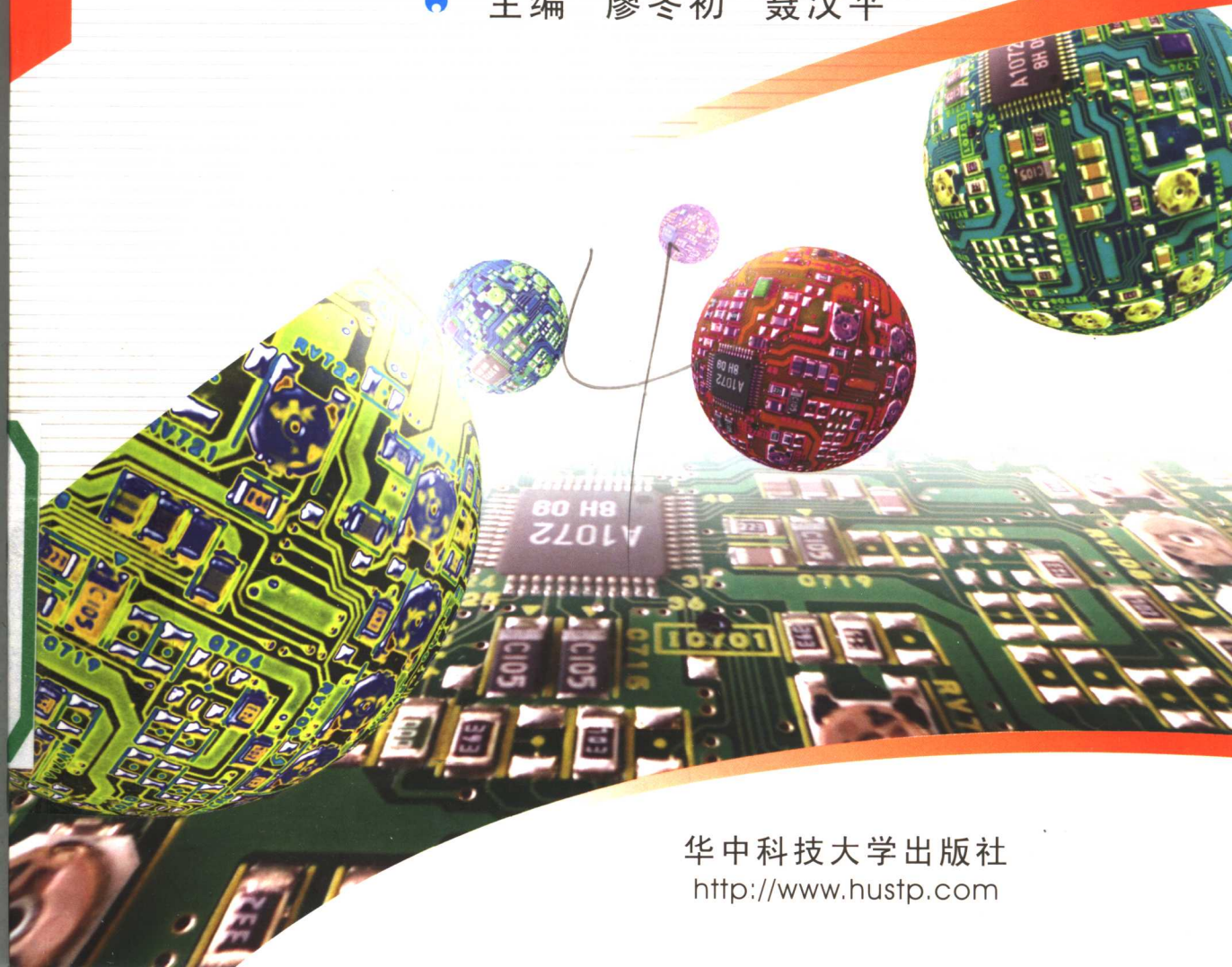




21世纪电气信息学科立体化系列教材

电力电子技术

● 主编 廖冬初 聂汉平



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

TM1/166D

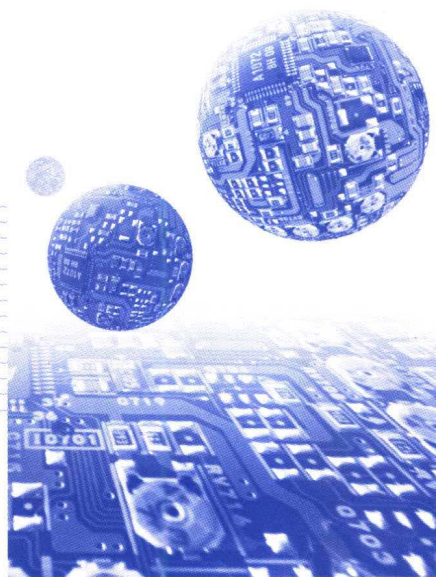
2007



21世纪电气信息学科立体化系列教材

电力电子技术

主 编 廖冬初 聂汉平
副主编 刘小红 刘晓兰



华中科技大学出版社
(中国 武汉)

