



21 世纪高等院校电气信息类系列教材

Electrical Information •
Science and Technology

电力电子技术

曲永印 白 晶 主 编
李华德 主 审



附赠电子教案

[http:// www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

21 世纪高等院校电气信息类系列教材

电 力 电 子 技 术

主 编 曲永印 白 晶
副主编 董 洁 崔桂梅
主 审 李华德



机 械 工 业 出 版 社

本书可分为器件、变换器、应用三大部分。

第一部分(第1章):重点介绍了晶闸管(SCR)、电力场效应晶体管(P-MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)、注入增强栅晶体管(IEGT)、集成门极换流晶闸管(IGCT)等电力电子器件的半导体物理结构、工作原理、开关特性、主要参数、优缺点、应用前景,以及驱动、缓冲、保护、串并联等器件应用的共性问题和基础性问题。

第二部分(第2~6章):其中第2~5章详细地分析和研究了直流-交流变换器(逆变器)、交流-直流变换器(整流器)、直流-直流变换器(直流斩波器)、交流-交流变换器(直接变换器)四类基本变换器的主电路拓扑结构、工作原理、基本特性、谐波及功率因数、控制方式、性能指标,以及应用场合;第6章介绍了为提高电力电子变换器效率而应用的软开关技术。

第三部分(第7章):介绍了各种多级组合型电力电子变换器在各个领域中的应用。

本书可作为电气工程专业、电气自动化专业,以及相关专业本科生、研究生的教学用书,也可供从事电力电子技术工作的工程技术人员使用。

本书配有电子课件等教学资源,欢迎使用该教材的教师登录 www.cmpedu.com 免费注册、审核后下载,或联系编辑索取(QQ:1157122010,电话88379753)。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/曲永印,白晶主编. —北京:机械工业出版社,2013.3
ISBN 978-7-111-41076-8

I. ①电… II. ①曲… ②白… III. ①电力电子技术 IV. ①TM1

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第001597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:时静 责任编辑:时静 张利萍

版式设计:霍永明 责任校对:丁丽丽 肖琳

责任印制:乔宇

北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市胜利装订厂装订)

2013年6月第1版第1次印刷

184mm×260mm·25.25印张·626千字

0001—3500册

标准书号:ISBN 978-7-111-41076-8

定价:49.90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

出版说明

随着科学技术的不断进步，整个国家自动化水平和信息化水平的长足发展，社会对电气信息类人才的需求日益迫切、要求也更加严格。在教育部颁布的“普通高等学校本科专业目录”中，电气信息类（Electrical and Information Science and Technology）包括电气工程及其自动化、自动化、电子信息工程、通信工程、计算机科学与技术、电子科学与技术、生物医学工程等子专业。这些子专业的人才培养对社会需求、经济发展都有着非常重要的意义。

在电气信息类专业及学科迅速发展的同时，也给高等教育工作带来了许多新课题和新任务。在此情况下，只有将新知识、新技术、新领域逐渐融合到教学、实践环节中去，才能培养出优秀的科技人才。为了配合高等院校教学的需要，机械工业出版社组织了这套“21世纪高等院校电气信息类系列教材”。

本套教材是在对电气信息类专业教育情况和教材情况调研与分析的基础上组织编写的，期间，与高等院校相关课程的主讲教师进行了广泛的交流和探讨，旨在构建体系完善、内容全面新颖、适合教学的专业教材。

本套教材涵盖多层面专业课程，定位准确，注重理论与实践、教学与教辅的结合，在语言描述上力求准确、清晰，适合各高等院校电气信息类专业学生使用。

机械工业出版社

前 言

电力电子技术（电力电子学）是 20 世纪 50 年代初期诞生的学科、技术。进入 21 世纪以来，电力电子技术发展尤其迅速，新思想、新理论、新技术、新方法层出不穷，日新月异。当今电力电子技术应用非常广泛，已覆盖了国民经济和社会生活的各个领域，产生了巨大的经济效益和社会效益。专家和学者们早有预言，电力电子技术与计算机技术必将成为未来科学技术发展的两大支柱。在这样的形势下，本书编者认识到，作为重要专业基础课程的教科书——《电力电子技术》一书的内容和理论体系，也到了必须修改的时候了。

编者在参阅多种版本《电力电子技术》之后，认为很多版本都具有先进的编写思想和编写路线，例如“加强基础，循序渐进，理论联系实际”的编写原则，这是要继承并发扬光大的地方。但是必须看到，在实际应用中各类电力电子变换器都采用了 PWM 控制技术，相位控制技术将逐步被淘汰，不久就要退出科技发展的历史舞台。因此，《电力电子技术》在编写思想上必须尽快转变：①一直以相位控制技术作为重点内容的理论体系必须快速转向以 PWM 控制技术为重点内容的理论体系，这是一种理论体系的更新，也是一种技术思想、技术观念的转变；②推陈出新，剔去过时的老内容，纳入新理论、新技术、新方法。为此，确定了本书编写宗旨：①初步建立电力电子技术的 PWM 理论体系，完成以相控整流技术、方波逆变技术为主导的理论体系转变为以 PWM 整流技术、PWM 逆变技术为主导的理论体系；②注意引入了最新技术成果以保证本书内容的新颖性和先进性。

本书主要特点如下：

1) 重点介绍全控型电力电子器件。全控型电力电子器件的应用，才使 PWM 控制技术得以充分发挥作用。近十几年来，高频自关断电力电子开关器件蓬勃发展，功能和功率等级不断提高，在应用中显示了巨大的优越性。本书第 1 章以在应用中胜出的 P-MOSFET、IGBT、IEGT、IGCT 等全控型器件为重点进行了详细介绍。目前 SCR 器件还有一定市场，兼顾实际需要，本书第 1 章还是用了一定篇幅作了较为详细的介绍。考虑到器件发展过程的连续性和相关性，本书第 1 章中对其他一些全控型器件也作了简单介绍。

