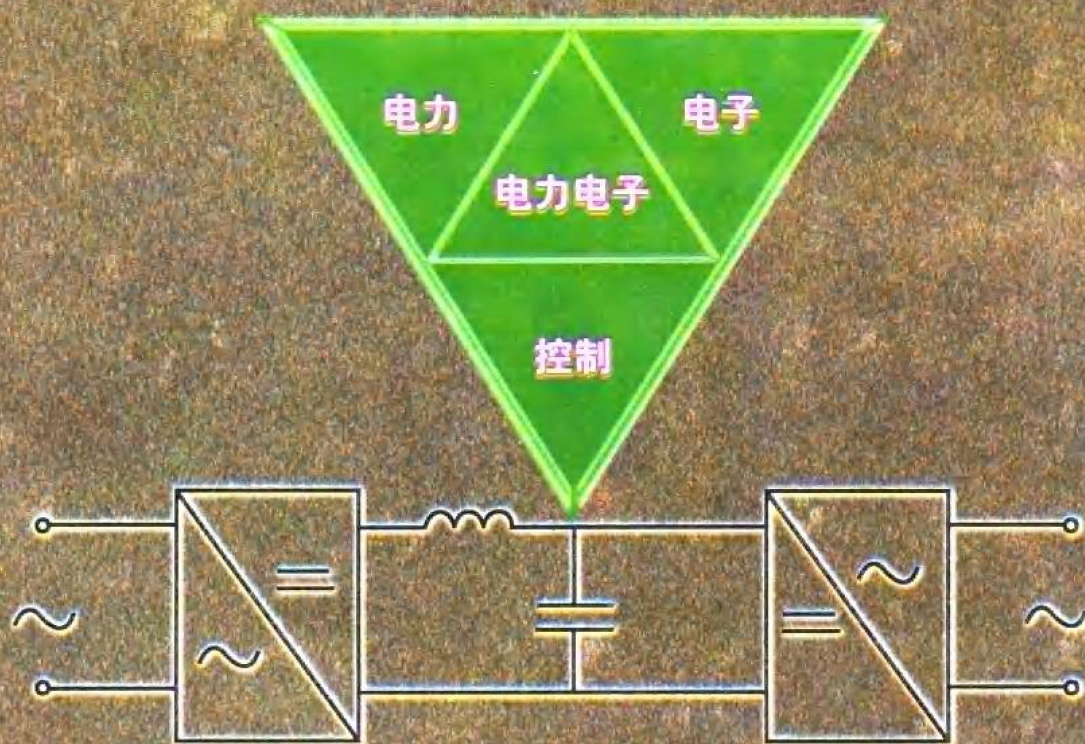


电力电子技术 应用基础

王汝文 张杭



西安交通大学出版社

电力电子技术应用基础

王汝文 张 杭

西安交通大学出版社

内 容 提 要

本教材以应用为目标,介绍了当前常用的不控、半控和全控型电力电子器件的简单工作机理及基本特性,以及由它们组成的各种结构和类型的交流—直流、直流—交流、直流—直流、交流—交流变换电路的工作原理、分析方法及其系统设计的基本过程。

本教材适用于应用电子技术专业及电工类各专业本、专科学生教学,其中一些新型电路拓扑的分析部分还可作为上述各专业研究生教材,也能供从事电力电子技术工作的科研和工程技术人员参考。

(陕)新登字 007 号

电力电子技术应用基础

王汝文 张杭

责任编辑 于茂云

*

西安交通大学出版社出版发行

(西安市咸宁西路 28 号 邮政编码 710049 电话:(029)3268316)

西安市德力彩印厂印装

各地新华书店经销

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 15.625 字数: 381 千字

1998 年 7 月第 1 版 1998 年 7 月第 1 次印刷

印数: 1~2000

ISBN7-5605-1008-6/TM·44 定价: 16.00 元

若发现本社图书有倒页、白页、少页及影响阅读的质量问题,请去当地销售部门调换或与我社发行科联系调换。发行科电话:(029)3268357,3267874

前 言

电力电子技术是一种用大功率半导体开关器件完成能量变换、传输和控制的技术。基于这类器件和这种技术建立的各类电源装置在技术和经济指标两方面都远优越于传统的旋转式变换装置,因而从 70 年代以来取得了惊人的发展,已在各种应用领域内全面取代了旋转变流器。近十年来,随着新型器件的开发与性能的提高,出现了更多高性能的电力变流装置。这不仅促进了电力电子学自身的发展,而且影响着半导体材料技术、大规模集成电路技术、自动控制技术、信息传递与处理技术及电路拓扑技术的进步。总之,电力电子技术是一门有着广阔应用前景,发展方兴未艾的技术。

电力电子技术的一个主要方面是应用各类电力电子开关器件来建立电能变换装置,因此它应包含器件、主电路、控制及系统等内容。本教材将以建立系统为目标,介绍器件性能、主电路拓扑结构和分析方法,以及相应的控制电路设计思想。其中,包括传统的晶闸管及其变换装置,也包括近年来流行的全控器件和由它们构成的斩控式和谐振式变换装置。由于篇幅和学时所限,这部分内容在大学本科和专科教学中可适当删减,但可供研究生和有关科技人员自学时选用。

