



21世纪高职高专系列规划教材

机电电气控制专业



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电力电子技术

DIANLI DIANZI JISHU

主 编◎孟庆波 王 辉

副主编◎詹训进 郭亚军 陈迎松



北京师范大学出版集团

BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP

北京师范大学出版社

21世纪高职高专系列规划教材 机电电气控制专业
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电力电子技术

DIANLI DIANZI JISHU

主 编◎孟庆波 王 辉

副主编◎詹训进 郭亚军 陈迎松



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子技术 / 孟庆波, 王辉主编. —北京: 北京师范大学出版社, 2008.6 (2011.8第2版)

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-303-09221-5

I. ①电… II. ①孟…②王… III. ①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 053446 号

出版发行: 北京师范大学出版社 www.bnup.com.cn

北京新街口外大街 19 号

邮政编码: 100875

印 刷: 北京市易丰印刷有限责任公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 184 mm × 260 mm

印 张: 16.5

字 数: 350 千字

版 次: 2008年6月第1版

印 次: 2011年8月第2版 第2次印刷

定 价: 29.00 元

策划编辑: 周光明

责任编辑: 周光明

美术编辑: 高 霞

装帧设计: 国美嘉誉

责任校对: 李 菡

责任印制: 孙文凯

版权所有 侵权必究

反盗版、侵权举报电话: 010-58800697

北京读者服务部电话: 010-58808104

外埠邮购电话: 010-58808083

本书如有印装质量问题, 请与印制管理部联系调换。

印制管理部电话: 010-58800825

前 言

《电力电子技术》一书是普通高等教育高职高专国家级“十一五”规划教材。

电力电子技术是利用电力电子器件组成各种电力电子系统,对电力进行变换和处理的技术,是电气工程学科中的一个最为活跃的分支,许多现代高新技术均与电力电子技术有关。电力电子技术及其相关产业的进一步发展也必将会给现代化工农业生产和人民生活带来极大的便利。近年来,随着电力电子器件制造技术的进步,各种新型电力电子器件及其组成的电路层出不穷,电力电子设备的数量和品种迅速增长,社会上急需大量的掌握一定理论基础和技能的人员去操作和使用它们。为了适应科技的发展对电力电子技术应用型人才的需求,在北京师范大学出版社的组织下,我们编写了本教材。

本教材在编写的过程中,围绕高等职业技术教育的培养目标,紧紧把握理论联系实际,注重加强应用,基础理论则以“必须、够用”为原则。教材减少了理论和数学推导的内容,增加了图形、波形、仿真和实验等内容,有利于学生掌握与生产技术有关的技能。本书既可作为高职高专电气类专业的教材,也可供从事电力电子技术的工程技术人员参考。本课程建议授课学时为48~56学时,实验8~10学时,上机仿真2~4学时。

本教材共8章。第1章介绍电力电子器件的概念、特征及分类;电力二极管、晶闸管和全控型器件;电力电子器件的驱动、保护、缓冲、串并联技术等应用时的问题。第2章介绍整流电路的结构形式、工作原理,分析整流电路的工作波形;有源逆变的工作原理、工作波形;变压器漏抗对整流电路的影响、整流电路带电动机负载时的机械特性、触发电路等内容。第3章介绍交流-交流变换电路,包括交流调压、交-交变频以及几种交流变换电路的典型应用。第4章介绍各种斩波型直流-直流变换电路的工作原理、参数指标计算、各种斩波型直流-直流变换电路的比较及直流开关电源的应用。第5章介绍电压型和电流型变换器原理、电压型变换器与电流型变换器的比较以及SPWM型变换器。第6章介绍变换器的保护电路、电力电子器件散热器的设计和软开关技术。第7章介绍Matlab软件中Simulink和Power System工具箱的模块资源、模型窗口和菜单的构成、模块和系统模型的基本操作方法和系统的仿真技术,对典型电力电子电路建立仿真模型并进行仿真。第8章选择了8个实验,较详细地介绍各个实验的原理、步骤、注意事项、实验报告要求等事项,供实验教学时参考。

全书由王辉、孟庆波任主编。其中绪论和第7、8章由王辉执笔,第1章由孟庆波执笔,第2章由詹训进执笔,第3、4章由郭亚军执笔,第5、6章由陈迎松执笔。

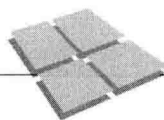
由于作者水平有限,书中疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者
2011年7月