2) 初步建立了电力电子技术的 PWM 理论体系。PWM 控制在电力电子变换技术中占有十分重要的地位，在逆变器、整流器、直流斩波器、直接变换器中均可采用。实践表明，采用 PWM 控制技术，可以大幅度提高各类变换器的性能，实现其他控制方式难以实现的变换功能，根除了其他控制方式的一切弊端。因此，本书在各类电力电子变换器中首推 PWM 控制技术，确立 PWM 控制在各类变换器中的主导地位，使 PWM 控制技术成为电力电子技术中的核心理论之一。

3) PWM 技术首先应用于逆变器中，目前在逆变器应用中基本上都采用了 PWM 控

制技术,可以说 PWM 控制技术在逆变器的应用中真正确立了它的应有地位。因此本书第 1 章介绍器件后,紧接着在第 2 章讲述了 PWM 控制技术、PWM 逆变器,也为第 3 章中涉及的有源逆变器提供了理论基础。

4) 高频化为电力电子技术应用带来了诸多好处,但是高频化又使得器件的开关损耗增大,降低了电力电子变换器的效率,这是不能允许的。为此本书介绍了 PWM 谐振型软开关技术。这是目前电力电子技术的发展前沿之一。²

5) 本书用一定的篇幅介绍方波逆变器、相控整流器的工作原理是为了保证电力电子技术理论的连续性;也是为了让读者了解方波逆变器、相控整流器存在的问题,以及采用 PWM 控制技术的必然性和必要性。

本书第 1 章重点介绍了晶闸管 (SCR)、电力场效应晶体管 (P-MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)、注入增强栅晶体管 (IEGT)、集成门极换流晶闸管 (IGCT) 等电力电子器件的半导体物理结构、工作原理、开关特性、主要参数、优缺点,以及应用前景,以便能够在工作中正确选用这些常用的电力电子器件;第 2~5 章为本书的主体,以 PWM 控制技术为核心,分析和研究了直流-交流变换器(逆变器)、交流-直流变换器(整流器)、直流-直流变换器(直流斩波器)、交流-交流变换器(直接变换器)四类基本变换器的拓扑结构、工作原理、基本特性、谐波情况、性能指标等;第 6 章介绍了为提高高频化电力电子变换器效率而采用的 PWM 谐振型软开关技术;第 7 章结合工程实际介绍了各种组合型电力电子变换器在各个领域中的应用。

本书可作为高等院校电气工程、电气自动化以及相关专业本科生、研究生的教材,也可以作为工程技术人员的参考书。

电力电子技术是一门实践性很强的专业基础课,因此,教学实验是必不可少的重要环节。本书精选了 5 个教学实验项目,并配有相应的实验指导。

本书由曲永印、白晶担任主编,董洁、崔桂梅担任副主编。参加编写的老师还有刘德君、王洪希、柳成、宋宏、周振雄。

北京科技大学李华德教授担任了本书主审,并对本书提出了重要的建议,在此谨致衷心感谢。

在本书编写过程中,得到了北华大学电气信息工程学院教师的大力支持和帮助,在此向他们表示衷心的感谢,同时向所有参考文献的作者致谢。

由于本书编者水平有限,错误和疏漏之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

符号说明

A——安培；晶闸管的阳极	i_e ——晶体管发射极电流
b——晶体管基极	$I_{F(AV)}$ ——电力二极管的正向平均电流
C——电容器；电容量	I_{FSM} ——电力二极管的浪涌电流
C——IGBT 集电极	I_G ——GTO 的门极电流
c——晶体管集电极	I_H ——晶闸管的维持电流
D——MOSFET 漏极	I_L ——晶闸管的掣住电流
di/dt ——晶闸管通态电流临界上升率	i_o ——输出电流
du/dt ——晶闸管通态电压临界上升率	I_p ——两组整流桥之间的环流（平衡电流）瞬时值
E——IGBT 发射极	I_R ——整流后输出电流中谐波电流有效值
E ——直流电源电动势	I_T ——流过晶闸管的电流有效值
e——晶体管发射极	i_T ——流过晶闸管的电流瞬时值
e_L ——电感的自感电动势	$I_{T(AV)}$ ——晶闸管的通态平均电流
E_M ——电动机反电动势	I_{TSM} ——晶闸管的浪涌电流
f ——频率	i^* ——指令电流
G——发电机；MOSFET 栅极；晶闸管门极；GTO 门极；IGBT 栅极	K——晶闸管的阴极
h_{FE} ——晶体管直流电流增益	K——常数
HRI_n —— n 次谐波电流含有率	L ——电感；电感量；电抗器符号
I ——整流后负载电流的有效值	L_B ——从二次侧计算时变压器漏感
I_1 ——变压器一次相电流有效值	L_p ——平衡电抗器
i_1 ——变压器一次相电流瞬时值	M——电动机
I_2 ——变压器二次相电流有效值	m ——相数；一个周期的脉波数
i_2 ——变压器二次相电流瞬时值	n ——电动机转速
I_{ATO} ——GTO 最大可关断阳极电流	n_N ——电动机额定转速
i_b ——晶体管基极电流	N ——线圈匝数
i_c ——晶体管集电极电流	N——负（组）；三相电源中性点
I_C ——IGBT 集电极电流	P——功率；有功功率
I_{ceo} ——晶体管集电极与发射极间漏电流	P——正（组）
I_{cM} ——晶体管集电极最大允许电流	p ——极对数
I_{cs} ——晶体管集电极饱和电流	p_{CM} ——IGBT 集电极最大耗散功率
I_D ——流过整流管的电流有效值；MOSFET 漏极电流	P_{cM} ——晶体管集电极最大耗散功率
I_d ——整流电路的直流输出电流平均值	P_d ——整流电路输出直流功率
i_{dD} ——流过整流管的电流瞬时值	P_C ——直流发电机功率
I_d ——整流电路的直流输出电流瞬时值	P_M ——直流电动机反电动势功率
I_{dD} ——流过整流管的电流平均值	P_R ——电阻上消耗的功率
I_{DM} ——MOSFET 漏极电流幅值	Q——无功功率
I_{DR} ——流过续流二极管的电流有效值	R——电阻器；电阻
i_{DR} ——流过续流二极管的电流瞬时值	R_B ——从变压器二次侧计算的变压器等效电阻
I_{dT} ——流过晶闸管的电流平均值	R_M ——直流电动机电枢电阻
	S——视在功率（表观功率）
	S——MOSFET 源极；功率开关器件