为便于多层次的学生和科技人员学习参考,本教材加强了电路工作物理过程的分析,删减了对电路方程的数学推导过程,同时增加了各类变流器系统设计的基本方法介绍。全书共分 8 章。第 1 章介绍用电力电子器件实现能量变换的基本物理机理,学科发展的历史、现状和前景及本教材的基本分析方法。第 2 章分不控、半控和全控三部分介绍常用电力电子器件应用特性。第 3 至第 7 章按变换型式分类,依次介绍整流、交流电能控制、直流电能控制、逆变和直接频率变换的基本电路拓扑和控制方法。各章按使用器件和控制方式分为相控和斩控(或自然换流和强迫换流)两部分,并配有一定数量思考题和习题。第 8 章简单介绍电力电子线路计算机仿真的基本概念和常用方法。

本教材第 2 章和第 5 章的第 5.1、5.2、5.4 节及第 8 章的 8.2、8.3.2、8.3.3、8.3.4 等节由张杭编写,其余各章节由王汝文编写并负责全书的统稿。西安理工大学陈治明教授对全书作了详细审阅并提出了有益的建议。西安交通大学王溥仁教授对第 3~7 章,高玉民教授对第 2 章的内容提出了许多宝贵中肯的意见,苏彦民教授在全书定稿前做了仔细的评阅,在此对他们表示诚挚的谢意。

限于编著者对本学科知识的了解深度和水平,书中内容有不妥和谬误之处,请读者批评、指正。

目 录

前 言

第 1 章 绪论

1.1 电力电子学概述	(1)
1.2 电力电子技术的应用范围	(2)
1.3 电力电子技术讨论的内容	(3)
1.4 电力电子技术的现状与展望	(6)
1.5 本教材讨论对象及基本分析方法	(10)

第 2 章 基本的电力电子开关器件

2.1 不控开关器件	(12)
2.2 晶闸管	(15)
2.3 门极可关断晶闸管 GTO	(28)
2.4 双极型功率晶体管 BJT	(37)
2.5 功率场效应晶体管 MOSFET	(46)
2.6 绝缘栅双极型晶体管 IGBT	(52)
2.7 其它全控开关器件	(56)
2.8 全控开关器件的缓冲电路和保护	(57)
2.9 全控开关器件的串、并联	(59)
思考题与习题	(61)

第 3 章 可控整流器

3.1 单相半波整流器主电路	(62)
3.2 双脉波整流器主电路	(72)
3.3 三相桥式整流器主电路	(82)
3.4 相控整流器的电网输入功率因数	(90)
3.5 变压器漏电感的影响	(91)
3.6 移相控制电路	(94)
3.7 斩控式整流器简介	(102)
思考题与习题	(104)

第 4 章 静止式交流电能控制器

4.1 晶闸管移相控制交流调压器	(109)
------------------------	-------

4.2 晶闸管通断式交流功率控制器	(125)
4.3 斩控式交流调压器	(126)
4.4 三种电能控制方式比较	(134)
思考题与习题	(135)
第 5 章 直流—直流变换器	
5.1 A 型降压斩波器	(137)
5.2 B 型斩波器	(144)
5.3 升压斩波器	(146)
5.4 升降压直流—直流变换器	(150)
5.5 库克变换器	(152)
5.6 直流—直流变换器小结	(154)
思考题与习题	(155)
第 6 章 逆变器	
6.1 逆变器及其分类	(157)
6.2 负载性质对逆变开关器件换流的影响	(158)
6.3 晶闸管负载换流逆变器	(160)
6.4 硬开关逆变器	(169)
6.5 谐振式逆变器	(189)
6.6 几种逆变器性能的比较	(197)
思考题与习题	(198)
第 7 章 变频器	
7.1 相控式交流—交流变频电路	(201)
7.2 斩控式交流—交流变频器	(207)
7.3 间接变频器与直接变频器性能的比较	(214)
思考题与习题	(215)
第 8 章 电力电子线路的计算机仿真分析基础	
8.1 概述	(216)
8.2 仿真分析中常用元件的模型	(220)
8.3 电力电子装置系统仿真分析基础	(222)
8.4 PSPICE 在电力电子电路仿真中的应用	(237)
思考题与习题	(242)
参考文献	(243)

第 1 章 绪 论

1.1 电力电子学概述

电力电子学(Power Electronics)是一门新兴的能量处理学科,其精确定义在它发展的各个阶段不完全相同。但就其实质来说,包含了两方面的内容:

- ① 采用功率半导体开关器件对能量进行变换和控制;
- ② 电力、电子和控制三门学科的交叉。图 1.1 为其示意图。

因此现代电力电子学可以比较精确地定义为“运用现代控制技术,以大功率电子开关器件来实现能量变换、传输与控制的应用电子学”。它属于应用电子学在强电范畴的分支。应用电子学的另一分支是信息变换、传输与控制,它关注的是信息变换及不失真地传输,其能量小,要求器件工作于线性运行模式。而电力电子学关注的是高效率地进行能量变换、控制与传输,器件在大功率电路中运行,并且以开关模式操作,二者间有着质的区别。但近年来随着电力电子学中的功率器件性能和控制技术的发展,信息处理技术的某些方面已被用于对电力电子线路进行控制,而新型电力电子器件也开始用于信号的功率放大和传输,二者间泾渭分明的状态已发生变化。