目 录

绪 论	(1)
第 1 章 电力电子器件	(5)
1.1 电力电子器件概述	(5)
1.1.1 电力电子器件的概念	(5)
1.1.2 电力电子器件的发展趋势	(6)
1.1.3 电力电子器件的特征	(7)
1.1.4 电力电子器件的分类	(8)
1.1.5 应用电力电子器件的系统组成	(10)
1.2 不可控器件——电力二极管	(11)
1.2.1 PN 结与电力二极管的工作原理	(11)
1.2.2 电力二极管的基本特性	(13)
1.2.3 电力二极管的主要参数	(15)
1.2.4 电力二极管的主要类型	(16)
1.3 半控型器件——晶闸管	(16)
1.3.1 晶闸管的结构和工作原理	(17)
1.3.2 晶闸管的基本特性	(20)
1.3.3 晶闸管的主要参数	(23)
1.3.4 晶闸管的派生器件	(24)

1.4 典型全控型器件	(26)
1.4.1 门极可关断晶闸管	(26)
1.4.2 电力晶体管	(29)
1.4.3 电力场效应晶体管	(33)
1.4.4 绝缘栅双极晶体管	(39)
1.5 其他新型电力电子器件简介	(43)
1.5.1 MOS 控制晶闸管 MCT	(43)
1.5.2 静电感应晶体管 SIT	(44)
1.5.3 静电感应晶闸管 SITH	(44)
1.5.4 集成门极换流晶闸管 IGCT	(44)
1.5.5 功率模块与功率集成电路	(45)
1.6 电力电子器件的驱动概述	(45)
1.6.1 晶闸管触发电路	(46)
1.6.2 典型全控型器件的触发电路	(47)
1.7 电力电子器件的串并联技术	(48)
1.7.1 晶闸管的串联	(48)
1.7.2 晶闸管的并联	(49)
1.7.3 电力 MOSFET 和 IGBT 并 联运行的特点	(50)



本章小结	(50)
------------	------

第2章 可控整流电路与有源逆变电路

.....	(53)
2.1 引言	(53)
2.2 单相半波可控整流电路	(54)
2.2.1 电阻性负载	(54)
2.2.2 阻感性负载	(56)
2.2.3 阻感性负载加续流二极管	(57)
2.3 单相桥式全控整流电路	(60)
2.3.1 电阻性负载	(60)
2.3.2 阻感性负载	(62)
2.3.3 反电动势负载	(64)
2.4 三相半波可控整流电路	(65)
2.4.1 电阻性负载	(65)
2.4.2 阻感性负载	(68)
2.5 三相桥式全控整流电路	(70)
2.5.1 电阻性负载	(70)
2.5.2 阻感性负载	(74)
2.6 变压器漏抗对整流电路的影响	(76)
2.7 有源逆变电路	(78)
2.7.1 单相全波有源逆变的工作原理	(78)
2.7.2 三相半波有源逆变电路	(80)
2.7.3 三相桥式有源逆变电路	(81)
2.7.4 有源逆变最小逆变角 $\beta_{\min}$ 的限制	(81)
2.8 晶闸管触发电路	(83)
2.8.1 对触发电路的要求	(83)

2.8.2 单结晶体管触发电路 ...	(83)
2.8.3 同步电压为锯齿波的触发电路	(88)
2.8.4 集成触发电路	(93)
2.8.5 数字触发电路	(95)
2.8.6 触发脉冲与主电路电压的同步	(98)
2.9 晶闸管——直流电动机系统的机械特性	(100)
2.10 整流电路的谐波	(103)
本章小结	(106)

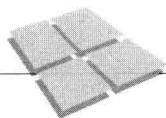
第3章 交流-交流变换电路

3.1 交流调压电路	(109)
3.1.1 单相交流调压电路	(110)
3.1.2 三相交流调压电路	(112)
3.1.3 斩波控制式交流调压电路	(114)
3.1.4 交流调功电路	(114)
3.2 交-交变频电路	(115)
3.2.1 单相交-交变频电路 ...	(116)
3.2.2 三相交-交变频电路 ...	(117)
3.3 交-交变换电路的应用	(118)
3.3.1 晶闸管在电动机软启动中的应用	(118)
3.3.2 无触点开关	(119)
3.3.3 白炽灯调光电路	(121)
本章小结	(121)