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/廖冬初 聂汉平 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2007年9月
ISBN 978-7-5609-4163-9

I. 电… II. ①廖… ②聂… III. 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(2007)第133632号

电力电子技术

廖冬初 聂汉平 主编

策划编辑:王红梅 孙基寿

责任编辑:王红梅

责任校对:陈 骏

封面设计:秦 茹

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:龙文排版工作室

印 刷:华中科技大学印刷厂

开本:787mm×960mm 1/16

印张:15 插页:2

字数:328 000

版次:2007年9月第1版

印次:2007年9月第1次印刷

定价:25.80元(含1 CD)

ISBN 978-7-5609-4163-9/TM·94

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内容简介

本书是高等工科院校自动化、机电一体化以及电气工程及其自动化专业学生必修的专业基础课教材。本书的内容涉及各种电力电子器件,DC/DC、DC/AC、AC/DC 和 AC/AC 四类电力转换电路,电力电子变换系统中的辅助元器件和控制系统,谐振变换电路,以及电力电子技术在电力传输和电力控制、电力补偿中的应用技术。

本书精选和归纳了现代电力电子技术的基本原理和应用技术,并体现了其最新发展。全书结构合理,层次分明,适于教学。与教材配套出版的光盘中,有本课程的学习重点、重难点解析、教学课件、习题解答等内容,适于自学使用。

本书适用于自动化、电气工程及其自动化、机电一体化以及高等学校引导性专业目录中的电气工程及其自动化相关专业的本科生,也可供相近专业学生选用或供工程技术人员参考。

前言

电能是迄今为止人类文明史上最优质的能源。人们使用的电能绝大部分是公用电网提供的频率固定、幅值固定的交流电。虽然人类在电能的产生、传输和利用方面已经取得了辉煌的成就,但如何更加合理、高效、精确和方便地利用电能,仍然是需要解决的重大问题。电力电子技术作为研究电能变换与控制的技术,是解决这一问题的重要手段。在世界范围内,经过电力电子装置变换和调节的用电量占用电总量的比例,已经成为衡量用电水平的重要指标,在发达国家,该指标的值目前为 75%,预计不久将达到 95%。电力电子技术广泛应用于电力工业、冶金工业、化学工业、机械工业、交通运输、航空航天、家用电器等诸多领域,如高压直流输电、太阳能发电、磁悬浮列车、电动汽车、数控机床、电动机变频调速以及各类电气电子设备,都离不开电力电子技术。

电力电子技术以电力电子器件为基础,通过控制电力电子器件开通与关断,实现对与该器件串联的电路接通与断开的控制,并通过高频 PWM 等控制技术,在负载侧获得期望的供电形式。同时,电路开关的高频化可使变压器、滤波电感、滤波电容等器件的体积减小、重量减轻、效率提高。因此,使用电力电子技术可以使电能高质量地为负载所利用,达到节能省材、提高电能利用率、提升系统整体性能的目的。因此,电力电子技术在改造传统产业、促进新兴机电一体化产业方面具有独特的优势。特别是在我国政府将节能减排作为社会经济发展重要战略目标的今天,电力电子技术必将发挥重要作用。

本书覆盖了电力电子技术的主要内容。第 1 章介绍了电力电子技术的概念及其主要研究内容、电力电子技术的发展概况及电力电子技术的典型应用。第 2 章介绍了常用电力电子器件的结构、工作原理及其基本特性,包括电力二极管、晶闸管、功率 MOSFET 和 IGBT 等,同时讨论了基本的电力电子器件驱动技术及典型运行保护方法。第 3 章首先讨论了应用于直流—直流变换的 PWM 技术的基本概念,在此基础上研究了典型直流—直流变换电路的结构、工作原理及基本数量关系,包括 Buck 电路、Boost 电路、Buck-Boost 电路、Cuk 电路等。第 4 章研究了逆变电路概念及典型逆变电路的结构、工作原理,讨论了逆变电路的 SPWM 控制技术,介绍了逆变技术在开关电源、变频器等领域的应用,最后介绍了应用于大功率电路的多重逆变技术。第 5 章研究了可控整流电路的基本结构、工作原理及其主要数量关系,讨论了整流装置的有源逆变工作状态,最后介绍了采用全控器件的 PWM 整流电路。第 6 章介绍了交流—交流变换电路的基本结构及工作原理,包括交流调压电路、相控交流变频电路、矩阵式交流变频电路等。第 7 章介绍了软开关的基本概