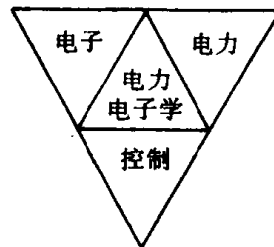


图 1.1 电力电子学的定义图

目前,电力电子学所涉及的能量处理形式主要有两种,即光能—电能变换和电能—电能变换与控制。

光能—电能变换的代表器件是太阳能电池(Solar Cells)。图 1.2 示出了典型的太阳能电池应用系统结构。太阳能电池一般由许多基本单元串并联组成。从本质上看,每个基本单元就是一个 PN 结。由于半导体材料的光伏特性,这些 PN 结在阳光照射下,只要入射光子能量大于半导体能带中禁带的宽度,电子便由满带被激发到导带,在满带中留下空穴,形成电子空穴对。在内电场作用下,电子流向 N 区,空穴流向 P 区,从而在 PN 结两端形成电位差,其 P 为正,N 为负,大小等于一个 PN 结的正向电压。把它们按所需电压的高低和电流的大小串并起来,用电极与外部用电器连接,将有流过负载的电流。现在太阳能电池已被应用于某些大功率通讯装置,以及汽车、泵类、航天设备的电源等。

实际上,一般所指的电力电子能量变换基本上只涉及第二种能量处理,即电能的二次变换及控制。常见的电能—电能变换有:

- 能量变换 { 交流—直流变换(AC—DC conversion),即整流;
- { 直流—交流变换(DC—AC conversion),又叫逆变;
- { 交流—交流变换(AC—AC conversion),或称频率变换、周波变换。

能量控制

直流—直流变换(DC—DC conversion),传统上称为直流斩波器,也叫作直流电压控制器;
 交流电压控制(AC voltage Regulation);
 交、直流开关——功率控制(Power Control)。

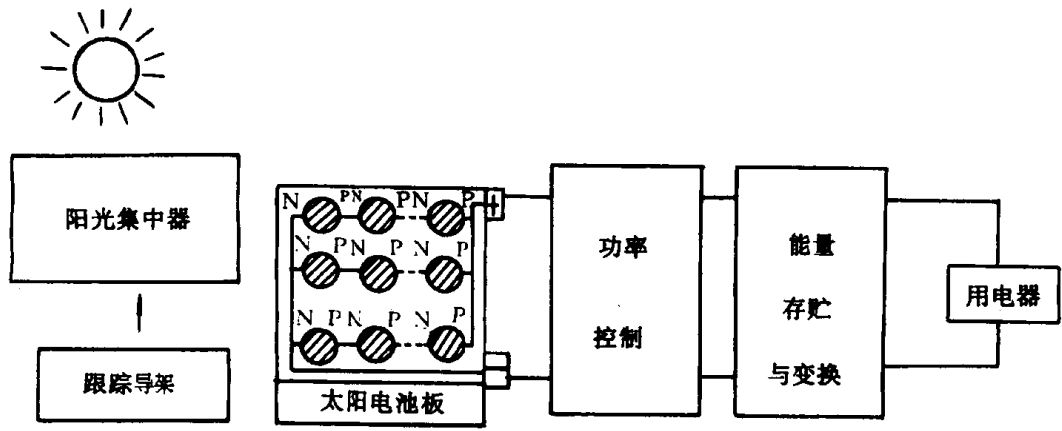


图 1.2 太阳能电池应用系统结构图

为了完成上述变换来满足现代生产和生活的不同需求,70 年代前基本采用旋转变换装置即电动机-发电机系统。电力电子变换装置则是通过电力电子开关器件的不同连接和控制方式实现的,与旋转变换器相比,它没有旋转振动部分,因此常被称作静止变换器。它具有更高的转换效率;较低的生产成本和维护费用;较小的设备体积和更低的控制功率;此外可以节省大量旋转变换器所需要的钢、硅钢、铜等金属材料。因此,电力电子装置几乎已全面地取代了旋转变流器,在现代社会各领域起着极其重要的作用,而且还将起更大的作用。

在工程应用领域中,电力电子学通常称为电力电子技术。

1.2 电力电子技术的应用范围

根据电力电子能量变换的不同形式及电能控制的功能,电力电子装置被广泛地应用于现代生产、生活及科学研究各领域。表 1.1 示出了它们的主要应用及相应的变换形式。

表 1.1 电力电子装置的应用领域及相应的变换形式

应用领域		变换形式
电气传动控制	直流调速	整流、直流电压控制
	交流调速	逆变、变频、交流电压控制
冶金	熔炼	逆变、整流
	钢液精炼、连续浇铸的电磁搅拌	逆变、变频
金属材料热处理	中、高频感应加热供电电源	逆变
	电阻加热炉供电电源	交流电压控制、功率控制

续表 1.1

应用领域		变换形式
化工	电解电源	整流
交通	电力机车、城市电车	整流、直流电压控制
	汽车电池充电	整流、太阳能电池
电力系统	高压直流输电	整流、逆变
	无功补偿	逆变、交流开关
科学实验	空间站供电系统	整流 + 高频逆变
	激光光源	整流 + 高频逆变
	无停电电源(UPS)	整流、逆变
照明	高稳定度萤光灯电源	整流、高频逆变
	大功率高压气体放电灯	整流、高频逆变
	节能、调光	交流电压控制
其它	高频焊机电源	整流 + 高频逆变
	开关电源	整流 + 直流电压控制
		斩控式交流电压控制 + 整流
交、直流开关		

1.3 电力电子技术讨论的内容

作为一门学科,电力电子学所讨论的内容应包含器件与系统两大部分,但在工程应用中只需了解如何合理地选择和使用电力电子器件来构成各种变流装置,而无需了解器件制造工艺及载流子运动物理过程的细节。因此,电力电子技术要探讨的主要内容侧重于器件的基本原理、特性和参数选择,以及由它们组成的变换器主电路拓扑、控制及保护措施。下面就有关基本概念作简单说明。

