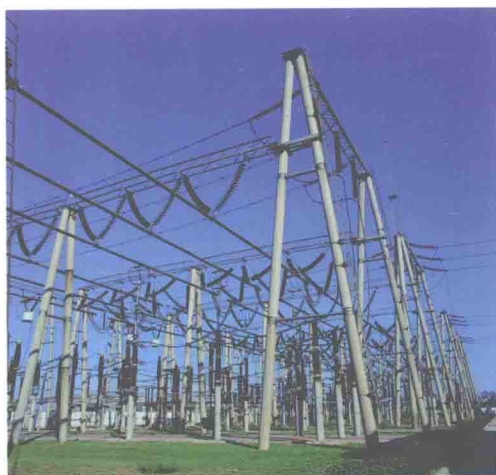




普通高等教育“十三五”规划教材



电力电子变流技术

单海欧 刘晓琴 主编

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

普通高等教育“十三五”规划教材

电力电子变流技术

单海欧 刘晓琴 主编

中国石化出版社

内 容 提 要

《电力电子变流技术》主要包括:晶闸管、单相可控整流与触发电路、三相可控整流与触发电路、有源逆变电路、交流开关与交流调压、新型全控功率电力电子开关器件及其应用、变频器与斩波器、主电路的选择与保护等。全书针对高等院校的教学,精选内容,以定性分析为主,具有理论联系实际与突出工程应用的特点。

本书适用于电气工程及其自动化专业、自动化专业以及工科引导性专业目录中的电气工程与自动化专业及其他相关专业的本科生,也可供相近专业选用或供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子变流技术 / 单海欧, 刘晓琴主编. —北京:
中国石化出版社, 2016. 12
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5114-4349-6

I. ①电… II. ①单… ②刘… III. ①电力电子学-
变流技术-高等学校-教材 IV. ①TM46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 281148 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何
形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市朝阳区吉市口路9号

邮编:100020 电话:(010)59964500

发行部电话:(010)59964526

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京富泰印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 11 印张 258 千字

2017 年 2 月第 1 版 2017 年 2 月第 1 次印刷

定价:28.00 元

前 言

电力电子技术的飞速发展使其已成为电气工程学科中重要的分支。其主要任务是实现电能的变换与控制，是电气工程学科强弱电之间的桥梁。随着新型器件的诞生，电力电子技术的应用领域越来越广，因此，对高等院校的教学内容与方法提出了挑战，为此编写一本适用于工程应用教学要求的教材，是作者的初衷。

本书共分三部分内容：第一部分是电路分析方法，是本课程的核心部分，主要介绍 AC/DC、DC/AC、DC/DC 和 AC/AC 四种电路的分析方法和定量计算方法；第二部分是仿真技术，主要介绍常用的 Matlab 软件在电力电子技术中的应用；第三部分是实践和测试，以巩固学生的理论知识。第 9 章作为选修章节，可根据学校的教学学时进行选讲。同时，本书还介绍了 PWM 控制技术和软开关技术，帮助学生了解电力电子技术的发展过程及发展趋势。

本书由辽宁石油化工大学单海欧、刘晓琴主编，王天施参与编写。编写过程中还参考了许多同行及前辈编写的专著和教材，在此一并表示感谢。

由于作者学识有限，编写仓促，书中难免会有许多疏漏和错误之处，希望使用本书的老师 and 同学批评指正。

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 电力电子技术概述	(1)
1.1.1 电力电子技术与电气工程的关系	(2)
1.1.2 电力电子技术与信息电子技术的关系	(2)
1.1.3 电力电子技术与控制理论的关系	(3)
1.1.4 电能变换及控制方法	(3)
1.2 电力电子技术的发展史	(4)
1.3 电力电子技术的特点	(5)
1.4 电力电子技术的应用	(5)
1.5 电力电子技术的发展趋势	(7)
第2章 可控整流电路	(8)
2.1 单相半波可控整流电路	(8)
2.1.1 单相半波可控整流电路电阻性负载	(8)
2.1.2 单相半波可控整流电路阻感性负载	(9)
2.1.3 单相半波可控整流电路有续流二极管阻感性负载	(10)
2.2 单相桥式全控整流电路	(12)
2.2.1 单相桥式全控整流电路电阻性负载	(12)
2.2.2 单相桥式全控整流电路阻感性负载	(13)
2.2.3 单相桥式全控整流电路有续流二极管阻感性负载	(14)
2.3 单相桥式半控整流电路	(15)
2.3.1 单相桥式半控整流电路电阻性负载	(15)
2.3.2 单相桥式半控整流电路阻感性负载	(16)
2.3.3 单相桥式半控整流电路有续流二极管阻感性负载	(17)
2.4 单相全波可控整流电路	(18)
2.5 三相共阴极半波可控整流电路	(18)
2.5.1 三相共阴极半波可控整流电路电阻性负载	(18)
2.5.2 三相共阴极半波可控整流电路阻感性负载	(20)
2.6 三相共阳极半波可控整流电路	(22)
2.7 三相桥式全控整流电路	(22)
2.7.1 三相桥式全控整流电路电阻性负载	(22)