t ——时间
 t_d ——晶体管、GTO 开通时的延迟时间；电力二极管关断时的延迟时间
 $t_{d(on)}$ ——MOSFET、IGBT 开通时的延迟时间
 $t_{d(off)}$ ——MOSFET、IGBT 关断时的延迟时间
 t_f ——晶体管、GTO、MOSFET 关断时的下降时间；电力二极管电流下降时间
 t_{fr} ——电力二极管正向恢复时间
 t_{gr} ——晶闸管正向阻断恢复时间
 t_{gt} ——晶闸管的开通时间
 THD_i ——电流谐波总畸变率
 t_{off} ——晶体管、GTO、MOSFET、IGBT 的关断时间
 t_{on} ——晶体管、GTO、MOSFET、IGBT 的开通时间
 t_q ——晶闸管的关断时间
 t_r ——晶闸管、晶体管、GTO、MOSFET 开通时的上升时间
 t_{rr} ——电力二极管反向恢复时间；晶闸管反向阻断恢复时间
 t_s ——晶体管、GTO 关断时的储存时间
 t_t ——GTO 关断时的尾部时间
 t_b ——并联谐振逆变电路触发引前时间
 $U、V、W$ ——逆变器输出端
 U ——整流电路负载电压有效值
 U_1 ——变压器一次相电压有效值
 u_1 ——变压器一次相电压瞬时值
 U_{1L} ——变压器一次线电压有效值
 U_2 ——变压器二次相电压有效值
 U_{2L} ——变压器二次线电压有效值
 u_c ——载波电压
 U_{ces} ——晶体管饱和时集电极和发射极间的管压降
 U_{CES} ——IGBT 最大集射极间电压
 u_{co} ——控制电压
 U_d ——整流电路输出电压平均值；逆变电路的直流侧电压
 u_D ——整流管两端电压瞬时值
 u_d ——整流电路输出电压瞬时值
 u_{DR} ——续流二极管两端电压瞬时值
 U_{DRM} ——晶闸管的断态重复峰值电压
 U_{DS} ——MOSFET 漏极和源极间电压
 $U_{d\alpha}$ ——触发角为 α 时整流电压平均值
 $U_{d\beta}$ ——逆变角为 β 时逆变电压平均值
 u_g ——晶闸管门极电压瞬时值
 u_{GE} ——IGBT 栅极和发射极间电压

$u_{CE(th)}$ ——IGBT 的开启电压
 U_{GS} ——MOSFET 栅极和源极间电压
 U_i ——斩波电路输入电压
 u_K ——整流变压器的阻抗电压
 u_L ——电抗器两端电压瞬时值
 U_n ——整流电路输出电压中的 n 次谐波电压有效值
 U_{nm} ——整流电路输出电压中的 n 次谐波电压最大值
 U_o ——斩波电路输出电压
 u_r ——信号波电压
 U_R ——整流电路输出电压中的谐波电压有效值
 U_{RRM} ——电力二极管、晶闸管的反向重复峰值电压
 u_s ——同步电压
 U_n ——MOSFET 的开启电压
 U_{TM} ——晶闸管的通态（峰值）电压
 U_{UN} ——逆变电路负载 U 相相电压有效值
 U_{UV} ——逆变电路负载 U 相和 V 相间线电压有效值
 V ——晶体管；IGBT；电力 MOSFET
 VD ——整流管
 VD_R ——续流二极管
 VS ——硅稳压管
 VT ——晶闸管；GTO
 X ——电抗器的电抗值
 X_B ——从二次侧计算时的变压器漏抗
 X_p ——平衡电抗器的电抗
 Z ——复数阻抗
 Z_1 ——基波阻抗
 Z_n —— n 次谐波的阻抗
 α ——晶闸管的触发延迟角；晶体管共基极电流放大系数；用于斩波电路表示器件导通占空比
 β ——晶闸管的逆变角；晶体管电流放大系数
 β_{min} ——最小逆变角
 β_{off} ——GTO 电流关断增益
 δ ——晶闸管的停止导电角；并联谐振逆变电路触发引前角
 γ ——换相重叠角；纹波因数；输出电压比
 θ ——晶闸管的导通角
 φ ——位移因数角；相位滞后角
 ω ——角频率
 ω_c ——载波角频率
 ω_r ——信号波角频率
 ν ——基波因数

