

The background of the cover is a photograph of an industrial welding process. Bright orange sparks are flying from a point of contact, likely a robotic arm or a welder's torch, against a dark, metallic background. The image is partially obscured by a large, diagonal green and black geometric shape that cuts across the lower half of the cover.

电力电子 系统与amp;控制

DIANLI DIANZI XITONG YU KONGZHI

李媛媛 曾国辉 主 编
阚 秀 奚峥皓 副主编

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

电力电子系统与控制

李媛媛 曾国辉 主 编
阚 秀 奚峥皓 副主编

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

本书共分7章,内容涵盖电力电子技术的发展历史、基本理论、电路工作原理、电路分析方法及对应的实际应用技术。其中:第1章主要介绍电力电子技术的基本概念、电能变换及控制的方法,以及电力电子技术的发展和特点等;第2章主要介绍常用电力电子器件的结构、工作原理和特性等;第3~6章分别对电力电子技术中常见的整流电路、逆变电路、斩波电路、交流调压和变频电路的基本工作原理和特性进行阐述;第7章主要针对目前在直流斩波电路和逆变电路中常用到的PWM控制技术进行详细的介绍。

本书内容深入浅出、通俗易懂,适合作为高等院校自动化专业、电气工程专业,以及其他相关专业的教材,也可作为相关专业研究生及本科生的教学参考书,还可作为从事电力电子变换和控制相关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子系统与控制/李媛媛,曾国辉主编.—北京:中国铁道出版社,2018.5

ISBN 978-7-113-18491-9

I. ①电… II. ①李… ②曾… III. ①电子控制 IV. ①TN1

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第000767号

书 名:电力电子系统与控制

作 者:李媛媛 曾国辉 主编

策 划:曹莉群

读者热线:(010)63550836

责任编辑:陆慧萍 绳 超

封面设计:刘 颖

责任校对:张玉华

责任印制:郭向伟

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址:<http://www.tdpress.com/51eds/>

印 刷:北京虎彩文化传播有限公司

版 次:2018年5月第1版 2018年5月第1次印刷

开 本:787mm×1092mm 1/16 印张:12 字数:284千

书 号:ISBN 978-7-113-18491-9

定 价:35.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社教材图书营销部联系调换。电话:(010)63550836

打击盗版举报电话:(010)51873659

电力电子学中电力电子变换和控制技术是一门发展非常迅速的技术,同时也是高等工科院校自动化专业、电气工程专业以及机电一体化等专业学生必修的一门专业基础课程。

电力电子技术横跨电力、电子和控制三个领域,是现代电子技术的基础之一,是实现通过弱电方式控制强电设备的桥梁和纽带,也是从事相关工作的专业技术人员所必须掌握的知识之一。

本书共分7章。第1章主要介绍电力电子技术的基本概念、电能变换及控制的方法,以及电力电子技术的发展和特点等;第2章主要介绍常用的电力电子器件的结构、工作原理和特性等;第3~6章分别对电力电子技术中常见的整流电路、逆变电路、斩波电路、交流调压和变频电路的基本工作原理和特性进行阐述,其中主要包括单相和三相可控整流电路、有源逆变电路、直流斩波电路、复合斩波电路、交流调压电路、交流/交流变换电路等;第7章主要针对目前在直流斩波电路和逆变电路中常用到的PWM控制技术进行详细的介绍。同时,本书各章后均设有小结和习题,以利于学生复习。

本书的内容在选取过程中遵循以电工、电子学和控制理论最基本的原理为起点,完整、系统地讲述电力电子变换和控制技术的基本知识、新技术的发展和应用原则。本书文字流畅、概念清晰、叙述深入浅出,适合高等院校的学生和自学者使用。

本书的编写人员均具有多年电力电子学一线教学经验。

本书由李媛媛、曾国辉任主编,阚秀、奚峥皓任副主编。其中第1、2章由李媛媛编写,第3章由阚秀编写,第4、6章由曾国辉编写,第5、7章由奚峥皓编写。

在本书编写的过程中,得到上海工程技术大学相关领导和教师的支持和帮助,在此对所有给予本书帮助的人员表示衷心的感谢,也向为本书编写、整理付出辛勤劳动的硕士研究生表示感谢。

