

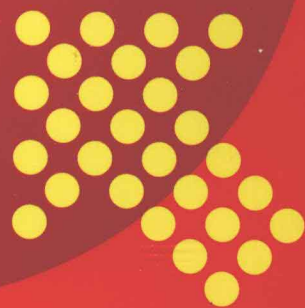
21世纪高等学校规划教材



DIANLI DIANZI JISHU

电力电子技术

叶予光 王 辉 主 编
王化冰 张晓杰 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

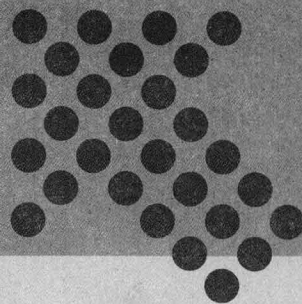
21世纪高等学校规划教材



DIANLI DIANZI JISHU

电力电子技术

主 编	叶予光	王 辉
副主编	王化冰	张晓杰
编 写	卞和营	张柳芳
主 审	程汉湘	



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

全书共分 10 章,其主要内容包括电力电子器件、相控整流电路、直流变换电路、无源逆变电路及电力电子技术在工程中的应用等。本书内容广泛,重点突出,反映了电力电子技术领域的新技术、新动向,每章后附有思考题和习题。

本书主要作为普通高等院校电气工程及其自动化专业、自动化专业电力电子技术课程的教学用书,也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术 / 叶予光, 王辉主编. —北京: 中国电力出版社, 2011.12

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978-7-5123-2379-7

I. ①电… II. ①叶… ②王… 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 (2011) 第 272834 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 2 月第一版 2012 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.25 印张 416 千字

定价 30.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

本教材是根据高等教育的特点及电气信息类及相关专业而编写的。

本教材由三大部分组成：

第一部分，内容包括常用电力电子器件的工作原理、特性、参数、驱动电路及保护方法，同时也介绍了近年出现的新一代电力电子器件，这是全书的基础。

第二部分是本书的主干部分，内容包括相控整流电路、有源逆变电路、直流电压变换电路，无源逆变电路，常用电子电路的工作原理，参数计算方法 and 应用范围。

第三部分从应用的角度出发，介绍了电力电子技术在工程中的应用及电力电子的 MATLAB 仿真。

另外在教学结构上，每章都设置了“本章小结”和“习题与思考题”，便于学生巩固所学知识及自学。

本教材由叶予光、王辉担任主编，王化冰、张晓杰担任副主编。参加本教材编写工作的有：河南平顶山学院叶予光（第 1 章、第 5 章）、平顶山学院卞和营（第 2 章）、平顶山学院张柳芳（第 3 章、绪论）、平顶山学院王化冰（第 4 章、第 10 章）、河南城建学院王辉（第 6～8 章）、河南城建学院张晓杰（第 9 章）。

在本教材的编写过程中，查阅和参考了大量的文献资料，在此谨向参考文献的作者致以诚挚的谢意。

限于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请广大读者提出宝贵意见，以便修改。

编 者

2011 年 4 月

目 录

前言	
绪论	1
第1章 电力电子器件	9
1.1 电力电子器件概述	9
1.2 功率二极管	10
1.3 晶闸管	11
1.4 可关断晶闸管 (GTO)	18
1.5 双极型功率晶体管 (GTR)	22
1.6 功率场效应晶体管	26
1.7 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)	31
1.8 其他新型电力电子器件	33
1.9 电力电子器件的串联与并联	38
本章小结	43
习题及思考题	44
第2章 相控整流和有源逆变电路	45
2.1 概述	45
2.2 单相可控整流电路	46
2.3 三相可控整流电路	60
2.4 变压器漏感对整流电路的影响	67
2.5 电容滤波的不可控整流电路	69
2.6 整流电路的谐波分析	74
2.7 大功率可控整流电路	81
2.8 整流电路的有源逆变工作状态	86
2.9 晶闸管触发电路	90
本章小结	95
习题及思考题	96
第3章 交流电力控制电路	98
3.1 交流调压电路	98
3.2 交流调功电路	104
3.3 交流电力电子开关电路	105
3.4 交—交变频电路	106
3.5 矩阵式变频电路	115
本章小结	118
习题及思考题	119