念、分类及典型软开关电路的基本结构与工作原理,包括准谐振电路、移相全桥零开关 PWM 电路、Boost 型零转换 PWM 电路等。

电力电子电路是非线性电路,分析电力电子电路的基本思路是以线性电路理论为基础,采用分段线性等效电路来分析、研究电力电子电路工作原理。

学习电力电子技术的一种直观方法是采用仿真分析。建议读者在阅读本书的过程中采用 Matlab 等仿真软件对典型电力电子电路进行仿真,以便更形象、深入地研究电力电子电路的工作过程。作为一门工程学科,加强实验与动手操作是学好电力电子技术的重要途径。

本书适合于大专院校电气信息类专业师生教学使用,也可供从事电力电子技术工作的工程技术人员阅读、参考。全书力图深入浅出地阐述电力电子技术的基本思想与主要分析方法,注重实用性。

本书第 1 章、第 6 章由湖北工业大学廖冬初编写,第 2 章由郑州大学刘晓兰编写,第 3 章、第 4 章由长江大学聂汉平编写,第 5 章、第 7 章由湖南大学刘小红编写。全书由廖冬初统稿。中南民族大学刘立航、江汉大学陈亮明参与制定编写大纲,并提出了富有建设性的建议,在此致以衷心的感谢!

编写本书的过程中参考了许多文献,在此特别要对书末所列参考文献的作者表示衷心的感谢。

由于编者学术水平及时间限制,书中错误在所难免。真诚欢迎读者对书中的不足、错误提出批评指正。编者电子信箱为:liaodc@mail.hbut.edu.cn 或 nie_hp@126.com 或 honhonl@163.com。

编 者

2007 年 6 月

目 录

1 电力电子技术概述	(1)
1.1 电力电子技术的概念	(1)
1.2 电力电子技术研究的主要内容	(2)
1.3 电力电子技术的发展概况	(3)
1.4 电力电子技术的应用	(6)
1.4.1 电力电子变换电源	(7)
1.4.2 电力电子补偿控制器	(8)
本章小结	(9)
思考题与习题	(10)
2 电力电子器件	(11)
2.1 电力电子器件概述	(11)
2.1.1 电力电子器件的概念与特征	(11)
2.1.2 电力电子器件的分类	(12)
2.1.3 电力电子器件的主要技术指标	(13)
2.2 不可控器件——电力二极管	(14)
2.2.1 电力二极管的结构与工作原理	(14)
2.2.2 电力二极管的主要特性	(15)
2.2.3 电力二极管的主要参数	(17)
2.3 半控型器件——晶闸管	(18)
2.3.1 晶闸管的结构与工作原理	(18)
2.3.2 晶闸管的主要特性	(20)
2.3.3 晶闸管的主要参数	(22)
2.3.4 晶闸管的门极触发电路	(24)
2.3.5 晶闸管的派生器件	(25)
2.4 全控型器件	(26)
2.4.1 可关断晶闸管	(26)
2.4.2 功率场效应管	(28)
2.4.3 绝缘栅双极晶体管	(33)
2.4.4 集成门极换流晶闸管	(37)
2.4.5 大功率晶体管	(40)
2.5 功率集成电路	(40)

2.5.1	IPM 的结构	(41)
2.5.2	IPM 的内置功能	(41)
2.6	电力电子器件的保护	(42)
2.6.1	过电压保护	(42)
2.6.2	过电流保护	(43)
2.6.3	缓冲电路	(45)
2.6.4	器件温度控制	(48)
	本章小结	(50)
	思考题与习题	(51)
3	DC/DC 变换电路	(53)
3.1	直流 PWM 控制技术基础	(53)
3.1.1	直流变换的基本原理及 PWM 概念	(54)
3.1.2	PWM 技术基础	(55)
3.2	基本的直流斩波电路	(57)
3.2.1	降压变换电路	(57)
3.2.2	升压变换电路	(60)
3.2.3	升降压变换电路	(63)
3.2.4	库克变换电路	(65)
3.3	复合斩波电路	(67)
3.3.1	可逆斩波电路	(67)
3.3.2	多相多重斩波电路	(70)
3.4	变压器隔离的 DC/DC 变换器	(71)
3.4.1	正激变换器	(71)
3.4.2	反激变换器	(72)
	本章小结	(73)
	思考题与习题	(74)
4	DC/AC 逆变电路	(77)
4.1	逆变概念	(77)
4.1.1	逆变的定义	(77)
4.1.2	逆变电路的分类	(78)
4.2	电压型逆变电路	(79)
4.2.1	单相电压型逆变电路	(79)
4.2.2	三相电压型逆变电路	(82)
4.2.3	SPWM 控制技术	(86)
4.2.4	电压型逆变电路的应用	(102)
4.3	电流型逆变电路	(112)
4.3.1	单相电流型逆变电路	(112)
4.3.2	三相电流型逆变电路	(115)
4.4	多重逆变电路	(119)
4.4.1	并联型多重逆变电路	(119)