由于时间仓促,加之编者水平有限,书中难免存在疏漏和不足之处,恳请广大读者给予批评指正。

编 者

2018年3月

第1章 绪 论	1
1.1 电力电子技术概述	1
1.2 电能变换及控制的方法	1
1.3 电力电子技术的发展史	2
1.4 电力电子技术的特点	3
1.5 电力电子技术的应用	4
1.6 电力电子技术的展望	5
小结	12
习题	12
第2章 电力电子器件	13
2.1 电力电子器件概述	13
2.2 电力二极管	15
2.2.1 电力二极管的基本结构与工作原理	15
2.2.2 电力二极管的基本特性	16
2.2.3 电力二极管的主要参数	18
2.2.4 电力二极管的主要类型	18
2.3 晶 闸 管	19
2.3.1 晶闸管的基本结构与工作原理	19
2.3.2 晶闸管的工作特性	21
2.3.3 晶闸管的主要参数	23
2.3.4 晶闸管的主要类型	26
2.4 典型全控型器件	28
2.4.1 门极可关断晶闸管	28
2.4.2 电力晶体管	30
2.4.3 电力 MOS 场效应晶体管	35
2.4.4 绝缘栅双极型晶体管	38
2.5 其他新型电力电子器件	42

2.5.1	MOS 控制晶闸管	42
2.5.2	静电感应晶体管	42
2.5.3	静电感应晶闸管	43
2.5.4	集成门极换流晶闸管	43
2.5.5	电子注入增强栅晶体管	43
2.6	电力电子器件驱动与保护电路	43
2.6.1	电力电子器件驱动电路概述	43
2.6.2	晶闸管的触发电路	44
2.6.3	典型全控器件的驱动电路	45
2.6.4	过电压的产生及保护	48
2.6.5	过电流的产生及保护	49
2.6.6	电力电子器件的缓冲电路	49
2.6.7	晶闸管的串联与并联	51
2.6.8	电力 MOSFET 的并联与 IGBT 的并联	52
小结	.....	53
习题	.....	53

第3章 整流电路 55

3.1	概 述	55
3.2	单相可控整流电路	55
3.2.1	单相半波可控整流电路	56
3.2.2	单相桥式全控整流电路	58
3.2.3	单相桥式半控整流电路	62
3.3	三相可控整流电路	63
3.3.1	三相半波可控整流电路	64
3.3.2	三相桥式全控整流电路	73
3.4	大功率可控整流电路	80
3.4.1	带平衡电抗器的双反星形可控整流电路	80
3.4.2	整流电路的多重化	84
3.5	有源逆变电路	85
3.5.1	整流与逆变的关系	85
3.5.2	电源间能量的变换关系	86
3.5.3	有源逆变电路的工作原理	87
3.5.4	三相半波共阴极逆变电路	89
3.6	整流电路的谐波和功率因数	90
3.6.1	整流电路的谐波及功率因数的概念	91

3.6.2	交流输入侧的谐波及功率因数	92
3.6.3	整流输出侧的谐波分析	92
小结	.....	94
习题	.....	95
第4章	逆变电路	96
4.1	逆变电路的分类和控制方式	96
4.1.1	逆变电路的分类	96
4.1.2	逆变电路的控制方式	97
4.2	电压型逆变电路	97
4.2.1	单相电压型逆变电路	97
4.2.2	三相电压型逆变电路	101
4.2.3	方波逆变电路输出电压波形分析	103
4.3	电流型逆变电路	104
4.3.1	单相电流型逆变电路	105
4.3.2	三相电流型逆变电路	105
4.4	逆变电路在中高压电气传动方面的应用案例——多电平逆变 电路	111
4.4.1	中高压逆变电路的应用场合及中压电压等级问题	111
4.4.2	二极管钳位型多电平逆变电路	112
4.4.3	电容钳位型多电平逆变电路	113
4.4.4	具有独立直流电源的级联型多电平逆变电路	114
4.5	逆变电路在电力系统中的应用案例——静止同步补偿器	116
4.6	逆变电路在电源技术中的应用案例	117
4.6.1	感应加热电源	117
4.6.2	交流方波电源	118
4.6.3	IGBT 逆变式电阻焊机电源	118
小结	.....	119
习题	.....	120
第5章	斩波电路	121
5.1	概 述	121
5.2	基本斩波电路	123
5.2.1	降压斩波电路	123
5.2.2	升压斩波电路	126
5.2.3	升降压斩波电路和 Cuk 斩波电路	130