1.3.1 电力电子开关器件

前已述及,用作能量变换与控制的半导体器件与信息处理用器件不同。一方面它必须有高电压、大电流的承受能力,另一方面必须以开关模式运行,因此通常被称作电力电子开关器件。根据器件所用半导体材料、制造工艺、工作机理及器件开通和关断的控制方式,电力电子器件有许多种类和不同的分类方式,一般按照开通、关断控制方式可分为三大类:

(1) 不控型 这是一类两端口器件。一端是阳极,另一端是阴极。其开关操作仅取决于施加于器件阳、阴极间的电压,正导通,负关断,流过其中的电流是单方向的。由于其开通和关断不能按需要控制,故这类器件称为不控型器件,常见的有大功率二极管(Power Diodes),快速恢复二极管(Fast Recovery Diodes)及肖特基二极管(Schottky Diodes)。

(2) 半控型 这类器件是三端口器件,除阳、阴极外,还增加了一个控制门极。它们具有

不控型器件的单向导电性,但开通不仅需在其阳、阴极间施加正向电压,而且还必须在门极和阴极间输入正向控制功率,因此开通可以被控制。然而这类器件一旦开通,就不能再通过门极控制关断,只能从外部改变加在阳、阴极间的电压极性或强制阳极电流变成零,所以把它们称为半控型。这类器件主要指晶闸管(Thyristor)及其派生器件,如双向、逆导晶闸管等。

(3) 全控型 这类器件也是带有控制端的三端口器件,但控制端不仅可控制其开通,而且也能控制其关断,故称全控型。由于无需外部提供关断条件,仅靠自身控制即可关断,所以这类器件常被称作自关断器件。这类器件种类多、工作机理也不尽相同,在现代电力电子技术应用中起着越来越重要的作用,也是电力电子器件发展的主导方向。属于这类的代表器件有门极可关断晶闸管 GTO (Gate Turn Off)、双极型大功率晶体管 BJT(Bipolar Junction Transistor)、功率场效应晶体管 Power MOSFET(Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)和绝缘栅极双极型晶体管 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)等。

1.3.2 电力电子能量控制与变换机理及基本电路模式

从本质上说,采用电力电子开关器件实现电能控制与变换的过程,就是把输入的连续电能按某种规律分割成片段,在负载端按一定规律重新“拼装”或“综合”的过程。如图 1.3(a)所示电路,若控制开关 SW 在整个电源电压 u_s (图 1.3(b))正半周导通,负半周关断,输入的完整正弦波被切成分段的半波,单极性地加于负载上,其输出平均电压为 U_O (图 1.3(c))。若控制开关在正半周接通的时刻,则可得到 1.3(d)所示不完整的正弦半波片段。相对不同的开关接通时刻,输出平均电压不同(图 1.3(d)中 U_{O1} 、 U_{O2} 、 U_{O3})。如果开关在输入电压正、负半周都按给定时刻接通,输出电压仍然是交流,然而仅是正弦波的片段。控制开关接通时刻,就能控制输出电压的大小(图 1.3(e))。

令开关 SW 以远高于输入电源频率的工作频率操作,可以得到另一种分片结果。图 1.4(a)示出开关在整个负半周关断、正半周进行高频开关操作的情况,其输出为直流。

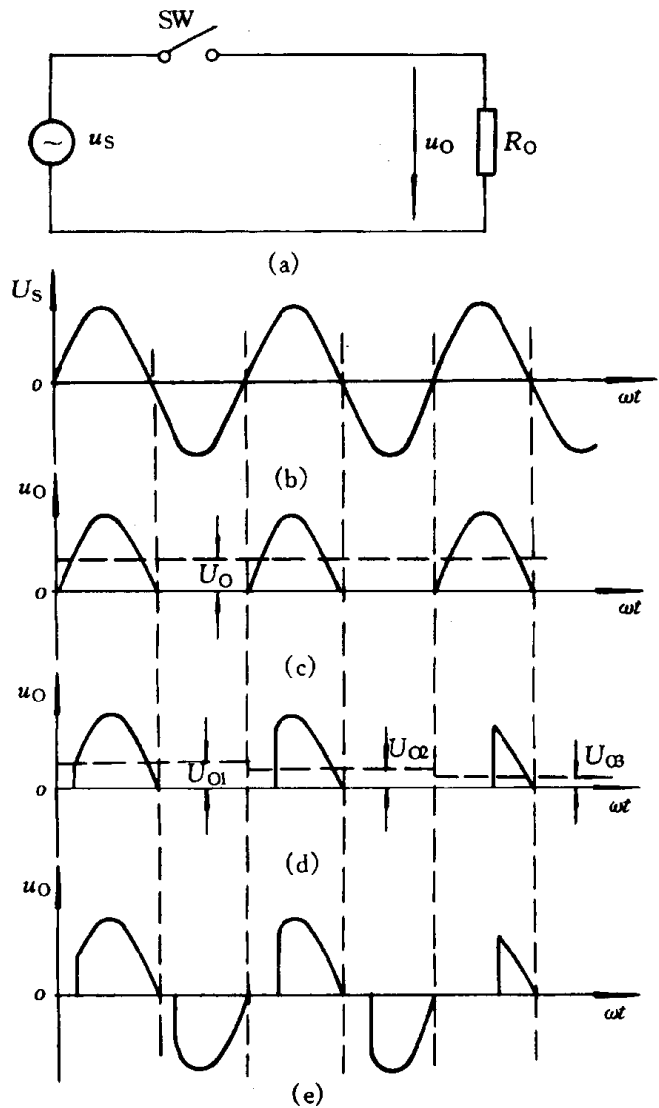


图 1.3 移相控制电力电子能量变换与控制机理

图 1.4(b)SW 在正、负半周都进行高频开关操作,输出仍为交流。这种方式下,输入的连续正弦量被“斩”成许多离散片段,改变每个开关周期内开关导通时间(即占空比),同样可以改变输出电能的大小。