第 4 章 直流电压变换电路	120
4.1 直流电压变换电路的基本原理及分类	120
4.2 降压直流电压变换电路	121
4.3 升压型直流电压变换	124
4.4 直流变换降压—升压复合型直流变换电路	126
4.5 库克直流电压变换电路	128
4.6 Sepic 斩波电路和 Zeta 斩波电路	130
4.7 电流可逆斩波电路	131
4.8 桥式可逆斩波电路	132
4.9 多相多重斩波电路	133
4.10 直流变换电路的 PWM 控制技术	134
本章小结	137
习题及思考题	137
第 5 章 无源逆变电路	138
5.1 逆变器的基本工作原理及分类	138
5.2 电压型逆变器电路	142
5.3 电流型逆变器电路	149
5.4 多重送变电路和多电平逆变电路	156
5.5 脉宽调制 PWM 电路	162
5.6 正弦脉宽调制 SPWM 电路	168
5.7 PWM 整流电路	172
本章小结	176
习题及思考题	177
第 6 章 组合变流电路	178
6.1 间接交流变流电路	178
6.2 间接直流变流电路	184
本章小结	189
习题及思考题	190
第 7 章 软开关技术	191
7.1 软开关的基本概念	191
7.2 软开关电路的分类	192
7.3 典型软开关电路的工作原理	194
本章小结	198
习题及思考题	199
第 8 章 电力电子的 MATLAB 仿真	200
8.1 电力电子器件的仿真模型	200
8.2 电力电子电路中典型环节的仿真模型	206
8.3 典型电力电子电路的应用仿真	210
本章小结	221

习题及思考题	222
第 9 章 电力电子技术的应用	223
9.1 有源电力滤波器	223
9.2 静止无功补偿装置	224
9.3 静止无功发生器	225
9.4 高压直流输电	227
9.5 电力电子技术的其他应用	229
本章小结	231
习题及思考题	231
第 10 章 课程设计与实验	232
10.1 电力电子技术课程设计与实验概述	232
10.2 课程设计	232
10.3 课程实验	248
参考文献	266

绪 论

电力电子技术就是以电子器件为开关,把能得到的电源变换为所需要的电源的一门科学应用技术。它是电子工程、电力工程和控制工程相结合的一门技术,以控制理论为基础,以微电子器件或微计算机为工具,以电子开关器件为执行机构实现对电能的有效变换,以满足不同的负载需求,同时以追求电源变换装置的体积小、质量轻和成本低为目标。

电力电子技术包括电力电子器件、电力电子电路和控制技术三个部分,其主要研究任务是电力电子器件的应用、电力电子电路的电能变换原理、控制技术以及电力电子装置的开发与应用。

一、电力电子技术的发展

1. 电力电子器件的发展

电力电子技术的发展取决于电力电子器件的研制与应用。电力电子器件是电力电子技术的基础,也是电力电子技术发展的动力,电力电子技术的每一次飞跃都是以新器件的出现为契机的。

1957 年美国通用电气公司发明了可控硅 (Silicon Controlled Rectifier, SCR),后被国际电工学会正式命名为晶闸管 (Thyristor)。晶闸管于 1960 年正式供应市场。由于晶闸管是 PNPN 结构,具有更低的导通压降,又是可控的器件,因此它的发明被称为电子学的第二次革命。从现代角度来理解电力电子技术的内涵,晶闸管可以说是第一种电力电子半导体器件,它开启了电力电子技术的新纪元。

由于晶闸管在电源变换中的突出作用和众多优点,它自发明以来得到迅速发展。到 1980 年,已经开发出采用光触发的大功率晶闸管,容量达到 4000V/1500A。

晶闸管加上正向电压后,通过触发极可选择任何时刻控制其开通;一旦导通后,触发极便失去作用,只有当流过晶闸管的电流为零时才能自然关断。这不像机械开关,即可合闸控制其开通,又可拉闸控制其关断。既能控制开通、又能控制关断的晶闸管于 1961 年由美国通用电气公司研究成功,称为门极可关断晶闸管 (Gate Turn Off Thyristor, GTO)。

1948 年发明的硅晶体三极管 (三个极为基极、集电极、发射极),通过控制其基极、集电极之间可以起到类似机械开关的作用,可以控制电路中电流的通、断。当晶体管基射极之间不加正向电流时,甚至加一定反向电压时,晶体管不导通,相当于机械开关断开;当晶体管基射极之间加上正向电流大于某一定值时,晶体管进入饱和导通态,相当于机械开关闭合导通。1970 年,美国国际整流器公司开发出 500V/20A 的功率晶体三极管。现在晶体三极管一般称为双极晶体管 (Bipolar Junction Transistor, BJT)。1975 年,300V/400A 的功率 BJT 问世。由于功率晶体管的容量相对于信号用的晶体管,无论是器件耐压还是电流通过能力都要大得多,因此,功率 BJT 又称巨型晶体管 (Giant Transistor, GTR)。为使功率 BJT 能达到高的电流通过能力,采取了一种基射极级联的复合晶体管结构,称为达林顿结构 (Darlington),所以功率 BJT 也叫达林顿晶体管。