5.2.4	Sepic 斩波电路和 Zeta 斩波电路	134
5.3	复合斩波电路和多相多重斩波电路	135
5.3.1	电流可逆斩波电路	135
5.3.2	桥式可逆斩波电路	135
5.3.3	多相多重斩波电路	137
5.4	晶闸管斩波器	138
5.5	斩波变阻电路	138
5.6	带隔离的直流/直流变流电路	139
5.6.1	正激电路	139
5.6.2	反激电路	140
5.6.3	半桥电路	141
5.6.4	推挽电路	142
5.6.5	全桥电路	143
小结	.....	144
习题	.....	145
第 6 章	交流调压和变频电路	146
6.1	间接交流/交流变换电路	146
6.1.1	电流型交流/交流变换电路	146
6.1.2	电压型交流/交流变换电路	147
6.2	直接交流/交流变换电路	148
6.2.1	周波变换器	148
6.2.2	矩阵变换器	151
6.3	交流调压电路	155
6.3.1	单相交流调压电路	155
6.3.2	三相交流调压电路	157
小结	.....	159
习题	.....	159
第 7 章	PWM 控制技术	160
7.1	PWM 控制的基本原理	160
7.2	PWM 逆变电路及其控制方法	162
7.2.1	计算法和调制法	162
7.2.2	异步调制和同步调制	166
7.2.3	PWM 逆变电路的谐波分析	168
7.2.4	提高直流电压利用率和减少器件的开关次数	170

7.2.5 PWM 逆变电路的多重化	172
7.3 PWM 跟踪控制技术	173
7.3.1 滞环比较方式	173
7.3.2 三角波比较方式	175
7.4 PWM 整流电路及其控制方法	176
7.4.1 PWM 整流电路的工作原理	176
7.4.2 PWM 整流电路的控制方法	179
7.4.3 功率开关器件	180
小结	182
习题	182



第 1 章 绪 论

学习目标:

- (1) 掌握电力电子技术的基本概念;
- (2) 掌握电能变换的基本类型;
- (3) 掌握电力电子技术的特点;
- (4) 了解电力电子技术的发展过程。

1.1 电力电子技术概述

电子技术的发展有两大方向:一个是电子信息技术;另一个是电力电子技术。电子信息技术的处理对象是信号和信息,即如何对信号和信息进行快速处理和真实传送。通常所说的模拟电子技术和数字电子技术都属于电子信息技术。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。目前所用的电力电子器件均用半导体制成,故又称电力半导体器件。电力电子技术所变换的“电力”,功率可以大到数百兆瓦甚至吉瓦,也可以小到数瓦甚至 1 W 以下。

电力电子学(power electronics)这一名称是在 20 世纪 60 年代出现的。1974 年,美国的 W. Newell 用一个倒三角形(见图 1-1)对电力电子学进行了描述,认为它是由电力学、电子学和控制理论三个学科交叉而形成的。这一观点被全世界普遍接受。“电力电子学”和“电力电子技术”是分别从学术和工程技术两个不同的角度来称呼的。

虽然作为新的学科领域只经过了五十多年的发展,但是已经取得了令人瞩目的成就,现在,电力电子技术已成为电气技术人员不可或缺的知识。

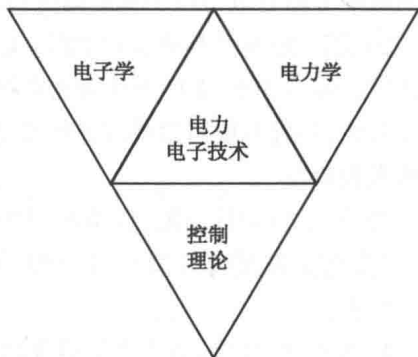


图 1-1 描述电力电子学的倒三角形

1.2 电能变换及控制的方法

电力电子技术是使用电力电子器件对电能进行高效变换和控制的技术。通常,表征电能状态的参数有电压、电流、频率、相位以及相数。电力电子技术中所说的电能变换控制,就是将这些电能状态的一个或多个参数进行变换控制,理想的情况下,电能的变换可趋近于既无时间延