第4章 直流-直流变换电路

4.1 引言	(124)
4.2 降压变换电路	(125)
4.2.1 直流变换电路的工作原理	(125)
4.2.2 降压变换电路	(126)
4.3 升压变换电路	(128)
4.4 升降压变换电路	(130)

4.5 库克变换电路	(131)		(163)
4.6 输出与输入隔离的直流变换 电路	(134)	本章小结	(164)
4.6.1 反激式变换电路	(134)	第6章 电力电子技术应用中的一些 问题	(166)
4.6.2 正激式变换电路	(135)	6.1 变换器的保护	(166)
4.6.3 推挽式变换电路	(136)	6.1.1 过电压的产生及保护	(166)
4.6.4 半桥式变换电路	(136)	6.1.2 过电流保护	(169)
4.6.5 全桥式变换电路	(137)	6.1.3 电压上升率及电流上升率 的限制	(170)
4.7 直流变换电路的控制	(138)	6.2 器件的热传导和散热器的选择	(171)
4.7.1 直流变换电路中的开关器件	(138)	6.2.1 电力电子器件的温度	(171)
4.7.2 直流变换电路的控制方式	(140)	6.2.2 热传导	(171)
4.8 直流变换电路的应用	(141)	6.2.3 电力电子器件的功率损耗	(176)
本章小结	(145)	6.2.4 散热器	(177)
第5章 交流-直流-交流变换器	(148)	6.3 软开关技术	(179)
5.1 引言	(148)	6.3.1 硬开关和软开关	(179)
5.2 电压型与电流型变换器	(149)	6.3.2 软开关电路	(180)
5.2.1 电压型变换器	(149)	本章小结	(183)
5.2.2 电流型变换器	(153)	第7章 电力电子的 Matlab 仿真	(184)
5.3 电压型变换器与电流型变换 器的比较	(154)	7.1 Matlab/Simulink/Power Sys- tem 工具箱及应用简介	(184)
5.4 脉宽调制逆变器	(156)	7.1.1 Simulink 工具箱简介	(184)
5.4.1 脉宽调制的基本原理	(156)	7.1.2 Power System 工具箱简介	(187)
5.4.2 PWM 逆变电路的控制方式	(158)	7.1.3 Simulink/Power System 的模型 窗口	(191)
5.4.3 三相桥式 PWM 逆变电路的 工作原理	(160)	7.1.4 Simulink/Power System 的模块 操作	(193)
5.4.4 PWM 变频电路的调制控制方式	(161)	7.1.5 Simulink/Power System 系统模 型的操作	(197)
5.4.5 SPWM 波形形成的方法			



7.1.6	Simulink/Power System 系统仿真的配置	(198)
7.2	电力电子器件的仿真模型	(202)
7.2.1	晶闸管的仿真模型	(202)
7.2.2	GTO 的仿真模型	(205)
7.2.3	IGBT 的仿真模型	(207)
7.3	电力电子电路中典型环节的仿真模型	(209)
7.3.1	同步六脉冲触发器的仿真模型	(209)
7.3.2	PWM 发生器的仿真模型	(211)
7.3.3	通用变流桥的仿真模型	(213)
7.4	典型电力电子电路的应用仿真	(215)
7.4.1	晶闸管三相桥式全控整流电路的应用仿真	(215)
7.4.2	有源逆变电路的应用仿真	(217)
7.4.3	交流调压电路的应用仿真	(221)
7.4.4	直流斩波电路的应用仿真	(222)
	本章小结	(227)
第 8 章	电力电子技术实验	(228)
8.1	电力电子技术实验概述	(228)
8.1.1	实验的特点和要求	(228)

8.1.2	实验准备	(228)
8.1.3	实施实验	(229)
8.1.4	实验总结	(229)
8.1.5	实验安全操作规程	(230)
8.2	DJK-1 型电力电子技术及电机控制实验装置简介	(230)
8.2.1	实验装置特点	(230)
8.2.2	实验装置技术参数	(231)
8.2.3	DJK01 电源控制屏	(232)
8.3	电力电子技术实验内容	(233)
8.3.1	实验一 晶闸管的测试及导通关断条件测试实验	(233)
8.3.2	实验二 单结晶体管触发电路和单相半波可控整流电路实验	(235)
8.3.3	实验三 单相桥式全控整流及有源逆变电路实验	(239)
8.3.4	实验四 三相半波可控整流电路实验	(242)
8.3.5	实验五 三相桥式全控整流及有源逆变电路实验	(244)
8.3.6	实验六 单相交流调压电路实验	(247)
8.3.7	实验七 三相交流调压电路实验	(250)
8.3.8	实验八 直流斩波电路实验	(252)
	参考文献	(255)