前一种通过控制开关在输入电源不同相位上导通,实现输出电能控制的方法叫移相控制;后一种则称为斩波控制。

根据输入电能的类型及在负载端“拼装”的规则,电力电子装置可分为以下几种基本模式,分别对应着前述能量变换与控制类型。

交流—直流变换器(AC-DC Converter): 把输入的交流电能变成直流电能的装置,即通常所说的整流器(Rectifier)。

直流—交流变换器(DC-AC Converter): 把输入直流电能变为交流电能的装置,又称作逆变器(Inverter)。

频率变换器(Frequency Changer): 将输入交流电源频率变为负载要求的另一种工作频率的装置。

交流电压控制器(AC Voltage Regulator): 按负载要求控制交流电压大小的装置。

直流电压控制器(DC Voltage Regulator): 按负载需要调节输出直流电压大小或改变其极性的装置,又称直流—直流变换器(DC-DC Converter),以前常称为斩波器(Chopper)。

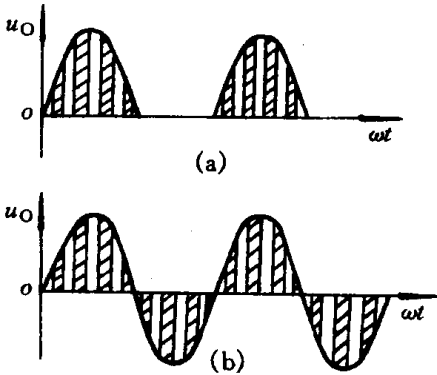


图 1.4 斩波控制能量变换机理

1.3.3 控制方式

电力电子变流电路的控制是通过器件控制端来操纵电路中的开关器件,完成输入电能对负载的接通和开断,从而实现所需的能量控制与形式变换的。因此,电力电子电路控制方式一般都按器件开关信号与控制信号间的关系分类。

相控式:器件开通信号相位(即器件开通时刻相位)受控于控制信号幅度的变化。晶闸管相控整流和交流调压电路均采用这种方式。图 1.5 示出了这种控制方式下,晶闸管门极脉冲控制电压 u_G 相位随控制电压 U_R 大小变化而变化的情况(图中 u_{sy} 称作同步信号)。

频控式:用控制电压的幅值变化来改变器件开关信号的频率,以实现器件开关工作频率的控制。这种控制方式多用于直流—交流变换电路中。

斩控式:器件以远高于输入、输出电压工作频率的开关频率运行,利用控制电压(即调制电

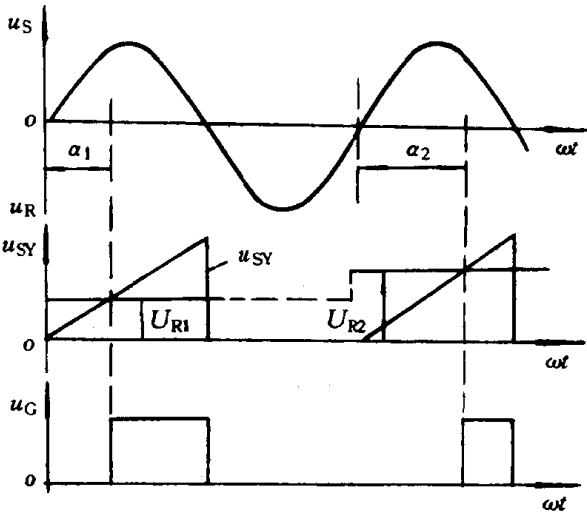


图 1.5 相控方式门极信号与控制信号的关系
 u_{sy} —同步电压; U_R —设定电压; u_G —门极脉冲

压 u_m) 的幅值来改变一个开关周期中器件导通占空比, 从而实现电能的变换与控制 (见图 1.6)。自关断器件问世并投入使用前, 这种控制方式仅用于直流电压控制器。现在采用自关断器件, 通过这种控制方式可完成各种形式的电能变换与控制, 并获得比移相控制、频率控制更好的整体性能。

1.3.4 换流方式

电力电子变流电路工作时, 各开关器件轮流导通向负载传递电源能量, 因此流向负载的电能一定要从一个或一组元件向另一个或另一组元件转移, 这个过程叫做换流或换相。换流过程总是在一个开关被开通的同时关断原来导通着的开关。按照导通元件在下一个元件开通时的关断的方式, 电力电子电路有四种换流方式。

电源换流: 由于电源电压极性改变向导通元件提供反向封锁电压使其关断, 这种换流方式只适用于交流电源供电, 以不控或半控开关器件组成的变流电路, 如整流器等。

负载换流: 由负载电压或电流极性改变向导通元件施加反向封锁电压使其关断, 它用于直流供电、负载可振荡的直流—交流变换电路。

强迫换流: 由外部电路向导通元件强行提供反向封锁电压或从导通元件控制极施加关断信号迫使其关断。这种方式常见于晶闸管直流—直流变换电路和所有斩控式变换电路。

无换相方式: 负载电流因方向改变过零使原来导通元件自行关断。这种方式见于晶闸管交流电压控制器。

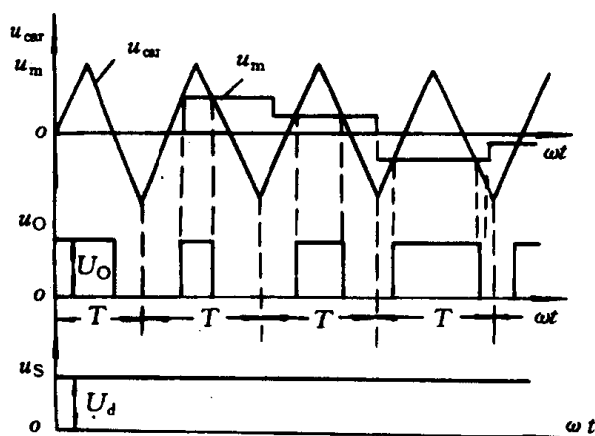


图 1.6 控制信号幅值与占空比的关系

u_m —调制电压;