晶体管是空穴和电子两种载流子共同导电,具有电导调制效应,使得导通电压降比较低,

但开关速度受到一定限制。1978 年开发出了单载流子（要么空穴，要么电子）导电的功率 MOS 场效应管，容量为 100V/25A。由于功率 MOS 场效应管常采用垂直（Vertical）双扩散（Diffusion）沟道，通常简称为功率 MOS 管，或 VDMOS。VDMOS 没有电导调制效应，其开关速度要比容量相当的 BJT 更快，但其导通压降要比容量相当的 BJT 高不少。前面提到，BJT 的基极要加一定的电流（称驱动电流），集射极之间才能进入低压降的饱和导通状态。所以，BJT 被称为电流控制型器件，简称电流型器件。而 VDMOS 器件不然，VDMOS 的栅极和发射极之间是绝缘的，通常不导电。VDMOS 的栅极通常称为绝缘栅。只要在 VDMOS 的栅射极（相当于 BJT 的基射极）之间加上一个电压（称驱动电压），一般在 12V 到 17V 之间，VDMOS 就进入饱和导通状态。VDMOS 正常导通期间，栅射极之间是绝缘的，没有电流，只有电压。所以，VDMOS 称为电压控制型器件，简称电压型器件。在半导体器件工作状态下，有电流就有损耗。因此从器件损耗角度，比较相同电压和电流的 BJT 和 VDMOS，可以得出两点简单结论：一是 BJT 的驱动损耗比 VDMOS 大；二是 BJT 的导通损耗比 VDMOS 小。

1981 年，一种吸收了 VDMOS 的驱动优点和 BJT 的导通优点的新型半导体器件诞生了。这种混合型器件称为绝缘栅双极晶体管（Insulated-Gate Bipolar Transistor, IGBT）。由于其驱动损耗小，通态压降低、开通和关断时不必采取额外的措施来限制电流电压变换率，因此 IGBT 自投放市场以来，比先前的各种可关断器件，更受到使用者的青睐。通过不断改进结构和工艺，现在容量已经达到 6500V/2400A。

从 IGBT 器件的开发成功和市场前景，可以看出混合型器件的生命力和优势。于是，混合型器件不断得到开发。1987 年开发出了静电感应晶体管（Static Induction Transistor, SIT）和静电感应晶闸管（Static Induction Thyristor, SITH）；1988 年开发出 MOS 控制晶闸管（Mos Controlled Thyristor, MCT）；1991 年以后开发出不同的发射极开关的晶闸管（Emitter Switched Thyristor, EST）；1996 年开发出集成门极换向晶闸管（Integrated Gate Commutated Thyristor, IGCT）；1998 年开发出注入增强门极晶体管（Injection Enhancement Gate Transistor, IEGT）等。从混合器件开发的历程可以看出，半导体电子开关的控制模式趋向于采用 MOS 结构的电压控制模式；导通模式有晶体管和晶闸管两种模式。晶体管模式的通态压降比晶闸管得高，但开通和关断时对电流电压的变换率的承受能力要比晶闸管优越得多。IGCT 器件成功地结合了晶体管和晶闸管模式——导通时是晶闸管模式，有较低的通态压降；关断时是晶体管模式，不需要电压变化率的抑制电路。IGCT 器件的容量已经做到 6.5kV/6kA。

1990 年，把 IGBT 半导体电子开关的驱动电路、过流保护电路、过热保护电路、短路保护电路等集成起来，与电子开关一起封装在一个模块中的“智能化”器件开发成功，称为智能功率模块（Intelligent Power Module, IPM）。这是一种全新的器件理念。在这种理念引导下，此后各种各样的集成电力电子模块（Integrated Power Electronics Module, IPEM），如电力电子积木（PEBB）组件、灵巧（SMART）器件、专用功率集成（ASPIC）器件等得到进一步开发。

随着技术的发展，电力电子器件在不断进步。在控制方面，从单门控制器件（Single Gate Device）向双门控制器件（Double Gate Device）变化，如双沟道（Trench Double）IGBT；在材料方面，从硅（Silicon）材料向碳化硅（4H-SiC）材料变化，如碳化硅功率二极管，甚至今后可能采用金刚石材料；在 PN 结方面，从一维结器件（One-dimensional Junction Device）向三维超结器件（Three-dimensional Super Junction Device）变化，如 Cool MOS 器件。西门

子公司开发的耐压为 600V 的 Cool MOS, 其通态电阻只有普通功率 MOS 管的 1/5。2001 年戴姆勒-克莱斯勒用 1700V 的碳化硅二极管替代 IGBT 模块中的硅反并二极管后, 所构成逆变器的开通损耗只有原来的 1/3, 关断损耗只有原来的 1/5。到 2001 年, 全碳化硅器件已经开发出 19kV 的二极管, 1.8kV 双极晶体管, 3.1kV/3A 的 GTO, 也开发出了功率 MOS 管和 IGBT 模块。