目 录

出版说明

前言

符号说明

绪论 1

0.1 电力电子技术的定义及其研究内容 1

0.1.1 电力电子技术的定义 1

0.1.2 电力电子技术的研究内容及电力 电子变换器的类型 2

0.2 电力电子变换器的特点及分析方法 3

0.2.1 电力电子变换器的特点 3

0.2.2 电力电子变换器的分析方法 3

0.3 电力电子技术的经济和社会意义 8

0.3.1 技术经济意义 8

0.3.2 节能降耗意义 8

0.4 电力电子技术的发展历史及今后的发展 趋势 9

0.4.1 早期电力电子技术发展的历史 9

0.4.2 现代电力电子技术发展的历史 10

0.5 电力电子技术的应用 12

0.6 本书内容简介和读者需要掌握的学习 方法 15

第1章 电力电子器件 17

1.1 不控型器件——电力二极管 17

1.1.1 PN结与电力二极管的工作原理 17

1.1.2 电力二极管的基本特性 19

1.1.3 电力二极管的主要参数 20

1.1.4 电力二极管的主要类型 21

1.2 半控型器件——晶闸管 22

1.2.1 晶闸管的基本结构 22

1.2.2 晶闸管的工作原理 23

1.2.3 晶闸管的伏安特性 25

1.2.4 晶闸管的主要参数 27

1.2.5 晶闸管的派生系列 32

1.3 全控型器件 36

1.3.1 电力晶体管 36

1.3.2 电力场效应晶体管 38

1.3.3 门极关断晶闸管 41

1.3.4 绝缘栅双极型晶体管 42

1.3.5 注入增强栅晶体管 45

1.3.6 静电感应晶体管 48

1.3.7 静电感应晶闸管 48

1.3.8 集成门极换流晶闸管 48

1.3.9 基于宽禁带半导体材料的电力 电子器件 51

1.4 功率集成电路与集成电力电子模块 52

1.5 电力电子驱动电路 53

1.5.1 P-MOSFET 驱动要求及驱动 电路 53

1.5.2 IGBT 的栅极驱动电路 55

1.5.3 IGCT 的门极驱动技术 56

1.6 电力电子器件的串并联设计 57

1.6.1 电力电子器件的串联技术 57

1.6.2 电力电子器件的并联技术 59

本章小结 61

习题与思考题 61

第2章 直流-交流变换器

(逆变器) 63

2.1 直流-交流变换器(逆变器)综述 63

2.1.1 逆变器概念 63

2.1.2 逆变原理 63

2.1.3 逆变电路换相方式 64

2.1.4 逆变器分类 66

2.1.5 逆变器性能指标 67

2.2 方波逆变器 67

2.2.1 电压型单相方波逆变器 68

2.2.2 电压型三相桥式方波逆变器 72

2.2.3 电流型三相桥式方波逆变器 74

2.2.4 方波逆变器存在的问题 76

2.3 逆变器的脉宽调制控制技术——PWM 逆变器 76

2.3.1 综述 76

2.3.2 电压正弦 PWM (SPWM) 控制技 术——SPWM 逆变器 77

2.3.3 SPWM 逆变器的谐波分析 84

2.3.4 SPWM 模式优化	86	3.3.9 相控整流器中的有源逆变工作 状态分析	191
2.3.5 随机 PWM 技术	90	3.3.10 相控整流器的触发控制技术	198
2.3.6 电流正弦 PWM 控制技术	93	3.4 PWM 整流器	211
2.3.7 电压空间矢量 PWM (SVPWM) 控制技术——SVPWM 逆变器	95	3.4.1 综述	211
2.4 PWM 多电平逆变器	105	3.4.2 电压型单相桥式 PWM 整流器	214
2.4.1 多重化 PWM 逆变器	106	3.4.3 电压型三相桥式 PWM 整流器	218
2.4.2 中性点钳位式 PWM 多电平 逆变器	112	3.4.4 电流型单相桥式 PWM 整流器	224
2.5 PWM 逆变器的仿真研究方法	131	3.4.5 电流型三相桥式 PWM 整流器	229
2.5.1 PWM 逆变器的通用数学模型	131	3.4.6 PWM 整流器的控制技术	236
2.5.2 Simulink 模块化实现	133	3.4.7 中性点钳位式多电平 PWM 整流器 (NPC-PWM-REC)	246
2.5.3 SPWM 逆变器的仿真	133	本章小结	251
2.5.4 CHBPWM 逆变器的仿真	133	习题与思考题	252
2.5.5 SVPWM 逆变器的仿真	135	第 4 章 直流-直流变换器 (直流斩 波器)	255
本章小结	141	4.1 直流斩波器的基本控制方式	255
习题与思考题	142	4.1.1 时间比控制	256
第 3 章 交流-直流变换器 (整流器)	144	4.1.2 瞬时值控制	257
3.1 整流器的概念、类型及性能指标	144	4.2 直流降压斩波器	257
3.1.1 整流器的概念	144	4.3 直流升压斩波器	259
3.1.2 整流器的类型	145	4.4 直流降压-升压斩波器	261
3.1.3 整流器的性能指标	145	4.5 Cuk 斩波器	263
3.2 具有电容滤波的不控整流电路	146	4.6 复合型斩波器和多相、多重斩波器	264
3.2.1 电容滤波的单相不控整流电路	146	4.6.1 桥式可逆斩波器	264
3.2.2 理想情况下电容滤波的三相不控 整流电路	149	4.6.2 多相多重斩波器	269
3.2.3 考虑电感时电容滤波的三相不控 整流电路	151	4.7 具有隔离变压器的直流斩波器	270
3.2.4 主要数量关系	152	4.7.1 隔离型 Buck 斩波器——单端 正励斩波器	271
3.3 相控整流器	152	4.7.2 隔离型 Buck-Boost 斩波器—— 单端反励斩波器	272
3.3.1 单相半波相控整流器	152	4.7.3 隔离型 Cuk 直流斩波器	273
3.3.2 单相全控桥式 (阻感性负载) 相控整流器	160	本章小结	273
3.3.3 三相半波相控整流器	162	习题与思考题	274
3.3.4 三相全控桥式相控整流器	170	第 5 章 交流-交流变换器 (直接变 换器)	275
3.3.5 大功率相控整流电路	175	5.1 交流调压器	275
3.3.6 变压器漏抗对晶闸管相控整流 电路的影响	179	5.1.1 晶闸管单相交流调压器	276
3.3.7 相控整流电路的谐波及功率 因数	183	5.1.2 三相交流调压器	279
3.3.8 相控整流电路带反电动势负载的 工作情况分析	188	5.1.3 具有变压器抽头的交流调压器	282
		5.2 交-交变频器	284
		5.2.1 三相输入单相输出交-交变	

