、设计工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代电力电子学/徐德鸿等编著. —北京: 机械工业出版社, 2012. 5

研究生教学用书

ISBN 978-7-111-39685-7

I. ①现… II. ①徐… III. ①电力电子学 - 研究生 - 教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 211776 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 王寅生 版式设计: 霍永明

责任校对: 张媛 封面设计: 张静 责任印制: 乔宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2013 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 20 印张 · 491 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-39685-7

定价: 49.00 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

网络服务

社服务中心: (010) 88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

电力电子技术是一项实现电能高效率利用和运动精密控制的技术，已渗透到人类生活的各个方面，成为现代工业、信息和通信、能源、交通、国防等领域的支撑科学技术。自1948年美国贝尔实验室发明晶体管以来，电力电子器件经历了半个多世纪的发展，功率器件经历从结型控制器件（如晶闸管、功率GTR、GTO）到场控器件（如功率MOSFET、IGBT、IGCT）的发展历程，电力电子器件的性能取得了显著的进步。此外，以SiC为代表的新一代功率器件从实验室进入了工业应用。同时，电力电子电路理论及其控制技术也取得了长足的发展，在电路拓扑、分析方法、建模方法、控制方法、设计方法等方面实现了飞跃，出现了新的知识和内容。

目前，国内很少见到系统地反映电力电子技术新的知识和内容，并适合研究生教学的深度教材。针对以上情况，我们组织了该书的编写工作，本书可以作为研究生教材或电力电子技术高级课程的参考书。

本书力图以通俗易懂的方式，将电力电子技术的新知识介绍给大家。本书共分为8章。第1章为绪论，介绍电力电子技术的概况和技术展望。第2章介绍电力电子技术中常用的数学方法，包括傅里叶级数与傅里叶变换、坐标变换、瞬时功率理论、对称分量法。第3章介绍现代电力电子器件，包括二极管、功率MOS、IGBT、GTO和IGCT等的原理与特性、宽禁带半导体电力电子器件、电力电子器件应用技术基础。第4章介绍DC/DC高频功率变换技术，包括软开关直流变换、三电平直流变换、同步整流、交错并联等内容。第5章介绍DC/DC变换器的动态模型与控制，包括功率变换器动态建模的意义、开关周期平均与小信号线性化动态模型、统一电路模型等内容。第6章介绍逆变器及调制技术，包括常用PWM技术、多电平逆变器拓扑结构及其PWM调制。第7章介绍SPWM变换器系统控制技术，包括SPWM变换器的建模、SPWM变换器控制方法等内容。第8章介绍有源功率因数校正技术，包括单相有源功率因数校正原理、单相有源功率因数校正电路与控制、三相Boost PFC电路与控制、三相6开关PFC电路等内容。

本书可作为电气工程学科及相关专业的研究生教材，也可作为从事电力电子装置、变频器、开关电源、新能源变流器等开发与设计的工程技术人员参考书。希望本书的出版能对国内广大从事电力电子技术、电源技术的科研人员了解电力电子技术的新知识有所帮助，在促进我国电力电子技术的教学和研究水平的提升方面发挥一点作用。

本书由徐德鸿编写了第1章、第5章、第8章，陈敏编写了第2章，陈治明编写了第3章，阮新波编写了第4章，李永东编写了第6章，康勇编写了第7章。徐德鸿负责全书的统稿。

本书引用了国内外许多专家、学者的著作、论文等文献，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，恳切希望读者批评指正。

作 者

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 电力电子技术的定义	1
1.2 电力电子器件	1
1.3 电力电子功率变换技术	3
1.4 电力电子技术的展望	4
1.5 本章小结	10
参考文献	10
第 2 章 电力电子技术中的数学方法	11
2.1 傅里叶级数与傅里叶变换	11
2.1.1 连续傅里叶级数与傅里叶变换	11
2.1.2 离散傅里叶级数与傅里叶变换	14
2.2 坐标变换	17
2.2.1 三相到两相的静止变换	18
2.2.2 d-q 旋转变换	18
2.2.3 空间矢量	22
2.3 瞬时功率理论	23
2.3.1 瞬时无功功率理论基础及其发展	23
2.3.2 Akagi 瞬时无功功率理论	24
2.3.3 基于电流分解的瞬时无功功率理论	25
2.3.4 通用瞬时无功功率理论	26
2.4 对称分量分解法	27
2.4.1 正序分量	27
2.4.2 负序分量	27
2.4.3 零序分量	27
2.4.4 总量和正序、负序、零序分量之间的关系	28
2.5 本章小结	29
参考文献	29
第 3 章 现代电力电子器件	31
3.1 概述	31
3.1.1 电力电子器件概述	31
3.1.2 发展沿革与趋势	33
3.2 电力电子器件原理与特性	37
3.2.1 整流原理与阻断特性	37
3.2.2 开关原理与频率特性	44
3.2.3 电导调制原理与通态特性	50
3.2.4 功率损耗原理与高温特性	51
3.3 现代整流二极管	56
3.3.1 普通肖特基势垒二极管	56
3.3.2 PN 结-肖特基势垒复合二极管	57
3.3.3 MOS-肖特基势垒复合二极管	58
3.3.4 改进的 PIN 二极管	58
3.4 功率 MOS	59
3.4.1 功率 MOS 的基本结构与工作原理	59
3.4.2 功率 MOS 的特征参数	61
3.4.3 功率 MOS 的基本特性	62
3.4.4 功率 MOS 的可靠性问题	67
3.5 绝缘栅双极晶体管 (IGBT)	70
3.5.1 IGBT 的基本结构和工作原理	70
3.5.2 IGBT 的工作特性	72
3.5.3 安全工作区	77
3.5.4 特种 IGBT 与 IGBT 的进化	77
3.6 宽禁带半导体电力电子器件	79
3.6.1 电力电子器件的材料优选	79
3.6.2 碳化硅电力电子器件	80
3.6.3 其他宽禁带半导体电力电子器件	83
3.7 本章小结	83
参考文献	84
第 4 章 DC/DC 高频功率变换	85
4.1 软开关直流变换器	85
4.1.1 直流变换器软开关的分类	85
4.1.2 谐振变换器	88
4.1.3 LLC 谐振变换器	92
4.1.4 PWM 软开关变换器	94
4.1.5 移相控制全桥变换器	97
4.2 三电平 DC/DC 变换器	100
4.2.1 多电平变换器的分类	100
4.2.2 基本的三电平变换器	101
4.2.3 隔离型三电平变换器	112

