



普通高等教育“十二五”规划教材

现代电力电子技术

主编 周京华 李正熙



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

014011554

TM1-43
87

要 目 容 内



普通高等教育“十二五”规划教材

现代电力电子技术

主编 周京华 李正熙



TM1-43
87



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



北航

C1698629

014011224

内 容 提 要

本书为普通高等工科大学“电力电子技术”课程教学用书。本书重在介绍PWM电力电子变换器的基本原理、构成及应用,共分7章,内容包括概述、电力电子器件、交流—直流变换器、直流—直流变换器、直流—交流变换器、交流—交流变换器、软开关技术。最后,为配合本书中的例题及实际应用,以附录的方式介绍了Matlab仿真的基础知识及其在电力电子技术中的应用、电力电子器件的触发与驱动。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化专业、自动化专业及其他相关专业的高年级本科生教材,也可供电气工程专业的研究生、技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代电力电子技术 / 周京华, 李正熙主编. — 北京
: 中国水利水电出版社, 2013. 7
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5170-1169-9

I. ①现… II. ①周… ②李… III. ①电力电子技术
—高等学校—教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第246363号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 现代电力电子技术
作 者	主编 周京华 李正熙
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京时代澄宇科技有限公司
刷 印	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16开本 18印张 449千字
版 次	2013年7月第1版 2013年7月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	36.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

自 20 世纪中期出现了大功率二极管及可控的晶闸管之后, 电力电子技术就呈现出了蓬勃发展之势, 不仅在国民经济的各个领域得到了成功的应用, 而且也成为高等学校电气工程及其自动化、自动化或相关专业的一门重要专业基础课。特别是在全控型器件出现并采用了 PWM 控制技术之后, 不仅使电力电子技术进入了超音频时代, 而且还可以使现代控制技术应用到电力电子技术, 进而产生了一系列性能卓越的新型电力变换器。这些新型电力电子变换器的出现及其控制方式的新发展和分析设计手段的新变化, 都大大地丰富了电力电子教学的内容。面对如上形势, 本科的电力电子技术及相关课程内容有必要进行重新梳理和改革。

鉴于电力电子技术内容的大量增加, 及其相关高级分析理论和方法的产生和引入, 完成电力电子技术的教育应分为本科和研究生教育两个阶段, 故应编写本科用和研究生用两类教材。本科教学应侧重入门和打基础, 其教学内容应以常用电力电子电路与变流技术的基本原理为主, 适当介绍电力电子变换器的建模、控制等高级技术; 研究生教育则应侧重在建模、电力电子技术控制以及电力电子热设计与电磁技术等方面, 以使學生具有一定理论研究能力。因而在本科教材的编写上要掌握如下几点:

(1) 以全控型器件电力电子变换电路为主线, 以 PWM 控制技术为基础, 重点介绍逆变及整流电路, 适当削减晶闸管相控变换器的内容。

(2) 适当将空间矢量调制等较为高级, 但在实际应用中已经或正在使用的技术引入本科教材。

(3) 鉴于计算机仿真技术已成为学习、分析、设计电力电子电路的主要工具, 故该技术应在本科教材中占有一定份量。

基于上述思想, 作者编写了本书。本书共分 7 章及 2 个附录。第 1 章概述, 介绍了电力电子技术的基本概念、基本电路构成、核心器件及 PWM 技术基础。第 2 章电力电子器件, 重点介绍了各种电力电子器件的

结构、原理及应用。第3章交流—直流变换器，重点介绍了二极管整流器、晶闸管可控整流及有源逆变。第4章直流—直流变换器，重点介绍Buck、Boost和Buck/Boost变换器及其在电力拖动系统中的简单应用。与其他教材不同的是，本书在介绍两种基本变换器的同时，介绍了PWM脉冲发生及控制的相应技术。第5章直流—交流变换器，重点介绍了全控器件组成的PWM逆变器及其生成正弦波的原理，其特点是将空间电压矢量的内容贯穿在整个逆变器介绍过程之中。第6章交流—交流变换器，重点介绍了交流开关及其应用，并在后半部分介绍了交—交变频器。第7章软开关技术，重点介绍了软开关的概念及其具体实现电路。最后，为配合本书中的例题以及电力电子变换电路的实际应用，以附录的形式介绍了Matlab电路仿真及电力电子器件的触发与驱动。

本书在内容的阐述方法上，尽可能地规避了以简单罗列方式对现有变换器进行解析的讲述方法，而以应用需求为导向，沿现代PWM变换器及其理论的发展与演化的线索来讲述，潜移默化地引导学生对所学变换器拓扑的演化成因、历史渊源、工作原理以及改进方法进行科学的比较和分析，并通过高强度的仿真实验例题，训练学生在研究和探索中学习的方法，从而使他们在本科阶段就得到一定程度的研究型思维训练，以利于创新能力的提高。

本书由周京华、李正熙共同担任主编。第1章、第2章、第5章、第6章由周京华编写；第3章、第4章由李正熙编写；第7章及附录B由任哲编写；附录A由章小卫编写。全书由周京华统稿。