4.4.2 串联型多重逆变电路	(121)
4.4.3 多重化技术应用实例	(123)
本章小结	(125)
思考题与习题	(126)
5 AC/DC 变换电路	(127)
5.1 整流器的性能指标	(127)
5.2 单相相控整流电路	(129)
5.2.1 单相半波可控整流电路	(129)
5.2.2 单相桥式全控整流电路	(133)
5.2.3 单相桥式半控整流电路	(139)
5.3 三相相控整流电路	(141)
5.3.1 三相半波可控整流电路	(141)
5.3.2 三相桥式可控整流电路	(145)
5.3.3 相控整流电源设计	(151)
5.3.4 大功率整流电路	(154)
5.4 变压器漏感对相控整流电路的影响	(157)
5.5 整流电路的谐波分析	(159)
5.5.1 m 相整流电路的一般分析	(159)
5.5.2 单相和三相桥式可控整流电路的谐波分析	(161)
5.6 相控整流电路的有源逆变工作状态	(164)
5.6.1 有源逆变的工作原理	(164)
5.6.2 三相半波有源逆变电路	(166)
5.6.3 三相桥式有源逆变电路	(166)
5.6.4 逆变失败与最小逆变角的限制	(167)
5.6.5 晶闸管—直流电动机系统工作原理	(169)
5.7 相控整流电路的晶闸管触发电路	(169)
5.7.1 同步信号为锯齿波的触发电路	(170)
5.7.2 KC04 集成移相触发器	(175)
5.7.3 相控整流电路中晶闸管触发控制	(177)
5.8 PWM 整流电路	(178)
5.8.1 单相 PWM 整流电路	(178)
5.8.2 三相 PWM 整流电路	(181)
5.8.3 PWM 整流电路的控制方法	(181)
本章小结	(182)
思考题及习题	(183)
6 AC/AC 变换电路	(187)
6.1 交流调压电路	(187)
6.1.1 单相交流调压电路	(187)
6.1.2 三相交流调压电路	(190)
6.1.3 交流电力电子开关	(193)

6.2 相控 AC/AC 变频电路	(193)
6.2.1 单相 AC/AC 变频电路	(193)
6.2.2 三相 AC/AC 变频电路	(196)
6.3 矩阵式 AC/AC 变频电路	(200)
6.3.1 电路结构与工作原理	(200)
6.3.2 矩阵式 AC/AC 变频电路的控制	(202)
本章小结	(204)
思考题及习题	(204)
7 谐振变换电路	(205)
7.1 谐振变换电路概论	(205)
7.1.1 硬开关与软开关	(205)
7.1.2 谐振变换电路的分类及特点	(207)
7.2 谐振变换电路基础	(210)
7.2.1 RLC 串联谐振电路	(210)
7.2.2 RLC 并联谐振电路	(212)
7.2.3 电压型串联谐振逆变电路	(214)
7.3 准谐振 DC/DC 变换电路	(216)
7.3.1 零电压开关准谐振电路	(216)
7.3.2 零电流关断准谐振电路	(218)
7.4 移相全桥型零电压开关 PWM 电路	(220)
7.5 零电流转换 PWM DC/DC 变换电路	(223)
7.5.1 基本工作原理	(224)
7.5.2 ZCT-PWM 电路的主要参数设计	(225)
7.6 零电压转换 PWM DC/DC 变换电路	(226)
7.6.1 Boost 型 ZVT-PWM 变换电路的基本工作原理	(227)
7.6.2 Boost 型 ZVT-PWM 变换电路的主要参数设计	(228)
本章小结	(229)
思考题和习题	(230)
参考文献	(231)

1

电力电子技术概述

本章讨论电力电子技术的概念,概述电力电子技术研究的基本内容,叙述以电力电子器件为核心的电力电子技术发展概况,阐述电力电子技术在科学技术及经济领域的重要作用,最后介绍电力电子技术的典型应用。

1.1 电力电子技术的概念

电子技术有两大分支:信息电子技术与电力电子技术。二者在电子器件、电路分析等方面的理论基础相同,但应用方向不同。信息电子技术主要用于提取、识别、处理小功率电信号中包含的信息,如收音机、电视机中的调谐电路,信号测量中的滤波、放大电路,对输入信号进行逻辑处理、算术运算的数字电路等。通常所说的模拟电子技术、数字电子技术都属于信息电子技术范畴。电力电子技术主要用于将输入电能变换为期望的另一种形式的电能,涉及的电功率从几瓦到几兆瓦,如变频调速中将工频交流电变换为所需频率的交流电、直流电源中将电网输入的交流电变换为直流电等,都是电力电子技术的典型应用领域。