2.7.2 三相桥式全控整流电路阻感性负载	(24)
2.8 带平衡电抗器的双反星形可控整流电路	(27)
2.9 变压器漏感对整流电路的影响	(30)
习题与测试	(31)
电路仿真	(33)
第3章 逆变电路	(36)
3.1 逆变电路的工作原理	(36)
3.2 整流电路有源逆变状态	(37)
3.2.1 整流与逆变的关系	(37)
3.2.2 电源间能量的流转关系	(37)
3.2.3 有源逆变电路	(38)
3.3 单相电压型逆变电路	(40)
3.3.1 半桥逆变电路电阻性负载	(41)
3.3.2 半桥逆变电路阻感性负载	(41)
3.3.3 固定脉冲全桥逆变电路	(42)
3.3.4 移相脉冲全桥逆变电路	(43)
3.4 三相电压型逆变电路	(43)
3.5 电流型逆变电路	(45)
3.5.1 单相电流型逆变电路	(45)
3.5.2 三相电流型逆变电路	(46)
3.6 PWM 逆变电路	(49)
3.6.1 PWM 逆变电路控制的基本原理	(49)
3.6.2 PWM 逆变电路控制方法	(53)
3.6.3 电压型单相桥式 PWM 逆变电路	(61)
3.6.4 电压型三相桥式 PWM 逆变电路	(62)
3.6.5 PWM 整流电路及其控制方法	(63)
3.7 逆变电路综合实例	(64)
3.7.1 EPS 应急电源	(65)
3.7.2 UPS 不间断电源系统	(66)
3.7.3 太阳能光伏发电系统	(68)
习题与测试	(69)
电路仿真	(71)
第4章 交流变流电路	(73)
4.1 交流调压电路	(73)
4.2 相位控制单相交流调压电路	(74)
4.2.1 相位控制单相交流调压电路电阻性负载	(75)
4.2.2 相位控制单相交流调压电路阻感性负载	(76)

4.3 斩控单相交流调压电路	(79)
4.4 三相交流调压电路	(79)
4.4.1 三相交流调压电路形式	(80)
4.4.2 三相三线调压电路	(80)
4.5 交流调功电路	(82)
4.6 交流电力电子开关	(84)
4.7 变频电路	(84)
4.7.1 变频电路的作用和原理	(85)
4.7.2 单相交-交变频电路	(85)
4.8 负载谐振式变频电路	(90)
4.8.1 并联谐振式变频电路	(90)
4.8.2 串联谐振式变频电路	(91)
4.9 三相变频电路	(93)
习题与测试	(95)
电路仿真	(97)
第5章 直流变换电路	(101)
5.1 直流电压变换电路的工作原理及其分类	(101)
5.1.1 直流电压变换电路的工作原理	(101)
5.1.2 直流电压变换电路的分类	(102)
5.2 基本直流变换电路	(102)
5.2.1 降压变换电路	(102)
5.2.2 升压变换电路	(105)
5.2.3 升-降压变换电路	(108)
习题与测试	(109)
电路仿真	(110)
第6章 应用电路	(112)
6.1 晶闸管直流可逆拖动系统	(112)
6.2 绕线异步电动机的串级调速系统与高压直流输电	(113)
6.2.1 串级调速系统	(114)
6.2.2 高压直流输电	(115)
6.3 变流装置的功率因数	(116)
6.4 自关断电力电子器件驱动保护电路	(118)
6.5 变频器电路	(119)
习题与测试	(123)
第7章 软开关技术	(124)
7.1 软开关的基本概念	(124)
7.2 软开关电路的分类	(125)

7.3 典型软开关电路	(127)
习题与测试	(131)
第8章 组合变流电路	(132)
8.1 间接交流变流电路	(132)
8.1.1 电压型间接交流变流电路	(132)
8.1.2 电流型间接交流变流电路	(133)
8.1.3 交-直-交变频器	(134)
8.1.4 恒压恒频(CVCF)电源	(135)
8.2 间接直流变流电路	(135)
8.2.1 正激电路	(136)
8.2.2 反激电路	(136)
8.2.3 半桥电路	(137)
8.2.4 全桥电路	(137)
8.2.5 推挽电路	(139)
8.2.6 全波整流和全桥整流电路	(140)
8.2.7 开关电源	(140)
习题与测试	(141)
第9章 电力电子器件	(143)
9.1 概述	(143)
9.1.1 电力电子器件的概念和特征	(143)
9.1.2 应用电力电子器件的系统组成	(144)
9.1.3 电力电子器件的分类	(144)
9.2 不可控器件——电力二极管	(144)
9.3 半控型器件——晶闸管	(147)
9.4 典型全控型器件	(151)
9.4.1 门极可关断晶闸管	(152)
9.4.2 电力晶体管	(152)
9.4.3 电力场效应晶体管	(153)
9.4.4 绝缘栅双极晶体管	(155)
9.4.5 其他新型电力电子器件	(157)
9.5 电力电子器件的保护	(160)
9.6 电力电子器件的串联和并联	(161)
习题与测试	(162)
附录	(164)
试题一	(164)
试题二	(166)
参考文献	(168)