本书的编写及出版受到北京市电气工程优秀教学团队、2013年北方工业大学校级教改重点项目、2012年北京市优秀人才项目、2009年北京市科技新星计划资助。

在本书编写过程中，参考了国内外有关单位和学者的著作和文章，在此对这些文献的作者表示衷心的感谢。

由于时间仓促，以及作者水平有限，书中难免疏漏和不妥之处，恳请读者批评指正。

编者

2012年12月

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 电力电子技术及其发展	1
1.2 电力电子变换的核心器件和技术	4
1.3 电力电子变换器中的开关与储能元件	8
习题	11
第 2 章 电力电子器件	13
2.1 概述	13
2.2 电力二极管	18
2.3 晶闸管及其派生器件	21
2.4 电力晶体管和场效应管	29
2.5 绝缘栅双极型晶体管	32
2.6 集成门极换流晶闸管	35
2.7 功率集成电路	36
2.8 电力电子器件的触发、驱动及保护	37
习题	40
第 3 章 交流—直流变换器	41
3.1 二极管整流器	41
3.2 单相晶闸管整流器	63
3.3 三相晶闸管整流器	72
3.4 大功率晶闸管整流器	81
3.5 晶闸管有源逆变器	86
习题	91
第 4 章 直流—直流变换器	94
4.1 概述	94
4.2 基本 DC—DC 变换器	96
4.3 PWM 脉冲的产生	113
4.4 基本 DC—DC 变换器的组合应用	115

4.5	变压器隔离型 DC—DC 变换器	128
	习题	135
第 5 章	直流—交流变换器	137
5.1	概述	137
5.2	电压型方波逆变器	138
5.3	电压型正弦波逆变器	154
5.4	电压型多电平逆变器	171
5.5	电压型 PWM 整流器	176
5.6	电压型变换器控制技术	181
5.7	电流型变换器	187
	习题	189
第 6 章	交流—交流变换器	192
6.1	交流电子开关及其应用	192
6.2	交交变频器	200
	习题	204
第 7 章	软开关技术	205
7.1	软开关的概念	205
7.2	准谐振软开关	206
7.3	零开关 PWM 软开关电路	209
7.4	零转换 PWM 软开关电路	210
7.5	移相全桥型零电压开关 PWM 电路	211
	习题	213
附录 A	Matlab/Simulink 电路仿真	214
附录 B	电力电子器件的触发与驱动	265
	参考文献	281

第 1 章 概 述

电力电子技术就是使用电力电子器件对电能进行变换和控制的技术，如何构建和利用电力电子电路对电能形式及量级进行转换和控制是它的主要研究内容。经多年发展，电力电子技术理论已日臻完善。

本章主要内容：

- (1) 电力电子技术及其发展。
- (2) 电力电子技术中的核心器件及技术。

1.1 电力电子技术及其发展

对于用户来说，发电装置、电网、电池或其他供电系统提供的电能都是原始电能，其形式（波形）、等级（电压或电流的数量级）以及供电质量常常不能满足用户的实际需求。因此，通常希望能在电源和用电设备之间采用一些装置来实现如下功能：

- (1) 对原始电能进行再加工，在形式和量级上对它进行变换和处理，使之达到用户要求。
- (2) 防止电源受到用户负载所产生的干扰而影响公共电源的供电质量。

由于电力电子器件发展水平的限制，在很长一个历史时期内，除了小功率信息处理系统，电能加工、处理与变换主要依靠由旋转电机组成的各种变流机组。

图 1-1 是一种交流—直流变换机组。它是把交流电变换成直流电的主要手段。这种机组由同轴连接的两台电机组成，一台是交流电动机，另一台是直流发电机。当需要把交流电变换成直流电时，将交流电输入交流电动机使之旋转并带动同轴的直流发电机旋转以产生直流电。能量的传递与转换过程为：交流电能→机械能→直流电能。

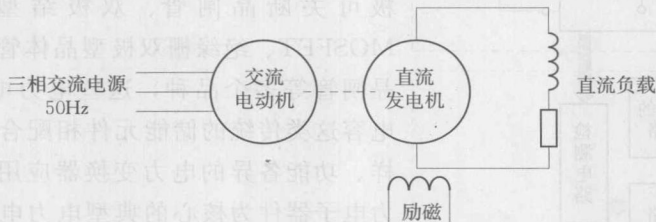


图 1-1 交流—直流变换机组

图 1-2 是一种交流—交流变频机组，它的功能是将固定频率的交流电变换成频率可调的交流电。从用电要求来看，接收原始交流电的是交流电动机，向用电负载提供交流电的是交流发电机，但它们之间并不能同轴连接，因为用户需求的是频率可调的交流电，即

交流发电机的转速应该可调。但在早期，可连续调节转速的电机只有直流电动机，于是交流发电机必须由直流电动机来拖动，而直流电动机必须再由上面介绍的交流—直流变换机组供电。最终使得这种机组必须由交流电动机、直流发电机、直流电动机和交流发电机四台电机组成。其中，交流电动机与直流发电机同轴连接组成了交流—直流变换机组，负责向后面的直流—交流机组供电；直流—交流机组在通过对直流电动机转速的调节对它所拖带的交流发电机产生的交流电频率进行控制。在这种机组中，能量的传递与转换过程为：交流电能→机械能→直流电能→机械能→频率可调的交流电能。