4.3 同步整流技术	120	7.1 概述	220
4.3.1 同步整流技术的基本概念	120	7.2 SPWM 变换器系统的一般性能要求 及指标	222
4.3.2 同步整流管的驱动时序	120	7.2.1 SPWM 变换器的一般性能要求 ...	223
4.3.3 同步整流管驱动电路分类	121	7.2.2 SPWM 变换器的一般性能指标 ...	223
4.3.4 同步整流双向驱动方式	123	7.3 SPWM 变换器的建模	226
4.3.5 同步整流单向驱动方式	128	7.3.1 SPWM 逆变器(独立运行)的 数学模型	226
4.4 交错并联技术	131	7.3.2 SPWM 整流器(接入电网)的 数学模型	235
4.4.1 交错并联技术的基本概念	131	7.4 独立运行逆变器的控制技术	240
4.4.2 交错并联变换器	131	7.4.1 逆变器输出电压控制技术	240
4.4.3 交错并联变换器和多电平变换 器的对比	134	7.4.2 逆变器并联运行控制技术	242
4.5 本章小结	135	7.5 接入电网的 SPWM 变换器控制技术 ...	248
参考文献	135	7.5.1 接入电网的 SPWM 变换器直流 侧电压控制技术	248
第 5 章 DC/DC 变换器的动态模型 与控制	137	7.5.2 接入电网的 SPWM 变换器电网 侧基波电流控制技术	251
5.1 功率变换器动态建模的意义	137	7.5.3 接入电网的 SPWM 变换器电网 侧功率控制技术	252
5.2 开关周期平均与小信号线性化动态 模型	142	7.5.4 接入电网的 SPWM 变换器电网 侧谐波电流控制技术	255
5.3 统一电路模型	158	7.6 控制器的设计	259
5.4 调制器的模型	159	7.6.1 基于经典控制理论的设计	260
5.5 闭环控制与稳定性	161	7.6.2 基于状态空间理论的设计	262
5.6 本章小结	164	7.6.3 重复控制	264
参考文献	164	7.6.4 无差拍控制	266
第 6 章 逆变器及调制技术	165	7.7 本章小结	268
6.1 概述	165	参考文献	269
6.2 电压型逆变器及其 PWM 技术	166	第 8 章 有源功率因数校正技术	271
6.2.1 电压型 PWM 逆变器的主回路	166	8.1 单相有源功率因数校正原理	271
6.2.2 电流正弦 PWM 技术	167	8.1.1 电阻负载模拟	271
6.2.3 空间矢量 PWM 技术	171	8.1.2 功率变换器与有源功率因数 校正	272
6.3 多电平变换器的拓扑结构	173	8.2 CCM 单相 BOOST 功率因数校正 变换器	276
6.3.1 多电平变换器的特点	173	8.2.1 电路原理分析	276
6.3.2 箝位型多电平变换器	175	8.2.2 CCM 单相 BOOST 功率因数 校正变换器的控制	281
6.3.3 级联型多电平变换器	183	8.3 DCM 单相 BOOST 功率因数校正 变换器	284
6.3.4 其他多电平结构	185	8.3.1 CRM 单相 BOOST 功率因数 校正变换器电路分析	286
6.4 多电平变换器的 PWM 控制	188		
6.4.1 多电平载波 PWM 技术	188		
6.4.2 多电平空间矢量 PWM 技术	194		
6.4.3 多电平载波与空间矢量的统一 ...	213		
6.5 本章小结	218		
参考文献	219		
第 7 章 SPWM 变换器系统控制 技术	220		

8.3.2 CRM 单相 BOOST 功率因数校正变换器的控制	291	电路	296
8.4 其他单相功率因数校正变换技术	292	8.5 三相 PFC 原理	297
8.4.1 无桥型功率因数校正变换电路	292	8.5.1 三相单开关 Boost PFC 电路的控制	297
8.4.2 低频开关功率因数校正变换电路	293	8.5.2 三相六开关 PFC 电路的控制	305
8.4.3 窗口控制功率因数校正变换		8.5.3 其他三相 PFC 电路	308
		8.6 本章小结	310
		参考文献	310

第 1 章 绪 论

1.1 电力电子技术的定义

电力电子技术通俗地说，就是利用半导体实现电能的高效率应用的技术。因此，电力电子技术的基础是功率半导体器件，或称为电力电子器件。1948 年美国贝尔实验室的肖克利等人发明了能够放大电信号的晶体管，从而开创了半导体电子学。实际上，晶体管不仅可以放大信号，也可以进行功率变换，如功率放大器。如果使晶体管工作在开关工作方式，并通过控制晶体管导通状态或关断状态在一个周期中持续的时间，就可以实现输出功率大小的控制。目前广泛采用的功率半导体器件如功率场效应晶体管（功率 MOSFET）、绝缘栅双极型晶体管（IGBT）、晶闸管都发展自晶体管，因此晶体管诞生也标志着电力电子技术学科发展的基础已经建立。历史上对电力电子技术学科的形成发挥关键作用的要数晶闸管的出现。1957 年美国通用电气公司在晶体管的基础上发明了晶闸管（SCR），晶闸管是一个可控的单向开关，可以实现大功率的应用，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，采用晶闸管器件的变流装置迅速推广。1974 年美国学者 W. Newell 提出了电力电子技术（Power Electronics）的定义，并用倒三角形对电力电子技术作了描述。倒三角形寓意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，这一观点已被学术界普遍接受。电力电子技术的定义如图 1-1 所示。