绪 论

1. 什么是电力电子技术

以电力为处理对象的电子技术称为电力电子技术(Power Electronics)，它是一门利用电力电子器件对电能进行控制和转换的学科。

电力电子技术包括电力电子器件、变流电路和控制技术 3 个部分，其中以电力电子器件的制造和应用技术为核心技术，电力电子技术与其他学科的关系如图 0-1 所示。从图中可以看出电力电子技术交叉涵盖电力、电子和控制 3 大电气工程技术领域。随着科学技术的发展，电力电子技术又与现代控制理论、材料科学、计算机技术、微电子技术等许多领域密切相关，并逐步发展成为一门多学科、相互渗透的综合性技术学科。

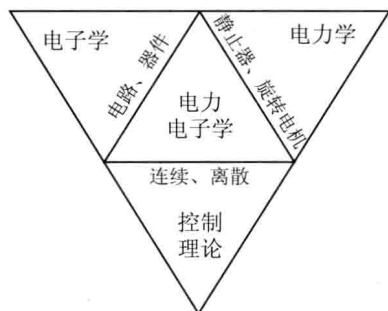


图 0-1 电力电子技术与其他学科的关系

通常所用的电能有直流(DC)和交流(AC)两大类。前者有电压幅值和极性的不同，后者除电压幅值和极性外，还有频率和相位的差别。实际应用中，常常需要在两种电能之间，或对同种电能的一个或多个参数(如电压、电流、频率)进行变换。电力变换通常可分为 4 大类，介绍如下。

(1)交流-直流(AC-DC)变换：称为整流，即将交流电转换为直流电。

(2)直流-交流(DC-AC)变换：将直流电转换为交流电。这是与整流相反的变换，也称为逆变。当输出接电网时，称之为有源逆变；当输出接负载时，称之为无源逆变。

(3)交流-交流(AC-AC)变换：将交流电能的参数(幅值或频率)加以变换。其中改变交流电压有效值称为交流调压；将工频交流电直接转换成其他频率的交流电，称为交-交变频。

(4)直流-直流(DC-DC)变换：也称为直流斩波，是将恒定直流变成断续脉冲输出，以改变其平均值。



2. 电力电子技术的发展进程

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,因此,电力电子技术的发展是伴随着电力电子器件的发展应运而生的。

19 世纪初年出现了电子管(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,从而开创了电子技术之先河。后来出现了水银整流器(Mercury Rectifier),它把水银封于管内,利用对其蒸气的点弧可对大电流进行控制,其性能和现在的晶闸管非常相似。20 世纪 30 年代到 50 年代是水银整流器发展迅速并大量应用的时期。它被广泛用于电化学工业、电气铁道直流变电所以及轧钢用直流电动机的传动等场合,甚至被用于直流输电。

1947 年,美国的贝尔实验室发明了晶体管(Transistor),引发了电子技术的一场革命。此后,半导体器件在世界范围内很快发展起来,逐渐形成了半导体固态电子学。

1957 年,美国的通用电气公司研制出第一个晶闸管(Thyristor),标志着电力电子技术的诞生。从此,半导体固态电子学逐渐分化为两个分支:一个分支是以晶体管集成电路为核心,以计算机为代表,对信息进行处理的高新技术;一个分支是以晶闸管为核心,对电能进行变换和控制的电力电子技术。在我国,1960 年成功研究了硅整流管(Silicon Rectifying Tube/Rectifier Diode),1962 年成功研究了晶闸管。但晶闸管为半控型器件,其应用受到一定的限制。

20 世纪 70 年代后期,以门极可关断晶闸管(GTO, Gate-Turn-Off Thyristor)、电力晶体管(GTR, Giant Transistor)、电力场效应晶体管(P-MOSFET, Power Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)为代表的全控型器件迅速发展。

从 20 世纪 80 年代后期开始,以绝缘栅双极晶体管(IGBT, Insulated-Gate Bipolar Transistor)为代表的复合型器件异军突起,IGBT 是 P-MOSFET 和 GTR 的复合。它集 MOSFET 的驱动功率小、开关速度快和 GTR 通态压降小、载流能力大的优点于一身,性能十分优越,使之成为现代电力电子技术的主导器件。与 IGBT 相对应,MOS 控制晶闸管(MCT, MOS Controlled Transistor)和集成门极换流晶闸管(IGCT, Integrated Gate-Commutated Thyristor)等都是 MOSFET 和 GTO 的复合,它们也综合了 MOSFET 和 GTO 两种器件的优点。