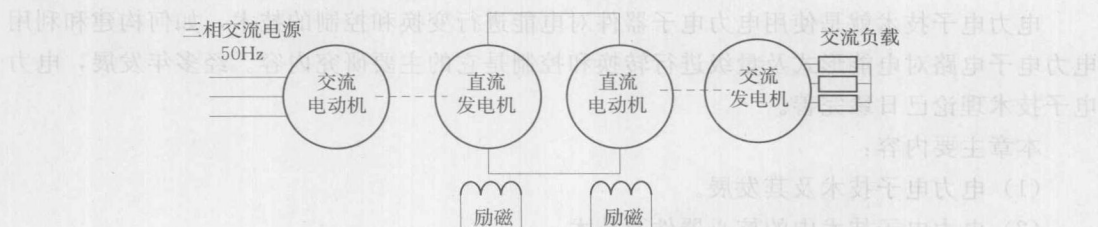


图 1-2 交流—交流变频机组

可见，上述变流机组实现电能形式的转换时，中间至少需要一次电能→机械能→电能的转换，因此，不仅转换效率极低，而且还存在机组耗费金属材料多、重量重、体积大、环节多、维护工作量困难、噪声大等诸多缺点。

在依赖变流机组的年代，不仅在电能形式的转换上困难重重，而且在电压电流的量级变换方面手段也不多。交流电的量级转换还可以依靠磁耦合的变压器，而对大功率直流电压电流量级的变换则几乎毫无办法。尽管后来发明的硒整流器、水银整流器等一些电力变换装置使局面有了一些改观，但仍然没有彻底摆脱窘境。直到 20 世纪 50 年代，电力电子工作者才终于看到了希望。1957 年，第一种可控电力电子器件——晶闸管诞生，这种以半导体为材料的固体电子器件一出现，立即就替代了旧有的水银整流器这些笨重的电力变换装置并产生了巨大的经济效益。从此，晶闸管的诞生作为一个划时代事件被记入了电力科学技术发展史册，标志着电力变换及控制技术从此进入了半导体电力电子技术时代。

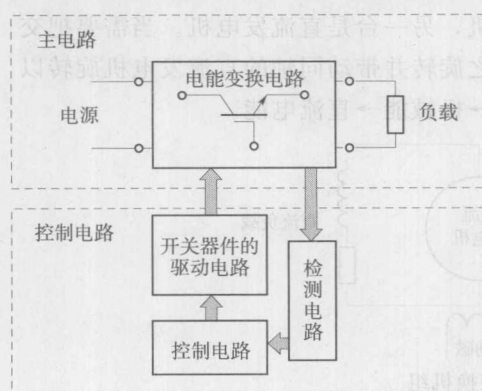


图 1-3 电力电子变换系统构成

以晶闸管为开端，近半个多世纪以来，多种性能各异的电力电子器件相继诞生。目前，电力电子开关器件已经发展到有二极管、晶闸管、门极可关断晶闸管、双极结型晶体管、电力 MOSFET、绝缘栅双极型晶体管、集成门极换流晶闸管等多个品种，这些电力电子器件与电感、电容这类传统的储能元件相配合，形成了各种各样、功能各异的电力变换器应用电路。一个以电力电子器件为核心的典型电力电子变换系统示意图如图 1-3 所示。

由图 1-3 可见，电力电子变换电路有主电路和控制电路之分。主电路处于电源和负载之间起到电能的传递和变换作用，主要由电力电子开关器件和电感、电容等储能元件组成；控制电路的主要任务则是根据控制目的计算开关的控制时

刻并驱动电力电子器件进行相应的动作，协助主电路完成变换器的任务。控制电路的主要任务为信息处理，属于信息电子电路。

从电力电子技术的发展历程上看，早期组成电力电子变换器的核心器件主要为电力二极管、晶闸管及其派生器件，其主要技术为基于交流正弦波形的相位控制技术，简称相控技术。典型的变换器为相控整流器与有源相控逆变器。随着技术的发展，新器件的出现，电力电子变换器的核心器件也变得多种多样，特别是 MOSFET、IGBT、GTO 这类导通和关断均可控的全控型器件的出现，以及 PWM 控制方法的应用，都给电力电子技术带来了新的活力和生机。

迄今为止，电力电子技术已迅速成长为了一个涉及到多个学科的综合性的技术。1974 年美国学者 W. Newell 首次提出电力电子技术的定义，即电力电子技术是由电子学、电力学及控制学组成的边缘学科，并用图 1-4 (a) 所示的“倒三角”图形表示了电力电子技术与其他相关学科之间的联系。为了使电力电子技术的定义更加具体化，美国著名学者 B. K. Bose 教授于 1980 年对 W. Newell 的定义进行了拓展，提出了图 1-4 (b) 所示的电力电子技术新定义。随着电力电子技术的快速发展，电力电子技术的定义也在不断地拓展、延伸，至今国际上还没有一个关于电力电子技术的公认的或权威性的定义。因此这两个图也仅为读者学习电力电子技术提供一个参考。

