

新世纪电气自动化系列精品教材

XINSHIJIDIANQIZIDONGHUAXILIEJINGPINJIAOCAI

DIANLIDIANZIJISHUJICHU

电力电子

(第3版)

技术基础

冷增祥 徐以荣 / 编著



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

新世纪电气自动化系列精品教材

电力电子技术基础

(第3版)

冷增祥 徐以荣 编著

东南大学出版社

·南京·

内 容 提 要

本书介绍了电力半导体器件的原理和特性,以及由这些器件组成的各种电力电子电路。器件除普通晶闸管及派生元件外,着重介绍了全控型器件,包括功率场效应晶体管(P-MOSFET)、大功率晶体管(GTR)、可关断晶闸管(GTO)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)、集成门极换流晶闸管(IGCT)等;电路则包含 AC/DC、AC/AC、DC/DC 和 DC/AC 四种基本变换;还对软开关技术以及电力电子技术的应用作了介绍。

本书可作为自动化、电气工程及其自动化、机械设计制造及其自动化及机电一体化等专业的“电力电子技术”课程的教材,亦可供有关工程技术人员和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术基础 / 冷增祥,徐以荣编著. —3 版
南京:东南大学出版社,2012. 2

新世纪电气自动化系统规划教材

ISBN 978-7-5641-3320-7

I. ①电… II. ①冷…②徐… 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(2012)第 019793 号

电力电子技术基础(第 3 版)

出版发行 东南大学出版社
出版人 江建中
社 址 南京市四牌楼 2 号
邮 编 210096
经 销 江苏省新华书店
印 刷 江苏凤凰扬州鑫华印刷有限公司
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 16.75
字 数 418 千字
版 次 2008 年 1 月第 2 版 2012 年 2 月第 3 版
印 次 2012 年 2 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5641-3320-7
印 数 1—3000 册
定 价 36.00 元

(凡因印装质量问题,请与本社读者服务部联系。电话:025-83792328)

第3版前言

本书初版《电力电子学基础》于1993年9月出版,1999年12月修订,并更名为《电力电子技术基础》,成为高等学校电子信息类部级规划教材。期间均经多次重印,这次又进行了修改。

晶闸管的问世,标志着电力电子的诞生。起初,它主要用于整流,即将交流电变为直流电,但是普通晶闸管是一种半控型器件,当反之,欲直流变为交流电时,将其关断非常困难。于是随后陆续研制出了各种全控型器件,交直流之间的变换遂容易实现。本书就是依据电力电子技术这一发展进程安排内容的。这次第3版仍保留了这种器件与电路相配合的特色即:第1章,从普通晶闸管开始讲可控整流电路(AC/DC变换);第2章变流器运行;第3章门极触发电路,是与此相关的内容;交流调压和交交变频(AC/AC变换)也主要是由晶闸管实现,所以安排为第4章;其后,第5章才介绍全控型电力半导体器件,且内容较充实,因为对器件的了解直接关系到变换器的性能;第6章直流变换器(DC→DC变换)、第7章无源逆变和直交变频(DC→AC变换),它们几乎全是由全控型器件构成;由于大功率变频器的使用日益增多,第7章中专门有一节介绍中高压变频器;电力电子技术目标之一是高频化,因此以第8章软开关技术来反映这一新技术的发展;最后一章第9章,集中介绍了电力电子技术在各方面的应用。鉴于电能的各种变换都是用开关器件来实现的,因此这次修订中,在绪论部分先介绍了这类变换的基本原理及对开关器件的要求;在电力电子技术应用部分增加了电力补偿器的内容;而删去了已过时的强迫换流电压型、电流型逆变器两节及交流电动机调压调速等内容,所有这些增删的目的,是使教材更符合当今的教学要求。

本书的另一特点是注重基本概念和工作原理的阐述。诸如快速二极管的动特性和反向恢复电流;以大功率晶体管为例的动态负载线和缓冲电路;斩波器强迫换流的谐振过程;以及适应手携电子设备极低电源电压要求而提及的同步整流等等,无不体现了这点。也正因此,本书仍名为《电力电子技术基础》。

电力电子技术对自动化、电气工程及其自动化、机械设计制造及其自动化

及机电一体化等专业既是一门必修的技术基础课,又是一门专业性课程,因为它不仅分析各种基本的变换电路,而且结合实际介绍其在各方面的应用。加之,各专业的侧重点有所不同。例如:自动化专业,负载多为电动机,以与运动控制系统(电力传动)课程相衔接;电力工程专业,电力补偿、调节,电能质量改善则是重点;对关心开关电源来说,DC/DC变换和软开关技术要深入分析。有鉴于此,本次修订仍保留较多内容,以供各校有关专业根据需要选用。如果教学时数为48学时(含实验环节8学时),建议授课安排如下:绪论2学时,第1章8学时,第2章4学时,第3、4章各3学时,第5、6章各4学时,第7章8学时,第8章4学时,第9章机动或自学。