频器	284	7.3.2 开关电源	348
5.2.2 三相输入三相输出交-交变		7.4 电力电子技术在电力系统中的应用 ...	349
频器	288	7.4.1 高压直流输电	349
5.3 PWM 交流-交流变换器	290	7.4.2 双 PWM 变频调速系统	350
5.3.1 单相交流调压器	290	7.4.3 PWM 开关并联无功功率发	
5.3.2 三相交流调压电路	298	生器	352
5.3.3 由全控型器件组成的直接变		7.4.4 晶闸管串、并联电抗补偿器	353
频器	299	7.4.5 串联型电力有源滤波器和并联型	
5.4 矩阵式变频器	309	电力有源滤波器	357
本章小结	314	7.4.6 统一潮流控制器	363
习题与思考题	315	7.4.7 风力发电	365
第6章 软开关技术	316	7.5 在其他领域中的应用	366
6.1 软开关的基本特性和类型	316	7.5.1 电子镇流器	366
6.2 电压型串联谐振式逆变器	320	7.5.2 焊机电源	368
6.3 电流型并联谐振式逆变器	320	7.5.3 高效节能照明	368
6.4 零电流关断 PWM DC-DC 软开关		7.5.4 飞轮储能技术	369
电路	323	7.5.5 超导磁体储能技术	370
6.5 零电压开通 PWM DC-DC 软开关		7.5.6 磁悬浮技术	371
电路	323	7.5.7 在电力机车中的应用	373
6.6 直流环节并联谐振型逆变器	324	本章小结	375
本章小结	326	习题与思考题	376
习题与思考题	326	教学实验	377
第7章 电力电子技术的应用	327	实验1 三相桥式全控整流及有源逆变电路	
7.1 多级组合型(复合结构)电力电子变		实验	377
换器	327	实验2 单相交流调压电路实验	378
7.1.1 电压源型交-直-交 PWM 变压变频		实验3 全桥 DC-DC 变换电路实验	380
供电电源	327	实验4 单相交-直-交变频电路	
7.1.2 电流源型交-直-交 PWM 变压变频		(纯电阻)	381
供电电源	328	实验5 直流斩波电路(设计性)的性能	
7.2 电力电子技术在电力拖动领域中的		研究	382
应用	329	附录	384
7.2.1 晶闸管直流电动机调速系统	329	附录A 傅里叶级数	384
7.2.2 交流电动机变频调速系统	335	附录B 常用术语中英文对照	387
7.3 不间断电源及开关电源	345	参考文献	392
7.3.1 不间断电源	345		

绪 论

读者在学习本课程之前，应通过了解什么是电力电子技术，对其学科特点、研究内容和分析方法、技术经济意义、发展历史和趋势及应用领域等先有一个轮廓认识。这有利于读者在总体上把握《电力电子技术》一书的全貌，从而提高学习的主动性和积极性。

0.1 电力电子技术的定义及其研究内容

电子技术又称电子学，它是研究电子器件和电子电路的科学技术。20 世纪 50 年代以后，在电子技术的发展过程中，由于电子器件的功率等级不同、电子器件的特性不同、应用领域不同，使得电子技术逐步形成了信息电子技术和电力电子技术两大分支。通常所说的模拟电子技术和数字电子技术都属于信息电子技术。现在，习惯上仍然把信息电子技术叫做电子技术。通常所说的变频技术、晶闸管电路、半导体变流技术、开关电源等都属于电力电子技术，它是利用半导体电力电子开关器件组成开关型变换器，用来实现电能变换与控制的电子技术。“电力电子技术”这一术语有两层含意：一是“大功率”，早期的电力电子技术就称为“大功率电子学”；二是应用于电力工程中，其功率从数瓦到数百兆瓦，甚至到吉瓦。

0.1.1 电力电子技术的定义

1. 电力电子技术与电子技术的关系

由于电力电子技术源于电子技术，与信息电子技术同属于电子技术的范畴，因而可知，电力电子技术与信息电子技术的基础理论相同。电力电子开关器件和电子器件均用半导体材料制成，二者的制造工艺大多一致，特别是现代电力电子器件的制造大都使用集成电路制造工艺，采用微电子制造技术。此外，电力电子电路和信息电子电路的许多分析方法也是一样的。以上说明两者同根同源，理论与方法相似或相近。所不同的只是两者应用不同，前者用于电力变换，后者用于信息处理。

2. 电力电子技术与控制技术的关系

为了实现电能变换和控制，一是要有由半导体电力电子开关器件构成的开关型变换电路，二是要有以半导体集成电路和微处理器为基本硬件所构成的控制电路，这是将自动控制技术引入了开关型变换电路的通断控制。因此，可以把电力电子技术看成是弱电控制强电的技术，通过有效地控制可以使电力电子电路的性能满足各种需求。

3. 电力电子技术与电力技术（电气工程）的关系

电力电子技术主要应用于电气工程中，电力电子装置是电力技术（输配电系统、机电系统等）的主要组成部分，其作用和功能是电能（电功率）传递过程的变换与控制，这是电力电子技术和电力技术的主要关系。

由上述可知，电力电子技术与电子技术、控制技术、电力技术之间的关系是学科交叉、互相依存、互相渗透的关系。1974 年，美国的 W. Newell 用如图 0-1 所示的倒三角形对电力

电子学进行了描述，认为电力电子技术是由电力技术、电子技术和控制技术三个学科交叉而形成的新兴交叉学科（也称为新兴边缘学科），被国际电工委员会（IEC）命名为电力电子学（Power Electronics）或称为电力电子技术（Power Electronics Technology）。随后，美国电气和电子工程师协会（IEEE）的电力电子学会将“电力电子技术”定义为：电力电子技术是有效地使用半导体电力电子开关器件、应用电路的设计理论及分析方法，生产电力电子变换器，用来实现对电能的有效变换和控制，包括电压、电流、频率、相位、相数和波形等方面的变换与控制。