电力技术主要讨论利用发电机、变压器、输电线等实现电能的生产、传输与分配。电力电子技术处理的对象是电能,但它对电能的变换与控制是基于电力电子器件——电力半导体器件来完成的,因此电力电子技术是应用于电力技术领域的电子学,是利用电力半导体器件实现对电能的高效能变换与控制的一门学问。

由于电力电子器件涉及大功率电能处理,器件工作时存在功率损耗,这些损耗不仅降低电能处理效率,还会导致器件发热,从而影响器件工作的可靠性。为降低损耗,电力电子器件通常都处于开关工作状态。与模拟电子技术中器件工作在放大状态不同,电力电子器件工作在开关状态,这是电力电子技术的一个重要特点。数字电子电路中电子器件

也工作在开关状态,但其目的是利用器件的不同状态表达不同的信息。

应用电力电子技术实现电能变换的装置通常称为电力电子系统或电力电子装置,其典型结构如图 1-1 所示。

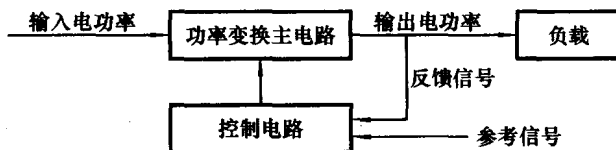


图 1-1 电力电子装置的典型结构

功率变换主电路以大功率电子器件为核心,在控制电路的作用下,将输入电能变换为负载所期望的电能形式输出。图 1-1 中,反馈信号反映了输出电能或被控制量的实际状态。反馈信号的获取、控制电路的物理实现都会涉及电子技术,如输出电功率的电流值可利用霍尔传感器进行检测,霍尔传感器输出的电流信号经电子电路滤波、放大后送控制电路使用。控制电路的作用就是根据主电路形式、对输出电能的要求、输出电能的实际状态等信息,按照一定的控制规律,确定对功率变换主电路中大功率电子器件开通与关断的控制。可见,电力电子技术与电力技术、电子技术、控制理论等有着密不可分的联系。正如 1974 年美国学者 W. Newell 所指出的,电力电子技术是由电气工程三大领域——电力技术、电子技术与控制理论交叉形成的学科。

电力电子技术广泛用于电气工程,如高压直流输电、静止无功补偿、电力机车牵引、交直流电力传动、电机励磁、电加热、高性能交直流电源等广泛采用了电力电子技术。因此,通常把电力电子技术归属于电气工程学科。

电力电子技术可以看成是弱电控制强电的技术,是弱电和强电之间的接口,而控制理论则是实现这种接口的一条强有力的纽带。因此,电力电子技术离不开控制理论。同时,电力电子装置广泛应用于基于控制理论的自动化系统,是自动化领域的基础元件和重要支撑技术。

国际电工委员会将电力电子学科命名为“power electronics”,中文直译为“电力电子学”。电力电子技术与电力电子学并无实质的不同,只不过前者从工程技术角度而后者从学术角度来称呼所研究的学科。

1.2 电力电子技术研究的主要内容

电力电子技术主要研究电力电子器件、电力电子电路及其控制技术、电力电子装置与应用。

电力电子器件的理论基础是半导体物理,其制造技术是电力电子技术发展的基础。

电能有直流、交流两种基本形式,因此,实现电能变换的电力电子电路具有交流一直

流变换(简称 AC/DC 变换)、直流—交流变换(简称 DC/AC 变换)、直流—直流变换(简称 DC/DC 变换)和交流—交流变换(简称 AC/AC 变换)四种典型表现形式。研究实现这些变换的电路结构及其工作原理是电力电子技术的重要内容。

AC/DC 变换是交流到直流的变换,这种变换称为整流,相应的装置称为整流器。采用晶闸管的相控整流装置应用很广,如直流调速、卫星地面接收站使用的直流电源等。

DC/AC 变换与整流过程相反,是直流到交流的变换,这种变换称为逆变,相应的装置称为逆变器。逆变器输出的交流频率可以根据应用要求调整,如计算机房使用的不间断电源(UPS)就是一种恒频输出的逆变器,交流电机调速使用的变频器是输出频率可调的逆变器。

DC/DC 变换是直流到直流的变换,其装置也称为斩波器,如直流电机斩波调速装置、太阳能发电装置中使用的直流电压升压电路等都属于 DC/DC 变换。

AC/AC 变换是对交流电参数进行变换。对电压有效值进行调节的称为交流调压,如有些温度控制系统就是采用调压来控制发热元件所输出的功率;将 50 Hz 工频交流电直接变换为其他频率交流电的过程称为交—交变频,相应的变流装置称为周波变换器。周波变换器广泛应用于低频、大功率交流调速。