本书第1、2、3、9章主要由徐以荣执笔,绪论和4、5、6、7章主要由冷增祥执笔。

恳切希望使用本书的教师、学生和有关工程技术人员,对书中不足和错误之处给予批评指正。

编者
2011年11月

目 录

0	绪 论	(1)
0.1	电力电子技术的内容	(1)
0.2	利用开关器件实现电力变换的基本原理	(2)
0.3	电力变换对开关器件的要求	(5)
0.4	电力电子技术的发展	(6)
0.5	电力电子技术的应用领域和重要作用	(7)
0.6	本课程的性质、分析方法和学习要求	(8)
	习题和思考题	(8)
1	晶闸管及其可控整流电路(AC/DC 变换)	(9)
1.1	普通晶闸管	(9)
1.1.1	晶闸管结构	(9)
1.1.2	晶闸管的工作原理	(9)
1.1.3	晶闸管特性	(12)
1.1.4	晶闸管主要参数	(13)
1.2	晶闸管器件的串并联	(18)
1.2.1	晶闸管器件的串联运行	(18)
1.2.2	晶闸管器件的并联运行	(20)
1.3	单相半波可控整流电路	(22)
1.3.1	电阻负载	(22)
1.3.2	电阻电感负载	(24)
1.3.3	带续流二极管的电阻电感负载	(26)
1.3.4	电容性负载	(27)
1.4	单相桥式可控整流电路	(28)
1.4.1	单相全控桥式整流电路	(29)
1.4.2	单相半控桥式整流电路	(34)
1.5	三相半波可控整流电路	(35)
1.5.1	三相半波不可控整流电路	(36)
1.5.2	三相半波电阻负载可控整流电路	(36)
1.5.3	三相半波感性负载可控整流电路	(39)
1.5.4	六相半波可控整流电路	(41)

1.6	三相桥式可控整流电路	(42)
1.6.1	共阴极接法与共阳极接法	(42)
1.6.2	三相全控桥式整流电路	(42)
1.6.3	三相半控桥式整流电路	(49)
1.7	反电势负载	(54)
1.7.1	晶闸管整流电路反电势负载时的工作情况	(54)
1.7.2	反电势负载的特点	(55)
	习题和思考题	(55)
2	变流器运行	(58)
2.1	换流重叠角	(58)
2.1.1	交流侧电感对三相不可控整流的影响	(58)
2.1.2	三相半波可控整流电路的换流重叠角	(61)
2.1.3	其他整流电路的换流重叠角	(62)
2.2	有源逆变	(63)
2.2.1	有源逆变产生的条件	(63)
2.2.2	三相半波可控整流电路的有源逆变	(65)
2.2.3	三相全控桥式电路的逆变工作状态	(68)
2.3	变流器外特性	(69)
2.3.1	整流器外特性	(69)
2.3.2	有源逆变器外特性	(70)
2.4	谐波	(71)
2.4.1	谐波分析	(72)
2.4.2	负载谐波的影响	(75)
2.4.3	电源中谐波的影响	(77)
2.5	功率因数	(79)
2.5.1	功率因数的基本概念	(79)
2.5.2	整流电路的功率因数	(80)
2.5.3	提高功率因数的途径	(82)
	习题和思考题	(85)
3	门极触发电路	(86)
3.1	概述	(86)
3.1.1	门极触发信号的种类	(86)
3.1.2	晶闸管对门极触发电路的要求	(87)
3.2	晶体管触发电路	(88)
3.2.1	正弦波同步、锯齿波移相的晶体管触发电路	(88)
3.3	集成触发器	(91)
3.3.1	集成触发器原理及应用	(91)

3.3.2 集成触发器类型	(93)
3.4 数字触发器	(94)
3.4.1 由硬件构成的数字触发器	(95)
3.4.2 微机数字触发器	(96)
3.5 触发器的定相	(99)
3.5.1 概述	(99)
3.5.2 触发器的定相方法	(99)
习题和思考题	(102)
4 交流调压和交交变频(AC/AC变换)	(103)
4.1 交流调压	(103)
4.1.1 单相交流调压	(103)
4.1.2 三相交流调压	(107)
4.1.3 异步电动机的软起动	(109)
4.1.4 晶闸管交流调功器	(111)
4.1.5 双向晶闸管	(112)
4.2 交交变频器	(114)
习题和思考题	(121)
5 全控型电力半导体器件	(123)
5.1 门极可关断晶闸管(GTO)	(123)
5.1.1 结构特点和关断原理	(123)
5.1.2 主要参数	(124)
5.1.3 缓冲电路	(125)
5.1.4 对门极信号的要求	(127)
5.1.5 门极驱动电路	(129)
5.2 大功率晶体管(GTR)	(130)
5.2.1 特性和参数	(130)
5.2.2 安全工作区	(132)
5.2.3 缓冲电路和续流二极管的影响	(135)
5.2.4 开关特性	(138)
5.2.5 驱动电路	(141)
5.3 电力场效应晶体管(P-MOSFET)	(145)
5.3.1 结构和工作原理	(146)
5.3.2 静态特性和参数	(146)
5.3.3 动态特性和参数	(148)
5.3.4 功率 MOSFET 的特点	(149)
5.3.5 功率 MOSFET 的驱动电路	(151)
5.4 绝缘栅双极晶体管(IGBT)	(152)

