

21世纪电子电气工程师系列

电力电子学

双色

(日) 正田英介 主编
楠本一幸 编

ART 21
电子电气工程师

科学出版社

OHM社

电力电子学

〔日〕 正田英介 主编 楠本一幸 编
耿连发 耿晓兰 译
金喜平 校



图字:01-2001-0369 号

Original Japanese edition

Arute 21 Pawa Erektoronikusu

Edited by Kazuyuki Kusumoto

Copyright © 1999 by Kazuyuki Kusumoto

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese language edition is co-published by Ohmsha, Ltd. and Science Press.

Copyright © 2001

All rights reserved.

本书中文版权为科学出版社和 OHM 社所共有

**アルテ21
パワーエレクトロニクス**

楠本一幸 オーム社 1999正

图书在版编目(CIP)数据

电力电子学/[日]楠本一幸编;耿连发等译.-北京:科学出版社,2001

(21世纪电子电气工程系列/[日]正田英介主编)

ISBN 7-03-009263-5

I. 电… II. ①楠… ②耿… III. 电力电子学 IV. TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 13561 号

北京东方科龙电脑图文制作有限公司 制作

科学出版社 OHM 社 出版

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经

2001 年 6 月第 一 版 开本: A5(890×1240)

2001 年 6 月第一次印刷 印张: 6 7/8

印数: 1—3 500

字数: 202 000

定 价: 19.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

主编的话

当今,电子设备已广泛应用于国民经济的各个领域,为了用好这些电子设备,科技人员必须掌握电子技术方面的有关知识。与此同时,电子技术的应用领域也在迅速扩展,人材需求量很大的状况一直没有改变。因此对电子工程专业的毕业生有必要从应用的角度进行二次培训,也有必要为非电专业的技术工作者学习电气电子技术的基础知识创造更多的机会。

为了适应这一形势的需要,组织编写了“21世纪电子电气工程师系列”丛书,目的是编写一套全面系统介绍电子电气专业基础知识,既适用于企业内部职工培训,也适于非电专业初学者阅读的新型教科书。丛书编委都是在日本有名的电子、电气企业中长期从事职工教育培训的专家,丛书结构及各册内容均由编委会讨论决定。

本套丛书的特点首先表现在教材内容紧密联系实际。通过产品和技术模型说明基础知识与产品、系统的关系,通过具体产品的结构和系统中所发生的现象说明其工作原理或理论。另外,本丛书的所有执笔者都是在相应企业中长期从事实际技术工作或从事职工教育工作的专家,具有丰富的实际经验,书中的举例和例题都是他们多年工作经验的结晶。

此外,在电子技术的专业教学中,由于内容非常广泛,所以以往在对教学内容细化的同时常常忽略了对基础内容的充分消化。本丛书充分注意到了这一问题,从现象入手说明原理,从而保证了基础知识易学易懂,教材内容紧密联系实际。本丛书除了用于企业内部职工教育外,还可用于大专或中等专业学校的专业课教学。

由于受产业全球化和地球环境社会的影响,21世纪的工程学科必将会发生巨大地变化。读者通过对本套丛书的学习,可以对新时期的电子技术的基础有较充分的了解,在各种领域的产品和系统的革新中发挥自己的聪明才智。

东京理科大学教授,工学博士

正田英介

21世纪电子电气工程师系列

编辑委员会

- 主 编 正田英介（东京理科大学 前东京大学）
- 编 委 楠本一幸（株式会社东芝）
岛田 弥（三菱电机株式会社）
高木正藏（东芝综合人材开发株式会社）
常深信彦（株式会社日立制作所 日立京浜工业专科学院）
丹羽信昭（东京电力株式会社综合研修中心）
春木 弘（前富士电机株式会社）
吉冈芳夫（金泽工业大学 前株式会社日立制作所）
吉永 淳（福井工业大学 前三菱电机株式会社）
- 执 笔 色川彰一（株式会社东芝）
古关庄一郎（株式会社日立制作所）
松竹 贡（株式会社日立制作所）
田中 茂（株式会社东芝）
齐藤凉夫（株式会社东芝）
石桥秀男（株式会社富士电机能力开发中心）
黑泽良一（株式会社东芝）
矢野禎成（三菱电机株式会社）
冈地广明（三菱电机株式会社）

前 言

现在,利用电能的各种装置已经发展到能进行精密操作的程度,在日常生活及工业生产中正日益发挥出更大的作用。因此,要保证装置精密地运转电力电子学在电力能源和控制上显得越来越重要。