2. 电力电子电路的发展

电力电子的电路拓扑结构也伴随着器件的发展而发展。自 1891 年建立了世界上第一座交流发电站以后, 1896 年和 1897 年分别发明了单相和三相桥式整流电路。1903 年发明了相控整流原理, 可以通过控制开关的导通时刻来控制直流输出电压的大小。1922 年发明了从交流到交流变换的周波变换器 (Cyclo-converter) 也译为“循环变换器”原理, 又称循环变换器原理。1924 年发明了从直流到直流变换的斩波器原理。1925 年发明了逆变器换流原理。1935 年直流高压输电线路正式在美国纽约州的 Mechanicville 和 Shenectady 之间建成。1942 年 20MW 的频率变换站建成。1959 年集成电路诞生, 为后来功能和性能更好的电力电子器件指明了方向。1964 年把用于通信领域的脉冲宽度调制 (PWM) 概念移植到电力电子变换器中, 直流变换到交流的逆变器在理论上可以输出交流正弦波电压或电流。1969 年, 发明了 PWM 整流器, 把 PWM 技术应用在整流器上, 通过控制脉冲, 整流器的输入电流可以为正弦波形, 与电压波形一样。PWM 变流器的发明, 改变了电力电子整流装置会使电网电流波形畸变的历史。

从电力电子变换器输入和输出的交直流关系来说, 通常有四种形式: AC/DC (交流到直流)——整流, DC/AC (直流到交流)——逆变, DC/DC (直流到直流)——斩波, AC/AC (交流到交流)——交流调压或周波变换。

交流到直流 (AD/DC) 的整流技术。整流器的发展经历四个阶段, 对应四种形式: 二极管不控整流器; 晶闸管等器件的相控整流器; 1989 年发明的二极管不控整流加升压斩波器; PWM 整流器。后两种整流器能改善交流侧的电流波形质量, 理论上可以达到正弦波形。

直流到交流 (DC/AC) 的逆变技术。根据逆变器直流侧的储能元件是电容器还是电抗器, 分为电压型逆变器和电流型逆变器两种。电压型逆变器的发展分为方波六阶梯波逆变器; PWM 逆变器; 1987 年发明的整流和逆变器均采用 PWM 控制的双 PWM 逆变器; 1987 年发明的多电平 PWM 逆变器; 谐振直流环或交流环逆变器等。根据产生 PWM 的方式不同, PWM 逆变器分为正弦 PWM、指定谐波消除 PWM、电流滞环控制 (也称边带控制) PWM、三角调制 PWM、随机谐波频谱 PWM、空间电压矢量 PWM 等。谐振直流环逆变器有 1989 年 Divan 发明的有源电压钳位直流环谐振逆变器和 1990 年 Bose 发明的电流初始化直流环谐振逆变器等; 谐振交流环逆变器有 1990 年 Lipo 发明的直流环节高频谐振交流换向逆变器和 Donker 发明的辅助谐振换向极逆变器等。电流型逆变器的发展分为同步电动机驱动电流型逆变器 LCI、感应电动机驱动电流型逆变器 ASCI、电流型 PWM 逆变器、1985 年 Hombu 发明的整流和逆变都是电流型 PWM 控制方式的双 PWM 电流型逆变器、感应加热用的电流型并联谐波逆变器、1981 年 Schwarz 发明的串联谐振交流环电流型整流—逆变器系统。电压型逆变器的储能元件为电容器, 其损耗小、单位储能的体积小且质量轻、发射的电磁干扰小, 但容易造成逆变器贯穿短路而烧损; 常规电流型逆变器的储能元件为电抗器, 其损耗多、单位储能的体积大且质量重、发射的电磁干扰大, 但不会因为出现短路而烧损逆变器。因此, 在逆变器短路保护尚未完全解决之前, 电流型逆变器比较受欢迎。20 世纪 90 年代以来, 由于贯穿

短路问题得到解决,电压型逆变器已占绝大多数市场。

交流到交流(AC/AC)的变换技术,其基本的形式有采用反并联晶闸管等组成开关的定频相控调压器、频率可向低频变换的相控周波变换器、矩阵式变换器等。

直流到直流(DC/DC)的斩波技术又称DC/DC变换技术。最基本的形式有降压斩波器(Buck变换器)、升压斩波器(Boost变换器)和升降压斩波器(Buck-Boost变换器)三种。1982年Slobodan Cuk发明了Cuk变换器。电气隔离可保证故障情况下设备或人员的最大安全,同时可避免设备正常使用的接地短路问题。因此采用变压器耦合进行电气隔离的DC/DC变换器应用更加广泛。基本的隔离型DC/DC变换器,主要有以Buck-Boost为基础的Fly-Back(回扫)变换器、以Buck为基础的Forward(正向)变换器、Push-Pull(推挽)变换器、Half-Bridge(半桥)变换器、Full-Bridge(全桥)变换器等。

传送功率一定时,随着工作频率的提高,变压器的质量和体积会随之减小。同样随着工作频率的提高,变换器中需要电抗器和电容器缓冲的能量要求降低,因此电抗器和电容器的容量可以随之减小,从而也减小了电抗器和电容器的体积和重量。开关频率达到20kHz以上时,已经超出人的听觉范围。为此,去掉工频变压器,代之以高频变压器的开关电源技术自20世纪70年代中期以来风靡欧美等工业发达国家,出现了开关电源中的20kHz革命现象。