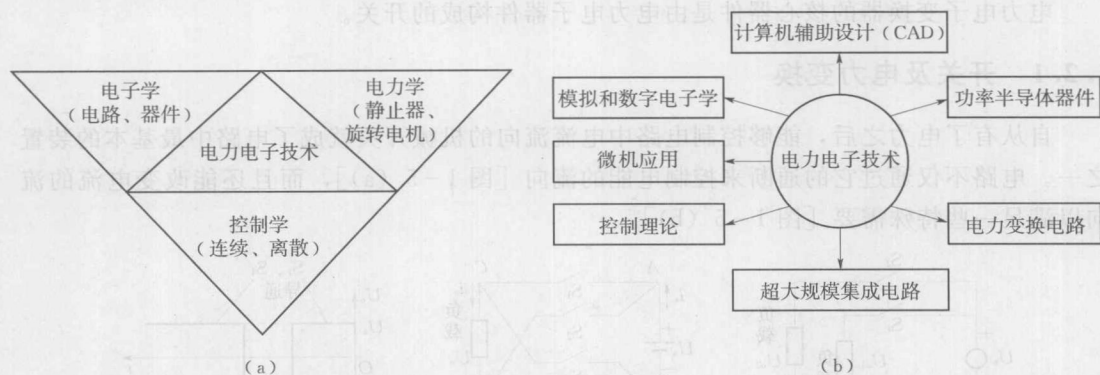


图 1-4 电力电子技术的定义

(a) W. Newell 对电力电子技术的定义；(b) B. K. Bose 对电力电子技术的定义

目前电力电子技术主要在对以下四种基本变换进行研究：

(1) 交流—直流 (AC—DC) 变换。交流—直流的变换一般称为整流，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。

(2) 直流—交流 (DC—AC) 变换。直流—交流的变换一般称为逆变，是与整流相反的变换，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，其直流—交流的变换称为有源逆变；当逆变器的交流输出与电机等无源负载连接时，其直流—交流的变换称为无源逆变。有源逆变实际上是整流器的逆运行状态，主要用于电能的联网馈电，如交、直流调速系统四象限运行中的电能回馈和太阳能、风能等新能源的并网发电等；无源逆变主要用于交流调速、恒频恒压逆变电源、不间断供电电源以及中频感应加热电源等。

(3) 交流—交流 (AC—AC) 变换。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场合。

(4) 直流—直流 (DC—DC) 变换。直流—直流变换主要完成直流电压幅值的调节与变换, 主要包括升压、降压和升—降压变换等。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。

从电力电子装置所采用的电力电子开关器件来看, 电力电子技术主要研究两种变换器:

(1) 以晶闸管为核心的相控变换器, 其中包括晶闸管整流器、晶闸管逆变器等。

(2) 以 MOSFET 或 IGBT 等全控型开关器件为核心的电力电子变换器, 例如 DC—DC 变换器、逆变器、PWM 整流器等。

1.2 电力电子变换的核心器件和技术

电力电子变换器的核心器件是由电力电子器件构成的开关。

1.2.1 开关及电力变换

自从有了电力之后, 能够控制电路中电流流向的机械开关就成了电路中最基本的装置之一。电路不仅通过它的通断来控制电能的流向 [图 1-5 (a)], 而且还能改变电流的流向以满足一些特殊需要 [图 1-5 (b)]。

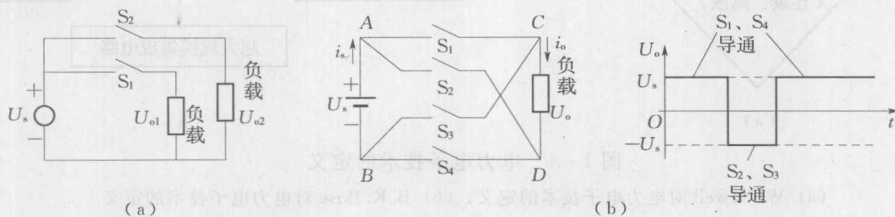


图 1-5 开关的用途

(a) 使用开关进行电能分配; (b) 使用开关对负载电流进行换向

例如, 在图 1-5 (b) 所示的桥式开关电路中, 共有 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 四个开关, 电源 U_s 接至桥式开关电路的输入端 A、B, 负载接至桥式开关电路的输出端 C、D, 这种电路可以借助开关的有序导通和关断实现如下两个功能:

(1) S_1 、 S_4 导通, S_2 、 S_3 关断时, 电源正端 A 经开关 S_1 接至负载 C 端, 而电源负端 B 经 S_4 接至负载负端 D, 负载电流 i_o 从 C 流向 D, 为正方向。

(2) S_1 、 S_4 关断, S_2 、 S_3 导通时, 电源正端 A 经开关 S_2 接至负载 D 端, 而电源负端 B 经 S_3 接至负载正端 C, 负载电流 i_o 从 D 流向 C, 为负方向。