电力电子学涉及到电工学的电能和电子学的半导体两个领域的知识。由于它多与控制系统相辅相成,因而也离不开控制理论的知识,所以说电力电子学是跨学科的新技术领域。

本书作为初学者的入门书,为了便于读者理解电力电子学知识,而从读者熟悉的应用实例开始解释。并且,电力电子学是一门跨跃电工学与电子学基础知识的专业性很强的学科,它含有许多专业用语及高技术层次的内容。因此,即使有不能够完全理解的内容,也可以通过在后续各章中的实例,反复讲解,帮助领会,希望读者坚持读到最后。还有,本书把能够理解电力电子学的概要作为首要目的,所以有关更详细的技术内容请参阅相关专著及参考文献。

分担本书执笔的是工作在电力电子学技术领域第一线的以下各位:

第1章:色川彰一 第2章:古关庄一郎、松竹 贡

第3章:田中 茂 第4章:斋藤凉夫

第5章:石桥秀男 第6章:黑泽良一

第7章:矢野禎成、冈地广明

最后,对编委主任、东京理科大学教授正田英介先生为首的各位编委们以及欧姆社(OHMSHA)出版部的各位表示谢意。

楠本一幸

译者跋

电力电子学是集电力、电子与控制技术为一体的一门新兴边缘学科。

本书由浅入深,首先介绍电力半导体器件的基本结构及工作特性,然后对电力电子学基本电路的构成做了比较详细地介绍。

另外,书中还例举了日本电力电子技术应用中有代表性的实例及其发展状况。例如:已经实用化的50万伏超高压直流输电系统,以及比较先进的电机调速系统、数控机床控制系统和轧钢机自动控制系统等。本书虽然起点较低,但是综合应用技术含量较高,特别是书中所述的微型计算机数字控制中调速系统的矢量控制技术、弱磁场控制技术等都是20世纪90年代的成熟技术。本人相信,无论是普通读者,还是专业技术人员,读后一定会有新的感受和启发。

最后,有幸翻译此书,对科学出版社东方科龙公司的各位表示感谢;同时在本书的翻译过程中得到了家人的热情支持和大力协助;金喜平教授也在百忙之中,抽出时间对本书进行全面、详细地审阅,并提出了宝贵的修改意见;在此表示衷心的感谢。

由于水平和时间所限,在翻译过程中难免有错误之处,希望读者批评指正。

译者

目 录

第 1 章 电力电子学概述

1.1 了解电力电子学	1
1.2 电力变换	3
1.3 理想开关和实际情况	5
1.4 电力半导体器件的辅助电路和装置	7
1.4.1 门电路	7
1.4.2 辅助电路	7
1.4.3 冷却装置	8
1.4.4 应用理想开关时的问题	9
1.5 不同类型的变换器使用在不同的场合	9
练习 题	12

第 2 章 交流电源工作的变换装置

——有源变换装置和循环变流器

2.1 交流变直流	13
2.1.1 怎样变成直流——使用二极管正变换装置	13
2.1.2 三相交流变成直流	17
2.1.3 如何改变直流电压——使用晶闸管正变换装置	20
2.1.4 归纳功率变换的公式	28
2.1.5 实际的变换装置是怎样构成的	29
2.2 直流变交流——有源逆变器装置	30
2.2.1 怎样由直流变成交流	30
2.2.2 逆变换使用的范围	32

2.3	改变交流频率	
	——使用有源变换装置的频率变换器	33
2.3.1	由交流变直流,再由直流变成交流	33
2.3.2	直接变换交流频率——循环变流器	37
2.4	控制交流功率	
	——交流开关和交流功率调节器	43
2.4.1	通、断交流	43
2.4.2	用晶闸管开关控制交流功率	44
2.5	由变换装置产生的干扰	
	——直流脉动、高次谐波、无功功率	47
2.5.1	直流脉动	47
2.5.2	交流电流波形是非正弦波	49
2.5.3	消耗无功功率	52
	练习题	54

第3章 直流斩波器与开关调节器

3.1	改变直流电压	55
3.2	降低损耗、改变直流电压的方法	56
3.3	斩波器的原理	56
3.4	斩波器控制方法种类	58
	3.4.1 三角波比较方式脉宽调制控制	58
	3.4.2 滞环比较方式(瞬时比较方式)	60
3.5	斩波器的种类	61
	3.5.1 降压斩波器	61
	3.5.2 升压斩波器	61
	3.5.3 升降压斩波器	62
	3.5.4 可逆斩波器	63
3.6	使用范围	63
	3.6.1 直流电动机的控制	64
	3.6.2 磁轴承控制	64

