



21世纪大学新型参考教材系列

电力电子学

(日) 堀 孝正 编著

Inter University



科学出版社

OHM社

TM1

80

21 世纪大学新型参考教材系列

电力电子学

[日]堀 孝正 编著
李世兴 程君实 译



北方工业大学图书馆



00499360

科学出版社 OHM 社

2001. 北京

h4c85/10

图字:01-2000-3670 号

Original Japanese edition

Interuniversity Power Electronics

by Takamasa Hori et al.

Copyright © 1996 by Takamasa Hori

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

インターユニバーシティ

パワーエレクトロニクス

堀 孝正 オーム社 2000年 第1版第4刷

图书在版编目(CIP)数据

电力电子学/[日]堀 孝正编著;李世兴,程君实译. -北京:科学出版社,2001

(21世纪大学新型参考教材系列)

ISBN 7-03-009574-x

I. 电… II. ①堀… ②李… ③程… III. 电力电子学-高等学校-教材 IV. TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 040806 号

北京东方科苑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 各地新华书店经销

2001年8月第一版 开本:A5(890×1240)

2001年8月第一次印刷 印张:4 5/8

印数:1—5 000 字数:132 000

定 价: 12.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

电气能源基础
等离子体电子工程学
电力系统工程学
电气电子材料
高电压/绝缘工程学
电动机器
电力电子学

电气能源

逻辑电路与自动机械
计算机工程学
程序语言设计
信息传送和符号的理论
信息通信工程学
信息网络

信息通信

公共基础

电磁学A
电磁学B
电气电路A
电气电路B
电子电路A
电子电路B
电气数学
信息数学
程序设计

测量·控制

系统与amp;控制
信号分析
传感测量
柔性信息处理
机器人控制

为了适应21世纪的要求

面向21世纪，日本各大学进行了系与学科的改编、研究生院的调整、导入两期制等。伴随着这些调整，现有的教材已不能适应现代学生的水平和兴趣要求。因此就要求有一套从版面到内容都更新颖的教科书。

本系列正是考虑到这种新的要求，经过不断深入考察和讨论，按照全新的整体编排形式制作完成的新型教材。曾荣获第七届日本工科教育协会奖「业绩奖」。

21世纪大学新型参考教材系列 编辑委员会

电子器件

电子物性
半导体工程学
电子器件
集成电路A
集成电路B
光电子学

主任委员：家田正之（爱知工业大学）
编 委：稻垣康善（名古屋大学）
白井支朗（丰桥技术科学大学）
梅野正义（名古屋工业大学）
大熊 繁（名古屋大学）
绳田正人（名城大学）

前 言

1957年,美国GE公司(美国通用电气公司)发明了半导体开关器件——晶闸管,由于它可简便地实施大功率变换,从而开始了电力电子学时代。

进入20世纪70年代,以晶闸管为代表,二极管及晶体管等功率半导体器件在高速、高压、大电流方面发展非常迅速。70年代以后,IC、LSI、微型计算机、DSP、ASIC等的实用化取得了进展,采用微型器件的控制技术、信号处理技术也日益成熟。由于微型器件和功率半导体器件两方面的进步,在70年代后半期,电力电子学才有了蓬勃发展。

逆变型荧光灯、变频空调器、直流输电、逆变型电车、新干线“希望”号、高层建筑的电梯控制、机器人控制、工厂自动化设备的控制,以及工业领域的电动机控制、开关稳压器等的普及和发展,使我们的生活丰富多彩。