电力电子技术是依靠功率半导体器件实现电能的高效率变换与控制，或是对电动机运动实现精密控制的一门学科。电力电子技术是现代社会的支撑科技，几乎进入社会的各个方面，如电气化、汽车、飞机、自来水供水系统、电子技术、无线电与电视、农业机械化、计算机、电话、空调与制冷、高速公路、航天、互联网、成像技术、家电、保健科技、石化、激光与光纤、核能利用、新材料制造等。电力电子技术在推动科学技术和经济的发展中发挥着越来越重要的作用。

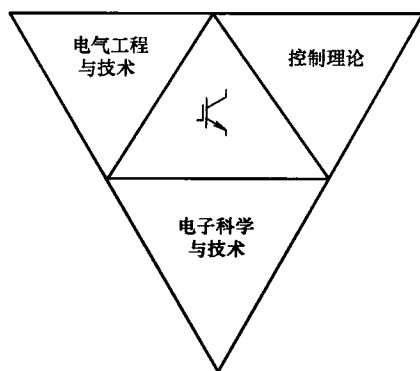


图 1-1 电力电子技术的定义

1.2 电力电子器件

按照载流子导电类型分类，电力电子器件可分为双极型、单极型和混合型。双极型器件采用两种载流子导电，具有耐压高、通态压降低的特点，适合于高压大容量的应用；单极型器件采用单一载流子导电，具有开关速度快和驱动方便的特点，适合于小功率的应用；混合型器件结合了双极型器件和单极型器件的优点。表

1-1 给出了典型电力电子器件的分类和用途。

表 1-1 典型电力电子器件的分类和用途

载流子导电类型	器件名称	英文名	用途	说明
双极型器件	二极管	Diode	整流、能量回馈、续流	分整流二极管和快速二极管
	功率晶体管	GTR		已被 IGBT 代替
	晶闸管	Thyristor	整流、逆变	高压大容量
	门极关断晶闸管	GTO	大容量逆变	已被 IGCT 替代
单极型器件	场效应晶体管	MOSFET	DC/DC 变换功率因数校正	小功率、高功率密度的应用
混合型器件	绝缘栅双极型晶体管	IGBT	逆变、DC/DC 变换、PWM 整流	应用十分广泛
	集成门极换流晶闸管	IGCT	大容量逆变	GTO 的进化

功率器件经历从结型控制器件（如晶闸管、GTR、GTO）到场控器件（如功率 MOSFET、IGBT、IGCT）的发展历程。20 世纪 90 年代又出现了智能功率模块（IPM），智能功率模块是将一个或多个功率器件及其驱动、保护等电路集成在一个硅片或一个基板上，形成了电力电子集成化的概念。大功率、高频化、驱动场控化成为功率器件发展的重要特征。图 1-2 所示为功率器件的电压等级和功率水平，图 1-3 所示为功率器件的应用场合。

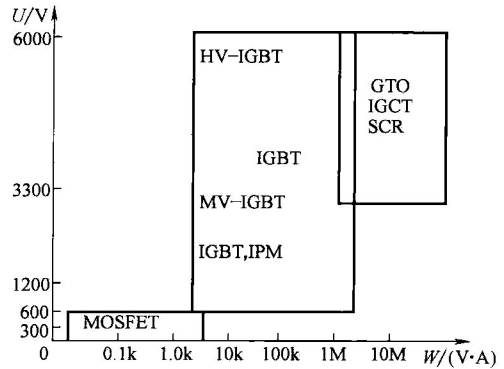


图 1-2 功率器件水平（电压、容量）

功率 MOSFET 的问世，打开了高频电力电子技术应用的大门。功率 MOSFET 主要应用在电压小于 600V、功率从数百毫瓦到数千瓦的场合，应用于计算机电源、通信电源、微型充电器、微型电动机控制等场合。

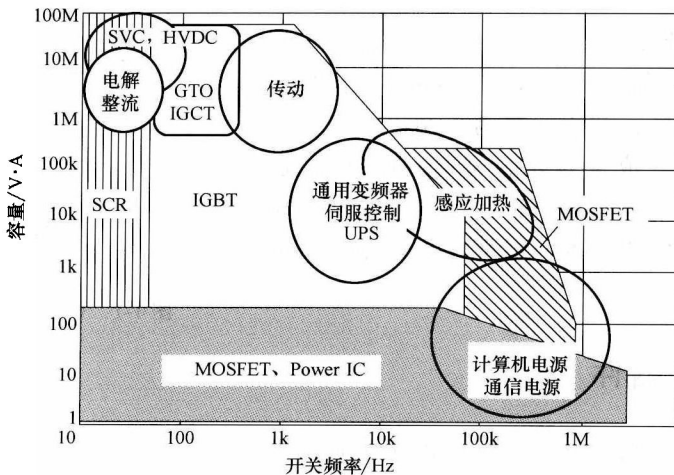


图 1-3 功率器件的应用场合

绝缘栅双极型晶体管（IGBT）综合了功率 MOSFET 和双极型 GTR 两者的优势，电压为

600V ~ 6.5kV, 适合功率从数千瓦到数兆瓦的应用场合。IGBT 已经成为最具有发展前景的功率器件, 应用于不间断电源设备 (UPS)、通用变频器、中压变频器、电力牵引、电动汽车、大功率开关电源、高频电焊机、感应加热电源、光伏变流器、风电变流器、静止无功发生器、电力储能控制装置等。