到了 20 世纪 90 年代,为了使电力电子装置的结构紧凑、体积减小,常常把若干个电力电子器件及必要的辅助元件做成功率模块(Power Module)的形式,这给应用带来了很大的方便。把驱动、控制、保护电路和功率器件集成在一起,就构成了功率集成电路(PIC, Power Integrated Circuit)。目前,其功率都还较小,但代表了电力电子技术发展的一个重要方向。此外,智能功率模块(IPM, Intelligent Power Module)专指 IGBT 及其辅助器件与其保护和驱动电路的单片集成,也称智能 IGBT(Intelligent IGBT);高压集成电路(HVIC, High Voltage Integrated Circuit)指横向

高压器件与逻辑或模拟控制电路的单片集成；智能功率集成电路（SPIC，Smart Power Integrated Circuit）一般指纵向功率器件与逻辑或模拟控制电路的单片集成。这些器件的出现，都代表了电力电子器件模块化、集成化、数字化与智能化的发展趋势。

随着全控型电力电子器件的不断进步，电力电子电路的开关频率不断提高，带来开关损耗随之增大的问题。为减小开关损耗而提出的软开关技术，在理论上可使开关损耗降低为零，使开关频率进一步提高，既增加了电力电子装置的功率密度，也提高了效率。

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，下面举例说明。

(1)电源：不间断电源（UPS，Uninterruptible Power Supply）、电解电源、电镀电源、开关电源、计算机及仪器仪表电源、航空电源、通信电源、稳压电源、脉冲功率电源、电力牵引机传动电源等。

(2)电力系统：高压直流输电（HVDC，High Voltage Direct Current），其送电端的整流阀和受电端的逆变阀均采用晶闸管变流装置。近年发展迅猛的柔性交流输电（FACTS，Flexible AC Transmission Systems）也是依靠电力电子装置得以实现的。

无功补偿和谐波抑制对电力系统也有很重要的意义。晶闸管控制电抗器（TCR，Thyristor Controlled Reactor）、晶闸管投切电容器（TSC，Thyristor Switched Capacitor）都是重要的无功补偿装置。近年来出现的静止无功发生器（SVC，Static Var Compensator）、有源电力滤波器（APF，Active Power Filter）等新型电力电子装置具有更为优越的无功补偿和谐波抑制的功能。

(3)新能源利用：电力电子装置还可用于太阳能发电及风力发电装置与电力系统的连接。

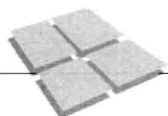
(4)节能：采用电力电子装置实现电动机调速，可以提高电动机效率。

(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，也常称为“节能灯”，它正逐步取代传统的白炽灯和日光灯。另外，像家用冰箱和空调器等也应用了电力电子技术。

总之，电力电子技术渗透到工业、交通运输、新能源、计算机系统乃至家庭的各个角落。伴随着器件与变流电路的进步，电力电子技术的应用领域也将会有进一步的突破。

4. 电力电子技术课程的学习要求

电力电子技术是一门实用性很强的技术基础课程。其内容包括器件、电路、控制、应用等几个方面，学习时应以电路为主。器件的主要内容包括常用的电力电子器件的基本工作原理、特性、参数及它们的驱动和保护方法，目的是为了应用这些



器件组成电路。电路主要研究由不同电力电子器件所构成的各种典型功率变换电路的工作原理、电路结构、分析方法、设计计算等内容。控制研究的是各种典型触发、驱动以及必要的辅助电路的工作原理和特点。