本书是面向大学专科及本科学生的教科书,也可供具备电气电子技术基础知识的技术人员参考,本书采用了简明易懂的叙述方法,便于读者理解电力电子学的基本技术及电路。

全书共分6章,每章的学习可通过两次讲解来完成。

第1章 阐述有关电力电子学的基本技术、电路、应用实例等,以便读者了解电力电子学的概貌。

第2章 介绍电力电子学中必需的功率半导体器件的种类及特性等。

第3章 说明采用功率半导体器件进行功率变换及控制的原理,以及功率半导体器件的使用方法。

第4章 说明将交流变换为直流或调节交流功率的晶闸管变换器的原理及特性。

第5章 说明将直流变换为不同大小直流的DC-DC变换器的原理及特性。

第6章 说明将直流转换为交流的逆变器的原理及特征。

由于受篇幅的限制以及笔者学识的局限,书中的某些内容,也许会有未能充分说明的地方。对于希望更详尽掌握、理解相关内容的读者,可利用每章末附有的练习题和书末附有的参考文献。读者可亲自去图书馆查阅、研究,以加深对电力电子学的理解。电力电子技术作为解决未来能源危机必备的技术之一而受到重视,若读者能以浓厚的兴趣学习本书,我将感到十分荣幸。

最后,对在本书撰稿和出版过程中给予帮助和支持的各位表示深深的谢意。他们是给予本书出版机会、并进行诸多指导的编委会主任家田正之先生、编委绳田正人先生,以及在百忙中尽心尽力为本书执笔的各位先生。

堀 孝正

目 录

1 电力电子学的学习方法	
1.1 电力电子学的意义及历史	2
1.2 电力电子学的作用	3
1.3 功率变换和控制的作用	6
1.4 功率变换和控制的基本原理	7
1.5 功率变换用的开关所要求的条件	8
1.6 功率半导体器件的种类	10
1.7 功率变换的基本电路和应用实例	12
1.8 非正弦波形的电压、电流、功率的处理方法	17
练习 题	22
2 功率半导体器件的基本特性	
2.1 功率半导体器件的种类	24
2.2 二极管	25
2.3 晶闸管	27
2.4 功率晶体管	35
2.5 各种器件的比较	42
练习 题	44
3 功率变换与控制	
3.1 通过开关动作进行功率变换	46
3.2 控制开关动作	49
3.3 器件的保护措施	55
3.4 晶闸管的导通与关断	58
3.5 降低开关器件的耗损	59

练习 题	62
4 晶闸管变换器的原理及特性	
4.1 单相半波二极管整流电路的工作特性	64
4.2 电感的作用	65
4.3 各种单相桥式整流电路	69
4.4 三相晶闸管桥式整流电路	75
4.5 采用换流电抗器的整流特性	78
4.6 采用晶闸管调节交流功率	80
4.7 循环换流器的结构	81
练习 题	84
5 DC-DC 变换器的原理及特性	
5.1 直流斩波器的结构	86
5.2 开关稳压器	93
5.3 谐振型变换器	98
练习 题	101
6 逆变器的原理及特性	
6.1 从直流变成交流的方法	104
6.2 用实际的功率半导体器件置换理想开关	107
6.3 如何控制逆变器的输出电压	109
6.4 如何实现多相逆变器	110
6.5 如何使输出波形接近正弦波	114
6.6 将逆变器的输入输出颠倒使用	118
6.7 用逆变器驱动交流电动机	120
练习 题	121
练习题解答	123
参考文献	131

篇外话

W. E. Newell 提出的“电力电子学”	3
半导体与 pn 结	25
傅里叶级数的求法	108

1

电力电子学的学习方法

电力电子学的含义是什么？它是由哪些基础技术构成的？另外，它的应用范围是什么？本章将就这些问题阐述电力电子学的概貌。

1.1 电力电子学的意义及历史

目前,电力电子学(power electronics)是指采用功率半导体器件进行功率变换、控制以及大功率电路开关的技术及其应用范围。但如何形成这一概念的,还需回顾一下历史。

自1948年发明晶体管(transistor)起,电子学时代就已经开始。在此之前,可控制真空中电子流的真空管已应用于通信、广播、音响等装置。但随着电子学时代拉开序幕,真空管就被晶体管所替代,很快真空管就不采用了。20世纪60年代以后,从晶体管开始,陆续开发了IC(集成电路: Integrated Circuit)、LSI(大规模集成电路: Large Scale IC)等新器件,是微电子学(micro electronics)鼎盛时代,并时至今日。微电子学在处理小信号的通信、信息、测量、控制等领域取得了显著进展。