依据使用的电力电子器件特性及器件开通与关断控制方案不同,电力电子电路的控制技术可分为相位控制与脉冲宽度调制(简称 PWM)两大类。相位控制技术通过控制电力电子器件在一个开关周期中开通的时刻来调节输出电能,主要用于采用电网换流的晶闸管电路。PWM 控制技术通过直接控制在一个开关周期中电力电子器件开通与关断的时间比例来调节输出电能,用于采用全控器件如功率场效应管的电力电子电路。在电力电子电路应用中,PWM 技术已成为主流控制方法。

电力电子电路中的大功率电子器件工作在开关状态,这种开关型的电路属于非线性电路。对非线性电路的分析,目前尚无广泛适用的定量分析方法。分析电力电子电路的基本方法是分段线性分析法,即对电力电子电路在不同时段采用不同的线性电路来模拟,进而利用线性电路理论进行分析。因此,电路理论是电力电子电路研究的基础。

电力电子装置与应用主要研究不同场合下电力电子电路及装置的设计、制造、运行与维护等工程应用技术。应指出,在实际应用装置中,可能同时使用多种变流器,如逆变开关稳压电源中经常使用 AC/DC→DC/AC→AC/DC 电路结构,采用了两种变流器。

作为自动化专业、电气工程及其自动化专业的一门专业基础课,电力电子技术主要介绍典型电力电子器件的工作机理,研究典型电力电子电路的结构、工作原理及其控制技术,介绍电力电子技术的典型应用。电力电子技术研究的核心问题是电能变换与控制的机理及效率。

1.3 电力电子技术的发展概况

电力电子技术的发展和电力电子器件的发展密切相关,新器件的出现促进新装置的

开发,并开拓新的应用领域。不断拓展的应用又会对电力电子器件提出更多的要求,反过来促进电力电子技术的发展。

与电力电子器件发展相对应,电力电子技术发展经历了黎明期、晶闸管时代(1956年到20世纪70年代初)、全控型器件大发展阶段(20世纪70年代初到2007年)和功率集成电路的兴起(20世纪80年代末到2007年)四个阶段,如图1-2所示。

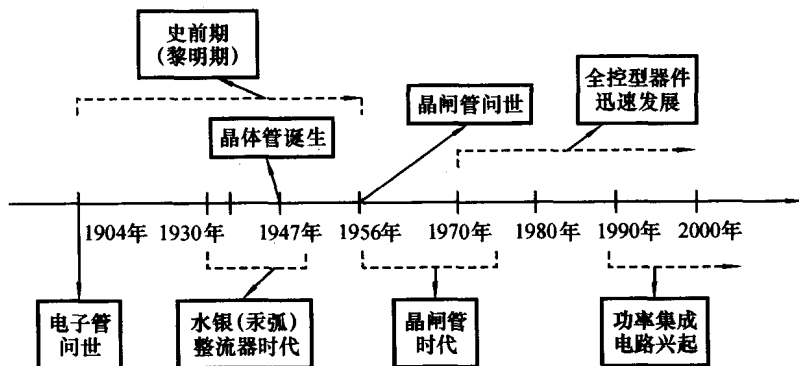


图 1-2 电力电子技术的发展史

在晶闸管整流电路广泛应用之前,实现交流电变为直流电的方法主要有两种:一是采用交流电动机—直流发电机组,即变流机组;二是水银整流器。和含有旋转部件的变流机组相对应,水银整流器不含旋转部件,因而称为静止变流器。

1956年,美国发明了硅半导体器件——晶闸管(thyristor),次年将其引入市场。由于晶闸管具有可控的单向导电性,被首先用于整流电路,因此晶闸管也称为可控硅(silicon controlled rectifier,简称SCR)。与变流机组及水银整流器相比,晶闸管整流装置在体积、重量、动态响应特性、控制方便性等诸多指标方面具有明显的优越性,因此很快得到推广应用。此后,晶闸管被用于DC/AC变换、AC/AC变换、DC/DC变换电路。到20世纪70年代末,晶闸管变流装置广泛应用于电力传动、电化学电源、感应加热电源等变流装置中。正是晶闸管变流装置的应用与发展奠定了现代电力电子技术的概念与基础。晶闸管制造水平目前已达到10 000 V/8 000 A以上,是容量最大的可控电力电子器件。在大功率场合,晶闸管整流装置仍得到普遍应用。由于晶闸管是一种半控型器件,即可在其门极加上合适的触发脉冲使其开通,但不能通过在门极加上控制信号而使其关断。虽然控制晶闸管的开通方便,但其关断通常需借助电网电压等外部条件来实现,因此其应用受到一定限制。

可关断晶闸管(gate turn off thyristor,简称GTO)是在SCR基础上开发出来的全控型电力电子器件。所谓全控型器件是指能在器件的控制极加上符合要求的信号实现器件的开通与关断。尽管GTO在20世纪50年代末即已问世,但一直应用于低电压、小功率的装置中,直到20世纪70年代末才得到较大发展。此后,GTO被用于大功率电力传动、