为了降低单位功率的电源体积和质量,或提高单位体积的功率密度,20世纪70年代以来,开关电源领域一直不断地改进技术,把开关频率继续推向高端。市场上供应的开关电源,采用软开关控制方式的开关频率现在已经达到500kHz,开关频率达到MHz级的开关电源也已经开发出来。

随着通信、计算机和网络技术的不断发展,对开关电源提出了更高的要求,也提出了挑战。为了满足电子通信设备、服务器、高速计算机芯片等的低静态功耗和高动态性能的要求,需要开关电源能提供低电压、大电流,有的设备已经需要开关电源输出为1V/50A。输出电压为1.1V,电流为100A,电流转换率为5A/ns的开关电源也于2003年问世。

可以整流和逆流的PWM变流器是一种功能强大的四象限变流器。所谓四象限变流器,是指从交流侧看,交流电压和电流波形的夹角可以是 $0^\circ \sim 360^\circ$,可位于直角坐标系中的任一象限。PWM四象限变流器不仅交流电压和电流的波形相位差可以是 $0^\circ \sim 360^\circ$,而且交流侧输出波形的幅值、频率和形状可以按照控制要求进行调节。PWM四象限变流器的性质,为交流电机变频调速奠定了理论基础,也为改善供电质量的电力有源滤波器的发展奠定了理论基础。电力有源滤波器不仅能补偿谐波电流,还能吸收容性和感性无功电流、平衡负荷。

1971年,德国工程师Blaschke提出了交流电机的矢量控制思想,后来其博士论文对矢量控制的原理和实现方法进行了系统的研究。矢量控制从理论上解决了交流电机的变频调速困难,它可以像他励直流电机那样完全解耦地对转矩和磁通分别进行平滑调节。矢量控制的算法相当复杂,鉴于当时微电子技术和计算机技术的发展水平,要实现矢量控制的优良特性比较困难。1985年,德国鲁尔大学Depenbrock教授提出了直接力矩控制,简化了矢量控制系统的算法,通过力矩反馈的“乓-乓”控制达到力矩和磁通的基本解耦控制。交流电机调速理论解决以后,根据调速理论对PWM四象限变流器的输出PWM波进行有效控制,电力电子变流器装置就获得了交流电机调速的理想变频变压电源。

1976年和1978年,美国西屋电气公司的Gyugyi基于电力电子变换技术分别提出电力有源滤波器(APF)和无功发生器(SVG)的概念。此后,电力电子技术开始用于电力网的谐

波滤除和无功补偿。在此基础上,1986年美国电力科学研究院的 Hingorani 提出了灵活交流输电 (FACTS) 的概念。灵活交流输电是指利用电力电子技术对输电线路的电源进行变换,达到对输电线路阻抗等参数进行调节,以实现潮流的更好控制,并保证输电线路的输送负荷安全运行在更加接近于设计容量极限。1988 年 Hingorani 又进一步提出定制电力 (Custom Power) 的概念。如果把灵活交流输电定位于输变电系统中,则定制电力主要是指在配电系统中,通过电力电子变换技术以获得更好的用电可靠性和用电质量。定制电力的概念表明,今后供电部门可以根据用户的电源要求来提供更好质量和可靠性的增值了的电力。

进行电源变换的电力电子技术,其基础是电力电子开关。电力电子技术,无论应用于一般电子电器电源领域、还是应用于电机传动领域和电力系统领域,电力电子开关的工作频率越高,经过变换得到的电源就越接近于理想电源。因此,从电力电子技术的电源变换角度来说,希望开关频率越高越好。电力电子技术的一个发展趋势是开关器件频率的高频化。

3. 电力电子软件开关技术的发展

电子开关在开通和关断时,电流和电压的变化不是瞬间完成的,而是需要一定的时间才能完成。那么,在开通和关断过程中,就会出现电压波形和电流波形变化的交叠现象。开关过程中电压电流波形的交叠会产生损耗,称为开关过程损耗。开关过程损耗比开关正常导通或关断状态的损耗要大得多。因此,从开关损耗的角度和电力电子装置效率的角度,希望开关频率越低越好;为了获得高质量的电源,希望电源变换的开关频率越高越好。这两者互相矛盾。要解决好这个矛盾,只有想办法把开关的损耗降下来。降低开关损耗,一是从开关器件本身想办法,增加开关速度,减少开关过程的电流电压交叠成分;二是从变换技术上想办法,减小开关过程的电流电压交叠成分。通过开关变换技术的办法,减小开关过程中电流和电压波形的交叠成分,从而减小开关过程损耗的办法,称为软开关技术。