迟也无电能损失的状态。

通常所用的电能有交流和直流两种。从公共电网直接得到的电能是交流的,从蓄电池和干电池得到的电能是直流的。从这些电源中得到的电能往往不能直接满足各种不同的需求,这时,就需要进行电能变换,如表 1-1 所示,电能变换的方式基本上可以分为四大类:交流变直流(AC/DC)、直流变交流(DC/AC)、直流变直流(DC/DC)、交流变交流(AC/AC)。交流变直流称为整流,直流变交流称为逆变。直流变直流是指一种电压(或电流)的直流变为另一种电压(或电流)的直流,一般用直流斩波电路实现;交流变交流可以是电压或电力的变换,称为交流电力控制,也可以是频率或相数的变换。

表 1-1 电能变换的基本类型

输出 输入	AC	DC
	整流	直流斩波
DC	交流电力控制变频、变相	逆变

1.3 电力电子技术的发展史

电力电子器件的发展决定了电力电子技术的发展,因此,电力电子技术的发展史是以电力电子器件的发展为纲的。

一般认为,电力电子技术的诞生是以 1957 年美国通用电气公司研制出的第一个晶闸管为标志的,电力电子技术的概念和基础也是由于晶闸管和晶闸管变流技术的发展而确立的。此前就已经有用于电能变换的电子技术,如 1904 年出现了电子管,1947 年美国著名的贝尔实验室发明了晶体管,这两种器件的出现在当时对电子技术的发展具有推动性的作用,所以晶闸管出现前的时期可称为电力电子技术的史前或黎明时期。

20 世纪 70 年代后期,以门极可关断晶闸管(GTO)、电力双极型晶体管(BJT)、电力场效应晶体管(Power MOSFET)为代表的全控型器件全速发展。全控型器件的特点是通过对其门极(栅极或基极)的控制既可以使其开通又可以使其关断,使电力电子技术的面貌焕然一新,从而进入新的发展阶段。

20 世纪 80 年代后期,以绝缘栅极双极型晶体管(IGBT)为代表的复合型器件集驱动功率小、开关速度快、通态压降小、载流能力大于一身,优越的性能也使之成为现代电力电子技术的主导器件。

20 世纪 90 年代,电力电子器件的研究和开发已进入高频化、标准模块化、集成化的智能时代。为了使电力电子装置的结构紧凑、体积减小,也把若干个电力电子器件及必要的辅助器件做成模块的形式,之后又把驱动、控制、保护电路和功率器件集成在一起,构成功率集成电路(PIC)。这也代表了电力电子技术发展的一个重要方向。

经过半个多世纪的发展,电力电子技术已经取得了辉煌的成就,但与微电子领域的高度集成化相比,电力电子技术仍处于“分立元件”时代,现在电力电子模块(IPEM)的概念已经提出。概念化的 IPEM 为三维结构,包括主电路、驱动控制电路、传感器与磁性元件等无源元件,并适合自动化生产。通过集成,可以将现有电力电子装置设计过程中所遇到的元器件、电路、控制、

电磁、材料、传热等方面的技术难点问题和主要设计工作在集成模块内部解决,使应用系统设计简化为选择合适规格的标准化模块并进行拼装即可。

这一革命性的技术将使现在的电力电子技术领域分化为集成模块制造技术和系统应用技术两个不同的分支,前者重点解决模块设计和制造的问题,通过多个不同学科的紧密交叉和融合攻克电力电子技术中主要的难点;而后者解决针对各种广泛而多样的具体应用将模块组合成系统的问题。

随着这一技术的发展,集成模块的设计和制造技术将成为电力电子技术研究的主要内容,而系统应用技术则渐渐成为具备基本素质的各行业工程师所掌握和使用的一般技术。由此,电力电子产业也将出现分化的趋势,集成模块的制造将成为该产业的主要内容,与集成电路一样,电力电子产业将会更加蓬勃发展。