第1章 绪 论

本章重点

1. 掌握电力电子技术特点。
2. 了解电力电子技术的发展和应用。

1.1 电力电子技术概述

IEEE(国际电气和电子工程师协会)对电力电子技术(或电力电子学)的表述为:有效地使用电力半导体器件,应用电路和设计理论以及分析开发工具,实现对电能高效变换和控制的一门技术。包括电压、电流、频率和波形等方面的变换。

电子技术包括信息电子技术和电力电子技术两大分支。通常所说的模拟电子技术和数字电子技术属于信息电子技术。电力电子技术是应用于电力领域的电子技术,它是利用电力电子器件对电能进行变换和控制的新兴学科。目前所用的电力电子器件采用半导体制成,故称为电力半导体器件。信息电子技术主要用于信息处理,而电力电子技术则主要用于电力变换。电力电子技术的发展是以电力电子器件为核心,伴随变换技术和控制技术而发展的。

具体地说,电力电子技术就是用电力电子器件对电能进行变换和控制的技术。电力电子器件的制造技术是电力电子技术的基础,变流技术则是电力电子技术的核心。1974年,美国电力电子学学者 W. Newell 提出电力电子学是由电力学、电子学和控制理论三个学科交叉而成的,倒三角形如图 1-1 所示。电力电子技术和电子学电力电子器件的制造技术与用于信息变换的电子器件制造技术的理论基础,都是基于半导体理论是一样的,其大多数工艺也是相同的。电力电子电路和信息电子电路的许多分析方法也是一致的。

“电力电子学”和“电力电子技术”是分别从学术和工程技术两个不同角度来称呼的,其实际内容并没有很大的不同。电子学包括电子器件和电子电路两大分支,分别与电力电子器件和电力电子电路相对应。电力电子器件的制造技术和电子器件制造技术的理论基础是一样的,其大多数工艺也是相同的。特别是现代电力电子器件的制造大都使用集成电路制造工艺或微电子制造技术,许多设备都和微电子器件制造设备通用,这说明二者同根同源。

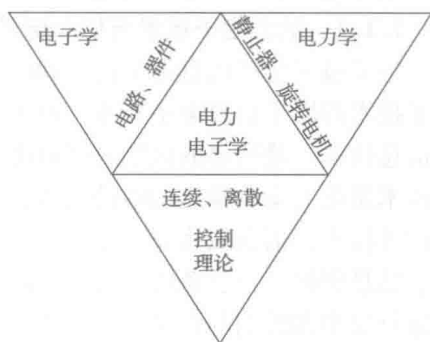


图 1-1 描述电力电子学的倒三角形

电力电子电路和电子电路的许多分析方法也是一致的,只是二者应用目的不同,前者用于电力变换和控制,后者用于信息处理。广义而言,

电子电路中的功率放大和功率输出部分也可算做电力电子电路。此外，电力电子电路广泛用于包括电视机、计算机在内的各种电子装置中，其电源部分都是电力电子电路。在信息电子技术中，半导体器件既可处于放大状态，也可处于开关状态；电力电子技术可以理解为功率强大，可供如电力系统那样大电流、高电压场合应用的电子技术，它与传统的电子技术相比，其特殊之处不仅因为它能够通过大电流和承受高电压，而且要考虑在大功率情况下，器件发热、运行效率的问题。为了解决发热和效率问题，对于大功率的电子电路，器件的运行都采用开关方式。这种开关运行方式就是电力电子器件运行的特点。信息电子技术主要用于信息处理，电力电子技术主要用于电力变换。

电力分为直流和交流两种。从公用电网直接得到的电力是交流，从蓄电池和干电池得到的电力是直流。电力变换通常可分为四大类，即交流变直流、直流变交流、直流变直流和交流变交流。进行电力变换的技术称为变流技术。电力电子技术的两个分支为电力电子器件制造技术和变流技术(电力电子器件的应用技术)。

变流技术包括用电力电子器件构成各种电力变换电路和对这些电路进行控制的技术，以及由这些电路构成电力电子装置和电力电子系统的技术。“变流”不只指交-直流之间的变换，也包括上述的直流变直流和交流变交流的变换。电力电子器件的制造技术是电力电子技术的基础，其理论基础是半导体物理，变流技术是电力技术的核心，其理论基础是电路理论。