电力电子软开关技术,受逆阻型晶闸管关断过程的换流思路启发。在晶闸管组成的电力电子装置中,要么通过负载电路谐振的办法让晶闸管电流过零关断;要么在装置电路中增加一个辅助电路,并在必要时启动辅助电路工作,使得晶闸管电流过零而关断。如果通过谐振等办法,使得一个开关器件开通以后才开始流通电流,或电流过零以后才开始关断器件,称为零电流软开关 (ZCS);一个开关器件两端的电压过零以后才开通器件,或器件两端的电压过零以后才开始关断器件,称为零电压软开关 (ZVS)。国际上,20 世纪 70~80 年代主要研究方向是零电压或零电流的谐振、准谐振软开关技术。其缺点是开关电流 (电压) 应力高,并且变频控制复杂。进入 20 世纪 90 年代,各种软开关技术的开发和应用,如零电压/零电流开关 PWM、零电压/零电流转移 PWM、移相全桥和有源钳位零电压 PWM 变换等都有很大发展。针对中等功率移相全桥零电压 PWM 技术的固有缺点以及应用 IGBT 后的特点,人们又做了许多改进研究,提出了混合 ZCSZVS 的 PWM 移相全桥软开关技术。此后又提出大功率和多电平的软开关变换器新拓扑,使整流管和辅助开关也实现了软开关,提高了电路效率,拓展了应用范围,至今方兴未艾。

二、电力电子技术的应用

电力电子技术的应用范围十分广泛。它不仅用于一般工业,也广泛用于交通运输、电力系统、通信系统、计算机系统和新能源系统等,在照明、空调等家用电器及其他领域中也有着广泛的应用,以下分几个主要应用领域加以叙述。

1. 一般工业

工业中大量应用各种交直流电动机。直流电动机有良好的调速性能,为其供电的可控整流电源或直流斩波电源都是电力电子装置。近年来,由于电力电子变频技术的迅速发展,使得交流电动机的调速性能可与直流电动机相媲美,交流调速技术大量应用并占据主导地位。大至数千千瓦的各种轧钢机,小到几百瓦的数控机床的伺服电动机,以及矿山牵引等场合都广泛采用电力电子交直流调速技术。一些对调速性能要求不高的大型鼓风机等近年来也采用了变频装置,以达到节能的目的。还有些不调速的电机为了避免起动时的电流冲击而采用了软起动装置,这种软起动装置也是电力电子装置。

电化学工业大量使用直流电源,电解铝、电解食盐水等都需要大容量整流电源,电镀装置也需要整流电源。

电力电子技术还大量用于冶金工业中的高频或中频感应加热电源、淬火电源及直流电弧炉电源等场合。

2. 交通运输

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,交流机车采用变频装置。直流斩波器也广泛用于铁道车辆。在未来的磁悬浮列车中,电力电子技术更是一项关键技术。除牵引电动机传动外,车辆中的各种辅助电源也都离不开电力电子技术。

电动汽车的电机靠电力电子装置进行电力变换和驱动控制,其蓄电池的充电也离不开电力电子装置。一台高级汽车中需要许多控制电机,它们也要靠变频器和斩波器驱动并控制。

飞机、船舶需要很多不同要求的电源,因此航空和航海都离不开电力电子技术。

如果把电梯也算做交通运输工具,那么它也需要电力电子技术,以前的电梯大都采用直流调速系统,而近年来交流变频调速已成为主流。

3. 电力系统

电力电子技术在电力系统中有非常广泛的应用。据估计,发达国家在用户最终使用的电能中,有60%以上的电能至少经过一次以上电力电子变流装置的处理。电力系统在通向现代化的进程中,电力电子技术是关键技术之一。可以毫不夸张地说,如果离开电力电子技术,电力系统的现代化就是不可想象的。

直流输电在长距离、大容量输电时有很大的优势,其送电端的整流阀和受电端的逆变阀都采用晶闸管变流装置。近年发展起来的柔性交流输电(FACTS)也是依靠电力电子装置才得以实现。

无功补偿和谐波抑制对电力系统有重要的意义。晶闸管控制电抗器(TCR)、晶闸管投切电容器(TSC)都是重要的无功补偿装置。近年来出现的静止无功发生器(SVG)、有源电力滤波器(APF)等新型电力电子装置具有更为优越的无功功率和谐波补偿的性能。在配电网系统,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,以进行电能质量控制,改善供电质量。

在变电站中,给操作系统提供可靠的交直流操作电源,给蓄电池充电等都需要电力电子装置。

4. 电子装置用电源

各种电子装置一般都需要不同电压等级的直流电源供电。通信设备中的程控交换机所用的直流电源以前用晶闸管整流电源,现在已改为采用全控型器件的高频开关电源。大型计算

机所需的工作电源、微型计算机内部的电源现在也都采用高频开关电源。在各种电子装置中,以前大量采用线性稳压电源供电,由于高频开关电源体积小、质量轻、效率高,现在已逐渐取代了线性电源。因为各种信息技术装置都需要电力电子装置提供电源,所以可以说信息电子技术离不开电力电子技术。