在 IGBT 出现以前, GTR 应用于开关电源、不间断电源设备、感应加热电源, 但目前 GTR 几乎被 IGBT 所替代。

晶闸管是最古老的功率器件, 目前仍是容量最大的功率器件, 主要应用在高压大容量整流、大容量电动机调速、无功补偿、直流输电等。由于晶闸管的门极没有关断能力, 需要借助电网或负载进行换流, 因此在逆变应用场合逐渐被 IGBT、GTO、IGCT 等替代。

门极关断晶闸管 (GTO) 是在晶闸管基础上发展起来的全控型电力电子器件, 目前的电压电流等级可达 6kV、6kA。GTO 开关速度较低, 损耗大, 需要复杂的缓冲电路和门极驱动电路, 使其应用受到限制。集成门极换流晶闸管 (IGCT) 综合了功率 MOSFET 和晶闸管两者优势。IGCT 继承了晶闸管的高阻断能力和低通态压降的特点。与 GTO 相比, IGCT 的关断时间降低了 30%, 功耗降低 40%。由于 IGCT 采用功率 MOSFET 作为场控驱动, 方便了应用。目前 IGCT 容量已达到 6.5kV/4kA, 适合功率从数百千瓦到数十兆瓦的应用场合。IGCT 同样主要面向高压大容量应用, 中压电机调速、电力牵引、风力发电、直流输电、固体断路器等。目前, 随着 IGBT 的高压大容量化, IGCT 的传统应用领地也不断受到 IGBT 蚕食。

1.3 电力电子功率变换技术

新的电力电子器件出现或新需求的出现总是对电力电子功率变换技术的发展注入新的动力。随着功率 MOSFET 器件和 IGBT 的出现, 20 世纪 80 ~ 90 年代掀起电力电子电路拓扑研究的热潮, 当时也正好是计算机技术快速发展时期, 对开关电源、不间断电源等产生了巨大的需求。为了满足开关电源的效率和功率密度等性能的提升要求, 发明了众多 AC/DC 和 DC/DC 功率变换的电路拓扑, 其中软开关谐振功率变换电路研究成为当时的热点。这一时期出现了如有源钳位 DC/DC 功率变换电路、全桥移相软开关 DC/DC 功率变换电路、单相功率因数校正电路、三相功率因数校正电路等新颖电路拓扑。20 世纪 90 年代以来出现了中压变频、无功补偿等应用需求, 高压、大容量的需求推动多电平变流技术的发展, 代表性的电路拓扑有中点钳位的三电平变流器或多电平变流器、飞跨电容多电平变流器、级联式多电平变流器。进入 21 世纪, 节能环保的要求拉动了新能源和电动汽车等需求, 以光伏逆变器电路拓扑为例, 出现 H5、HERIC 等新型光伏逆变电路拓扑。

对电力电子电路的功率调节主要有三种途径: 相控、PWM 控制、变频控制。传统晶闸管整流电路、交流调压电路一般依靠相控实现功率调节, 而以功率 MOSFET 或 IGBT 为开关器件的电力电子电路主要采用 PWM 控制。在三相变流系统中, 出现自然采样 PWM、规则采样 PWM、3 次谐波注入的 PWM、空间向量调制方法、特定谐波消除 PWM、最小损耗 PWM, 其中空间向量调制方法已成为三相变流系统的主流功率调节方法。伴随着三电平、多电平变流电路的出现, 空间向量调制方法或基于载波移相的 PWM 方法获得发展。一些面向高功率密度应用的谐振功率变换 DC/DC 变换电路采用变频控制实现功率调节, 同时实现电力电子器件的软开关和开关损耗的减少。

在电力电子系统理论方面出现了瞬时功率理论，它是分析以电力电子系统为代表的非正弦功率系统的有功、无功功率流动的基础。Park 变换被成功引入三相电力电子系统的控制，并在无功补偿器、有源滤波器、三相整流器、三相逆变器的控制中获得应用。许多控制理论的方法，如双环级联控制、解耦控制、前馈控制、重复控制、比例谐振控制、Deadbeat 控制、电流滞环控制、预测控制、神经网络控制，被引入电力电子系统的控制。数字锁相获得广泛应用，并发展出了能够适应非理想电网的锁相算法。

为了使电力电子系统达到所需的静态和动态指标，一般需要引入反馈控制。自动控制理论是进行反馈控制设计的有效工具。自动控制理论中关于控制器或补偿网络设计的主要工具有频域法和根轨迹法，它们只适用于线性系统。由于电力电子系统中包含功率开关器件或二极管等非线性器件，因此电力电子系统是一个非线性系统。为了进行控制器或补偿网络设计，需要建立电力电子系统的线性化动态模型。尽管电力电子系统为非线性电路，但在研究它在某一稳态工作点附近的动态特性时，仍可以把它当作线性系统来近似。

在电力电子电路和系统的仿真手段方面出现多种商用软件，如电路、系统分析软件 PSPICE、PSIM、SABER、SIMPLIS、PSCAD 等；变压器、电感等的分析软件 ANSOFT、热分析软件 ICEPAK。