另一方面,处理大功率的技术是采用什么器件呢?在真空管出现不久,就发明了能够通过大电流的气体放电管(闸流管及放电管等),可以控制从数百W至数kW以上的功率。30年代,采用闸流管进行电动机控制已经实用化。现在的电力电子学的部分主要技术就是这个时代形成的。

50年代,可处理数百千瓦以上功率的大容量水银整流器进入了实用期,并应用于电源装置、电气化铁路、工业用电动机控制、直流输电等,构筑了水银整流器时代。然而,1957年美国GE公司发明了晶闸管(thyristor)(GE公司的商品名:SCR: Silicon Controlled Rectifier),随着这一功率半导体器件的容量越来越大,采用晶闸管的功率变换技术的实用化也得到了发展。水银整流器由于利用的是放电现象这一原理,所以容易产生逆弧、失弧等异常现象。同时,由于水银整流器很难做到小型化,所以在60年代迅速消失,从而使晶闸管在功率变换及控制中占了主流。

进入60年代后半期,作为功率半导体器件(power semiconductor device)的二极管(diode)、晶体管、晶闸管等在大容量方面得到了发展,同时,控制功率半导体器件的电子技术也取得了进展。因此,电子技术逐渐向功率控制扩展,而形成了电力电子学。1974年,W. E. Newell赋予了“电力电子学”这一词汇所表示的意义(如图1.1所示)。总之,所谓电力电子学,

可定义为“功率 (power)、电子学 (electronics) 和控制 (control) 技术完全融合的学科”,是研究“采用功率半导体器件进行功率变换、控制以及大功率电路开关的技术及其应用范围”的学科。

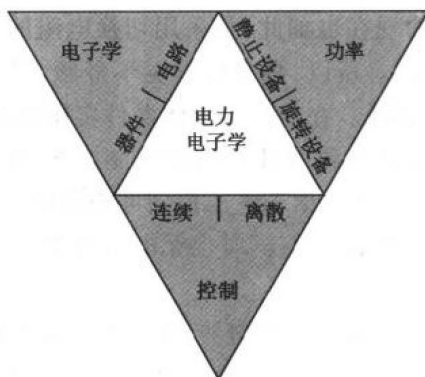


图 1.1 电力电子学的构成领域

(资料来源 电气学会编:半导体功率转换电路,电气学会(1987),p.1)

W. E. Newell 提出的“电力电子学”

(IEEE Trans. IA-10 (1), 1974, pp. 7~11)

“Power Electronics is a technology which is interstitial to all three of major disciplines of electrical engineering; electronics, power, and control. Not only does power electronics involve a combination of the technologies of electronics, power, and control, as implied by the Fig. 1.1 (图 1.1), but it also requires a peculiar fusion of the view points which characterize these different disciplines.”

1.2 电力电子学的作用

电力电子学在我们身边起到什么作用呢?下面根据图 1.2 及 1.3,以电车控制和利用自然能量发电为例来加以阐述。

1.2.1 电车控制

电车(地铁及城市近郊电车)是用设置在电车车底下面的功率变换电路控制来自架空线的直流电流,对电动机进行调速。

原有的电车,有的现在也如此,是采用切换电阻的方法,改变加在直流电动机上的电压来调速。所以,乘坐时感觉不舒服,另外加速和减速时,电阻会造成很大的功率损耗。在功率半导体器件实用化之后,从1975年左右开始,采用斩波电路通过高频的开与关的控制来控制电压,以代替切换电阻,这就是所谓斩波型电车。由于电压控制可连续进行,所以行驶速度可平滑调节。这样,乘坐时感觉舒服,同时也无电阻损耗,提高了效率,能做到节能运行。

但是,直流电动机有电刷和换向器,所以需要定期保养检查,同时难以高速旋转。在早晚上下班高峰时,电车的运行时间间隔要缩短,并频繁进行加速及减速运行,同时,越来越希望提高运行速度,实现高速化运行。所以,从1985年左右起,广泛使用了将直流改变为可变频率交流的逆变器来驱动笼型异步电动机的方式,以代替控制直流电动机,这就是逆变型电车。由此,实现了驱动部分小而轻、容易加速减速运行,而且保养检查简单的电车。