1.4 电力电子技术的特点

前面曾经说过,电力电子是以电力、电子以及控制三个学科的基本技术为基础的交叉学科领域。图 1-2 是电力电子装置一般组成的示意图。

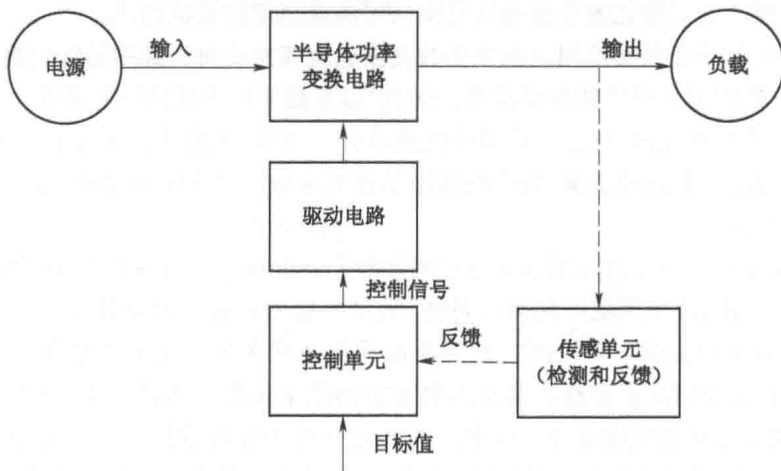


图 1-2 电力电子装置一般组成的示意图

图 1-2 中的主电路是电源的电能通过半导体功率变换电路变为负载所需的形态,并提供给负载。变换电路的多种方式与表 1-1 相对应。

如果电能变换电路相当于人类的肌肉,负载相当于人所要做的各种动作,那么就要有控制其动作的神经系统,它相当于图 1-2 的控制单元、驱动电路和传感单元,它们是根据外部的指令(目标值)、主电路中的各种状态量(电压、电流等)产生导通和关断的信号,并送到变换电路的开关器件。而驱动电路是将控制信号隔离放大后,驱动电力半导体器件的接口电路。

电力电子电路同其他的电力电路相比并没有多么显著的不同,其特点可归纳为以下几条:

(1) 使用开关动作。其目的是对大功率电能进行高效转换。

(2) 伴随换流动作。电流从某一器件切换到其他器件的现象称为换流(commutation)。

图 1-3 是开关电路的换流示意图,通过开关动作,电流从一侧支路转移到另一侧支路。

根据换流方式的不同,分为电网换流(line commutation)和器件换流(device commutation),又称自然换流(natural commutation)和强制换流(forced commutation)。

(3)由主电路和控制电路构成,两者间的接口技术同样重要。

(4)它是电力、电子、控制、测量等的复合技术。

(5)会产生谐波电流和电磁噪声。

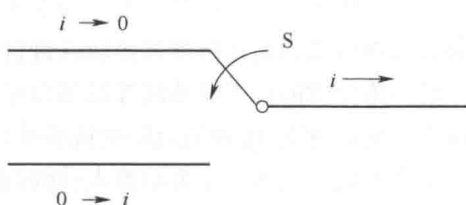


图 1-3 开关电路的换流示意图

1.5 电力电子技术的应用

应用电力电子技术构成的装置,按其功能可分为以下四种类型,对应了四大类电能变换技术:

- (1)可控整流器把交流电压变换成固定或可调的直流电压。
- (2)逆变器把直流电压变换成频率固定或可调的交流电压。
- (3)斩波器把固定或变化的直流电压变换成可调或固定的直流电压。
- (4)交流调压器及变频器把固定或变化的交流电压变换成可调或固定的交流电压。

这些装置单独应用了相关的变换技术,它们可以直接适用于某些特定场合。但也有不少其他装置综合运用了几种技术,比如变频器可能就结合了整流、斩波及逆变技术。可以说,电力电子装置及产品五花八门、品种繁多,被广泛应用于各个领域。其主要领域包括以下几方面。