5. 家用电器

照明在家用电器中占有十分突出的地位。由于电力电子照明电源体积小、发光效率高、可节省大量能源,通常被称为“节能灯”,它正在逐步取代传统的白炽灯和日光灯。

变频空调器是家用电器中应用电力电子技术的典型例子。电视机、音响设备、家用计算机等电子设备的电源部分也都需要电力电子技术。此外,有些洗衣机、电冰箱、微波炉等电器也应用了电力电子技术。

电力电子技术广泛用于家用电器使得它和我们的生活变得十分贴近。

6. 其他

不间断电源(UPS)在现代社会中的作用越来越重要,用量也越来越大。目前,UPS在电力电子产品中已占有相当大的份额。

航天飞行器中的各种电子仪器需要电源,载人航天器中为了人的生存和工作,也离不开各种电源,这些都必须采用电力电子技术。

传统的发电方式是火力发电、水力发电以及后来兴起的核能发电。能源危机后,各种新能源、可再生能源及新型发电方式越来越受到重视。其中太阳能发电、风力发电的发展较快,燃料电池更是备受关注。太阳能发电和风力发电受环境的制约,发出的电能质量较差,常需要储能装置的缓冲,需要改善电能质量,这就需要电力电子技术。当需要和电力系统联网时,也离不开电力电子技术。

为了合理地利用水力发电资源,近年来抽水储能发电站受到重视。其中的大型电动机的起动和调速都需要电力电子技术。超导储能是未来的一种储能方式,它需要强大的直流电源供电,这也离不开电力电子技术。

核聚变反应堆在产生强磁场和注入能量时,需要大容量的脉冲电源,这种电源就是电力电子装置。科学实验或某些特殊场合,常常需要一些特种电源,这也是电力电子技术的用武之地。

以前电力电子技术的应用偏重于中、大功率。现在,在1kW以下,甚至几十瓦以下的功率范围内,电力电子技术的应用也越来越广,其地位也越来越重要。这已成为一个重要的发展趋势,值得引起人们的注意。

总之,电力电子技术的应用范围十分广泛。从人类对宇宙和大自然的探索,到国民经济的各个领域,再到我们的衣食住行,到处都能感受到电力电子技术的存在和巨大魅力。这也激发了一代又一代的学者和工程技术人员学习、研究电力电子技术并使其飞速发展。

三、课程性质与学习方法

电力电子技术是高等学校自动化、电气工程及其自动化等相关专业的专业基础课程。本课程的目的和任务是使学生熟悉各种电力电子器件的特性和使用方法;掌握各种电力电子电路的结构、工作原理、控制方法、设计计算方法及实验技能;熟悉各种电力电子装置的应用范围及技术经济指标。同时,为“电力拖动自动控制系统”等后续课程打好基础。

学习本课程时,要着重物理概念与基本分析方法的学习,理论要结合实际,尽量做到器

件、电路、系统（包括控制技术）应用三者结合。在学习方法上要特别注意电路的波形与相位分析，掌握电力电子器件在电路中导通与关断的变化过程，从波形分析中进一步理解电路的工作情况，同时要注意培养读图与分析、器件参数计算、电路参数测量、调整以及故障分析等方面的实践能力。具体要求如下：

（1）掌握晶闸管、电力 MOSFET、IGBT 等电力电子器件的结构、工作原理、特性和使用方法。

（2）掌握各种基本的直流变换电路、逆变电路、整流电路和交流变换电路的结构、工作原理、波形分析方法。

（3）掌握相控技术和 PWM 技术的工作原理和控制特性，了解软件开关技术的基本原理。

（4）了解电力电子技术的应用范围和发展动向。

（5）掌握基本电力电子装置的实验和调试方法。

第1章 电力电子器件

电力电子器件是电力电子电路的基础,电力电子电路中的核心器件,电能变换是通过电力电子器件传递的。本章在对电力半导体器件的特征、发展历程和趋势、分类等问题作简要概述的基础上,重点介绍几种常用电力电子器件的工作原理、基本特性、主要参数,电力电子器件的驱动,电力电子器件的保护,电力电子器件串联和并联使用以及选择和使用中应注意问题等。

1.1 电力电子器件概述

1.1.1 概述

电力电子器件是电力电子电路的核心部件,是弱电控制强电的纽带,它直接应用于主电路,实现电能的变换或控制的电子器件。电力电子器件具有如下特征:

(1) 电力电子器件一般都工作在开关状态,往往用理想开关模型来代替。导通时其阻抗很小,接近于短路,管压降接近于零,流过它的电流由外电路决定;阻断时其阻抗很大,接近于开路,流过它的电流几乎为零,而电力电子器件两端电压由电源决定。

(2) 电力电子器件的开关状态往往需要由外电路来控制,即所谓的弱电对强电控制。在主电路和控制电路之间,需要中间电路根据控制电路的信号控制电力电子器件的开通和关断,用来控制电力电子器件导通和关断的电路称为驱动电路。