对负载和电源之间的开关通路经过设计还可以实现更为复杂的电能变换。例如, 图 1-6 在电源和负载之间用了 6 个开关, 从而形成了一个两端输入、三端输出的变换器, 它

可以把单方向流通的直流电变换成流动方向周期性交变的三相交流电。其工作原理为：在每个周期的 360° 期间，电路每个纵向支路上的上下两个开关各自导通 180° ，A、B、C 三个支路的开关动作互相错开 120° ，两个相邻序号开关导通的间隔为 60° ，于是这个电路便可将输入的直流电变换成如图 1-6 (b) 所示的三相交流电。

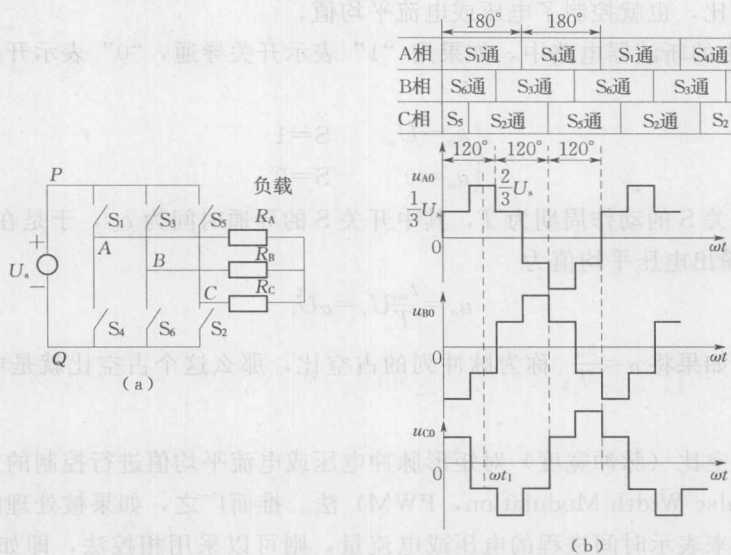


图 1-6 由 6 个开关组成的直—交转换电路

(a) 电路图；(b) 波形图

以上两个例子说明，在电源和负载之间采用设计合理的开关阵列完全可以实现对原始电能的变换，只不过需要高频开关。在电力电子开关器件出现之后，以这种器件为核心的电力电子变换器得到广泛应用。

1.2.2 脉冲宽度调制与相位控制

开关的最简单应用便是斩波器。

因开关只有导通和关断两种状态，所以从对原始电能进行变换的角度看，单一的一个开关只能对电压或电流的波形进行变换。即在开关导通时使输出与输入相等，关断时使输出等于零，从而使一个输入电压或输入电流的连续波形出现缺口。如图 1-7 所示，一个直流电压在通过一个高速导通关断的开关变换之后，其连续平直的电压波形会变为一个幅值不变，但出现了一系列缺口的矩形脉冲列，这种开关电路也被称为斩波器。

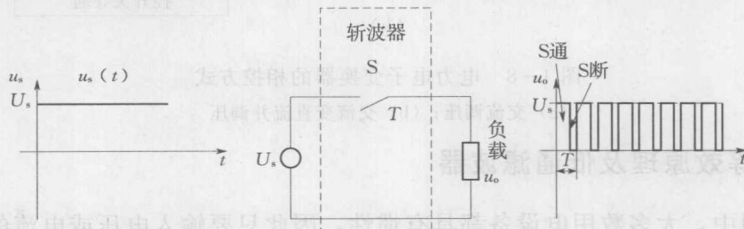


图 1-7 斩波器工作原理

显然，斩波器并不能解决电能变换的全部问题，但开关的斩波功能以及它对输入电压或电流波形的改变，却为电压和电流的波形和量级的转换提供了条件。因为与输入的电压或电流波形相比，斩波器输出的是带有缺口的波形，曲线下的面积变小，这就意味着这个波形的平均值变小，而且其变小的幅度与被斩掉的波形大小相关。换句话说，只要控制了开关的通断时间比，也就控制了电压或电流平均值。

在图 1-7 中的斩波器电路中，如果用“1”表示开关导通，“0”表示开关关断，则电路的输出电压为

$$\begin{cases} u_o = U_s & S = 1 \\ u_o = 0 & S = 0 \end{cases}$$

设斩波器开关 S 的动作周期为 T，其中开关 S 的导通时间为 t_{on} ，于是在一个周期内，图 1-7 电路的输出电压平均值为

$$u_o = \frac{t_{on}}{T} U_s = \alpha U_s$$

该式表明，如果将 $\alpha = \frac{t_{on}}{T}$ 称为脉冲列的占空比，那么这个占空比就是电路对输入电压的变换系数。

通过改变占空比（脉冲宽度）对矩形脉冲电压或电流平均值进行控制的方法，称为脉冲宽度调制（Pulse Width Modulation, PWM）法。推而广之，如果被处理的是正弦波这类可以使用相位来表示时间进程的电压或电流量，则可以采用相控法，即如图 1-8 所示通过控制晶闸管触发角来使输出波形发生变化，进而改变输出波形的平均值。