5.4.1	结构特点	(152)
5.4.2	有关特性	(153)
5.4.3	驱动电路	(154)
5.5	其他全控型电力电子器件	(155)
5.5.1	静电感应晶体管(SIT)	(155)
5.5.2	静电感应晶闸管(SITH)	(156)
5.5.3	金属氧化物可控晶闸管(MCT)	(157)
5.5.4	集成门极换流晶闸管(IGCT)	(158)
5.5.5	注入增强栅晶体管(IEGT)	(160)
5.6	模块和智能功率模块(IPM)	(160)
5.6.1	GTR 模块	(160)
5.6.2	其他功率模块	(161)
5.6.3	智能功率模块(IPM)	(162)
5.7	电力电子器件发展概貌	(163)
5.7.1	现代电力半导体器件的水平	(163)
5.7.2	各种装置的容量及频率范围	(164)
5.8	电力半导体器件和装置的保护	(164)
5.8.1	常规的过压、过流保护	(165)
5.8.2	用电子线路实施保护	(169)
	习题和思考题	(172)
6	直流变换器(DC/DC 变换)	(174)
6.1	斩波原理和控制方式	(174)
6.1.1	斩波原理	(174)
6.1.2	控制方式	(175)
6.2	直流变换器的基本电路	(176)
6.2.1	降压式(Buck)变换器	(176)
6.2.2	升压式(Boost)变换器	(177)
6.2.3	升/降压式(Buck-Boost)变换器	(178)
6.2.4	其他形式的基本变换电路	(179)
6.3	负载为直流电动机时的斩波器结构	(179)
6.3.1	单象限斩波器	(179)
6.3.2	两象限斩波器	(180)
6.3.3	四象限斩波器	(181)
6.4	输入与输出隔离的直流变换器	(183)
6.4.1	单端反激式	(183)
6.4.2	单端正激式	(185)
6.4.3	推挽式	(186)
6.4.4	半桥式	(186)

6.4.5	全桥式	(187)
6.4.6	同步整流	(187)
6.5	直流 PWM 的控制	(188)
	习题和思考题	(191)
7	无源逆变和直交变频(DC/AC 变换)	(192)
7.1	概 述	(192)
7.1.1	逆变与变频的含义	(192)
7.1.2	逆变和变频的两种类型	(192)
7.2	负载换流逆变器	(194)
7.2.1	晶闸管的换流	(194)
7.2.2	RLC 串联谐振逆变器	(196)
7.3	逆变器的谐波和调压	(200)
7.3.1	输出波形中的谐波含量	(200)
7.3.2	输出电压的调节	(200)
7.3.3	逆变器的多重化	(201)
7.4	脉宽调制(PWM)逆变器	(204)
7.4.1	正弦脉宽调制(SPWM)原理	(204)
7.4.2	PWM 逆变器及其优点	(207)
7.5	PWM 控制技术	(209)
7.5.1	调制法	(209)
7.5.2	指定谐波消除法(SHEPWM)	(215)
7.5.3	跟踪型 PWM(SHBPWM)	(216)
7.5.4	电压空间矢量 PWM(SVPWM)	(218)
7.6	中高压变频器	(220)
7.6.1	逆变器结构	(221)
7.6.2	整流装置	(224)
	习题和思考题	(226)
8	软开关技术	(228)
8.1	硬开关与软开关	(228)
8.1.1	开关高频化的好处	(228)
8.1.2	硬开关存在的问题	(228)
8.1.3	问题的解决途径	(229)
8.2	软开关的种类	(229)
8.3	软开关技术的实现	(230)
8.3.1	谐振型变换器(RSC)	(230)
8.3.2	软开关 PWM 变换器	(232)
8.3.3	零转换 PWM 变换器	(232)

8.4 软开关电路举例	(233)
8.4.1 BUCK ZCS-PWM 变换器	(233)
8.4.2 BOOST ZVT-PWM 变换器	(234)
8.4.3 谐振直流环(RDCL)逆变器	(236)
习题和思考题	(237)
9 电力电子技术的应用	(238)
9.1 电动机调速	(238)
9.1.1 直流电动机调速	(238)
9.1.2 直流可逆电路	(238)
9.1.3 交流电动机串级调速	(240)
9.1.4 交流电动机变频调速	(241)
9.2 电力控制补偿器	(243)
9.3 无触点开关	(244)
9.4 电加热	(246)
9.5 电压调节	(248)
9.6 不间断电源(UPS)	(249)
9.7 电化学	(250)
9.8 高压直流输电	(251)
9.9 蓄电池充电机	(252)
9.10 开关电源	(253)
9.11 电子镇流器	(254)
9.12 其他应用领域	(255)
习题和思考题	(256)
参考文献	(258)