静止无功功率发生器、电力储能系统等装置中。

20 世纪 70 年代末至 2007 年,随着电子器件制造技术的不断进步,全控型电力电子器件得到迅猛发展,大功率晶体管(giant transistor,简称 GTR)、功率场效应晶体管(metal oxide semiconductor field effect transistor,简称 MOSFET)、绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor,简称 IGBT)、集成门极换流晶闸管(integrated gate commutated thyristor,简称 IGCT)等新器件不断涌现,这促进了现代电力电子技术的迅速发展。

1978 年,功率 MOSFET 在美国问世。这是一种全控型(电压控制型)电力电子器件,具有开关频率高(50 kHz 以上)、驱动功率小、热稳定性优良等特点,在高频、中小功率变流器,特别是小型开关电源中得到了广泛应用。由于功率 MOSFET 是电力电子器件中开关频率最高的器件,而高频化有利于减轻变压器、滤波电感乃至整个装置的体积与重量,因而功率 MOSFET 仍将在低电压、高频、中小功率场合继续广泛应用。

1983 年,IGBT 在美国问世。IGBT 是由 GTR 与 MOSFET 复合而成的电场控制型器件,只需在其栅源极之间建立、撤销电场即可使其开通、关断,因而易于控制。IGBT 的电压、电流容量覆盖了大、中、小功率范围,其开关工作频率可达 20 kHz 以上,远高于 GTR、GTO。因此,IGBT 很快在几千瓦到几百千瓦功率范围内的各种变流装置中得到广泛应用,在许多场合已取代 GTO、GTR,迅速成为电力电子装置设计、制造中的首选器件。应用 IGBT 的交流变频调速装置、大功率逆变电源等系统在电力工程、化学工业、冶金工业、机械制造、家用电器等许多领域的成功普及与推广应用,充分展示了电力电子技术在节能、节材、提高系统性能等方面所具有的重要作用。

1996 年,IGCT 在瑞典问世。IGCT 是一种新型全控型器件,它将硬驱动的 GTO 及其驱动器做成一体,具有功率大、通态损耗小、驱动方便的特点。在大功率场合,IGCT 是有望取代 GTO 的非常有发展前景的器件。目前,市场化 IGCT 器件的容量已达到 6 500 V/4 000 A,展现了良好的发展态势。世界上第一套采用直接转矩控制策略的大功率感应电机传动系统 ACS 1000 应用了 IGBT,最大输出功率达到 5 000 kW;超导同步电动机的轮船推进系统也采用了 IGBT,输出功率达到 25 000 kW。

随着全控型器件的不断发展,以往用于电子、通信工程等学科的 PWM 技术在电力电子技术中获得了广泛的应用。实际上,全控型器件与 PWM 技术的结合成就了今天电力电子技术的重要地位。

功率集成电路(power integrated circuit,简称 PIC)是指将功率半导体器件及其驱动电路等组合在同一个芯片或同一个封装中的电路模块,即把功率部分和驱动控制部分、甚至保护电路都组合在一个器件中的电路。目前,功率集成电路内部使用的功率器件通常为 MOSFET 或 IGBT。通常将由 IGBT、驱动电路、保护电路集成的 PIC 称为智能功率模块(intelligent power module,简称 IPM)。采用 PIC 可以提高电路的功率密度、简化安装工艺、对器件过流和短路等保护更为可靠,从而提高电力电子装置的使用性能。自 20 世纪 80 年代问世以来,PIC 制造技术的发展十分迅速,已成为电力电子技术的重要发展方向。

PIC 的最新发展趋势是电力电子积木(power electric building block, 简称 PEBB)。PEBB 并不是一种特定的半导体器件,它是按一定功能组织起来的可处理电能的集成器件或模块,是依照最优的电路结构和系统结构设计的不同器件和技术的集成。PEBB 不仅包括功率半导体器件,还包括门极驱动电路、电平转换、传感器、保护电路、电源和无源器件。PEBB 有功率接口和通信接口,通过这两种接口,组合多个 PEBB 模块一起工作可以完成电压转换、能量的储存和转换、阻抗匹配等系统级功能。几个 PEBB 可以组成电力电子系统,这些系统可以像小型的 DC/DC 转换器一样简单,也可以像大型的分布式电力系统那样复杂。利用这种具有通用性的 PEBB 模块,电力电子系统的构建将可望像目前利用模块化的板卡构建计算机系统那样方便。