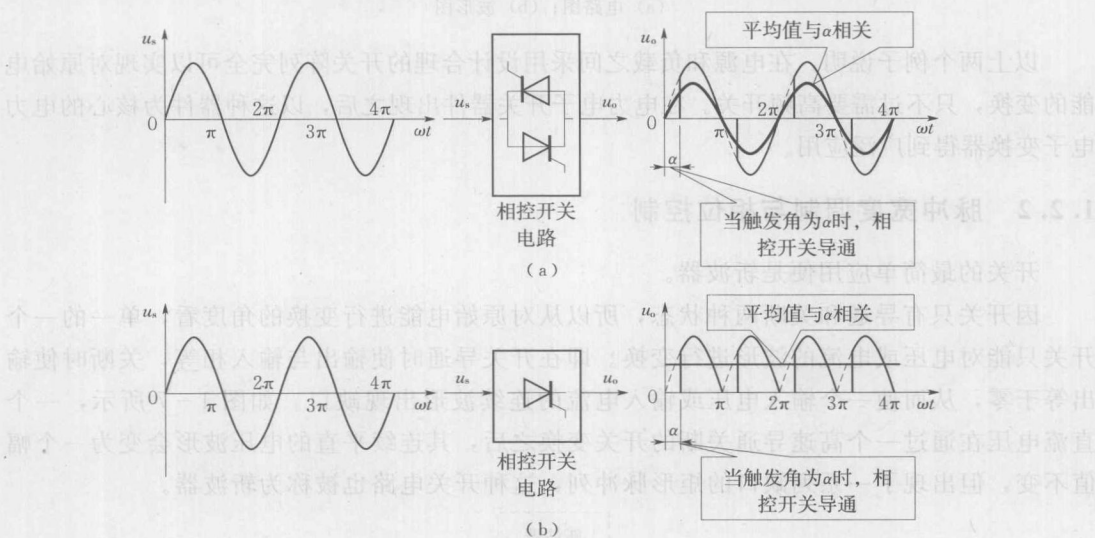


图 1-8 电力电子变换器的相控方式

(a) 交流调压；(b) 交流变直流并调压

1.2.3 面积等效原理及低通滤波器

在实际应用中，大多数用电设备都具有惯性，因此只要输入电压或电流的脉冲波形变化得足够快（即频率高），使得其波形为窄脉冲，那么这个电压或电流在用电设备上所产

生的效能基本取决于窄脉冲波形的面积，而与波形无关。即在惯性较大的用电设备上，波形面积相同而形状不同的两个电压或电流脉冲，在效能上是等效的，可以互换，这就是控制理论中的脉冲面积等效原理，图 1-9 示出了两种说明了面积等效原理的示例。

图 1-9 (a) 使用了等宽但不等高的一系列矩形脉冲等效一个正弦波，因为每个矩形脉冲的面积与同时间段正弦波下面的面积相等。图 1-9 (b) 使用了等高但不等宽的一系列矩形脉冲等效一个正弦波，也是因为每个矩形脉冲的面积与对应时段的正弦波面积相等。由此可以知道，图 1-9 (a) 的每一个矩形脉冲与图 1-9 (b) 的对应矩形也是等效的，因为它们的面积是相等的，即使它们的高度和宽度都不相等。

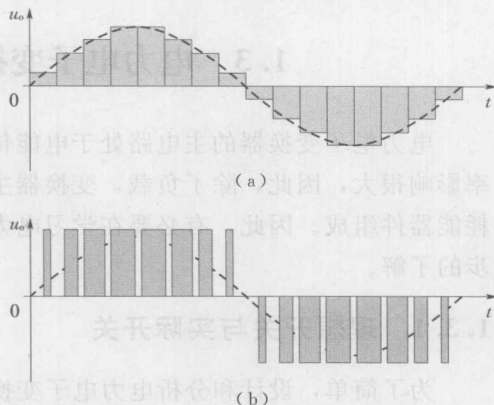


图 1-9 面积等效原理示例

(a) 用不同高度的矩形波（阶梯波）等效正弦波；

(b) 用不同宽度的等高矩形波等效正弦波

面积等效原理是 PWM 控制技术的重要理论基础，即冲量相等而形状不同的窄脉冲加在具有惯性的环节上时，其效果基本相同。冲量即指窄脉冲的面积。这里所说的效果基本相同，是指环节的输出响应波形基本相同。如果把各输出波形用傅里叶变换分析，则其低频段非常接近，仅在高频段略有差异。一个一阶低通滤波器就是一个惯性环节。

常用的低通滤波器为一阶滤波器，其微分方程为

$$T \frac{dy}{dt} + y = x$$

两种由基本电气元件构成的一阶低通滤波器如图 1-10 所示，它们的微分方程分别为

$$\frac{L}{R} \frac{di_o}{dt} + i_o = \frac{u_i}{R} \quad \text{和} \quad RC \frac{du_o}{dt} + u_o = u_i$$

其传递函数为

$$\frac{I_o(s)}{I_i(s)} = \frac{1}{\frac{L}{R}s + 1} \quad \text{和} \quad \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{RCs + 1}$$