1.4 电力电子技术的展望

1. 功率器件

功率器件的发展是电力电子技术发展的基础。功率 MOSFET 至今仍是最快速的功率器件，减少其通态电阻仍是今后功率 MOSFET 的主要研究方向。1998 年出现了超级结（Super-junction）的概念，通过引入等效漂移区，在保持阻断电压能力的前提下，有效地减少了 MOSFET 的导通电阻，这种 MOSFET 被称为 CoolMOS。CoolMOS 与普通 MOSFET 结构的比较如图 1-4 所示。比如 600V 耐压的 CoolMOS 的通态电阻仅为普通 MOSFET 的 1/5。它在中、小开关电源、固体开关中得到广泛的应用。

IGBT 综合了场控器件快速性的优点和双极型器件低通态压降的优点。IGBT 的高压、大容量也是长期以来的研究目标。1985 年人们认为 IGBT 的极限耐压为 2kV，然而 IGBT 器件的阻断电压上限不断刷新，目前已达到 6.5kV。采用 IGBT 改造 GTO 变频装置，减小了装置的体积和损耗。IGBT 的阻断电压的提高，使其能覆盖更大的功率应用领域，如 IGBT 替代 GTO 改造原有电气化电力机车的变频器。IGBT 正不断地蚕食晶闸管、GTO 的传统领地，在大功率应用场合极具渗透力。如何提高 IGBT 器件的可靠性如采用压接工艺等也是重要发展方向之一。对于应用于市电的电力电子装置的低压 IGBT 器件，其主要性能提高目标是降低通态压降和提高开关速度，出现了沟槽栅结构 IGBT

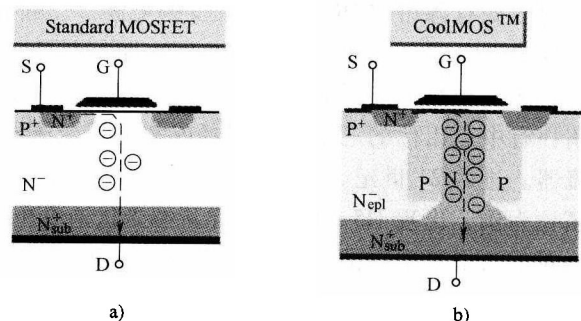


图 1-4 CoolMOS 与普通 MOSFET 结构的比较

a) 普通 MOSFET 结构 b) CoolMOS 结构

器件。面临 IGBT 的追赶，出现 GTO 的更新换代产品 IGCT，如图 1-5 所示。IGCT 通过分布集成门极驱动、浅层发射极等技术使器件的开关速度有一定的提高，同时减小了门极驱动功率，方便了应用。IGCT 正面临 IGBT 的严峻竞争，IGCT 的出路是高压、大容量化，可能在未来的柔性交流输电（FACTS）应用中寻找出路。

宽禁带功率器件是 21 世纪最有发展潜力的电力电子器件之一。目前最受关注的两种宽禁带材料是碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN），图 1-6 是两种宽禁带材料与硅材料的特性比较。SiC 材料的临界电场强度是硅材料的 10 倍，热导率是硅材料的 3 倍，结温超过 200°C 。从理论上讲，SiC 功率开关器件的开关频率将显著提高，损耗减至硅功率器件的 $1/10$ 。由于热导率和结温提高，因此散热器设计变得容易，构成的装置的体积变得更小。由于 SiC 器件的禁带宽，结电压高，因此比较适合于制造单极型器件。目前 600V 和 1.2kV 的 SiC 肖特基二极管产品具有几乎零反向恢复过程，已经在计算机电源中得到应用。2011 年 1200V SiC MOSFET 和 SiC JFET 实现了商业化。采用 SiC JFET 的光伏逆变器实现 99% 的变换效率。SiC 功率器件将应用于电动汽车、新能源并网逆变器、智能电网等场合。近年来，氮化镓（GaN）功率器件也十分引人注目，由于氮化镓（GaN）功率器件可以集成在廉价的硅基衬底上，并具有超快的开关特性，受到国际上的关注。主要面向 900V 以下的场合应用，开关电源、开关功率放大器、汽车电子、光伏逆变器、家用电器等。

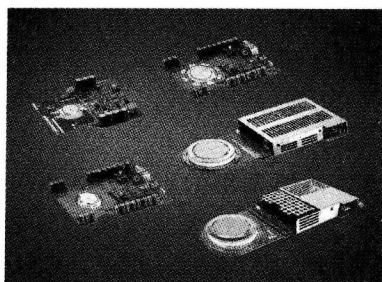


图 1-5 ABB 开发的 IGCT

2. 再生能源与环境保护

现代社会对环境造成了严重的污染，温室气体的排放引起了国际社会的关注，大量的能源消耗是温室气体排放的主要原因。发达国家的长期工业化过程是造成温室气体问题的主要原因。然而，改革开放以来，我国的能源消费量急剧上升，二氧化碳排放量也有较大增加。2011 年，我国的二氧化碳排放量已超过美国，成为世界上第一排放国。1997 年在日本京都召开的“联合国气候变化框架公约”会议上，通过了著名京都议定书 COP3，即温室气体排放限制议定书。通过国际社会的努力，2005 年京都议定书正式生效。

扩大再生能源应用比例和大力采用节能技术是实现京都议定书目标十分关键和有效的措施。欧盟制定了 20-20-20 计划，到 2020 年可再生能源占欧盟总能源消耗的 20%。2007 年 12 月美国总统签署了“能源独立和安全法案（EISA）”。

我国也十分重视再生能源的开发利用，2006 年我国施行了《再生能源法》。指定了《可再生能源中长期发展规划》，到 2020 年我国可再生能源将占总能源消耗的 15%。2010 年我国累计风电装机容量为 4200 万 kW，居世界第一，预计到 2020 年累计风电装机容量将逾 1