电力电子技术已经取得了显著进步,未来仍具有巨大发展潜力。

在应用方面,电力电子技术应用领域将会进一步扩大,如电力系统补偿控制器的研究与应用已经处在起步阶段、再生能源利用的无限发展空间也给电力电子技术的发展提供了更宽广的舞台等。同时,随着计算机技术、PEBB 的发展及用户对用电要求的提高,电力电子技术向数字化、模块化、绿色化发展的趋势更加明显。

在电力电子器件材料方面,由于目前采用的硅基电子器件在耐高温、高压方面还不能满足应用需要,在今后的发展空间已经相对窄小,因此在未来一段时期,基于新型材料的电力电子器件特别是碳化硅(SiC)器件的开发是推动电力电子技术发展的重要途径。与其他半导体材料相比,SiC 具有高禁带宽度、高饱和电子漂移速度、高击穿强度、低介电常数和高热导率等优异的物理特性,这些特性决定了 SiC 在高温($300\sim 500^{\circ}\text{C}$)、高频率、高功率的应用场合是十分理想的材料。理论分析表明,SiC 功率器件非常接近于理想的功率器件。可以预期,SiC 器件的研发将成为未来电力电子技术的一个主要方向,并将极大地推动电力电子技术的进步。

1.4 电力电子技术的应用

电力电子技术的应用在促进电能的最佳利用、改造传统产业、发展机电一体化等新兴产业的发展方面发挥了重要作用,在国民经济中具有十分重要的地位。

电网供电的形式(我国使用的为 50 Hz 的正弦波)是固定的,而用电设备对电能形式的要求是多种多样的。为了合理、高效地利用电能,通常需要在用电设备的前端对电能形式进行变换与处理以达到最佳利用。目前,发达国家电能的 75%要经过电力电子技术变换或控制后使用,预计不久的将来会达到 95%以上;我国经过变换或控制后使用的电能仅占总电能的 30%,利用电力电子技术控制电能的发展空间还很大。

应用电力电子技术改造传统产业,具有明显的节能、节材、改善产品性能等效果。例如,由于风机、水泵的输入功率与其转速的三次方成正比,当风机、水泵采用调节挡板或阀门变流量运行时,电能浪费很大;如改用变频调速运行,则降速 10%可节约 30%,节能效果显著。又如,对规定容量的变压器,铁芯截面积与其供电频率成反比,采用高频逆变

技术的电源装置的铁芯材料的使用比工频整流装置要少得多,因而在体积、重量等方面具有明显优势,如逆变式电焊机比工频交流和直流弧焊机节电 30%~40%,节材约 75%。

电力电子技术是发展机电一体化等新兴产业的重要技术手段。航天、激光、电动汽车、机器人、新能源(太阳能、风能、燃料电池)等领域都和电力电子技术有着密切关系,如太阳能发电中须利用 DC/DC 变换装置将太阳能电池输出的电能充给蓄电池,再用 DC/AC 变换装置将蓄电池储存的电能变换为交流电供用电设备使用或传输给电网。

从能否改善电网供电质量来划分,电力电子装置可分为电力电子变换电源、电力电子补偿控制器两大类。电力电子变换电源主要将电网电能变换为负载所需的电能形式供负载使用,或将其他形式的电能变换为工频电送给电网;电力电子补偿控制器的负载是电网本身,主要作用是改善电网质量。

1.4.1 电力电子变换电源及其应用

1. 直流开关电源

许多场合都会用到直流电源,如通信设备多使用 48 V 电源,计算机系统会同时用到 +12 V、-12 V、+5 V 等电源。实际上,几乎所有电子装置的控制系統部分都会使用低压直流电源。在各种电子装置中,以前大量采用线性稳压电源供电,开关电源由于体积小、重量轻、效率高,现在已逐渐取代了线性电源。因为各种信息电子装置都需要电力电子装置提供电源,可以说信息电子技术离不开电力电子技术。

2. 恒频、恒压逆变电源

在航空、舰船、车辆等应用场合,常常需要用恒频、恒压逆变电源装置将蓄电池、发电机等输出的直流电变换为恒频、恒压交流电供相关设备使用。

3. 工业用电力传动电源

工业中大量使用各种交直流电动机,如同步电动机励磁用可控整流电源、给直流电动机供电的可控整流电源或直流斩波电源等都是工业用电力电子装置。交流调速用变频器通过将固定频率的交流电转换成电压可调、频率可调的交流电,实现对交流电动机的无级调速。近十几年来,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媲美,被大量应用并逐渐占据主导地位。大至几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变频调速技术。近年来,一些对调速性能要求不高的设备如大型鼓风机等也采用变频装置,以达到节能的目的。

4. 电力系统应用

典型应用有高压直流输电(HVDC)系统、水力及风力发电机的变速恒频系统、太阳能发电系统等。

高压直流输电是将发电厂发出的交流电通过换流阀变成直流电,然后通过直流输电线路送至用电端,再变成交流电注入用电端交流电网。直流输电最核心的技术集中于换