因 RL 低通滤波器中代表负载的电阻 R 与电源有公共端，符合负载的一般接法，故电力电子变换器通常选用 RL 低通滤波器。也可以再在负载 R 两端并联一个电容构成如图 1-11 所示，构成低通滤波效果更好的 RLC 二阶低通滤波器。

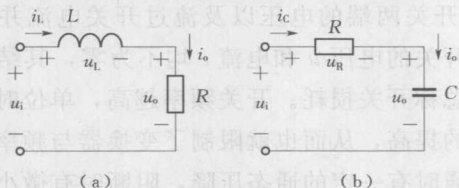


图 1-10 两种由基本电路元件组成的一阶低通滤波器

(a) RL 串联组成的一阶低通滤波器；(b) RC 串联组成的一阶低通滤波器

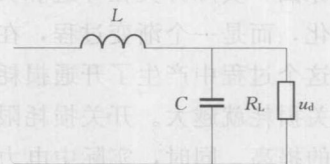


图 1-11 RLC 二阶低通滤波器

综上所述, 无论 PWM 控制还是相位控制, 开关控制的结果就是使得输入电压或电流波形变成了窄脉冲, 经低通滤波器滤除了高频分量后, 负载得到的就是与窄脉冲面积相关的平均值, 这就是开关也可以控制电压和电流量级的原理。

1.3 电力电子变换器中的开关与储能元件

电力电子变换器的主电路处于电能传输通道中对原始电能实施变换, 对能量的传输效率影响很大, 因此, 除了负载, 变换器主电路的其他部件都必须由开关、电容、电感等非耗能器件组成。因此, 有必要在学习电力电子变换器之前, 对这些器件的电气特性做进一步的了解。

1.3.1 理想开关与实际开关

为了简单, 设计和分析电力电子变换器时总是先把变换器中的电力电子器件看成理想开关, 然后再考虑实际开关对电路影响。在理想开关的概念中, 开关的导通和关断动作被认为是瞬间完成的。当开关由关断转为导通时, 开关两端的电压会瞬时变为零, 电流则会立即达到应有的稳态值; 当开关由导通转换为关断时, 开关的电流会立即变为零, 两端电压则立即达到开路电压值。理想开关的特性曲线及开关动作时的动态过程如图 1-12 所示。

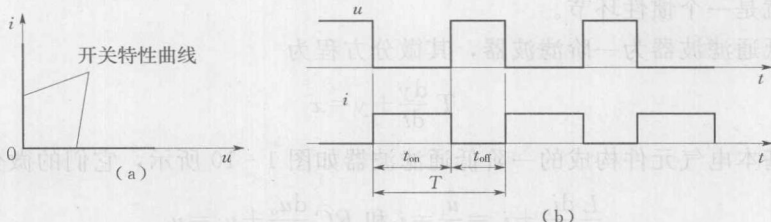


图 1-12 理想开关的开关波形及特性

(a) 理想开关的开关特性; (b) 理想开关的开关波形

但实际开关在由关断转换到导通, 或由导通转换到关断时, 其动作不会瞬间完成, 总是会存在着一个开关过程。当开关动作频率较低时, 这个过程所占用的时间相对较短, 可以忽略这个过程而认为它是理想开关, 但当开关动作频率较高, 开关动作过程时间与开关动作周期可比拟时, 这个动作过程以及在这个过程中开关的电压和电流的表现就不能忽略。图 1-13 (a) 示出了一个实际开关在开关过程中的电压、电流变化曲线。由于各种原因, 实际开关在导通和关断的过程中, 开关两端的电压以及流过开关电流并不瞬时变化, 而是一个渐变过程, 在这个过程中, 开关的电压 u 和电流 i 均不为零, 其结果就是在这个过程中产生了开通损耗和关断损耗, 总称开关损耗。开关频率越高, 单位时间内的开关损耗就越大。开关损耗限制了开关频率的提高, 从而也就限制了变换器与频率相关性能的提高。同时, 实际中电力电子器件在导通时有一定的通态压降, 阻断时有微小的断态漏电流流过, 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。

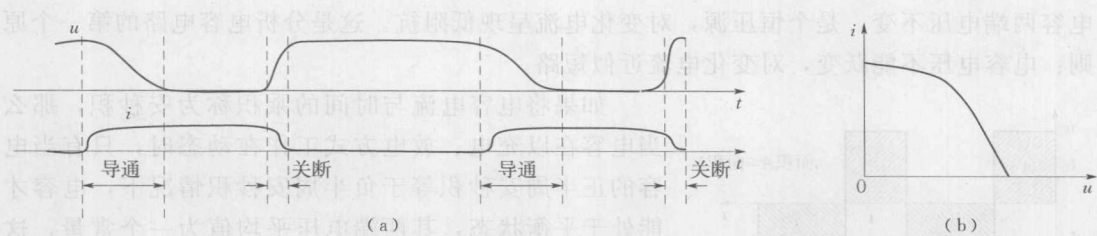


图 1-13 实际开关的开关波形及特性

(a) 实际开关导通和关断过程及电压电流的变化; (b) 实际开关的开关特性

这种未经任何处理而具有开关损耗的开关称为硬开关。

减少开关损耗的方法有两种：一是在设计变换器时，在满足变换功能需要的前提下，优化开关动作，以减少开关频率的方法降低开关损耗；二是在原有的开关电路上增加一些附加电路，并利用这些电路在开关动作时为开关创造一个电压或电流为零的环境，从而实现零损耗，具有这种功能的开关称作软开关。