U_d —电源电压 U_s 的幅值;

u_{car} —载波电压

1.4 电力电子技术的现状与展望

电力电子技术的发展是与器件的开发和性能的改善密切相关的。50 年代末期功率硅二极管的开发与应用, 出现了最早的电力电子整流装置, 被应用于铁道电气和电解电源等领域。60 年代后期开发出了大功率晶闸管, 相应的电力可控整流器、静止式交直流电压控制器、频率变换器、逆变器以及它们的控制电路都得到了开发并逐步趋于完善。70 年代初开始, 各种全控型电力电子开关器件被相继开发出来。近年来, 不仅原有器件性能不断提高, 而且又出现了更多新的器件, 使电力电子技术的应用领域不断扩展, 并推动了半导体材料科学、集成电路技术、微电子技术及控制技术的全面发展。目前, 各发达国家工业中的各个领域几乎都离不开电力电子装置。而作为一门新兴的应用学科, 电力电子技术有着广泛的发展前景。下面就几个方面分别作简单介绍。

1.4.1 器件现状与发展趋势

近年来, 电力电子器件正以迅猛的速度发展。80 年代中期开始, 继 GTO、MOSFET 和

BJT 后,已开发了如 IGBT、MCT、SITH 等多种全控开关器件,不控和半控开关也正向快速、大容量方向发展。可以说在电力电子学发展史上还从未在如此短的时间内开发出如此多的大功率半导体器件。表 1.2 列出的部分器件大致体现了截至 1996 年电力电子器件的发展水平。

表 1.2 部分电力电子器件的主要技术性能

类 别			已达到的主要技术性能			
			电压/电流	最高工作频率/Hz	开关时间/ μ s	通态电阻/ Ω
二极管	普通		5 000V/5 000A	1×10^3	100	0.16×10^{-3}
	快速		3 000V/1 000A	10×10^3	25	1×10^{-3}
	Schottky		100V/300A	20×10^3	0.23	0.1×10^{-3}
晶闸管	普通(SCR)		5 000V/5 000A	1×10^3	200	0.25×10^{-3}
	快速(HSTH)		1 200V/2 000A	10×10^3	10~20	2.16×10^{-3}
	逆导(RCTH)		2 500V/1 000A	5×10^3	40	2.1×10^{-3}
	双向(TRIAC)		1 200V/1 000A	400	200~400	3.57×10^{-3}
	光控(LASCR)		6 000V/1 500A	400	200~400	0.53×10^{-3}
自 关 断 器 件	GTO		6 000V/6 000A	10×10^3	15	2.5×10^{-3}
	静电感应晶闸管(SITH)		4 000V/3 000A	10×10^3	15	2.5×10^{-3}
	功率晶体管(BIT)	单管	400V/250A 630V/50A	20×10^3 25×10^3	9 1.7	4.0×10^{-3} 1.5×10^{-3}
		达林顿	1 200V/800A	10×10^3	30	10×10^{-3}
	静电感应晶体管(SIT)		1 200V/300A	100×10^3	0.55	1.2
	功率场效应晶体管(MOSFET)	单管	500V/50A	100×10^3	0.6	0.4
			60V/200A	$2 000 \times 10^3$	0.1	20×10^{-3}
	绝缘栅晶体管(IGBT)	单件	1 800V/600A	50×10^3	2.3	3.5×10^{-3}
		模块	3 500V/1 200A	50×10^3		
	MOS 控制晶体管(MCT)		1 000V/50A	20×10^3	1.5	1.8×10^{-3}

尽管电力电子器件已取得了如此惊人的成就,但电力电子技术在现代工业文明中所起的越来越重大的作用,要求有更为优良的器件来支持,因此电力电子器件仍处在一个所谓“动态变革”之中。就其发展趋势而言大致有以下几个方面:

- ① 进一步发展易驱动、大功率、高电流密度的全控型开关器件,提高器件开关频率。
- ② 器件模块化、集成化。在现有功率器件模块的基础上,开发功率集成电路,将传感器和诊断、保护甚至控制电路集成在一起,形成一个完整系统,进一步使装置小型轻量,提高运行可靠性。近年来开发出的以 IGBT 为功率开关器件的智能功率模块(IPM)和以 MOSFET 为功

率开关器件的功率集成电路(PIC)已在小功率逆变器、开关电源、日用电器、汽车电子及便携式电器中得到了广泛应用。有关专家预示,这种器件的发展可能使现代电力电子技术进入功率集成电力电子技术的新阶段。

③ 器件材料的更新。当今电力电子器件无例外地以硅作为基础材料,其垄断地位在不远的将来也许仍将维持。但某些新型材料如碳化硅、金刚石等的采用,已预示着新一代器件将出现。新器件类似于 MOSFET,但有高得多的功率和开关频率、低导通压降、耐高温等优良性能。其中,最令人瞩目的材料是金刚石。有关资料表明,与硅器件相比,金刚石 Power MOSFET 器件的功率可提高 10^6 数量级,频率提高 50 倍,导通压降降低一个数量级,最高结温可达 600°C 。