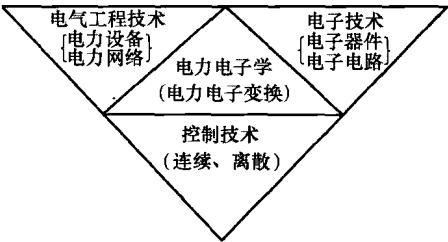


图 0-1 描述电力电子学的倒三角形

0.1.2 电力电子技术的研究内容及电力电子变换器的类型

由电力电子技术的定义可以看出，电力电子技术的研究内容有两个方面：一是研究各种半导体电力电子开关器件的结构、工作原理和特性；二是研究电能变换及其控制技术。具体来说，电力电子技术的研究内容是，采用半导体电力电子开关器件和辅助元件（ L 、 C ）组成开关型电力电子电路，再根据需要配备必要的控制器，组成电力电子变换器（见图 0-2），用来实现对电能的变换与控制，以达到使电能更好地满足各种不同用电设备的要求。

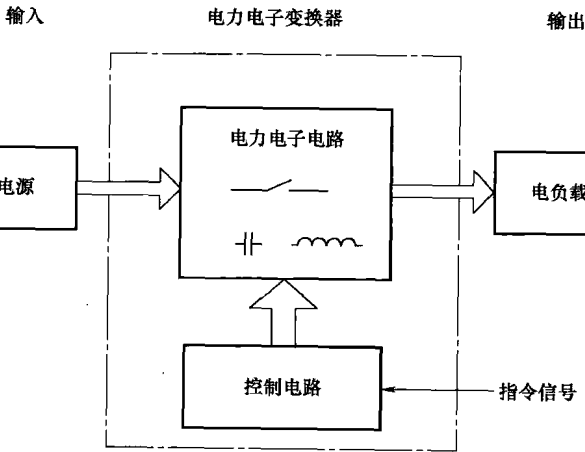


图 0-2 电力电子变换器系统

目前，电力电子技术的重点研究内容：一是研究半导体电力电子开关器件的高频化、大容量化、高效化；二是研究电能变换与控制的新技术，特别是研究提高电能变换效率的新技术。

电力电子变换器可以按电能输入、输出的变换形式来划分，有四种基本类型：

1. 交流-直流（AC-DC）变换器

交流-直流变换一般称为整流，完成交流-直流变换的电力电子装置称为整流器（Rectifier）。交流-直流变换器常应用于直流电动机调速、蓄电池充电、电镀、电解以及其他直流电源等。

2. 直流-交流（DC-AC）变换器

直流-交流变换一般称为逆变，这是与整流相反的变换形式，完成直流-交流变换的电力电子装置称为逆变器（Inverter）。当逆变器的交流输出与电网相连时，称这种直流-交流变换为有源逆变；当逆变器的交流输出与电动机等无源负载连接时，称这种直流-交流变换为无源逆变。有源逆变实际上是整流器的逆运行状态，把电能回馈给电网，如直流调速四象

限运行中的直流电能回馈到电网；无源逆变主要用于交流调速、恒频恒压（CFCV）电源、不间断供电电源（UPS）以及中频感应加热电源等。

3. 交流-交流（AC-AC）变换器

交流-交流变换主要有交流调压和交-交变频两种基本形式。其中，交流调压只调节交流电压而频率不变，常应用于调温、调光、交流电动机的调压调速等场合；交-交变频则是频率和电压均可调节，完成交-交变频的电力电子装置也称为周波变换器（Cycloconverter），主要用于大功率交流变频调速等场合。

4. 直流-直流（DC-DC）变换器

直流-直流变换主要完成直流电压幅值和极性的调节与变换，包括升压、降压和升-降压变换等。采用脉宽调制（PWM）技术实现直流-直流变换的电力电子装置一般称为斩波器（Chopper）。直流-直流变换常应用于开关电源、电动汽车、电池管理、升降压直流变换器等。

此外，根据实际应用需要，以基本电力电子变换器进行不同的组合，形成复合型多级组合电力电子变换器。为降低开关损耗，在电力电子电路中采取一些措施，如改变电路结构和控制策略，可获得新型变换器，如软开关变换器。

0.2 电力电子变换器的特点及分析方法

0.2.1 电力电子变换器的特点

1. 电力电子变换器的工作模式为开关工作模式

电力电子变换器总是处于开关工作状态，这是电力电子变换器的显著特点。因此，电力电子变换器也称为开关型电力电子变换器，其工作（变换）过程可描述如下：

开关电路周期性地将电源和负载直接连接、交叉连接或完全脱离，适时、适当地安排开关状态的顺序和各状态的持续时间，可以使输入到开关电路的电压（电流）变换为负载所需的电压（电流），再从开关电路输出至负载。

2. 电力电子变换器的数学模型具有时变、非线性特点

为了获得稳压或稳流的输出特性，可以将电力电子变换器设计成为闭环控制系统。由于电力电子变换器主电路为开关型电路，使得电力电子变换器的数学模型具有时变、非线性的特点。在分析和综合电力电子变换器系统时，必须引起注意。

3. 提高电力电子电路变换效率是电力电子电路的重点研究课题

电力电子电路中尤其看重变换效率，对于大功率电力电子变换器而言，若效率低于85%，就几乎没有应用价值。目前能源短缺已是我国面临的主要问题之一，因此进一步提高电力电子变换器的效率是工程技术人员的重要任务。

0.2.2 电力电子变换器的分析方法

1. 在研究电能变换原理时，科学的假定和合理的忽略是必须遵循的方法
理想开关与实际开关：

什么是理想开关，一般认为符合下列条件就是理想开关：

- 1) 开关处于关断状态时能够承受较高的端电压，并且漏电流为零。
- 2) 开关处于导通状态时能够流过大电流，并且此时端电压（导通电压）为零。
- 3) 导通、关断状态切换时的开关时间为零。

