

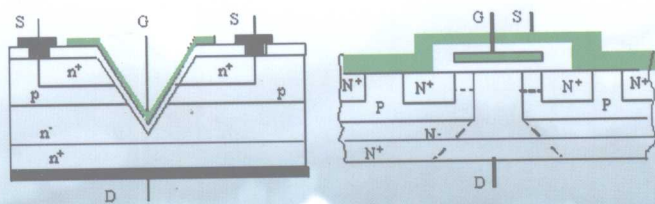


普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材

DIANQI
KINXILEI

现代电力电子技术基础

■ 李宏 王崇武 编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



免费
电子课件

普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材

现代电力电子技术基础

李 宏 王崇武 编



机械工业出版社

电力电子技术是目前最活跃的学科之一，它涉及国民经济的许多领域，并且应用广泛。本书介绍了电力电子器件的工作原理，以自关断器件及其电路为主，论述了 AC-DC、DC-DC、DC-AC、AC-AC 变换电路的工作原理，补充介绍了电力电子技术的一些最新研究成果，如软开关技术、功率因子校正技术和电路建模等，并介绍了几种实际的应用电路。

本书注重理论的完整性、先进性，突出工程设计和应用技术，在前人的研究基础上，融入了作者多年从事该学科研究的成果和经验。本书可作为高等院校自动化专业本科生和电力电子与电力传动学科研究生的教材和参考书，也可作为电力电子行业的工程技术人员的参考用书。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 下载或发邮件到 wbj@cmpbook.com 索取。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代电力电子技术基础/李宏, 王崇武编. —北京: 机械工业出版社, 2008. 12

普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材

ISBN 978-7-111-25418-8

I. 现… II. ①李…②王… III. 电力电子学 - 高等学校 - 教材
IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 165375 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 王保家 谷玉春 责任校对: 李秋荣

封面设计: 张 静 责任印制: 乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (兴文装订厂装订)

2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 19.5 印张 · 477 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-25418-8

定价: 32.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379711

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是在借鉴了前人的研究基础上，融入了作者及其同事多年从事该学科研究的成果和经验，经过多次修改而完成的。力求为读者学习、研究提供一本较为实用的基础书籍，满足“现代电力电子技术基础”课程的教学需要。

编写本书时考虑到以下事实：

1) 新型电力电子器件的出现改变了人们长期以来以低频技术处理变流技术的习惯，从而转入到以高频技术处理电力电子技术的阶段。本书从实际应用出发，以全控型功率器件构成的变换装置为主要研究对象，理论联系实际，由浅入深，讨论了各种变换器的工作原理及其分析方法，简明扼要地阐述了现代电力电子技术的基础知识。

2) 由于读者对于元器件的要求主要以正确选择和实际使用为目的，所以本书从应用角度重点阐述了电感、电容、变压器及电力电子器件的工作原理、特点和驱动要求，以达到对元器件的全面了解的目的。

3) 鉴于新型元器件的不断涌现，电力电子技术应用领域更加广泛，讨论所有的元器件和变换技术是不可能的，因此本书以目前常用的元器件和变换技术作为主线进行分析，对于软开关技术、变换器交流小信号模型等也作了简要介绍。

4) 鉴于控制系统的多样性和复杂性，计算机技术的发展为模拟控制向数字控制转换提供了技术基础，但这些内容属于另一范畴，故未列入本书内容。

5) 电力电子技术是目前最活跃的学科之一，是一门应用性很强的技术，其应用涵盖国防、工业和民用的各个领域。因此，本书介绍了几种实际应用电路，其目的在于引导读者进行实际设计工作，意欲突出实际应用的重要性。

6) 本课程是“电工基础”、“电子技术基础”和“自动控制原理”的后续课程，因此读者应该掌握电磁基础知识、公式定律及计算方法，但高频变压器和电感设计对自动化专业学生而言仍然是新的课题，需要了解和掌握，因此本书同时也介绍了电感、变压器的基本电磁定律和设计方法。

本课程课内讲授约 60 学时，全书共分 10 章，主要叙述 7 个基本内容，即元器件、AC-DC 变换、DC-DC 变换、DC-AC 变换、AC-AC 变换、软开关技术和交流小信号模型。第 1 章概述了电力电子技术的基本内容；第 2 章从应用观点出发阐述了电感、电容的应用选择以及电感、变压器的基本电磁定律和设计方法；第 3 章阐明了电力电子器件的工作原理和特点；第 4 章介绍了传统相控整流以及提高功率因数的方法；第 5 章介绍了 DC-DC 变换的典型电路和单端正激、单端反激、推挽式、半桥式和全桥式变换电路；第 6 章着重阐述了自关断器件构成的基本逆变电路、三相逆变电路、谐波分析及控制算法；第 7 章介绍了 AC-AC 变换的基本原理和基本概念；第 8 章介绍了软开关技术的基本概念，对于谐振、准谐振、多谐振、零电压 PWM、零电流 PWM 软开关技术等也作了较为详细的分析；第 9 章介绍了交流小信号建模技术；第 10 章以应用设计为例，讲述实际设计过程。

本书由李宏、王崇武编写。其中李宏编写了绪论和第 1、2、3、4、5、6、7、10 章；王

崇武编写了第 8、9 章；杨枚、张勇对本书亦有贡献。

贺昱曜教授、周继华教授、焦振宏副教授对本书提出了不少宝贵的意见。由于编者水平所限，加之本书涉及内容广泛，书中难免有错误与不当之处，恳请读者批评指正。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 下载或发邮件到 wbj@cmpbook.com 索取。