1. 工矿企业

电力电子技术在工业中的应用主要是过程控制与自动化。在过程控制中,需要对泵类和压缩机类负载进行调速,以得到更好的运行特性,满足控制的需要。自动化工厂中的机器人由伺服电动机驱动(速度和位置均可控制),而伺服电动机往往采用电力电子装置驱动才能满足需要。另外,电镀行业要用到可控整流器作为电镀槽的供电电源。电化学工业中的电解铝、电解食盐水等也需要大容量的整流电源。炼钢厂里轧钢机的调速装置运用了电力电子技术的变频技术。工矿企业中还涉及电气工艺的应用,如电焊铁、感应加热等都应用了电力电子技术。

2. 家用电器

运用电力电子技术的家用电器越来越多。洗衣机、电冰箱、空调等采用了变频技术来控制电动机。电力电子技术还与信息电子技术相结合,使这些家用电器具有智能和节能的作用。如果离开了电力电子技术,这些家用电器的智能化、低电耗是无法实现的。另外,电视机、微波炉甚至电风扇也都应用电力电子技术。照明电器在家庭中大量使用;现在家庭中大量使用的“节能灯”“应急灯”“电池充电器”就采用了电力电子技术。

3. 交通及运输

电力机车、地铁及城市有轨或无轨电车几乎都运用电力电子技术进行调速及控制。斩波器在这一方面得到大量的应用。在中国上海,世界上首次投入商业运作的磁悬浮列车运行系统涉及配电、驱动控制等。毫无疑问,电力电子技术在其中占有重要地位。还有像在工厂、车站短途运载货物的叉车、电梯等,也用到斩波器和变频器进行调速等控制。

4. 电力系统

电力电子技术在电力系统中有许多独特的应用,例如高压直流输电(HVDC),在输电线路

的送端将工频交流变为直流,在受端再将直流变回工频交流。电力电子技术和装置已开始逐渐在电力系统中起重要作用,使得利用已有的电力网输送更大容量以及功率潮流灵活可控成为可能。电力电子装置还用于太阳能发电、风力发电装置与电力系统的连接。电网功率因数补偿和谐波抑制是保证电网质量的重要手段。晶闸管投切电抗器(TCR)、晶闸管投切电容器(TSC)都是重要的无功补偿装置。20世纪70年代出现的静止无功发生器(SVG)、有源电力滤波器(APF)等具有更为优越的补偿性能。此外,电力电子装置还可用于防止电网瞬时停电、瞬时电压跌落、闪变等。这些装置和补偿装置的应用可进行电能质量控制、改善电网质量。

5. 航空航天和军事

航天飞行器的各种电子仪器和航天生活器具都需要电源。在飞行时,为了最大限度地利用飞行器上有限的能源,就需要采用电力电子技术。即使用太阳能电池为飞行器提供能源,充分转换及节省能源是非常重要的。军事上一些武器装备也需要用到轻便、节电的电源装置,自然也就用到电力电子技术。

6. 通信

通信系统中要使用符合通信电气标准的电源和蓄电池充电器。新型的通用一次电源,是将市电直接整流,然后经过高频开关功率交换,再经过整流、滤波,最后得到48V的直流电源。在这里大量应用了功率MOSFET管,开关工作频率广泛采用100kHz。与传统的一次电源相比,其体积、质量大大减小,效率显著提高。国内已先后推出48V/20A、48V/30A、48V/50A、48V/100A、48V/200A等系列产品,以满足不同容量的需求。

7. 新能源应用

风力发电中常用到三种运行方式:独立运行、联合供电方式、并网型风力发电运行方式,这些都离不开电力电子技术。并网光伏发电系统中,太阳电池方阵发出的直流电力经过逆变器变换成交流电。此外,在新能源汽车中,使用的蓄电池、太阳电池、燃料电池、高速飞轮电池、超级电容、电动机及其驱动系统、能源管理系统、电源变换装置、能量回馈系统及充电器中,电力电子技术发挥着重要的作用。

从上述例子可以看出,电力电子技术的应用已经渗透到国民经济建设和国民生活的各个领域。这些例子也说明,在工业、通信及人们日常生活等方面,所用到的电能许多并不是直接取自于市电,而是要通过电力电子装置将市电转换成符合用电设备所要求的电能形式,而这种需求促进了电力电子技术的广泛应用。事实上,一些发达国家50%以上的电能形式都是通过电力电子装置对负载供电,我国也有接近30%的电能通过电力电子装置转换。可以预见,现代工业和人民生活对电力电子技术的依赖性将越来越大,这也正是电力电子技术的研究经久不衰及快速发展的根本原因。