0.1 电力电子技术的内容

电力电子技术是以电力、电能为研究对象的电子技术,又称电力电子学(power electronics)。它主要研究各种电力电子半导体器件,以及由这些电力电子器件来构成各式各样的电路或装置,实现对电能的变换和控制,其功能如图 0.1 所示。它既是电子学在电工或强电(高电压、大电流)领域的一个分支,又是电子学在弱电(低电压、小电流)电子领域的一个分支,或者说是强弱电相结合的新学科。

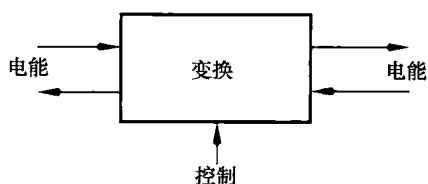


图 0.1 电力电子装置的功能

大家知道,电有直流(DC)和交流(AC)两大类。前者有电压幅值和极性的不同,后者除电压幅值外,还有频率和相位两个要素。而用电设备和负载是各式各样的,实际应用中,常常需要在两类电能之间或对同类电能的一个或多个参数(如电压、电流、频率和相位等)进行变换。不难看出,这些变换共有四种基本类型,它们各可通过相应的变流器或变换器(converter)来实现,如图 0.2 所示。

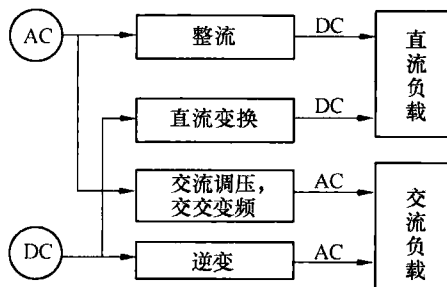


图 0.2 电力变换的基本类型

(1) AC→DC,即交流电转换为直流电。这种变换称为整流,实现的装置叫整流器(rectifier),用于如充电、电镀、电解和直流电动机的速度调节等。

(2) DC→AC,即直流电转换为交流电。这是与整流相反的变换,称为逆变。逆变器(inverter)的输出可以是恒频,用于如恒压恒频(CVCF)电源或不间断供电电源(UPS);也可以变频(这时变流器叫变频器),如用于各种变频电源、中频感应加热和交流电动机的变频调速等。

(3) AC→AC,这是将交流电能的参数(幅值或频率)加以转换。其中:交流电压有效值的调节称为交流电压控制或简称交流调压,用于如调温、调光、交流电动机的调压调速等;而将 50Hz 工频交流电直接转换成其他频率的交流电,称为交交变频,其装置叫做周波变换器(cycloconverter),主要用于交流电动机的变频调速。

(4) DC→DC,这是将直流电的参数(幅值或极性)加以转换。即将恒定直流变成断续脉冲形状,以改变其平均值。此种变流器称之为斩波器(chopper)或直流变换器,主要用于直流电压变换、开关电源和矿车、电瓶运输车等直流电动机的牵引传动。

可见,电力电子技术在工农业生产、电力系统、交通运输、邮电通信等国民经济各部门以及家用电器各方面都有着广泛的应用。

0.2 利用开关器件实现电力变换的基本原理

上述的电能变换都是由开关器件来实现的。之所以用开关来实现,主要是在电能变换过程中,功率损耗($p=ui$)是需要特别关心的问题。电力(功率)开关器件只有工作在开关状态,器件本身的损耗才是最小(开关开通时,通过的电流 i 很大,但开关上的电压 $u \approx 0$;开关断开时,承受的电压 u 很高,但流过的电流 $i \approx 0$)。这样才可以提高电能变换的效率。

那么怎样由开关器件来实现电力变换呢?兹以一种桥式电路来说明交直流间的 4 种基本变换。

(1) AC→DC 变换

电路如图 0.3(a)所示。开关 $S_1 \sim S_4$ 组成桥式电路,A、B为输入端,接交流电源 u_s ,C、D为输出端,接直流负载 R 。 S_1 、 S_2 和 S_3 、 S_4 为两对开关,它们分别同时通、断,即 S_1 、 S_2 开通时, S_3 、 S_4 关断; S_3 、 S_4 开通时, S_1 、 S_2 关断。

在图 0.3(a)电路中,设 u_s 电源正半周时,极性为+、-。令开关 S_3 、 S_4 断开, S_1 、 S_2 接通,则电流 i_s 回路为+→A→ S_1 →C→负载 R →D→ S_2 →B→-;负半周时, u_s 极性为(+)、(-),令 S_1 、 S_2 断开, S_3 、 S_4 接通,则电流 i_s 回路为(+)-→B→ S_3 →C→负载 R →D→ S_4 →A→(-),可以看出,尽管交流电源 u_s 正负交变,但由于 S_1 、 S_2 和 S_3 、 S_4 的交替通、断,在输出两端电压 u_o 。极性始终不变,即 C 为+,D 为一,这样便将交流变换成了直流。