1.3.2 电容和电感

电容、电感这类储能元件，在电力电子变换器中必不可少。因此，储能元件所具有的一些特性是理解电力电子变换器工作原理和工作过程的基础。

1.3.2.1 电容的电路特点与安秒平衡原则

电容是以容纳电荷方式储存电能的器件，其基本方程为

$$U_C = \frac{Q}{C}$$

式中： C 为电容的容量； U_C 为电容两端电压； Q 为存储于电容的电荷量。

上式表明，同等容量的电容，容纳的电能越大，其两端电压越高。即在容量不变的条件下，电容两端的电压反映了电容储能的大小。

电容的动态方程为

$$i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt} \text{ 或 } u_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_C(t) dt$$

式中： i_C 为电容的电流； u_C 为电容两端的电压。

电容的电压反映电流的积累，而电压的变化率则反映了电容电流的大小。故当电压电流变化时，电压的变化落后于电流的变化，在一个平衡的变化周期内，电容一半时间在充电并吸收电能，另一半时间在放电并释放电能，总功耗为零。在正弦电路中，电容的电压落后于电流 90° 。当电容以恒定电流充电时，其动态方程可写为

$$C \frac{\Delta U_C}{\Delta t} = I_C$$

即

$$C \Delta U_C = I_C \Delta t$$

式中： ΔU_C 为电容电压增量； Δt 为恒流充电时间。

因电容两端电压为充电电流积分的结果，故电容两端的电压不能跃（突）变，除非充电电流无穷大。即当电流不为无穷大，且电容量足够大，或考察时间足够短时，可认为

电容两端电压不变,是个恒压源,对变化电流呈现低阻抗。这是分析电容电路的第一个原则:电容电压不能跃变,对变化电流近似短路。

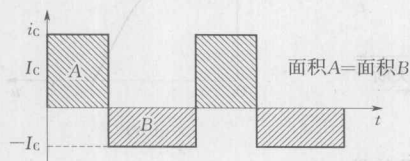


图 1-14 安秒平衡示意图

如果将电容电流与时间的乘积称为安秒积,那么当电容在以充电、放电方式工作在动态时,只有当电容的正半周安秒积等于负半周安秒积情况下,电容才能处于平衡状态,其两端电压平均值为一个常量,这时流经电容的电流在一个交流周期内对时间的积分为零,从电流波形曲线上看就是电流波形面积的代数和

等于零。这是分析电容电路时常使用的第二个原则:安秒平衡原则,如图 1-14 所示。

1.3.2.2 电感的电路特点与伏秒平衡原则

电感是储存磁能的元件,在电感量固定时,流经电感的电流反映了其所存储的磁能的多少。

电感的动态方程为

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_0^t u_L(t) dt \quad \text{或} \quad u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$$

式中: L 为电感量; i_L 为流过电感的电流; u_L 为电感两端的电压。

当电感以恒定电压蓄积能量时,其动态方程可简写为

$$L \frac{\Delta I_L}{\Delta t} = U_L \quad \text{或} \quad L \Delta I_L = U_L \Delta t$$

式中: ΔI_L 为电感电流增量; Δt 为恒压蓄能时间。

因电感电流 i_L 为电感两端电压 u_L 的积分,所以电感电流 i_L 不能跃(突)变,除非电感两端电压 u_L 无穷大。因此在此可得出分析电感电路的第一个原则:当电感两端电压非无穷大,且电感量足够大时,可认为其电流恒定不变,为恒流源,有稳流功能,其阻抗无穷大。这是分析电感电路的第一个原则:电感电流不能跃变,对变化电流近似开路。

如果将电感电压与时间的乘积叫做伏秒积,那么当电感在以存储磁能、释放磁能的方式工作在动态时,只有当电感的正半周伏秒积等于负半周伏秒积情况下,电感才能处于平衡状态,这时其电流的平均值为一个常量。从波形曲线上看,已经进入平衡态的电感电路,电感两端的电压在一个交流周期内对时间的积分为零,即电压波形面积的代数和为零。这是分析电感电路时常用的第二个原则:伏秒平衡原则,如图 1-15 所示。

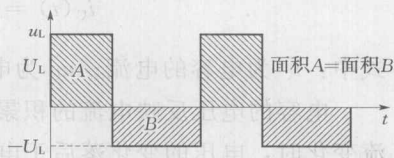


图 1-15 伏秒平衡示意图

1.3.2.3 电容与电感储能性质及其对偶性

电容和电感均是无源储能元件,但所能存储的能量性质不同,电容存储的是电能,电感存储的是磁能。电能称为势能,它相当于力学中的势能或位能,磁能则相当于力学中的动能。由于两种元件所存储的能量具有对偶性,所以也就决定了电容和电感这两种储能元件在其他方面的对偶性,为了清楚,现将它们列于表 1-1。