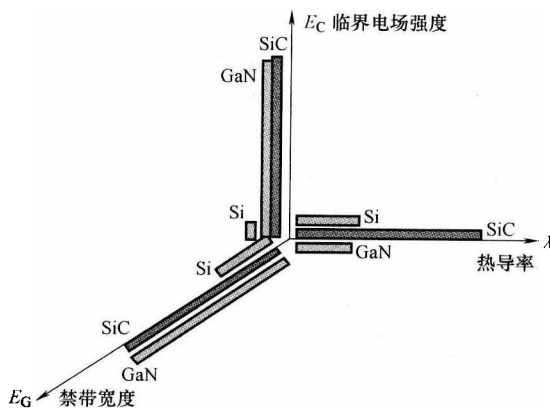


图 1-6 两种宽禁带材料与硅材料的特性比较

亿 kW。2010 年我国累计光伏装机容量为 100 万 kW，预计到 2020 年光伏装机容量将逾 4000 万 kW。

光伏、风力、燃料电池等新能源发电推动了电力电子技术的发展，并形成电力电子产品的巨大市场。由于光伏、风力等再生能源发出的是不稳定、波动的电能，必须通过电力电子变换器，将再生能源发出的不稳定、不可靠的“粗电”处理成高品质的电能，如图 1-7 所示。此外，电力电子变换器还具有风能或太阳能的最大捕获功能。因此，电力电子技术能提升新能源发电的可靠性、安全性，使其成为具有经济性、实用性的能源的支撑科技。

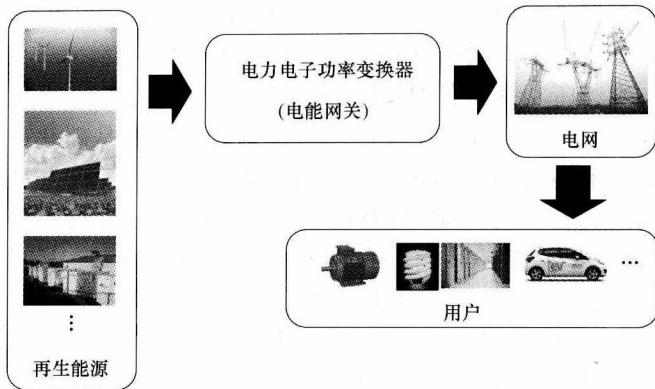


图 1-7 电力电子功率变换器是再生能源与电网之间的接口

3. 电动汽车

纯电动汽车与汽油汽车的一次能源利用率之比为 1:0.6。因此，发展电动汽车可以提高能源的利用率，同时减少温室气体和有害气体的排放。电动汽车的关键技术是电池技术和电力电子技术。为回避对大容量动力电池的依赖，日本开发了将汽油驱动和电动驱动相结合的混合动力汽车，并实现了产业化，如丰田 Prius 和本田 Insight。图 1-8 所示为混合型电动汽车的驱动结构图。混合动力汽车的产业化前景已引起美国汽车行业的注意，为防止失去混合动力汽车的市场，美国开发了 Plugin 混合动力汽车，Plugin 混合动力汽车配置一个较大的电池。

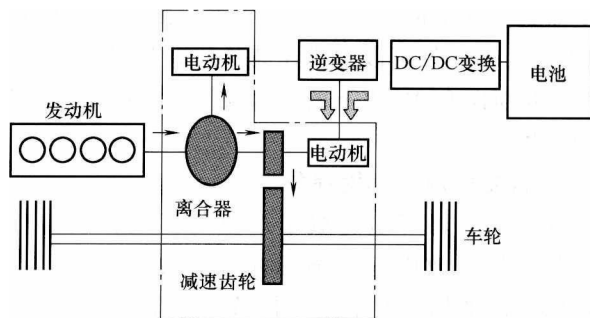


图 1-8 混合型电动汽车的驱动结构图

由于混合动力汽车无法解脱依赖石油的束缚，纯电动汽车才是理想的目标，但需要解决电池的问题。铅酸电池价格低，但能量密度低，体积大，一次充电的持续里程低，可充电次数少。于是开发比能量密度、比功率密度的电池成为研究热点，近年来磷酸铁锂动力电池由于其安全性、比能量密度、比功率密度等综合优势，已在电动汽车中获得实际应用。另一种受到关注的电池是以氢为燃料的质子交换膜燃料电池，它具有能量密度高的显著特点，因

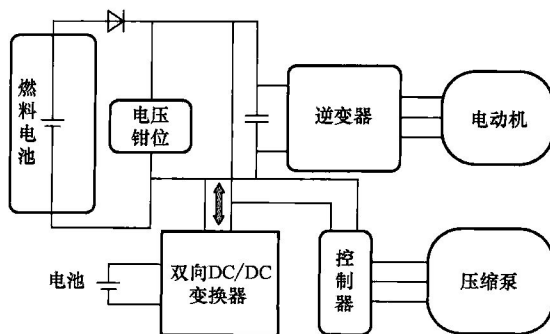


图 1-9 燃料电池电动汽车的结构

此燃料电池汽车是远景的理想环保的交通工具，图 1-9 所示为燃料电池电动汽车的结构。质子交换膜燃料电池开发重点是低成本化、长寿命。我国也十分重视电动汽车研究开发，已在部分城市进行电动汽车的应用示范。电动汽车产业将带动如电动机驱动、逆变器、DC/DC 变换器、辅助电源、充电器等电力电子产品的发展。

4. 轨道交通

2004 年 1 月国务院批准了中国铁路历史上第一个《中长期铁路网规划》，我国规划建设“四纵四横”高速铁路网、三个城际客运系统，到 2020 年基本实现铁路的现代化，客运专线达到 1.2 万 km 以上。2008 年 11 月颁布了《中长期铁路网规划（调整）》，到 2020 年，全国铁路营业里程将达到 12 万 km 以上，复线率和电气化率均分别达到 50% 和 60%，建成高速铁路 1.6 万 km，在 10 个煤炭外运基地及新疆地区建成大能力的煤运通道，开行 10000 ~ 20000t 重载单元组合列车。