当然,获得的直流是脉动的,但只需加适当的 L、C 滤波元件,便可在负载 R 两端得到直流平均电压 u_o ,如图 0.3(b)。

图 0.3(b)获得的 u_o 为最大值。如欲减小 u_o ,可控制 S_1 、 S_2 和 S_3 、 S_4 在 u_s 过零后推迟一段时间,例如 ωt_1 时刻(对应相位角为 α_1)接通和断开,则输出电压 u_o 波形如图(c)所示, u_o 将不是完整的正弦半波,而是被切去了一部分。不难看出,输出电压平均值 u_o 与滞后角 α 有关, α 愈大, u_o 愈小。这种控制方式称为相位控制或移相控制。

如果在电源的半周期内,令 S_1 、 S_2 和 S_3 、 S_4 分别通、断多次,则或获得图 0.3(d)多个脉波电压。当开关频率,即电源半周期中开通、断的次数固定,而改变脉波宽度,也可以调节直流输出电压平均值 u_o ,这种控制方式

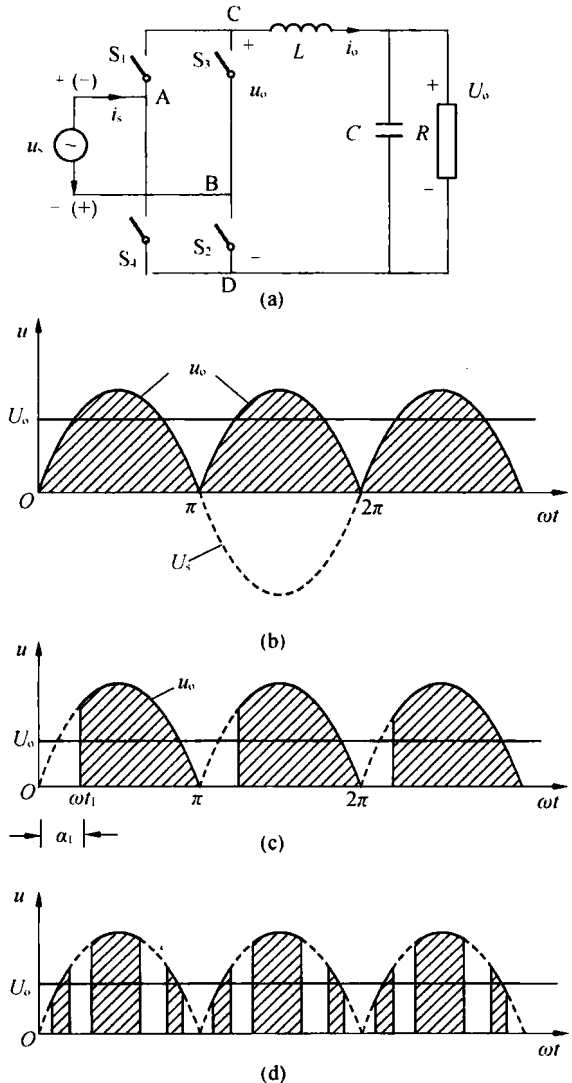


图 0.3 整流电路和电压波形

则称为脉冲宽度调制(PWM)控制。

(2) DC→AC 变换

图 0.4(a)所示电路,直流电压 U_s 接于输入端 A、B,负载 Z 接于输出端 C、D。如果要求输出交流的频率为 f (周期 $T=1/f$),令半周期 $T/2$ 时间里接通 S_1 、 S_2 ,断开 S_3 、 S_4 ,则直流电压 U_s 经 S_1 、 S_2 加至负载 Z 两端,逆变电路输出电压 $u_o = u_{CD} = +U_s$;令随后的 $T/2$ 时间里 S_3 、 S_4 接通, S_1 、 S_2 断开,则 U_s 经 S_3 、 S_4 加至 Z 两端, $u_o = u_{DC} = -U_s$ 。因此,开关电路输出电压 u_o 是频率为 f 、幅值为 U_s 的交流方波电压,如图 0.4(b)。

如果仅在正负半周的一部分时间 T_{on} 期间 S_1 、 S_2 接通, S_3 、 S_4 断开和 S_3 、 S_4 接通, S_1 、 S_2 断开,则 u_o 将是导通时间小于 $T/2$ 的矩形交流波,见图 0.4(c)。藉此便可以调节基波 u_1 的幅值。

同样,如果在正、负半周期 $T/2$ 内控制 S_1 、 S_2 和 S_3 、 S_4 的多次通、断,并令每次通、断时间不同,如图(c)所示 PWM 波形,输出电压波形更接近正弦波,且其中谐波电压频率较高,经很小的 LC 滤波后即可得到正弦化的交流电压。

(3) AC→AC 变换

在图 0.3(a)电路中,如果用的是双向开关,只要将开关 S_1 、 S_2 接通, S_3 、 S_4 断开或 S_3 、 S_4 接通, S_1 、 S_2 断开,输出电压 u_o 便是同频率的交流电压,见图 0.5(a)。当采用相位控制时,将正、负半周正弦波各切去一部分,便可实现交流调压,输出交流电压有效值与相位角 α 有关,且波形不是正弦形,见图 0.5(b)、(c)。