1.4.2 装置现状与展望

如前所述,电力电子器件与应用技术的发展,已极大地影响着现代社会的生产和生活,各种容量、各种应用目的的电力电子装置已在工业、交通及人类生活和工作的许多方面发挥着极大的作用。装置的发展可以概括为:晶闸管装置容量大型化;中、小容量装置采用全控型器件,实现线路新型化、运行高频化;控制系统数字化、微机化、智能化。下面作一简单说明。

1. 使用不同器件的电力电子装置容量、频率范围及应用领域

各类电力电子开关器件的功率等级、工作频率、驱动方式、换流方式不相同,因此用它们构成的装置在容量、工作频率范围及应用领域方面也有较大的区别。图 1.7 示出了 1992 年前后各类装置的大致分布情况。

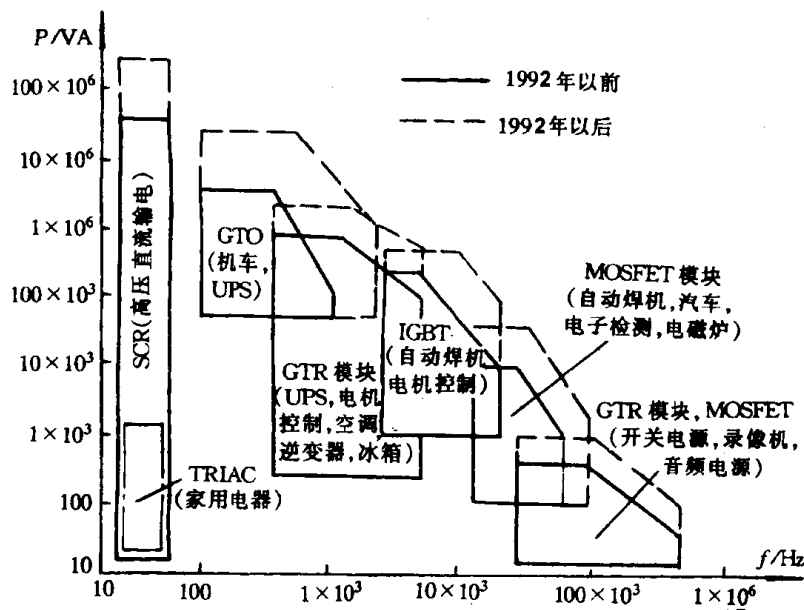


图 1.7 各类电力电子装置分布状态

图中实线所限定的是已达到的水平,虚线则是即将实现的目标。

在所有可控器件中,晶闸管有最大的功率能力,但因关断不能控制,开关频率较低,基本上用在 10kHz 以下频率范围,电源换流及负载换流的大功率和超大功率装置中。由于 GTO 功

率的提高,在几百赫兹至 10kHz,几千千瓦以下的逆变装置中,晶闸管已逐步被 GTO 取代。今后晶闸管装置的发展方向将是超高功率、电源换向的整流装置,如大型直流电弧炉供电和高压直流输电。GTO、BJT、IGBT 器件当前已全面用于中频中、小容量的各类装置。随着这些器件本身性能的改善,其容量及频率范围也在逐步扩大。当今空间技术、计算机技术及各科技领域中要求小功率、小型轻量化的各种电源装置,其器件工作在上百千赫兹以上的频率范围,在这一领域内以 MOSFET 器件装置占主导地位。中等容量的中频(数百赫兹至 50kHz)装置趋向于 GTO 和 IGBT 器件,而大功率 BJT 则因其控制功率大和固有的二次击穿等无法克服的缺陷将逐步被淘汰。静电电压晶体管 SIT、静电感应晶闸管 SITH 和 MOS 控制晶闸管 MCT 等器件的开发,将使高频中等功率的变流装置有较大的发展。

2. 装置主电路拓扑结构及发展

当前,在整流及超低频变频应用中,仍然以晶闸管桥式整流为主要的电路结构(见图1.8)。在大功率三相交流调压器和直流斩波器中,晶闸管也仍占主导地位。中、小功率变频器基本上是整流—逆变的交流—直流—交流变频器,逆变器主电路则随功率大小和负载要求采用单相半桥、全桥及三相桥式结构(见图 1.9)。随着全控型器件功率能力、耐压能力的提高和控制技术的发展,装置主电路拓扑结构也开始发生变化。传统晶闸管可控整流在超高容量系统中仍将独占鳌头,但将趋向于 12、24 或更多相整流,其器件采用串、并联的结构。中小容量装置则

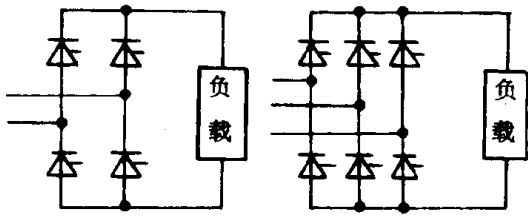


图 1.8 晶闸管整流主电路基本形式

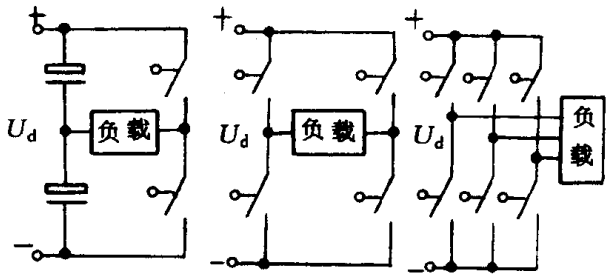


图 1.9 用全控器件的逆变主电路拓扑

趋向不控整流加 DC-DC 变换器(见图 1.10)。中小容量的交流电压控制器中的晶闸管将逐渐由 GTO、IGBT 等器件取代(见图 1.11)。近年来,为了克服传统电力电子装置因输入电流非正弦而造成的谐波干扰,提高电源功率因数,减小装置中无功元件的体积,出现了一些新的