1.6 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。其中

N_{sub}^+ 表示器件衬底, N_{epi}^- 表示厚的低掺杂的 N^- 外延层。比如 600 V 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。

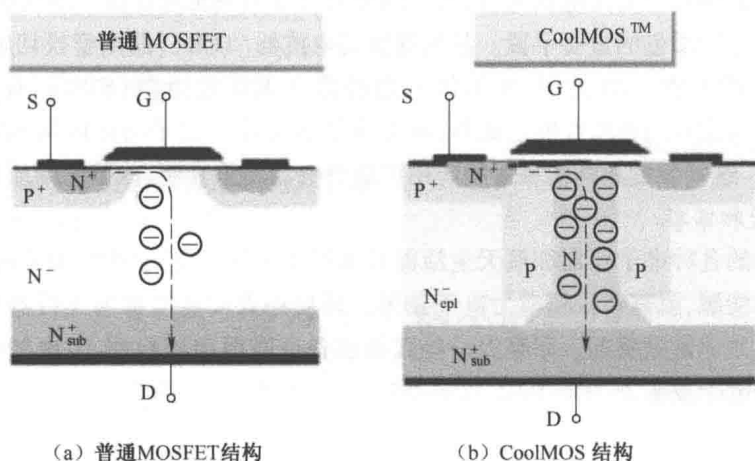


图 1-4 CoolMOS 与普通 MOSFET 结构的比较

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 2 kV,然而 IGBT 器件的阻断电压上限不断刷新,目前已达到 6.5 kV。采用 IGBT 改造 GTO 变频装置,减小了装置的体积和损耗。IGBT 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。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 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,可在未来的柔性交流输电(FACTS)应用中寻找出路。

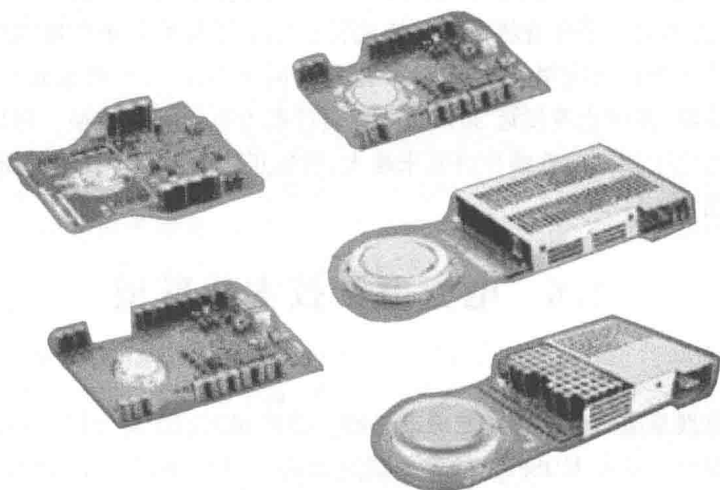


图 1-5 ABB 开发的 IGCT

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 600 V 和 1.2 kV 的 SiC 肖特基二极管产品几乎具有零反向恢复过程, 已经在计算机电源中得到应用。2011 年 1 200 V SiC MOSFET 和 SiC JEFET 实现了商业化。采用 SiC JEFET 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, 氮化镓功率器件也十分引人注目, 由于氮化镓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 900 V 以下的场合, 如开关电源、开关功率放大器、汽车电子、光伏逆变器、家用电器等。