3.6.3	直流电压的稳定性	64
3.7	开关调节器	64
3.7.1	正向变流器	65
3.7.2	反馈变流器	65
3.7.3	推挽式变流器	66
3.7.4	全桥式变流器	66
	练习题	67

第4章 无源变换装置——逆变器

4.1	具有电压源特性的逆变器	
	——电压型逆变器	69
4.1.1	电压型逆变器使用的范围	69
4.1.2	电压型逆变器电路	70
4.1.3	改变交流电压的方法	75
4.1.4	驱动电动机装置的工作原理	79
4.1.5	如何能够实现大容量的装置	81
4.1.6	使用电压型逆变器时注意事项	85
4.2	具有电流源特性的逆变器	
	——电流型逆变器	86
4.2.1	电流型逆变器使用的范围	86
4.2.2	电流型逆变器电路	87
4.2.3	改变交流电流的方法	91
4.2.4	驱动电动机装置的工作原理	93
4.2.5	如何能够实现大容量的装置	96
4.2.6	使用电流型逆变器时注意事项	98
4.3	优良特性的开关逆变器	
	——谐振型逆变器	100
4.3.1	为什么必需优良特性的开关	100
4.3.2	谐振型逆变器的使用范围	101
4.3.3	谐振型逆变器电路	102

4.3.4 谐振型逆变器的几个问题	107
练习题	108

第5章 电力半导体器件

5.1 电力半导体器件的种类及其应用	109
5.2 二极管	111
5.2.1 p型半导体、n型半导体	111
5.2.2 二极管的结构	112
5.2.3 二极管的工作原理	113
5.2.4 二极管的特性	114
5.3 双极晶体管	114
5.3.1 双极晶体管的工作原理	115
5.3.2 双极晶体管的特性和特征	116
5.4 晶闸管和 GTO 晶闸管(门极可关断)	118
5.4.1 晶闸管	118
5.4.2 GTO 晶闸管(门极可关断)	121
5.5 功率场效应晶体管和绝缘栅双极晶体管 ...	124
5.5.1 功率场效应晶体管(MOSFET)	124
5.5.2 绝缘栅双极晶体管(IGBT)	127
5.6 电力半导体器件的功率损耗和冷却	129
5.6.1 为什么必需对电力半导体器件进行冷却	129
5.6.2 电力半导体器件的功率损耗	129
5.6.3 计算电力半导体器件的面结温度	130
练习题	132

第6章 电力电子学中的控制

6.1 电力电子技术控制的特征	133
6.1.1 数字式的开、关控制中损耗低的电力变换	133
6.1.2 迅速导通、关断控制的平滑控制	134

6.1.3	按照开关的速度高速处理控制	135
6.1.4	根据目的、用途多样的控制	135
6.2	电力电子技术控制的基本因素	136
6.2.1	PWM 控制	136
6.2.2	空间矢量和坐标变换	143
6.2.3	交流电动机控制	145
6.2.4	转速传感器	150
6.2.5	变频器控制(PWM 变频器控制)	153
6.3	微型计算机和专用集成电路(ASIC)	156
6.3.1	微型计算机和数字信号处理器(DSP)	156
6.3.2	专用集成电路(ASIC)	159
6.4	构成实际控制的实例	162
6.4.1	电力电子微处理器	162
6.4.2	应用实例	164
	练习题	165

第 7 章 电动机控制

7.1	电动机可变速运行的结构	168
7.1.1	直流电动机如何变速	168
7.1.2	交流电动机如何变速	170
7.2	在钢铁轧钢机中如何使用电动机 驱动控制系统	178
7.2.1	轧钢机	178
7.2.2	轧钢机的电动机控制系统构成	179
7.2.3	直流电动机驱动系统的实例	181
7.2.4	交流电动机驱动系统的构成	182
7.3	在机床中如何使用这些控制系统	188
7.3.1	数控(NC)机床	188
7.3.2	驱动系统的构成	189
7.3.3	进给轴驱动	190

7.3.4 主轴驱动	192
练习题	194
练习题解答	195
参考文献	202

第 1 章 电力电子学概述

电力电子技术就是用电力半导体器件组合成合适形式的控制技术。

本章将介绍电力电子技术基础及其使用概要。

1.1 了解电力电子学

所谓电力电子学是以电力-电机技术(电工学)、半导体器件技术(电子学)及将两者结合的控制技术(自动控制)这 3 种基本技术作为基础,构成的边缘技术新学科。这个概念虽然从 20 世纪 60 年代开始就使用,但直到 1976 年才由艾维利博士(Dr. Newell)作出如图 1.1 所示的明确定义。