1.1.1 电力电子技术与电气工程的关系

电力电子技术广泛用于电气工程中，这就是电力电子学和电力学的主要关系。“电力学”这个术语在我国已不太应用，可用“电工科学”或“电气工程”取代。

各种电力电子装置广泛应用于高压直流输电、静止无功补偿、电力机车牵引、交直流电力传动、电解、励磁、电加热、高性能交直流电源等之中。因此无论是国内还是国外通常都把电力电子技术归属于电气工程学科，电力电子技术是电气工程学科中的一个最为活跃的分支。电力电子技术的不断进步给电气工程的现代化以巨大的推动力，是保持电气工程活力的重要源泉。

在我国，电力电子与电力传动是电气工程下的二级学科。电力电子技术和控制理论广泛用于电力电子技术中，它使电力电子装置和系统的性能不断满足人们日益增长的各种需求。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。另外，控制理论是自动化技术的理论基础，二者密不可分而电力电子装置则是自动化技术的基础元件和重要支撑技术。

1.1.2 电力电子技术与信息电子技术的关系

电子技术包括信息电子技术和电力电子技术两大分支。通常所说的模拟电子技术和数字电子技术都属于信息电子技术。电力电子技术是应用于电力领域的电子技术。电力电子技术和信息技术，最明显的区别是强电电子技术和弱电电子技术的区别。电力属于强电，电力电子技术是电力安全输送的辅助技术，包括电力通讯、电力检测、电力监控、电力安全防护和保护等技术，信息技术属于弱电，一般是指计算机网络信息技术，包括信息安全、信息通讯、信息保护、信息备份、信息应用、黑客技术等。具体地说，就是使用电力电子器件对电能进行变换和控制的技术。所用的电力电子器件均用半导体制成，故也称为电力半导体器件。电力电子技术所变换的“电力”，功率可以大到数百兆瓦甚至数十亿瓦，也可以小到数瓦甚至1W以下。信息电子技术主要用于信息处理，而电力电子技术则主要用于电力变换，如图1-2所示。

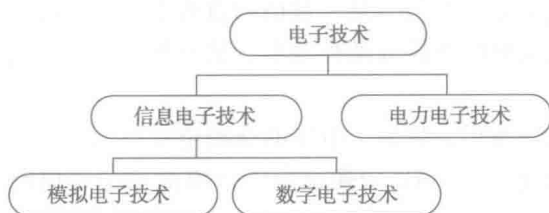


图 1-2 电力电子技术与信息电子技术的关系

电力电子涉及由半导体开关启动装置进行电源的控制与转换领域。半导体整流控制、半导体硅整小型化等的出现,产生一个新的电力电子应用领域。半导体硅整流、汞弧整流器应用于控制电源,但是这样的整流回路只是工业电子的一部分,对于汞弧整流器应用范围而言是有局限的。半导体硅整流的应用涉及很多领域,如汽车、电站、航空电子、高频变频器等。

1.1.3 电力电子技术与控制理论的关系

控制理论广泛用于电力电子技术中,它使电力电子装置和系统的性能不断满足人们日益增长的各种需求。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强有力的纽带。

控制理论和自动化技术密不可分,而电力电子装置则是自动化技术的基础元件和重要支撑技术。

1.1.4 电能变换及控制方法

由于电路中无旋转元、部件,故又称静止式变流电路,以区别于传统的旋转式变流电路(由电动机和发电机组成的变流电路)。两者相比,电力电子电路无磨损、低噪声、高效率,易于实现自动控制和生产,不需建造专门的基地。因而,20世纪60年代以后,已在世界范围内基本上取代了旋转式变流电路。

由于电力电子电路所处理的是大容量工业电能,高效低耗是这类电路的主要目标。为减少电路内耗,电力电子器件工作于开关状态,因此电力电子电路实质上是一种大功率开关电路。为实现对电能的控制,器件的开关状态必须是可控的,因此它又是一种器件工作状态可由微弱信号进行控制的大功率开关电路。

电力电子电路按实现电能变换时电路的功能可分为整流电路(将交流电能转换为直流电能)、逆变电路(将直流电能转换为交流电能)、交流变换电路(包括交流调压电路和变频电路)、直流变换电路(改变直流电能的大小和方向)。按电能转换次数可分为基本变换电路和组合变换电路。前者经一次转换即可实现所需电能的变换,又称直接变换电路;后者经多次转换以实现所需电能的变换,又称间接变换电路。按组成电路的器件可分为不控型变换电路(由不控型器件组成,电路对变换的电能无控制能力)、半控型变换电路(由半控型器件组成,只能在电路具备关断晶闸管的条件下才能正常工作)、全控型变换电路(由自关断器件组成,比半控型电路具有更佳的技术经济指标,但开关容量低于半控型)。电力电子电路按控制方式可分为四种:①相控电路,控制信号的变化表现为控制极脉冲相位的变化;②频控电路,信号的变化表现为控制极脉冲重复频率的变化;③斩控电路,控制信号的变化表现为控制极脉宽的变化;④组合控制电路,采用上述三种控制方式组合而成的控制方式。按电路中开关器件的工作频率可分为开关元件按电网频率(50Hz或60Hz)工作的低频电路和开关元件以远高于电网频率的载波频率工作的高频电路。电能的变换形式有以下四种:

① DC-DC 变换将某一数值的直流电压变换为另一数值直流电压。

② AC-DC 变换将交流电压变换为某一数值的直流电压，也称为正变换，或整流。

③ DC-AC 变换将直流电压变换为某种波形、某一频率和某一电压的交流电，称为逆变换，通常称为逆变。

④ AC-AC 变换将某一波形、频率、电压的交流电变换为另一波形、频率、电压的交流电，实现交-交变压、变频。AC-AC 变换也可以由整流和逆变电路组成 AC-DC-AC 变换，如表 1-1 所示。

表 1-1 电力变换的种类

输入	交流	直流	交流	直流
输出	直流	直流	交流	交流
种类	直流整流	直流斩波	交流交流电力控制	变频、变相逆变

1.2 电力电子技术的发展史

电力电子器件的发展对电力电子技术的发展起着决定性的作用，因此，电力电子技术的发展史是以电力电子器件的发展史为纲的。

一般认为，电力电子技术的诞生是以 1957 年美国通用电气公司研制出第一个晶闸管为标志的。晶闸管出现前的时期可称为电力电子技术的史前期或黎明期。

1904 年出现了电子管，它能在真空中对电子流进行控制，并应用于通信和无线电，从而开启了电子技术用于电力领域的先河。

20 世纪 30 年代到 50 年代，水银整流器广泛用于电化学工业、电气铁道直流变电及轧钢用直流电动机的传动，甚至用于直流输电。这一时期各种整流电路、逆变电路、周波变流电路的理论已经发展成熟并广为应用。在这一时期也应用直流发电机组来变流。

1947 年美国著名的贝尔实验室发明了晶体管，引发了电子技术的一场革命。随后进入晶闸管时代，晶闸管由于其优越的电气性能和控制性能，使之很快就取代了水银整流器和旋转变流机组，并且其应用范围也迅速扩大。电力电子技术的概念和基础就是由于晶闸管及晶闸管变流技术的发展而确立的。晶闸管是通过门极的控制能够使其导通而不能使其关断的器件，属于半控型器件。对晶闸管电路的控制方式主要是相位控制方式，简称相控方式。晶闸管的关断通常依靠电网电压等外部条件来实现，这就使得晶闸管的应用受到了很大的局限。

20 世纪 70 年代后期，以门极可关断晶闸管、电力双极型晶体管和电力场效应晶体管为代表的可控型器件迅速发展。可控型器件的特点是通过门极、基极、栅极的控制既可使使其开通又可使使其关断。采用可控型器件的电路的主要控制方式为脉冲宽度调制 PWM 方式。相对于相位控制方式，可称之为斩波控制方式，简称斩控方式。

在 20 世纪 80 年代后期，以绝缘栅双极型晶体管为代表的复合型器件异军突起。它是电力场效应晶体管和电力双极型晶体管的复合，综合了两者的优点。把驱动、控制、保护电路和电力电子器件集成在一起，构成电力电子集成电路，这代表了电力电子技术发展的一个重要方向。电力电子集成技术包括以电力电子集成电路为代表的单片集成技术、混合集成技术以及系统集成技术。随着可控型电力电子器件的不断进步，电力电子电路的工作频率也不断提高。与此同时，软开关技术的应用在理论上可以使电力电子器件的开关损耗降为零，从而

提高了电力电子装置的功率密度，如图 1-3 所示。

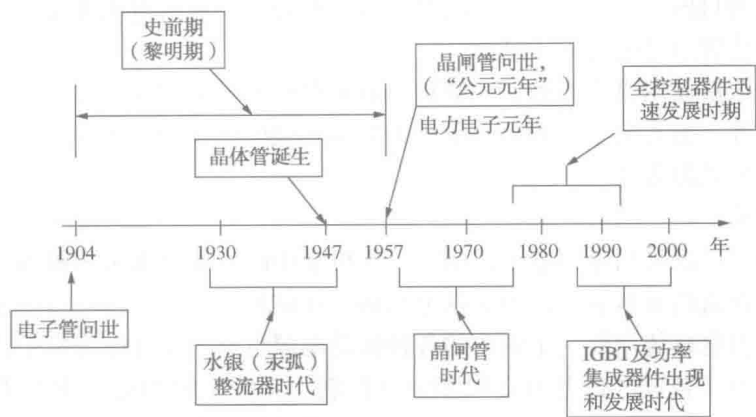


图 1-3 电力电子技术的发展史

1.3 电力电子技术的特点

与传统的旋转式变流电路相比，静止式变流电路具有无磨损、低噪声、高效率、易于实现自动控制和生产、无须专门的地基建设等优点，因而在国际范围已基本上取代了前者。

与低频变流电路相比，半导体变流电路有工作频带宽、系统响应快、易于实现小型轻量化并且工作寿命长等优点，故技术经济性能明显优于前者。各国均已不再生产由气体闸流管等离子器件组成的变流电路及其装置。