(3) 处理的电功率大,也就是电力电子器件能够承受高电压和通过大电流。电力电子器件的功率损耗通常远远大于信息电子器件,因而为了保证不至于因损耗散发的热量导致器件温度过高而损坏,不仅在器件封装上比较讲究散热设计,而且在其工作时一般都还需要安装散热器。

(4) 在实际应用中,电力电子器件往往需要由信息电子电路控制,而且两者之间应采取一定的隔离措施。

1.1.2 电力电子器件的分类

按照驱动电路加在器件控制端和公共端之间信号的性质,分为以下两类:

(1) 电流控制型:通过门极注入或者抽出电流来控制其导通或者关断的器件,属于这类器件的有晶闸管,电力晶体管 GTR、GTO 等。

(2) 电压控制型:通过在门极施加一定的电压信号就可以控制其导通与关断的器件,静态时几乎没有门极电流。由于电压控制型器件实际上是通过门极电压在器件内部产生可控的电场来改变流过器件的电流大小和通断状态的,所以又称为场控器件,如 IGBT、MCT 等。

按照器件内部电子和空穴两种载流子参与导电的情况可分为三类。

(1) 单极型器件:有一种载流子参与导电。此种器件具有输入阻抗高、响应速度快的特点,如 MOSFET、SIT 两种。

(2) 双极型器件：由电子和空穴两种载流子参与导电，此种器件具有通态压降低、阻断电压高、电流容量大的特点，如 GTR、GTO、SITH、IGCT 等。

(3) 复合型器件：由单极型器件和双极型器件混合而成的器件。该器件兼备了两者的优点，如 IGBT、MCT、IEGT 等。

按照器件的可控性分类又将电力半导体器件分为不可控型、半控型和全控型三种。

(1) 不可控型：如电力二极管，其特点是由电源主回路控制其通断状态。

(2) 半控型：如普通晶闸管，其特点是由触发信号控制其导通，但需由主回路的外部条件（负电压和小于维持电流）控制关断，通常采用换相电压的自然关断或强迫关断方法。

(3) 全控型：如电力开关器件，其特点是由触发信号控制导通和关断两种状态，包括可关断晶闸管（GTO）、大功率双极型晶体管（BJT）、MOS 场效应晶体管（MOSFET）、绝缘栅双极晶体管（IGBT）、MOS 控制晶闸管（MCT），以及静电感应晶闸管（SITH）和静电感应晶体管（SIT）等。

1.2 功率二极管

功率二极管属于不可控器件，是 20 世纪最早获得应用的电力电子器件，直到现在它仍在中、高频整流和逆变以及低压高频整流场合广泛应用。

1.2.1 功率二极管的工作原理

功率二极管是以 PN 结为基础的，是由一个面积较大的 PN 结和两端引线封装组成的。其外形主要有螺栓型和平板型两种，功率二极管的外形、结构和电气图形符号如图 1-1 所示。

功率二极管和电子电路中的二极管工作原理一样，具有单向导电性，即若二极管处于正向电压作用下，则 PN 结导通，正向管压降很小；反之，若二极管处于反向电压作用下，则 PN 结截止，仅有极小的可忽略的漏电流流过二极管。电力二极管的伏安特性曲线，如图 1-2 所示。

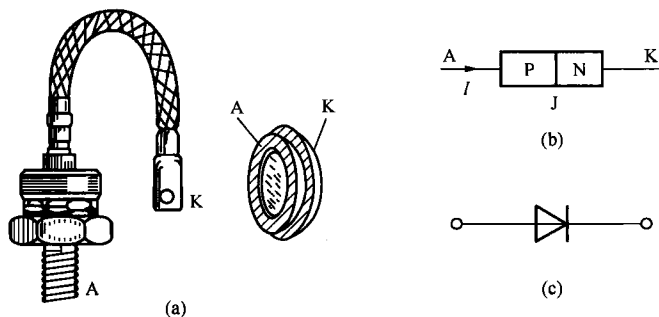


图 1-1 电力二极管的外形、结构和电气图形符号

(a) 外形；(b) 结构；(c) 电气图形符号

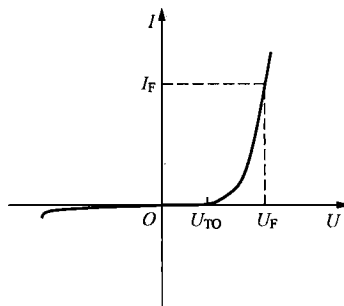


图 1-2 电力二极管的伏安特性

但必须注意，在外加电压的作用下，PN 结的电荷量随外加电压而变化，呈现电容效应，称为结电容，又称为微分电容。结电容按其产生机制和作用的差别分为势垒电容和扩散电容。势垒电容只在外加电压变化时才起作用，外加电压频率越高，势垒电容作用越明显。势垒电