可是，半导体电力电子器件并不是理想的电子开关。实际开关特性是：

1) 关断时能承受的端电压是有限的（目前最高为 12kV），关断时的阻抗也不是无穷大，总有漏电流流过，产生关断损耗。

2) 导通时能够流过的电流是有限的（目前最大为 4 ~ 6kA），导通时阻抗也不为零，正向导通电压和电流的乘积产生导通损耗。

3) 从关断到导通及从导通到关断的时间也不是零，这时的电压和电流乘积产生开关损耗。

在讨论各种变换器的变换原理时，都是在忽略开关损耗，假定电力电子器件为理想开关的情况下进行的。如果不做这种假设和忽略，则会大大增加分析问题的复杂性，甚至会使分析工作难以进行下去。这里需要指出的是，在后面所讲述的变换原理都是基于理想开关条件下进行的（虽然没有写出）。然而，在设计和制造电力电子变换器时，则必须考虑实际的开关特性。

2. 开关电路的基本特性和输出电压、输出电流的求解方法

交流或直流电源输入到开关电路，开关电路将输入电压变为输出电压。

由图 0-3 和图 0-4 可以看出，电路的输出电压和输入电流波形都不可能是理想的正弦交流或直流。例如，在实现 AC-DC 变换时（见图 0-3b、c），输出的直流电压只可能是交流电源正弦波部分片断波形的绝对值，而不可能直接得到平直的直流电压 $U_{d\alpha}$ ，在输出电压中除含有平均直流电压外，还含有一系列交流谐波电压。同时交流电源电流 i 也不可能是完整的正弦电流，除基波电流外还含有一系列谐波电流。同样在实现 DC-AC 变换时（见图 0-4b、c），输出的交流电压只可能是一定脉宽、幅值的矩形波交流电压，而不可能是完整的正弦电压。输出电压中除含有基波电压外，还含有一系列谐波电压。同时直流电源电流也不可能是平直的直流电流，除直流平均电流外还含有一系列谐波电流。在实现 DC-DC 和 AC-AC 变换时，情况类似。

了解开关型电力电子变换器的基本

特性之后，就能求解开关型电力电子变换器的输入、输出特性，所采用的解析方法就是傅里

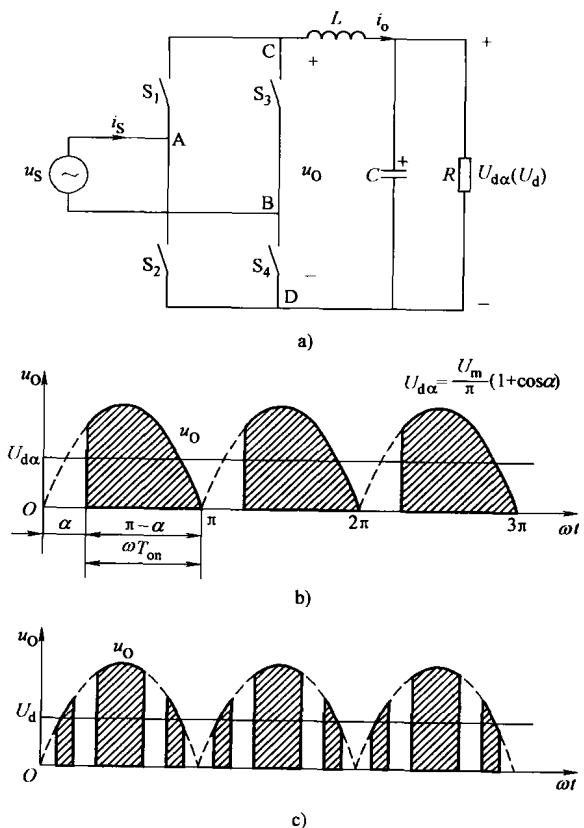


图 0-3 基本整流电路及波形

叶分析法。

开关型电力电子变换器的输入电流和输出电压都是特定的周期性时间函数，输出电压的每个周期都由多个开关状态时间段组成。每个开关状态时间段都对应一定的电源电压（ u 、 $-u$ 、 0 ）和电路结构，可用一个或一组电压、电流微分方程式来描述。在一个输出周期中，电压、电流波形由各开关状态时间段的相关波形组合而成。因此电路特性的分析和电压、电流的求解，应依次根据各个开关状态的电源电压、电路结构和初始条件逐段分析求解。须知，任何一个开关状态下的电压、电流终值 $X(T)$ 就是下一个开关状态的初值 $X(0)$ 。在一个周期中可能有几十个开关状态，对应几十个脉冲波形，因此电力电子变换器特性的严格分析求解是十分复杂、困难的。为了获得变换器的输入、输出特性，通常需要忽略一些次要因素，利用近似方法来解析。例如，在一个开关周期中，取变量在该周期中的平均值替代该周期中的瞬时值（状态空间平均法）。此外，很多情况下不必逐段求解每个开关状态下的微分方程，可根据一个输出电压周期中的各开关状态所形成的输出电压波形进行傅里叶分析，就可以获得电力电子变换器的基本输入、输出特性。

3. 控制理论在开关型电力电子变换器中的应用

电力电子变换器的数学模型具有时变、非线性的特点，一般可以按非线性控制理论进行分析和综合。但是当开关器件的关断延时时间很小（ 10ms 以下）时，可以近似地按照线性电路来处理，这样对于电力电子变换器系统就可以按照线性控制系统的理论进行分析与综合了。这一基本分析方法对各种电力电子变换器系统都是适用的。