与高频电子管电路相比，半导体变流电路的显著优点是损耗小，变换效率高，但由于前者的容量等级和工作频带尚高于目前已经实用化的半导体器件，因而至 20 世纪 80 年代，半导体变流电路只能在小容量范围取代前者。随着高频大功率半导体器件的出现和实用化（如大功率静电感应晶闸管，简称 SITH），半导体高频变流电路终将取代高频电子管变流电路。

由于电力电子电路所处理的是大容量工业电能，高效低耗是这类电路的主要目标。为了减少电路内耗以提高电能转换效率，电力电子器件工作于开关状态，因此电力电子电路实质上是一种大功率开关电路；而为了实现对电能的控制，器件的开关状态必须是可控的。因此，它又是一种器件工作状态可由微弱信号进行控制的大功率开关电路。

1.4 电力电子技术的应用

电力电子技术的应用范围十分广泛。它不仅用于一般工业，也广泛用于交通运输、电力系统、通信系统、计算机系统、新能源系统等。在照明、空调等家用电器及其他领域中也有着广泛的应用。

(1) 一般工业

工业中大量应用各种交直流电动机。直流电动机有良好的调速性能，给其供电的可控整流电源或直流斩波电源都是电力电子装置。近年来，由于电力电子变频技术的迅速发展，使得交流电机的调速性能可与直流电机相媲美，交流调速技术大量应用并占据主导地位。大至数千千瓦的各种轧钢机，小到几百瓦的数控机床伺服电机，以及矿山牵引等场合都广泛采用

电力电子交直流调速技术。一些对调速性能要求不高的大型鼓风机等近年来也采用了变频装置,以达到节能的目的。还有些不调速的电机为了避免起动时的电流冲击而采用了软起动装置,这种软起动装置也是电力电子装置。

电化学工业大量使用直流电源,电解铝、电解食盐水等都需要大容量整流电源,电镀装置也需要整流电源。电力电子技术还大量用于冶金工业中的高频、中频感应加热电源、淬火电源及直流电弧炉电源等场合。

(2) 交通运输

电气化铁道中广泛采用电力电子技术。电气机车中的直流机车采用整流装置,交流机车采用变频装置。直流斩波器也广泛用于铁道车辆。在磁悬浮列车中,电力电子技术更是一项关键技术。除牵引电机传动外,车辆中的各种辅助电源也都离不开电力电子技术。电动汽车的电机依靠电力电子装置进行电力变换和驱动控制,其蓄电池的充电也离不开电力电子装置。一台高级汽车中需要许多控制电机,它们也要靠变频器和斩波器驱动并控制。飞机、船舶需要很多不同要求的电源,因此航空和航海都离不开电力电子技术。如果把电梯也算做交通运输,那么它也需要电力电子技术。以前的电梯大都采用直流调速系统,而近年来交流变频调速已成为主流。

(3) 电力系统

电力电子技术在电力系统有着非常广泛的应用。据估计发达国家在用户最终使用的电能中,有60%以上的电能至少经过一次以上电力电子变流装置的处理。直流输电在长距离、大容量输电时有很大的优势,其送电端的整流阀和受电端的逆变阀都采用晶闸管变流装置,而轻型直流输电则主要采用全控型的IGBT器件。近年发展起来的柔性交流输电(FACTS),也是依靠电力电子装置才得以实现的。晶闸管控制电抗器TCR、静止无功发生器SVG、有源电力滤波器APF等电力电子装置大量用于电力系统的无功补偿或谐波抑制。在配电网系统中,电力电子装置还可用于防止电网瞬时停电时电压跌落、闪变等,以进行电能质量控制,改善供电质量。

在变电所中,给操作系统提供可靠的交直流操作电源,给蓄电池充电等都需要电力电子装置。各种电子装置一般都需要不同电压等级的直流电源供电。通信设备中的程控交换机所用的直流电源以前用晶闸管整流电源,现在已改为采用全控型器件的高频开关电源。大型计算机所需的工作电源、微型计算机内部的电源现在也都采用高频开关电源。在大型计算机等场合,常常需要不间断电源(UPS)供电,不间断电源实际就是典型的电力电子装置。

(4) 电子装置用电源

各种电子装置一般都需要不同电压等级的直流电源供电。通信设备中的程控交换机所用的直流电源以前用晶闸管整流电源,现在已改为采用全控型器件的高频开关电源。大型计算机所需的工作电源、微型计算机内部的电源现在也都采用高频开关电源。在各种电子装置中,以前大量采用线性稳压电源供电,由于高频开关电源体积小、质量轻、效率高,现在已逐渐取代了线性电源。因为各种信息技术装置都需要电力电子装置提供电源,所以可以说信息技术离不开电力电子技术。

(5) 家用电器

电力电子照明电源体积小、发光效率高、可节省大量能源,正在逐步取代传统的白炽灯和日光灯。空调、电视机、音响设备、家用计算机、不少洗衣机、电冰箱、微波炉等电器也应用了电力电子技术。