本课程的基本要求如下。

(1)熟悉和掌握常用电力电子器件的工作机理、特性和参数，能正确选择和使用它们。

(2)熟悉和掌握各种基本变换电路的工作原理，特别是各种基本电路中的电磁过程，掌握其分析方法、工作波形分析和变换电路的初步设计计算。

(3)了解各种开关元件的控制电路、缓冲电路和保护电路。

(4)了解各种变换电路的特点、性能指标和使用场合。

(5)掌握 Matlab/Simulink 在电力电子技术仿真中的应用。

(6)掌握基本实验方法，训练基本实验技能。

第 1 章 电力电子器件

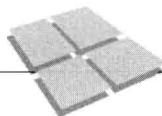
内 容 提 要

电力电子技术包括电力电子器件、电力电子变流技术及控制技术三大部分。电力电子器件是电力电子技术得以快速发展的物质基础。因此,掌握各种常见电力电子器件的特点、原理和正确使用方法就成为学好电力电子技术的基础。本章首先简要介绍电力电子器件的概念、特征、分类等内容。其次,较详细地介绍电力二极管、晶闸管和 4 种典型全控型器件的结构、工作原理、基本特性、主要参数及选择。再次,简要介绍一些其他的新型电力电子器件。在本章最后,简单介绍了一些电力电子器件的驱动、保护、缓冲、串并联技术等应用时的共性问题 and 基础性问题,以及一些选择和使用中应注意的问题。

1.1 电力电子器件概述

1.1.1 电力电子器件的概念

在电气设备或电力系统中,直接承担电能的变换或控制任务的电路被称为主电路(Power Circuit)。电力电子器件是指在可直接用于处理电能的主电路中,实现电能的变换或控制的电子器件。同在学习电子技术基础时广泛接触的处理信息的电子器件一样,广义上电力电子器件也可分为电真空器件(Electron Device)和半导体器件(Semiconductor Device)两类。但是,自 20 世纪 50 年代以来,除了在频率很高(如微波)的大功率高频电源中还在使用真空管外,基于半导体材料的电力电子器件已逐步取代了以前的汞弧整流器(Mercury Arc Rectifier)、闸流管(Thyratron)等电真空器件,成为电能变换和控制领域的绝对主力。因此,电力电子器件目前也往往专指电力半导体器件。与普通半导体器件一样,目前电力半导体器件所采用的主要



材料仍然是硅。

1.1.2 电力电子器件的发展趋势

电力电子器件是电力电子技术得以快速发展的物质基础，因而从一定程度上来说，电力电子器件的发展趋势也就彰显了电力电子技术的一些发展趋势。纵观电力电子器件的发展历程，结合当今电力电子技术的应用实际，这里对电力电子器件的发展趋势进行归纳和总结。现代电力电子技术除了不断向高电压、大电流方向发展外，在器件发展方面也呈现出如下趋势。

1. 全控化

电力电子器件实现全控化，即元件本身具有门(栅)极自关断能力，是现代电力电子器件在功能上的重大突破。在电力电子器件的发展史所介绍到的门极可关断晶闸管(GTO)、电力晶体管(GTR)、电力场效应晶体管(P-MOSFET)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)、MOS控制晶闸管(MCT)和集成门极换流晶闸管(IGCT)等都已经实现了全控化，从而避免了传统电力电子器件在关断时所需要的强迫换流电路。

2. 高频化

目前，GTO的工作频率可达 $1\sim 2\text{kHz}$ ，电力晶体管GTR的可达 $2\sim 5\text{kHz}$ ，电力MOSFET的可达 100kHz ，静电感应晶体管(SIT)的可达 10MHz ，这标志着电力电子技术已经进入高频化发展时期。

3. 集成化

几乎所有的全控型器件都由许多功能相同的单元胞管并联组成。例如，一个 1000A 的GTO元件，其内部是由近千个单元GTO胞管并联组成；一个 40A 的电力MOSFET由上万个单元并联集成。另外，问世于20世纪80年代中后期的电力电子器件第三代产品——智能功率模块(IPM)和智能功率集成电路(SPIC)是功率集成电路(PIC)中的尖端产品。IPM把不同功能的功率单元与驱动单元及保护单元集成为一个模块，缩小了整机的体积，方便了整机的设计和制造；SPIC把逻辑单元、传感单元、测量单元及保护单元等与功率单元集成于一体，使它具备了相当于某种复杂电路的功能。

4. 专用化

为了进一步提高器件的功能和降低成本，近年来国际上出现了电力电子器件的专业化集成电路(ASIC)以及专用的智能化功率集成模块(ASIPM)，它们把几乎所有的硬件都以芯片的形式安装到一个模块中，使元器件之间不再有传统的引线连接，这样的模块经过严格合理的热、电、机械方面的设计，达到优化完美的境地。其优点在于不仅使用方便、缩小了整机体积，更重要的是取消了传统连线，把寄生参数降到最小，从而把器件承受的电应力降至最低，提高了系统的可靠性。