4. 电力电子变换器的设计

电力电子变换器的设计有三个主要任务：

硬件任务：建立一个开关矩阵，包括选择合适功率开关器件以及驱动和保护电路所需的辅助元件。

软件任务：操作该矩阵完成预期的变换目的，也就是说，通过调节开关时序来实现所有操作协议。

接口任务：增设储能元件，以便为满足应用要求所必须增加的滤波器或中间储能环节。

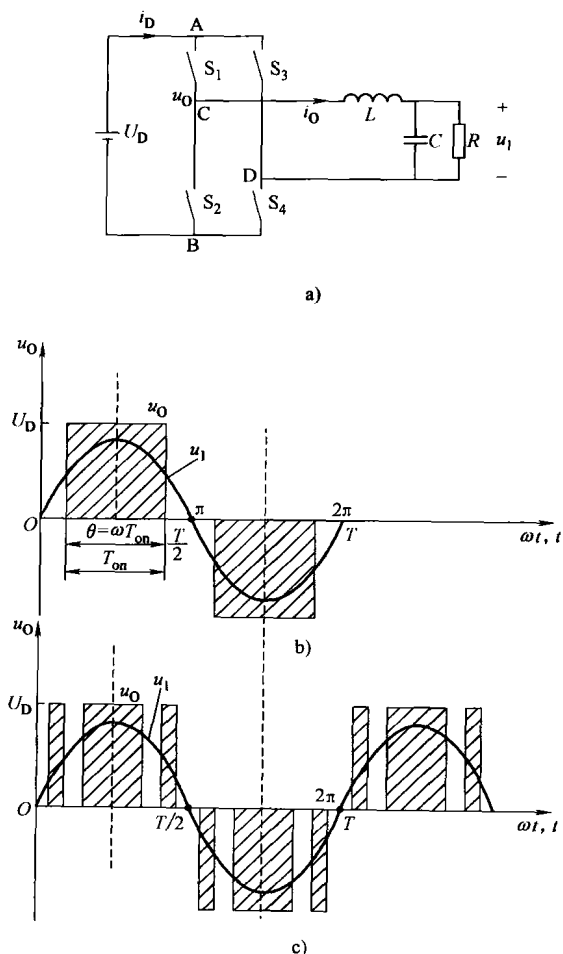


图 0-4 基本逆变电路及波形

在整流器或其他变换器中，必须选择好辅助元件，使它们最好地滤除输出纹波，以满足负载的要求。

设计电力电子变换器必需的三个要素如下：

(1) 开关矩阵

电力电子电路与电子电路最明显的区别就是电路的开关工作模式。与数字电路不同，这里的开关并不表示逻辑电平。控制电路的作用是控制开关的工作时刻。无论只有一个开关还是一组开关，它们都有一定程度的限制：如果一个变换器有 m 个输入和 n 个输出，即使最密集的开关集合，在每一条输入和每一条输出线之间也只需用一个开关来连接。电路中的 $m \times n$ 个开关是根据它们的连接方案来布置的，这种连线结构则称为矩阵，如图 0-5 所示。

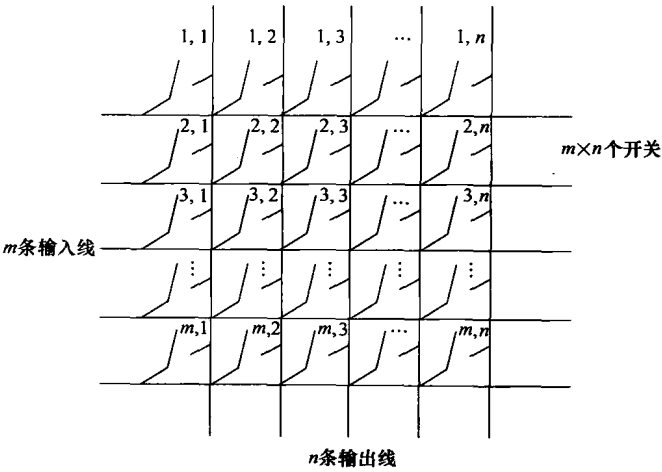


图 0-5 一般的开关矩阵

实际应用中，开关矩阵的阶数是很少的。例如一个 2×2 的开关矩阵就包含了一个单端口输入电源和一个两端负载。矩阵通常可描述成一个 H 桥结构，如图 0-6 所示。更为复杂的电路例子是三相桥式整流器电路，如图 0-7 所示，它是一个有三个输入端和两个直流输出端形成的一个 3×2 开关矩阵。实际上很少有变换器的开关超过 24 个，在大多数设计中，开关都少于 12 个。

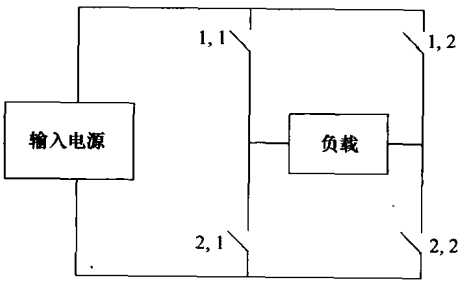


图 0-6 2×2 开关矩阵的 H 桥式结构

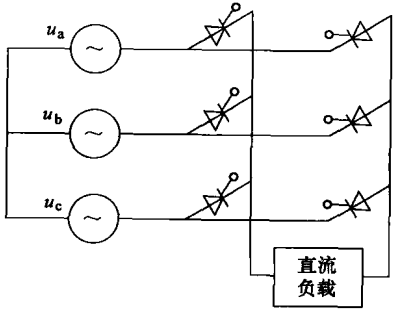


图 0-7 3×2 开关矩阵的三相桥式整流器电路

(2) 开关函数

$m \times n$ 开关矩阵中的每一个元素叫做开关函数 (switching function)，它表示对应的开关器件是处于开还是处于关的状态。

开关函数取值为

$$q(t) = \begin{cases} 1 & (\text{当相应开关接通时}) \\ 0 & (\text{当相应开关断开时}) \end{cases}$$