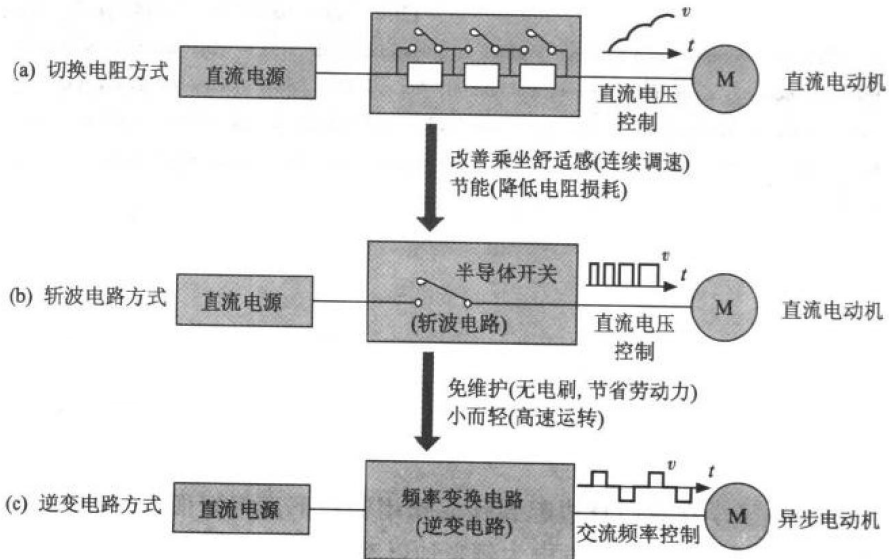


图 1.2 电车的调速方式

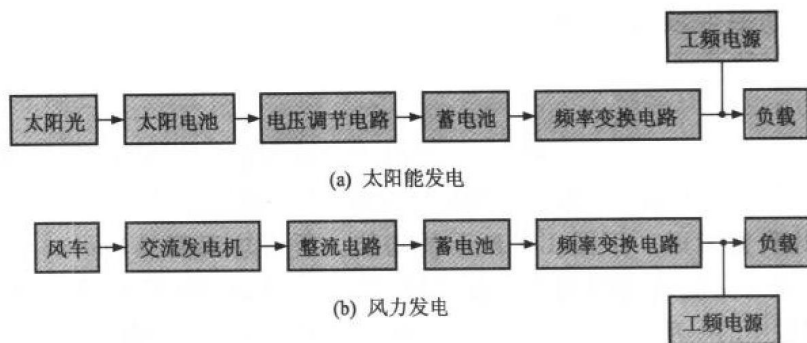


图 1.3 利用自然能量发电时的能量流程

1.2.2 利用自然能量发电

电,在我们的生活中是必需品,但大部分电是靠火力发电。而火力发电所使用的化石燃料是有限的,归根到底是要枯竭的。同时,也会产生 CO_2 , 这是产生地球温室效应的原因,并且也是酸雨形成的原因。而与此相反,阳光和风等自然能量是无限的,无资源性枯竭。靠太阳能发电及风力发电等自然能量来发电是无公害的,目前正在开发这种能源并致力于实用化。

但是,该两种发电方法也有缺点。例如风力发电时,由于风的强弱变化,会使发电功率变化;在太阳能发电时,日照量的多少也会使发电功率变化。另一方面,所发的电力是用于日常生活的,所以,作为交流电源使用时,希望交流电压和频率保持恒定;而作为直流电源使用时,希望直流电压保持恒定。这就是说,在采用自然能量发电时,必须控制变化的发电功率。

为了有效利用功率时刻变化的电力,必须采用改变直流电压大小的电路(斩波电路)、或将交流变换为直流的电路(整流电路)、或将直流变换为交流的电路(逆变电路)等。

上面,以两个例子阐述了由电力电子学进行的功率变换及控制在我们身边对丰富我们生活所起的作用。第 1.7 节将叙述其他几个应用例子。

1.3 功率变换和控制的作用

电力电子学是采用功率半导体器件进行功率变换、控制以及大功率电路开关等的技术领域。但功率变换和控制的作用是什么呢?