5. 多功能化和智能化

传统电力电子器件只有开关功能,多数用于整流。而现代电力电子器件的品种增多、功能扩大、使用范围拓宽,使其不但具有开关功能,有的还具有放大、调制、振荡以及逻辑运算和保护等功能,因而使电力电子器件多功能化,甚至智能化。

6. 控制技术数字化

全控型器件及高频化的功能促进了电力电子电路的弱电化。PWM 控制方法、谐振变换、高频斩波等如今已成为电力电子电路的重要形式。数字处理技术显示出越来越多的优点:便于计算机处理和控制在,避免模拟信号的传递畸变失真,减小杂散信号的干扰,便于软件调试和遥感、遥测、遥控,便于自诊断、容错等技术的植入。随着微电子技术 with 电力电子技术的结合,控制技术也逐步实现数字化。

1.1.3 电力电子器件的特征

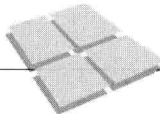
由于电力电子器件直接用于处理电能的主电路,因而同处理信息的电子器件相比,它一般具有如下特征。

(1)电力电子器件所能处理电功率的大小,也就是其承受电压和电流的能力,是其最重要的参数。其处理电功率的能力小至毫瓦级,大至兆瓦级,一般都远大于处理信息的电子器件。

(2)因为处理的电功率较大,所以为了减小本身的损耗,提高效率,电力电子器件一般都工作在开关状态。导通时(通态)阻抗很小,接近于短路,管压降接近于零,而电流由外电路决定;阻断时(断态)阻抗很大,接近于断路,电流几乎为零,而器件两端电压由外电路决定,就像普通晶体管的饱和与截止状态一样。因而,电力电子器件的动态特性(也就是开关特性)和参数,也是电力电子器件特性很重要的方面,有些时候甚至上升为第一位的重要问题。而在模拟电子电路中,电子器件一般都工作在线性放大状态,数字电子电路中的电子器件虽然一般也工作在开关状态,但其目的是利用开关状态表示不同的信息。正因为如此,也常常将一个电力电子器件或者外特性像一个开关的几个电力电子器件的组合称为电力电子开关,或称电力半导体开关。作电路分析时,为简单起见也往往用理想开关来代替。广义上讲,电力电子开关有时候也指由电力电子器件组成的在电力系统中起开关作用的电气装置,这在第6章中将有适当的介绍。

(3)在实际应用中,电力电子器件往往需要由信息电子电路来控制。由于电力电子器件所处理的电功率较大,因此普通的信息电子电路信号一般不能直接控制电力电子器件的导通或关断。因而,在主电路和控制电路之间,需要一定的中间电路对这些信号进行适当的放大,这就是所谓的电力电子器件的驱动电路。

(4)尽管工作在开关状态,但是电力电子器件自身的功率损耗通常仍然大于信



息电子器件的功率损耗,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。这是因为电力电子器件在导通或者阻断状态下,并不是理想的短路或者断路。导通时器件上有一定的通态压降,阻断时器件上有微小的断态漏电流流过,尽管其数值都很小,但分别与数值较大的通态电流和断态电压相作用,就形成了电力电子器件的通态损耗和断态损耗。此外,还有在电力电子器件由断态转为通态(开通过程)或者由通态转为断态(关断过程)的转换过程中产生的损耗,分别称为开通损耗和关断损耗,总称开关损耗。对某些器件来讲,驱动电路向其注入的功率也是造成器件发热的原因之一。通常来讲,除一些特殊的器件外,电力电子器件的断态漏电流都极其微小,因而通态损耗是电力电子器件功率损耗的主要成因。当器件的开关频率较高时,开关损耗会随之增大而可能成为器件功率损耗的主要因素。

1.1.4 电力电子器件的分类

电力电子器件种类繁多,因此有多种分类方法。

(1)按照器件能够被控制电路信号所控制的程度(开关控制性能),分为以下3类。

①不可控器件(Uncontrolled Device)——不能用控制信号来控制其通断,因而也就不需要驱动电路的电力电子器件被称为不可控器件。这种器件只有两个端子,其基本特性与信息电子电路中的二极管一样,器件的导通和关断完全是由其在主电路中承受的电压和电流决定的。不可控器件的代表元件为电力二极管(Power Diode)。