(6)其他领域

电力电子装置提供给负载的是各种不同的直流电源、恒频交流电源和变频交流电源,因此也可以说,电力电子技术研究的也就是电源技术。例如不间断电源(UPS)、航天飞行器中的各种电子仪器各种电源。

电力电子技术对节省电能有重要意义。特别在大型风机、水泵采用变频调速方面,在使用量十分庞大的照明电源等方面,电力电子技术的节能效果十分显著,因此它也被称为是节能技术。例如抽水储能发电站的大型电动机需要用电力电子技术来启动和调速。超导储能是未来的一种储能方式,它需要强大的直流电源供电,这也离不开电力电子技术。

新能源、可再生能源发电,比如风力发电、太阳能发电,需要用电力电子技术来缓冲能量和改善电能质量。当需要和电力系统联网时,更离不开电力电子技术。

总之,电力电子技术的应用会越来越广,其地位也会越来越重要。从人类对宇宙和大自然的探索,到国民经济的各个领域,再到我们的衣食住行,到处都能感受到电力电子技术的存在和巨大魅力,这也激发了一代又一代的学者和工程技术人员学习、研究电力电子技术并使其飞速发展。

1.5 电力电子技术的发展趋势

高频化、集成化、标准模块化和智能化是电力电子器件未来的主要发展方向。

随着电力电子技术应用的不断发展,对电力电子器件性能指标和可靠性的要求也日益苛刻。具体而言,要求电力电子器件具有更大的电流密度、更高的工作温度、更强的散热能力、更高的工作电压、更低的通态压降、更快的开关时间,而对于航天和军事应用,还要求有更强的抗辐射能力和抗振动冲击能力。特别是航天、航空、舰船、输变电、机车、装甲车辆等使用条件恶劣的应用领域,以上要求更为迫切。

尽管以硅为半导体材料的双极功率器件和场控功率器件已趋于成熟,但是各种新结构和新工艺的引入,仍可使其性能得到进一步提高和改善,各种改进型 IGBT 和 IGCT 均有相当的生命力和竞争力,将电力电子的功率半导体和微电子的信息半导体集成在一起,并按不同功能的电力电子电路、控制、检测和执行机构模块化、集成化使电力电子产品像目前 IC 芯片应用那么方便、普及和可靠。电力电子产品集成化市场前景极大,它将与微电子集成电路成为未来电子行业的一个重要经济增长点。

电力电子器件的智能化应用也在不断研究中取得了实质成果。一些国外制造企业已经开发出了相应的 IPM 智能化功率模块,结构简单、功能齐全、运行可靠性高,并具有自诊断和保护功能,将控制技术与电力电子技术相结合,使电力电子装置性能进一步提高。目前正在发展电力电子 IP 模块电动汽车其优点包括:节能(比天然气汽车、汽油汽车效率高 15% 和 30%)、环保(理论上接近零排放)、智能化(电气化异于智能化);结构及组成包括:储能系统、逆变器、电动机传动系统。

新型高频器件碳化硅和氮化镓器件正在迅速发展,一些器件有望在不远的将来实现商品化,美国北卡罗来纳的 CREE 公司已经实现商用的 SiC 二极管和 MOSFET。但由于材料和制造工艺方面的问题,还需要大量的研究投入和时间才能逐步解决,北卡罗来纳州立大学的 FREEDM 中心正在对此技术进行研究。

第2章 可控整流电路

本章重点

1. 掌握单相全控桥式整流电路和三相全控桥式整流电路的工作原理,并能分析与计算各种负载对整流电路工作情况的影响。
2. 掌握变压器漏抗对整流电路的影响,重点建立换相压降、重叠角等概念,并掌握相关的计算,熟悉漏抗对整流电路工作情况的影响。
3. 了解大功率可控整流电路的接线形式及特点,熟悉双反星形可控整流电路的工作情况,建立整流电路多重化的概念。
4. 了解晶闸管的触发电路。

2.1 单相半波可控整流电路

2.1.1 单相半波可控整流电路电阻性负载

(1) 电路结构

在生产实际中,有一些负载基本上是属于电阻性的,如电炉、电解、电镀、电焊及白炽灯等。电阻性负载的特点是:负载两端的电压和流过负载的电流成一定的比例关系,且两者的波形相似;负载电压和电流均允许突变。

在分析整流电路工作时,认为晶闸管(开关器件)为理想器件,即晶闸管导通时其管压降等于零,晶闸管阻断时其漏电流等于零,除非特意研究晶闸管的开通、关断过程,一般认为晶闸管的开通与关断过程瞬时完成。