让我们考虑一下图 1.4 所示的功能。所谓功率变换(power conversion),其意义就是:在电源和负载之间,将电压、电流、频率(包含直流)、相位、相数中的一项以上加以改变。将利用二极管、晶体管、晶闸管等功率半导体器件的开关动作无功耗、理想地进行功率变换的装置称为**半导体功率变换装置**。在功率变换中,着眼于从电源(输入)到负载(输出)如何改变功率的形态。另一方面,所谓**功率控制(power control)**的含意是控制电压、电流的大小及频率,着眼于输出与控制输入的关系。

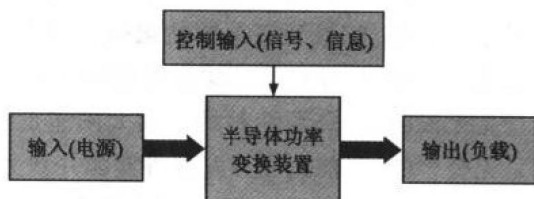


图 1.4 功率变换及控制的基本功能

作为功率的形态,若着眼于最重要的频率,用输入和输出的关系表示交流和直流的变换,则如表 1.1 所示。根据输入是交流,还是直流,另外根据输出是想得到交流,还是想得到直流,则功率的变换方式不同。例如,将交流变换成直流,称为**正变换**,完成这一变换的是**整流器(或者整流装置)**;而将直流变换为交流,称为**逆变换**,完成此变换的是**逆变器**。将交流变换成直流是功率变换,但在变换的同时,若又调整直流的电压和电流,则可看作是功率变换和控制同时进行。通常,功率变换中,也可以说必然伴随着功率的控制。

表 1.1 功率变换

输出(负载侧) 输入(电源侧)	直 流	交 流
交 流	正变换 (整流器)	交流功率调节 频率变换 (循环换流器)
直 流	直流转换 (斩波器)	逆变换 (逆变器)

1.4 功率变换和控制的基本原理

为了瞬时且高效进行功率变换和控制,则必须采用半导体开关。在此,根据表 1.2,采用开关,阐述功率变换和控制的基本原理。

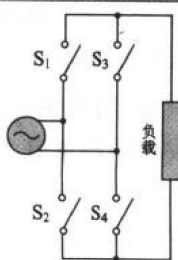
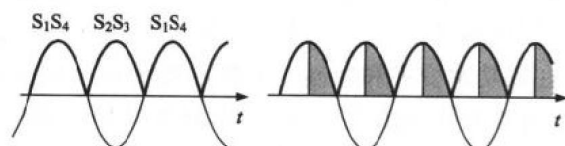
在方式 1 和 2 中,电源是交流,使 $S_1 \sim S_4$ 按照交流电源的电压相位进行动作,通过这样可改变直流电压(平均值)和交流电压(有效值)的大小。

在方式 3 中,利用开关的导通与关断,可任意改变加在负载上的直流电压平均值。若产生同样大小的直流平均电压,但如果提高开关的频率,则提高脉动分量的频率,这样就可以用小型的滤波器得到平滑的直流电压波形。

在方式 4 中,靠适当切换开关 $S_1 \sim S_4$ 的开关动作的时间,就可由直流电源产生正或负的直流电压,或者任意频率及大小的交流电压。

电力电子学是将该表中所示的开关置换成半导体开关,再进行功率变换和控制。

表 1.2 功率变换和控制的基本电路和动作

方式	电路结构	输出(负载)电压波形
1		 <p>(利用 $S_1 \sim S_4$ 的导通与关断的组合,可由交流形成直流。同时,利用控制开关导通的时间,可控制直流电压大小)。</p>