②半控型器件(Semi-controlled Device)——通过控制信号可以控制其导通而不能控制其关断的电力电子器件被称为半控型器件。这类器件的关断完全是由其在主电路中承受的电压和电流决定的。半控型器件的代表元件为晶闸管(Thyristor)及其大部分派生器件。

③全控型器件(Full-controlled Device)——通过控制信号既可控制其导通又可控制其关断的电力电子器件被称为全控型器件,也称自关断器件。全控型器件的代表元件为门极可关断晶闸管(GTO)、电力晶体管(GTR)、电力场效应晶体管(MOSFET)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)等。

(2)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电流驱动型(Current Driving Type)——通过从控制端注入或者抽出电流来实现导通或者关断控制的电力电子器件被称为电流驱动型器件,或电流控制型器件。电流驱动型的代表元件为晶闸管、门极可关断晶闸管(GTO)、电力晶体管(GTR)等。

②电压驱动型(Voltage Driving Type)——通过在控制端和公共端之间施加一定的电压信号就可实现导通或者关断控制的电力电子器件被称为电压驱动型器件,或电压控制型器件。电压驱动型器件实际上是通过加在控制端上的电压在器件的两个

主电路端子之间产生可控的电场来改变流过器件的电流大小和通断状态, 所以又称为场控器件(Field Controlled Device), 或场效应器件。电压驱动型的代表元件为电力场效应晶体管(P-MOSFET)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)等。

(3)按照器件内部电子和空穴两种载流子参与导电的情况, 分为3类(这种分类方法也是最根本、最本质的分类方法, 它影响和决定了前两种分类方法)。

①双极性器件(Bipolar Device)——由电子和空穴两种载流子参与导电的电力电子器件被称为双极性器件。双极性器件具有通态压降较低、阻断电压高、电流容量大等优点, 适用于中大容量的变流设备。双极性器件除了静电感应晶闸管(SITH)为电压控制型器件外, 其余的均为电流驱动型(电流控制型)器件, 控制性能和能耗均不如单极性器件的。双极性器件的代表元件为电力二极管、晶闸管、门极可关断晶闸管(GTO)、电力晶体管(GTR)等。

②单极性器件(Unipolar Device)——只有一种载流子即多数载流子参与导电的电力电子器件被称为单极性器件。单极性器件没有少数载流子的存储效应, 因而开关时间短, 一般为纳秒数量级(典型值为20ns); 这类器件另一个优点是输入阻抗很高, 通常大于40MΩ。此外, 单极性器件的电流具有负的电流温度系数, 温度上升, 电流下降, 因而该类器件有良好的电流自动调节能力, 二次击穿的可能性极小。单极性器件的不足之处是导通压降高, 电压和电流的定额都较双极性器件的要小。单极性器件主要用于功率较小、工作频率高的高性能传动装置中。单极性器件的代表元件为电力场效应晶体管(P-MOSFET)、静电感应晶体管(SIT)等。

③复合型器件(Complex Device)——由单极性器件和双极性器件集成混合而成的电力电子器件被称为复合型器件, 也称混合型器件。复合型器件既具有双极性器件的电流密度大、导通压降低等优点, 又具有单极性器件输入阻抗高、响应速度快的优点。复合型器件的代表元件为绝缘栅双极晶体管(IGBT)、MOS控制晶闸管(MCT)等。图1-1给出了电力电子器件按照这种分类方法形成的“树”。

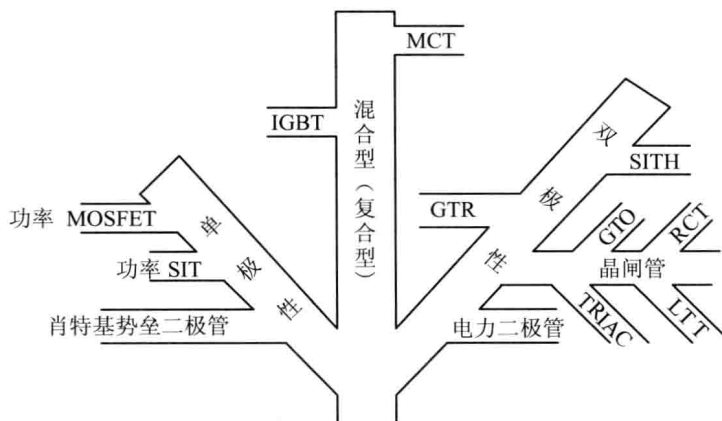


图 1-1 电力电子器件分类“树”