我国客运专线运行的高速动车组时速从 200 ~ 350km/h，采用电力牵引交流传动系统，如图 1-10 所示。牵引变流器由预充电单元、四象限变流器、中间直流侧电路、牵引逆变器组成。在牵引变流器中，3300V/1200A、4500V/900A、6500V/600A 等级的 IGBT 器件成为主流，约各占 1/3。

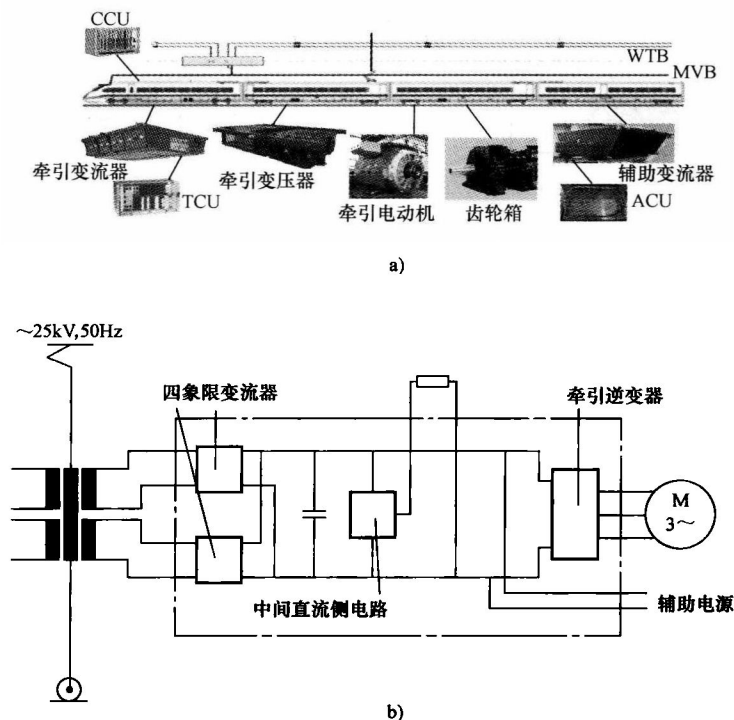


图 1-10 电力牵引交流传动系统

a) 电力牵引交流传动系统部件配置 b) 电力牵引交流传动系统示意图

在城市轨道交通方面，到 2015 年将有超过 30 个城市建设 85 条城市轨道交通线路，总长 2700km 以上。到 2020 年，北京、上海、广州、南京、天津、深圳、成都、沈阳、哈尔滨、青岛等城市将建成、通车的线路总计 40 多条，约 6000km，总投资在 7000 亿元以上。

电力电子技术是轨道交通的核心技术，我国急需开展高压大功率电力电子器件、大容量

高功率密度功率变流器、电力牵引交流传动控制技术的研发工作，以满足我国高铁和城市轨道交通的发展需求。

5. 智能电网

目前在国际上正在进行一场解放电力系统的创新——智能电网。智能电网核心技术包含信息技术、通信技术和电力电子技术。智能电网的目标是提高电力系统资产的利用率，减少能耗；提高电力系统的安全性、经济性；提高电力系统接纳新能源的能力，实现节能减排。智能电网将推动电力市场的发展，将使电力市场的发电方与供电方从垄断走向社会化。电力市场将促进分散供电系统的发展，可大幅度地减少电力输送的能耗，同时提高了电力系统的安全性，有利于能源多样化的实施，对国家安全有利；有利于采用再生能源、环保发电技术。从技术层面来讲，电力市场的引入将出现按质论价的电能供应方式，产生对电力品质改善装置，如 UPS、静止无功补偿装置（SVC）、静止无功发生器（SVG）、动态电压恢复器（DVR）、电力有源滤波器（APF）、限流器、电力储能装置、微型燃气发电机（Micro Gas Turbo）等；再生能源、环保发电技术等分散发电将需要交直流变流装置。电力市场将使柔性交流输电技术全面应用成为现实，带动直流输电（HVDC）、背靠背装置（BTB）、统一潮流控制器（UPFC）等电力电子技术的应用。图 1-11 所示为电力电子技术在电力系统中应用的示意图。

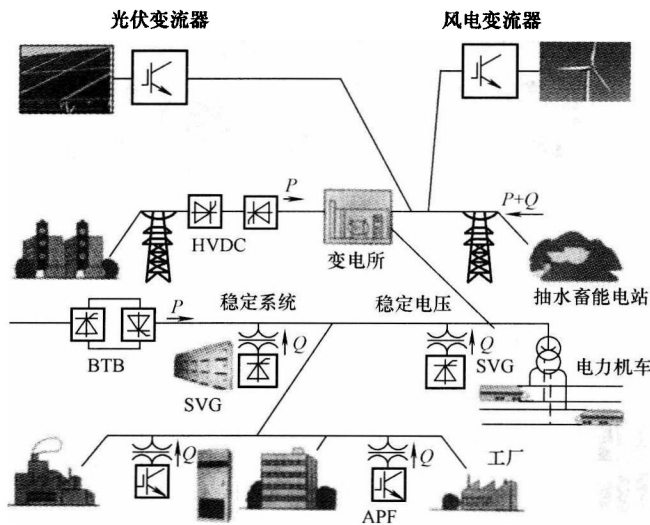


图 1-11 电力电子技术在电力系统中应用的示意图

目前再生能源的规模应用仍存在一定的困难，风能、光伏等再生能源存在间歇性、不稳定性等问题。针对分布式电源的困境，“微网”的概念应运而生。微网将化石能源、光伏、风力、储能装置等局部的电源和局部负荷构成一个小型的电能网络，可以独立于外电网或与外电网相连，如图 1-12 所示。它将若干个具有互补特性的分布式电源和局部负荷组成一个相对独立的微型电网，弥补再生能源存在间歇性、不稳定性等问题。微网可以小到给一户居民供电，大到给一个工厂或社区或一个工业区供电。微网可以通过一个潮流控制环节与外部大电网相连，既能实现微网与大电网的电能交换，也能实现微网与外电网故障的隔离。此外，微网具有能源利用率高的显著特点，如果采用热电联产，可以进一步提升能源利用效