1957 年由美国通用电气公司(GE)开发的晶闸管成为电力电子学发展的开端。之后,又相继开发了 GTO(gate turn-off thyristor,门极可关断晶闸管)、电力晶体管和 IGBT(insulated gate bipolar transistor,绝缘栅双极晶体管)等等,这些新型电力半导体器件正朝着大容量、高性能方向发展。使用这些器件不断开发新的电路技术。并且,微处理器的发展也促进控制技术的进步。由于上述 3 种基本技术的显著发展,电力电子学技术的应用领域也正在迅速扩大。

从小容量的家电产品到工厂、铁路和电力等部门中大容量系统的应用,容量从几千瓦到几千兆、电压从为几十伏到几十万伏,涉及的范围之广,以至于电力电子学已成为现代生活中不可缺少的。虽然电力

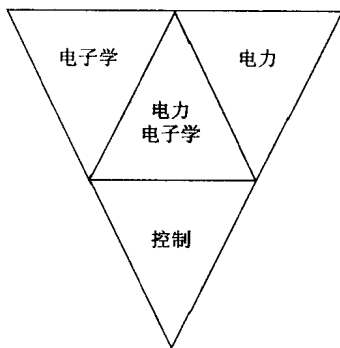


图 1.1 由艾维利博士定义的电力电子学

变换、控制等基本技术具有一定的兼容性,但根据容量和电压大小应用的半导体器件、电路技术也不同,所以说电力电子技术领域范围很广。

为了领会电力电子学的含义,我们首先试想一下成为电力电子技术直接控制对象的电力。在我们身边作为电源虽然有时也使用产生直流电的电池,然而绝大部分工厂、办公室和一般家庭都是使用交流电,它是由大容量交流发电机产生的电能。大功率电能远距离传输时,交流输电可用变压器将电压(V)升高,将电流(I)变小,于是、输电线电阻 R 上的损耗(I^2R)就可以变小了,提高了输电效率。即由于雷击使输电线发生故障,包括半周期内产生的零点交流电流,只要使用机械断路器就可轻易地消除故障的影响。由于上述原因,现在的电力系统都是以 50Hz 或 60Hz 的固定频率的交流电作为主体的。

但是,使用电力时固定频率的交流电未必总是最佳选择,有很多时候,为了高效率利用电能,可以根据需要改变频率或将交流电变成直流电。家庭中使用的变频空调就是将市电 100V 交流电¹⁾,先转换成 250V 左右的直流电,进而用半导体器件组成的逆变器将频率转换成 30 ~ 120Hz,从而改变感应电动机的转速,控制输出功率。开始运行时,转速上升,输出功率最大,让空调迅速地供暖或供给冷气;温度稳定后电机转速下降,可以持续地控制温度。这和以前用反复地开、关形式调温的空调器相比,噪声低、效率高。

这是电力电子技术应用的一个实例。交流电的频率、大小和相位是它的 3 要素,如果能使用电力电子技术,就可以自由地变换上述 3 要素,它将给我们带来很大的益处。由于发电造成的空气污染引起了人们对环境问题的关注,所以最近人们盛行开发太阳能电池和燃料电池,这些都是直流电源。将这些直流电如图 1.2 所示那样,通过电力电子技术变成交流,就可以供给人类使用。

由于电力电子技术的进步,把交流电变成高压直流电进行输送,在用户末端再一次地将它变成交流电,这样就可以利用它们。在直流输电中,具有不受电感、电容的影响的特点。应用端只要将输来的直流电再转换成交流电,进一步用电力电子技术,将电力根据各种各样的目的,变成使用容易的形式来使用。