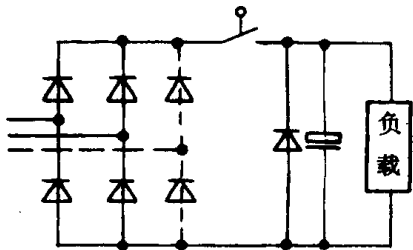


图 1.10 采用不控整流带 DC-DC 变换

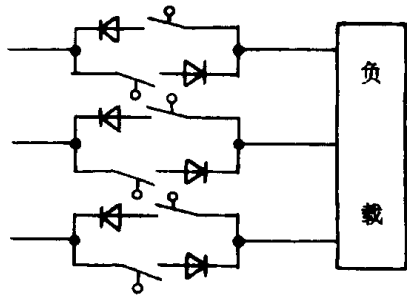


图 1.11 用全控开关的交流调压电路

电路拓扑结构。如图 1.12 所示的矩阵变换器(Matrix Converter),可直接把输入的电能(交流或直流)转变成负载所需的另一种频率(包括直流)的电能,其输出频率既能高于也能低于输入频率;同时又可获得正弦输入和输出,电网输入功率因数可以独立调节;此外,输出能在四象限内平滑过渡,很适于将来的交流传动变频调速。另一种是谐振式变换器(Resonate Converter)(见图 1.13),可以在上百千赫以上频率运行,且体积很小。

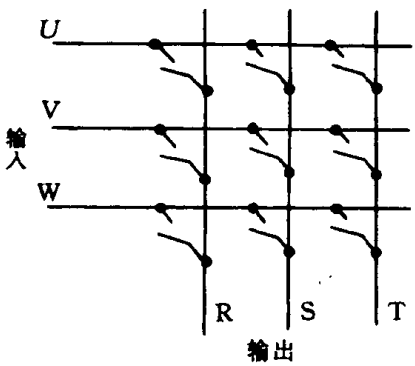


图 1.12 三相-三相矩阵变换器

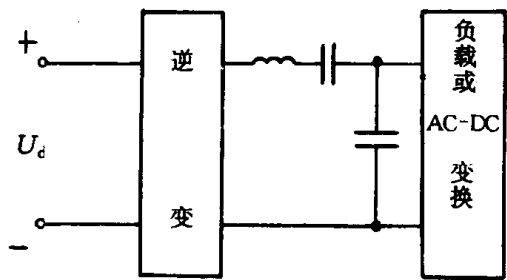


图 1.13 谐振式变换器

1.5 本教材讨论对象及基本分析方法

本教材是为电力电子技术应用而编写的。针对当前情况及发展,主要讨论常用器件的基本工作机理、特性、参数及它们的驱动和保护方法,介绍以晶闸管及全控器件为功率开关的常用电力电子装置主电路拓扑结构、分析方法及设计计算的基本手段和主电路开关元件的选择方法,对于正在发展的新型电路则仅作原理介绍。注意到近年来电力电子线路及系统仿真已得到了全面的开发及应用,本教材将对几种常用的仿真方法从基本原理上作简单介绍。

在分析电力电子主电路时,考虑到器件均为周期性开关工作,因此从电路运行来看,在进入稳态以后,电路各部分波形都将是重复的周期函数。为了对电路进行设计计算,本教材所采用的基本手段如下:

1. 电路各部分的理想化处理

- 电压源:内阻抗为零,电压不受负载影响。
- 电流源:内导纳为零,提供的电流与负载变化无关。
- 电力电子开关器件:开通与关断过程瞬时完成,开通状态压降为零,关断状态电流为零。
- 电阻元件中无电感;电感元件中电阻为零,无分布电容;电容元件中无电感,漏电流为零。

2. 电路暂态分析

由于电力电子电路中功率器件均为开关状态运行,对实际电路来说,每一个开关周期都将是一个暂态过程,而电路的“稳态”就是这些暂态过程的重复。用电路微分方程分析电路暂态过程的目的在于得出不同电路结构、不同负载参数下,开关器件的触发开通时刻,与器件在一个开关周期中导通时间长短的关系,从而判断电路运行时负载电流是否连续,为采用傅里叶分析方法计算稳态运行的电路提供基本参数,即傅里叶分析积分中的积分区间。

3. 傅里叶分析

如上所述,在稳态运行下的电力电子电路中,输入电流、输出电压及电流、开关器件承受的

电压及流过其中的电流等我们感兴趣的物理量,在每个开关周期中其变化过程都是重复的。换句话说,这些物理量可以用周期函数来描述。对周期函数的计算最简单的办法就是傅里叶分析。为了使计算直观,应根据暂态分析中得到的每个周期内器件的导通区间,画出电路中需计算的各物理量波形,直接对波形作傅里叶分析。

因此,电路暂态分析和稳态运行时的傅里叶分析是本教材的基本分析方法。必须指出,暂态分析的目的在于了解电路运行过程,并为傅里叶分析提供必要的参数,它不直接用来进行电路计算。在计算电路时,只需根据暂态分析结果提供的参数,求得傅里叶分析积分区间的长度,对有关物理量的波形用傅里叶分析法求解。