率。可见微网能够起到风能、光伏等分布式电源规模化推广的助推器的作用。

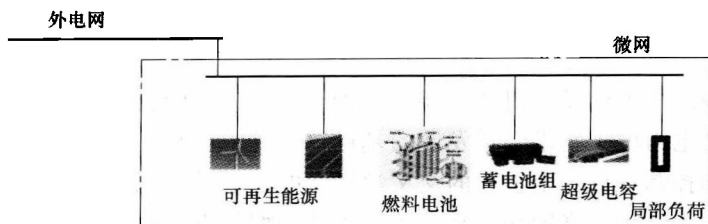


图 1-12 微网示意图

随着电动汽车的普及，大量电动汽车同时充电将对电力系统造成严重负担，需要将智能电网和储能技术相结合，借助市场杠杆实现充电的智能管理。另外，每个电动汽车都是一个储能装置，这种数量众多的分布式的储能装置，可以用来增加电力系统备用能力、实现电源与负荷平衡、提高故障处理能力、提升系统的经济性，是一种新的调控工具。于是就出现了所谓电动汽车对电网的作用的研究（V2G）。

6. 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。

图 1-13 所示为传统数据中心电源系统的电能利用效率分析，其利用率约为 70%，一次能源的利用率仅为 24%，其能源利用效率不高的主要原因是串联的功率变换环节级数太多。一次能源由电站转化成电能，然后通过输配电系统到达用户，再通过不间断电源（UPS）、整流器（AC/DC）、隔离型直流-直流变换器（DC/DC）、负载电源调节器（POL），最后供给数据处理芯片（CPU）。目前，出现了一种高压直流供电（HVDC）的数据中心电源系统方案，以减少串联的功率变换环节的级数。未来光伏、燃料电池等新能源发电将被引入数据中心电源系统，以实现节能减排，同时可以提高数据中心电源系统的可靠性。

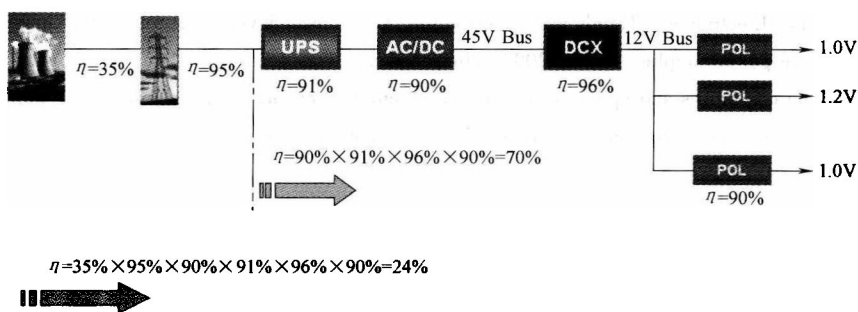


图 1-13 传统数据中心电源系统的电能利用效率分析

电源效率的提高，轻载或待机损耗下降，提高电源的功率密度将是未来的重要课题。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。

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。电力电子技术将在 21 世纪中为建设一个节能、环保、和谐的人类家园发挥重要的作用。

1.5 本章小结

目前广泛应用的电力电子器件如 IGBT、MOSFET 都发展自晶体三极管, 因此晶体三极管的诞生也标志着电力电子技术学科发展的基础已经建立。电力电子学是电气工程与技术、电子科学与技术和控制理论三个学科的交叉学科。电力电子器件经历从结型控制器件到场控器件的发展历程, 大功率、高频化、高效率、驱动场控化成为功率器件发展的重要特征。电力电子功率变换技术与电力电子器件同步发展, 在电路、控制、仿真手段等方面取得了重大的发展。

电力电子技术是依靠功率半导体器件实现电能的高效利用, 或者对运动的精密控制的一门学科。电力电子技术是现代社会的支撑科技, 几乎进入社会的各个方面。我国已形成上千亿元的电力电子产品市场, 支撑着数十万亿元的信息、通信、机电、能源、交通、家电等产业。电力电子技术在推动科学技术和经济的发展中发挥着越来越重要的作用。当今世界正面临能源、环境的双重压力, 特别是正在和平发展中的国家面临的史无前例的严峻挑战。电力电子技术是现代制造、新能源、智能电网、现代交通的核心技术。

参考文献

- [1] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [2] 林谓勋. 电力电子技术基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [3] 张立, 等. 现代电力电子技术[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [4] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [5] 陈坚. 电力电子学——电力电子变换和控制技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [6] 张占松, 蔡宣三. 开关电源的原理与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998.
- [7] E. Masada. Power electronics in industrial strategy for modern society[C]. PCC'2002, Osaka, April, 2002.
- [8] F C Lee. Power Electronics: Trends and opportunities[C]. Proceedings of the 5th Hong Kong IEEE workshop on switch mode power supplies, June, 2002, Hong Kong.
- [9] C C Chan. The challenges and opportunity in the new century: clean, efficient and intelligent electric vehicles [C]. Delta power electronics seminar, June, 2002, shanghai, China.