交交变频电路如图 0.6(a)所示,频率 $f=50\text{ Hz}$ (其周期 $T=20\text{ ms}$)的交流电压 u_s 接至开关电路的输入端 A、B,波形如图(b),如果在 u_s 的每个半波期间接通的开关编号如图所示(一对开关接通,另对开关必须断开),则开关电路输出端 C、D(即负载 Z)两端电压 u_o 将是图(c)所示波形。显然,这个输出的交流电压的周期为 $T_0=4T=80\text{ ms}$,频率 $f_0=\frac{1}{T_0}=\frac{1}{4T}=\frac{f}{4}=12.5\text{ Hz}$,每个正、负半周(40 ms)内各有 4 个脉波,输出电压 u_o 的基波周期是输入电压 u_s 周期的 4 倍,频率为电源电

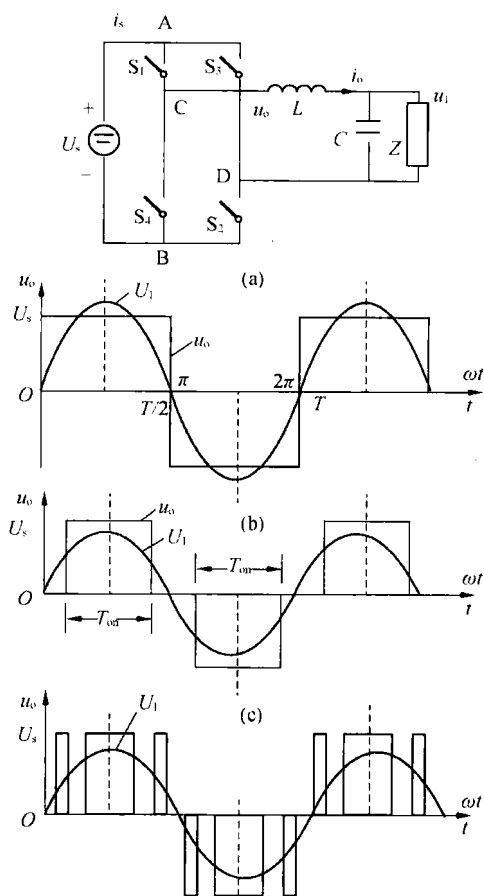


图 0.4 逆变电路和电压波形

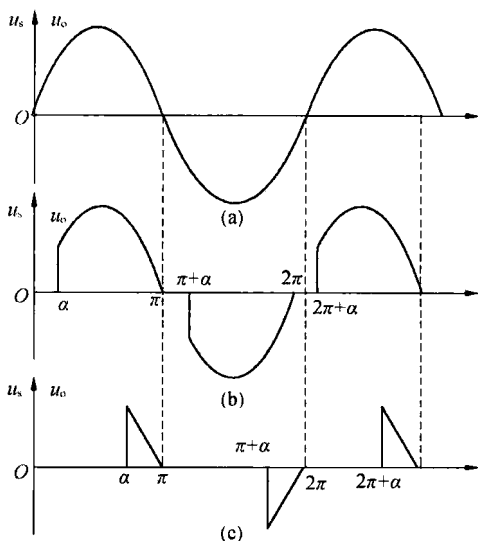


图 0.5 交流调压波形

压 u_s 频率的 $1/4$, 从而实现了交交频率变换。

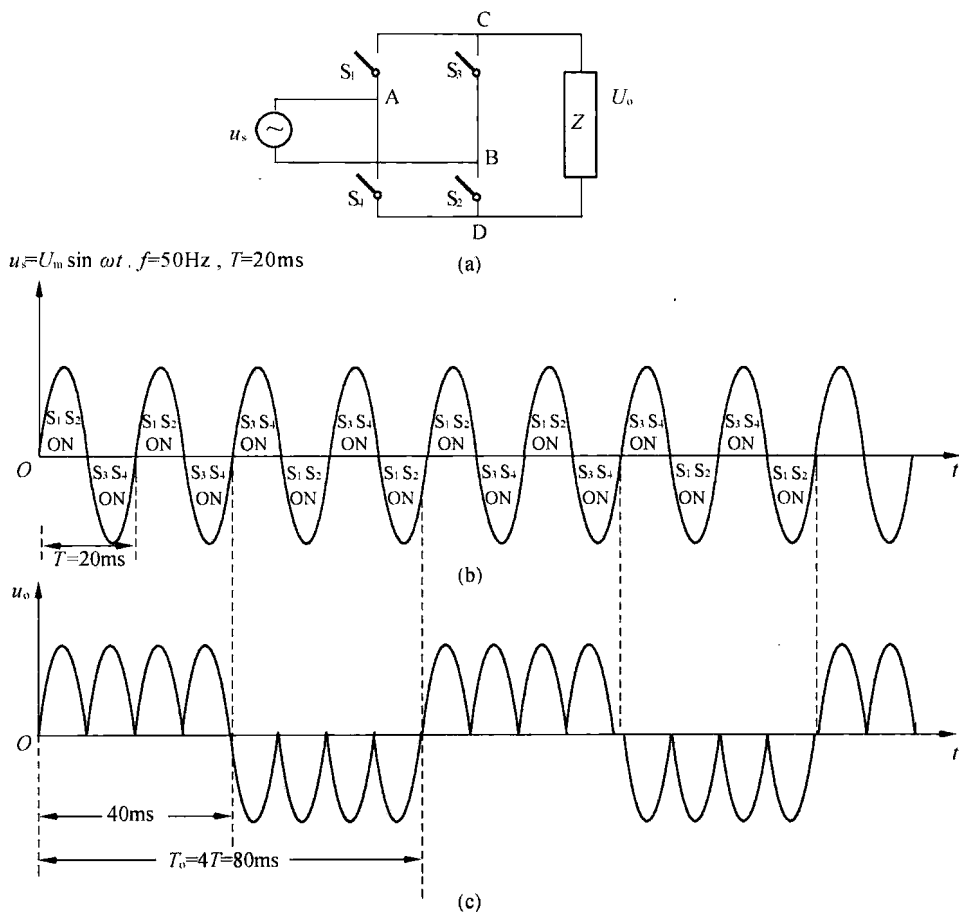


图 0.6 交交变频电路和电压波形

可以看出, 只要改变 S_1, S_2 和 S_3, S_4 的通、断时序及通、断持续时间, 便可以改变输出电压的波形, 即改变输出基波电压的大小和频率。

(4) DC→DC 变换

在图 0.7(a) 电路中, 令 S_3, S_4 持续断开, 而对 S_1, S_2 进行周期性通、断控制, 即 T_{on} 时间内接通, T_{off} 时间内断开, 则可得到如图 0.7(b) 所示输出电压 u_s 波形。经 LC 滤波后, 在负载 R 两端可获得直流平均电压 u_o , $u_o < u_s$, 从而实现了直流电压变换。只要改变 T_{on} 或 T_{off} 时间, 便可以得到不同的直流输出电压 u_o 。