图2-1(a)即为单相半波可控整流电路带电阻性负载时的电路,它由晶闸管VT、负载电阻 R 和变压器 T 主要来变换电压,其次变压器还有隔离一、二次侧的作用,其中一次侧和二次侧电压瞬时值分别用 u_1 和 u_2 表示,有效值分别用 U_1 和 U_2 表示, i_1 、 i_2 分别为流过变压器一次侧绕组和二次侧绕组电流的瞬时值,其中 U_2 的大小根据需要的直流输出电压 u_d 的平均值确定; u_d 、 i_d 分别表示整流后的输出电压、电流的瞬时值; u_T 、 i_T 分别为晶闸管两端电压和流过晶闸管电流的瞬时值。

(2) 工作原理

在晶闸管VT处于断态时,电路中无电流,负载电阻两端电压为零, u_2 全部施加于VT两端。如在 u_2 正半周VT承受正向阳极电压期间的时刻给VT门极加触发脉冲,如图2-1(b)所示,则VT开通。忽略晶闸管通态电压,则直流输出电压瞬时值 u_d 与 u_2 相等。至 $\omega t = \pi$ 即 u_2 降为零时,电路中电流亦降至零,VT关断,之后 u_d 、 i_d 均为零。图2-1(b)分别给出了 u_d 和晶闸管两端电压 u_{VT} 的波形, i_d 波形与 u_d 波形相同。

在单相半波可控整流电路中,从晶闸管开始承受正向电压,到其加上触发脉冲的这一段

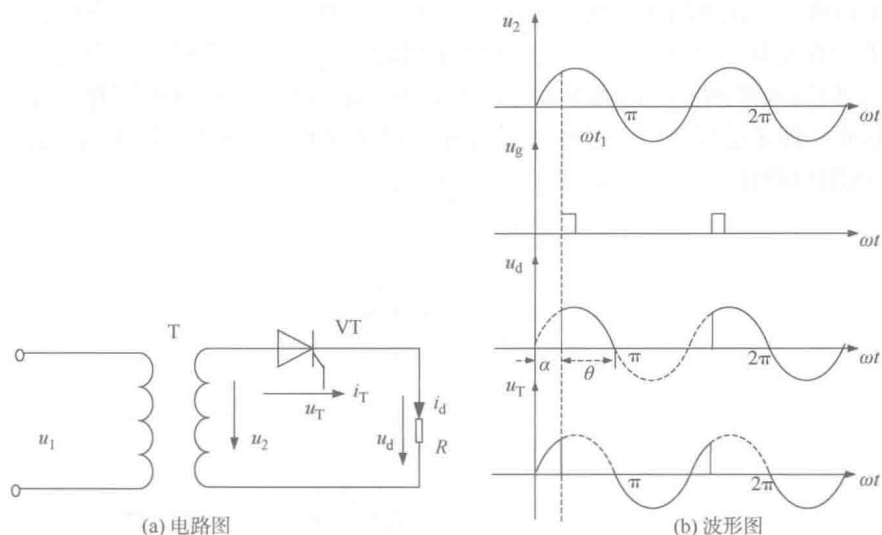


图 2-1 单相半波可控整流电路及波形图

时间所对应的电角度 $0 \sim \omega t_1$ 称为控制角 (也叫移相角), 用 α 表示; 晶闸管在一个周期内导通的电角度 $\omega t_1 \sim \pi$ 称为导通角, 用 θ 表示, 且在此电路中有 $\theta = \pi - \alpha$ 的关系。通过控制触发脉冲的相位来控制直流输出电压大小的方式称为相位控制方式, 简称相控方式。

改变触发时刻, u_d 和 i_d 波形随之改变, 直流输出电压 u_d 为极性不变但瞬时值变化的脉动直流, 其波形只在 u_2 正半周内出现, 故称“半波”整流。加之电路中采用了可控器件晶闸管, 且交流输入为单相, 故该电路称为单相半波可控整流电路。整流电压 u_d 波形在一个电源周期中只脉动 1 次, 故该电路为单脉波整流电路。

(3) 数量关系

直流输出电压平均值:

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{\sqrt{2} U_2 (1 + \cos \alpha)}{\pi} = 0.45 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

直流输出电压平均值随着 α 增大, U_d 减小, 该电路中 VT 的移相范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。

直流电流平均值:

$$I_d = \frac{U_d}{R} = 0.45 \frac{U_2}{R} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

负载电压有效值:

$$U = U_2 \sqrt{\frac{\sin 2\alpha}{4\pi} + \frac{\pi - \alpha}{2\pi}}$$

负载电流有效值:

$$I = \frac{U_2}{R} \sqrt{\frac{\sin 2\alpha}{4\pi} + \frac{\pi - \alpha}{2\pi}}$$

晶闸管电流平均值:

$$I_{dT} = \frac{U_d}{R} = 0.45 \frac{U_2}{R} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{\sqrt{2} U_2}{2\pi} (1 + \cos \alpha) = 0.45 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

2.1.2 单相半波可控整流电路阻感性负载

(1) 电路结构

阻感负载的特点是电感对电流变化有抗拒作用, 使得流过电感的电流不能发生突变。电