1) 是指日本供电标准。我国市电用 220V 交流电。——译者注

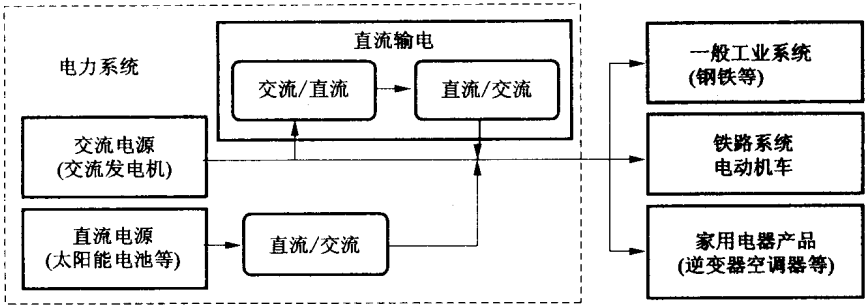


图 1.2 电力电子学的应用领域

1.2 电力变换

用简单的实例来说明用电力电子技术如何进行变换。图 1.3 是将交流变成直流的电路，假定开关是理想的开关，并且忽略了在实际电路中存在配线电感和电容。

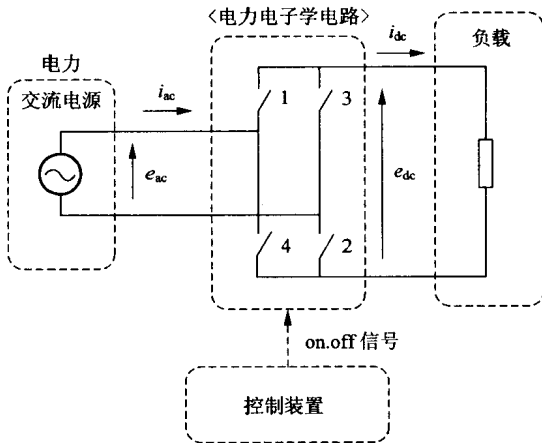


图 1.3 用电力电子技术电力变换的实例

如图 1.4 所示，设用开关 1 和 2 使交流电压 e_{ac} 的相位从零度开始，让

控制角仅延迟 α 定时导通, 在交流电压 e_{ac} 相位 180° 时关断。设开关 3 和 4 的交流电压 e_{ac} 的相位从 180° 时开始, 让控制角也仅延迟 α 定时导通, 在交流电压 e_{ac} 的相位零度时关断。

如图 1.4 所示, 直流电压 e_{dc} 将交流电压 e_{ac} 削去一部分, 然后连接合并在一起形成单极性波形, 其平均值为 V_{dc} 。由于这个电路略去电感, 仅有电阻, 所以直流电流 i_{dc} 和直流电压 e_{dc} 相似成为单极性波形, 平均值为 I_{dc} 。交流电流在开关 1 和 2 导通时形成正极性, 而在开关 3 和 4 导通时成为负极性, 直流电流 i_{dc} 削去一节, 连接合并一起成为双极性的交流电流 i_{ac} 。

当控制角 α 变大时, 平均直流电压 V_{dc} 下降, 平均直流电流 I_{dc} 也下降。由这样的开关构成的电路, 控制开关定时导通、关断, 削去交流电压波形的任意一部分, 连接合并在一起, 就可以将交流变成直流, 并且也可以控制它的大小。

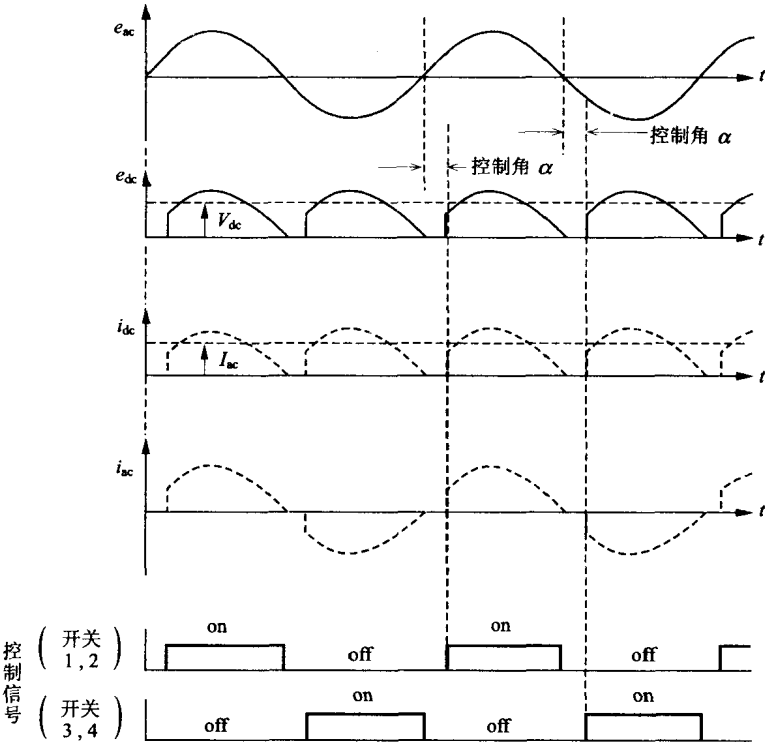


图 1.4 电力变换电路的电压、电流波形