由上可以看出, 利用开关器件实现电能的变换, 因为只是通、断两种状态的变化, 所以开关电路输出端电压和输入端电流都不可能是理想的、无脉动的直流或无畸变的正弦交流, 而需要加滤波等措施才能达到目的。在开关型电力变换中, 核心部分是一组开关

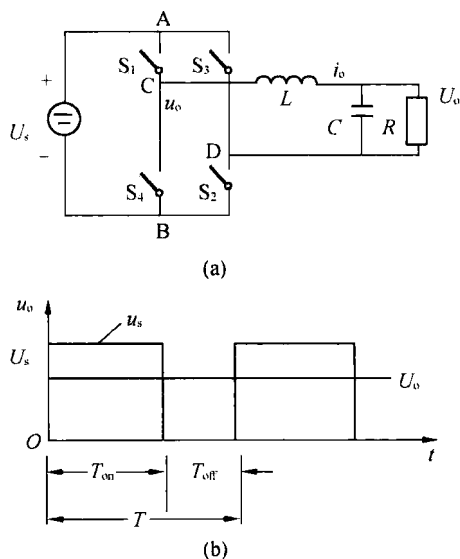


图 0.7 直流变换电路和电压波形

电路,必须适式、实时地对开关进行控制(control)。目前实现电能转换的开关控制方式主要有“相位控制”、“通断控制”和“脉冲宽度调制(PWM)”。

因此,可以说电力电子学是横跨“电子”、“电力”和“控制”三个领域的一门新兴工程技术学科。正是依据这一特征,我国电力电子学会设计了如图 0.8 所示的会标。

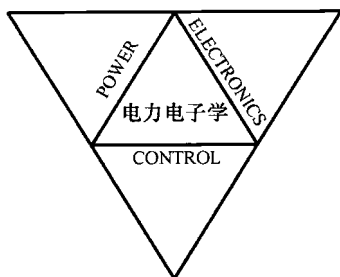


图 0.8 电力电子学会会标

0.3 电力变换对开关器件的要求

从利用开关器件对电能进行变换过程中,可以知道,开关器件必须具有以下理想特性:

- (1) 接通时,开关两端的等效电阻为零,电压降为零,开关接通时功耗为零;
- (2) 断开时,开关两端的等效电阻为无限大,漏电流为零,开关断开时功耗为零;
- (3) 转换过程,即从接通到断开或从断开到接通瞬时完成,过渡过程为零。

所有各种实用开关的性能,都应以以上理想特性的要求来衡量和比较。

在电力电子器件出现前,主要是用机电式开关,例如继电器、接触器。图 0.9 为接触器的电路符号,当线圈通电时,通过电磁和机械机构带动触点闭合,将电路接通;当线圈断电时,触点释放,将电路断开。这类开关以机械式触点来接通和断开电路,简单、直观。但由于电磁线圈的惯性和触点的空间移动,接通和断开动作慢,通断频率和动作次数有限制;接通时触点有接触电阻;特别是断开电感电路时会产生电弧(俗称火花),易烧毛触点甚至将触点焊死,需常维护更换。