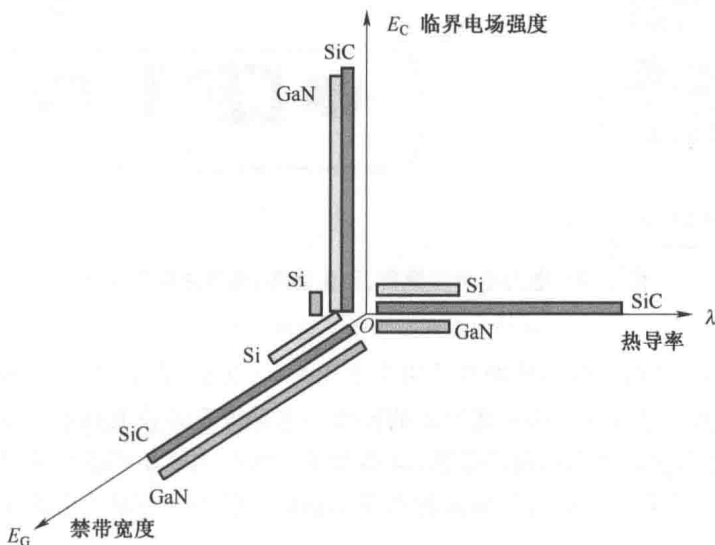


图 1-6 两种宽禁带材料与硅材料的特性比较

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。1997 年在日本京都召开的“联合国气候变化框架公约”会议上, 通过了著名的《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。欧盟制订了 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》。制定了《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 4 200 万 kW, 居世界第一, 预计到 2020 年累计风电装机容量将逾 1 亿 kW。

2010 年我国累计光伏装机容量为 100 万 kW, 预计到 2020 年我国累计光伏装机容量将逾 4 000 万 kW。

光伏、风力、燃料电池等新能源推动了电力电子技术的发展, 并形成了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。

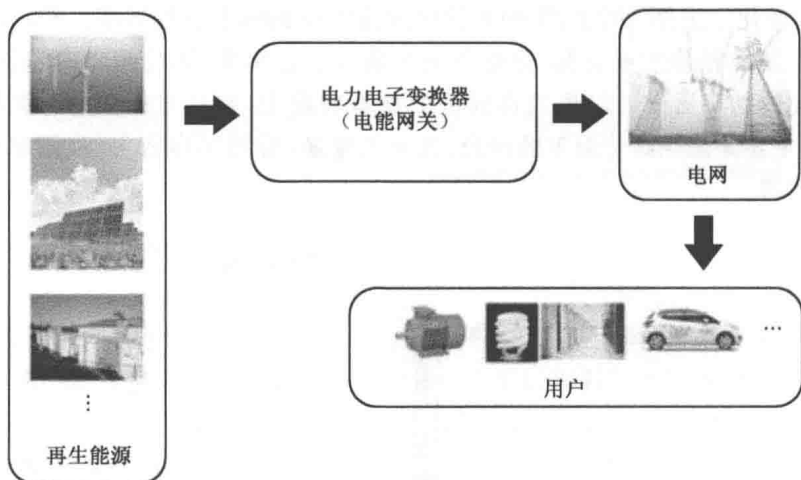


图 1-7 电力电子变换器、再生能源、电网之间的关系

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型电动汽车, 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。

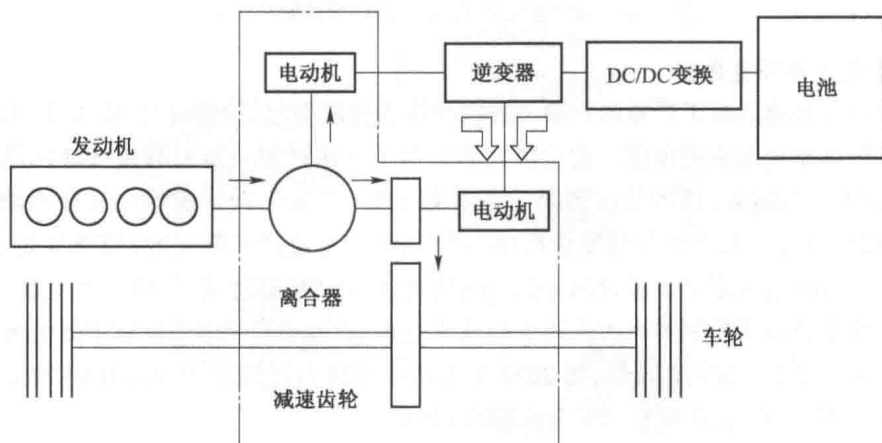


图 1-8 混合型电动汽车的驱动结构图

混合型电动汽车的产业化前景已引起美国汽车行业的注意, 为防止失去混合型电动汽车的