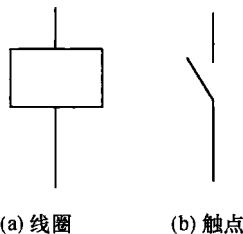


图 0.9 接触器的电能符号

电力电子器件是一种无触点开关。例如晶体三极管,见图 0.10,当它工作于饱和导通区和截止区时,便可以作为开关,由基极电流 I_b 控制开关的通断。这类开关,导通时有管压降,截止时存在漏电流,但是它没有触点开关的固有缺陷,特别是具有响应快,开关频率高,控制方便灵活的突出优点。因此在电能变换中,现在全是用电力电子器件作开关器件。

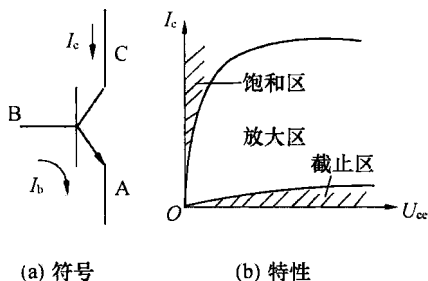


图 0.10 晶体三极管电能符号和特性

0.4 电力电子技术的发展

电力电子技术是建立在电力电子器件基础上的。电子学的发展史表明,一种新器件的出现,将对整个技术领域产生深刻的影响。1946年晶体管的诞生开始形成固体电子学。电力电子学也正是在1957年第一只晶闸管(thyristor)[也称可控硅(SCR)]——一种可控的大功率半导体器件问世后,逐步建立和发展起来的。

在这之前,电能的转换主要依靠旋转机组来实现。例如,将一台交流电动机拖动一台直流发电机可将交流电变换为直流电,调节直流发电机的励磁的大小和极性便可改变直流输出电压的高低和极性;如将一台直流电动机拖动一台交流发电机便可实现相反的转换,只要调节直流电动机的转速便可改变交流电的频率。与这些旋转式的变流机组比较,利用电力半导体器件组成的电能变换器是静止的,具有体积小、重量轻、无机械噪声和磨损、效率高、放大倍数大、易于控制、响应快及使用方便等一系列优点。因此,在变流领域内,自20世纪60年代开始进入了晶闸管的时代。在这期间,除普通晶闸管本身的电压、电流容量和 du/dt 、 di/dt 承受能力及开关特性不断提高外,还发展了一些派生元件,如快速晶闸管、高频晶闸管、双向晶闸管、逆导晶闸管、光控晶闸管等。这些元件均只能控制其开通,而不能控制其关断,称为半控型电力电子器件。半控器件工作频率低,但单个器件容量大。

20世纪70年代以后,国际上电力半导体技术突飞猛进,其特征是,出现了通和断或开和关都能控制的全控型电力电子器件(亦称自关断型器件),如门极可关断晶闸管(GTO)、大功率或巨型晶体管(GTR)、功率场效应晶体管(P-MOSFET)和绝缘栅双极晶体管(IGBT)等。这样,就突破了以晶闸管半控型器件为主体的单一局面,从而形成一个庞大的电力半导体器件家族。

电力电子技术包括器件及其应用,即元件和电路或器件和装置两个方面,它们的发展是相辅相成、互相促进的。装置依赖于器件,新的器件出现能开拓许多新的应用领域,做出新的装置;应用中出现的问题又对器件提出新的要求,推动新器件的研制。例如,只有半控型器件时,它用于整流比较成熟,所制作的整流器性能良好,但用于逆变器便带来技术上的复杂和体积庞大、成本昂贵等问题,而当自关断型器件出现后,这些问题就比较容易解决。而且新的电力电子器件和变换技术仍在不断出现,它们的应用领域也日益广泛。

电力电子技术的发展还与控制技术的发展紧密相关。控制电路经历了由分立元件到集成电路(IC)的发展阶段。现在已有专为各种控制功能设计的专用集成电路,使电力电子装置的控制电路大为简化。特别是微处理器和微型计算机的引入,且它们的位数成倍增加,运算速度随之提高,功能不断完善,使控制技术发生了根本的变化,即控制不仅依赖硬件电路,而且可利用软件编程,既方便又灵活,可使各种新颖、复杂的控制策略和方案得到实现,并具有自诊断功能,甚至能获得有一定智能的电力电子装置,可以使电路或装置达到更为完善的水平。所以,将新的控制理论和方法在实践中取得应用也是电力电子技术的一个重要内容。

综上所述可以看出,电力电子技术的发展有赖于电力电子器件的发展,电力电子技术发展的每一次飞跃都是以新器件的出现为契机的。电力电子器件是电力电子技术的基础。一代器件孕育着一代装置,一代装置产生一批新的应用领域。而微电子技术、电力电子器件和控制理论则是现代电力电子学缺一不可的发展动力。