编 者

目 录

前言

第1章 变换器概述	1
1.1 简单的变换器	2
1.2 理想开关和实际开关	3
1.3 变换器的分类	4
1.3.1 DC-AC 变换器——逆变器	4
1.3.2 AC-DC 变换器——整流器	5
1.3.3 DC-DC 变换器	6
1.3.4 AC-AC 变换器	6
1.3.5 软开关与硬开关	6
1.4 变换器的组成要素	7
1.4.1 电阻	7
1.4.2 电感	7
1.4.3 电容	7
1.4.4 电源	8
1.4.5 电力电子开关	10
1.4.6 变压器	10
1.4.7 负载	11
1.4.8 控制器	11
1.5 变换器中电感和电容的连接	12
1.5.1 变换器中电感的连接	12
1.5.2 变换器中电容的连接	13
1.6 变换器的希望特性和考核指标	13
1.7 变换器的保护	16
1.7.1 浪涌电压保护	16
1.7.2 过电流保护	16
1.7.3 开关器件保护	16
1.7.4 过电压保护	17
练习题	17
第2章 电容电感变压器	20
2.1 电容器	20
2.1.1 电容器的基本参数及等效电路	20
2.1.2 电容器的分类	22
2.2 磁学的基本概念	23
2.2.1 磁感应强度或磁通密度	23
2.2.2 磁通	24
2.2.3 磁场强度	24
2.2.4 磁场连续性定律	25
2.2.5 全电流定律	25
2.2.6 电磁感应定理	26
2.3 磁性材料的基本特性	27
2.3.1 磁化曲线	27
2.3.2 磁心损耗	29
2.4 铁心材料	32
2.4.1 铁氧体材料	32
2.4.2 磁粉心材料	32
2.4.3 合金类	33
2.5 线圈骨架及铁心窗口	33
2.6 电感	33
2.6.1 电感设计的基本公式	34
2.6.2 电感铁心的选择方法	36
2.7 变压器	39
2.7.1 变压器的基本知识及等效电路	39
2.7.2 脉冲变压器设计的基本公式	43
练习题	44
第3章 电力半导体器件	45
3.1 概述	45
3.2 功率二极管	46
3.2.1 PN 结工作原理及静态特性	46
3.2.2 PN 结动态工作过程	47
3.2.3 PN 结电容	49
3.2.4 二极管的主要参数	49
3.2.5 二极管的类型	49
3.3 功率晶体管	49
3.3.1 晶体管的工作原理及静态输出特性	49
3.3.2 GTR 的特点	50
3.3.3 GTR 的开关特性	51
3.3.4 GTR 的主要参数	52
3.3.5 GTR 模块	56
3.3.6 GTR 驱动	57
3.4 晶闸管及派生器件	60
3.4.1 晶闸管的工作原理	60
3.4.2 晶闸管的伏安特性	62

3.4.3 晶闸管的主要参数	62	电流	116
3.4.4 晶闸管触发电路	66	4.5.2 提高 AC-DC 电路的网侧功率因数的主要方法	118
3.4.5 派生器件	67	练习题	124
3.5 静电感应器件	70	第 5 章 DC-DC 变换技术	126
3.5.1 静电感应晶体管	71	5.1 概述	126
3.5.2 静电感应晶闸管	72	5.1.1 两种调节模式及比较	126
3.6 电力场效应晶体管	73	5.1.2 DC-DC 变换分类	128
3.6.1 电力场效应晶体管的特点	73	5.1.3 DC-DC 变换器的要求及主要技术指标	128
3.6.2 电力场效应晶体管的基本结构	74	5.2 DC-DC 变换器的基本电路拓扑	129
3.6.3 N 沟道增强型 VDMOS 的工作原理	75	5.2.1 Buck 电路	130
3.6.4 电力 MOSFET 栅极充电说明	77	5.2.2 Boost 电路	134
3.6.5 电力 MOSFET 开关过程分析	80	5.2.3 Buck-Boost 电路	137
3.6.6 电力 MOSFET 静态输出特性和安全工作区	83	5.2.4 Cuk 电路	140
3.6.7 电力 MOSFET 栅极驱动方法	83	5.3 带变压器隔离的 DC-DC 变换器的原理及设计	144
3.7 绝缘栅双极型晶体管	85	5.3.1 单端 DC-DC 变换器的原理及设计	144
3.7.1 IGBT 的结构	85	5.3.2 推挽式 DC-DC 变换器的原理及设计	153
3.7.2 IGBT 的导通特性	86	5.3.3 半桥式 DC-DC 变换器的原理及设计	157
3.7.3 IGBT 的开关特性	86	5.3.4 全桥式 DC-DC 变换器的原理	163
3.7.4 擎住效应和安全工作区	89	5.4 PWM 控制器原理	164
3.7.5 IGBT 的短路电流和门极驱动	90	5.4.1 电压型 PWM 控制器原理	164
3.7.6 IGBT 的参数特点	90	5.4.2 电流型 PWM 控制器原理	164
3.8 MOS 场控晶闸管	91	练习题	169
3.8.1 MCT 的工作原理	91	第 6 章 DC-AC 变换技术	171
3.8.2 MCT 的特点	92	6.1 逆变器的分类、功率流方向和波形指标	171
练习题	93	6.1.1 逆变器的分类	171
第 4 章 AC-DC 变换技术	94	6.1.2 逆变器的功率流方向	172
4.1 单相半波整流电路	94	6.1.3 逆变器的波形指标	173
4.1.1 不可控整流电路	94	6.2 方波逆变器	173
4.1.2 可控整流电路	97	6.2.1 单相半桥式逆变电路	173
4.2 全波整流电路	101	6.2.2 单相全桥式逆变电路	175
4.2.1 不可控整流电路	101	6.2.3 傅里叶级数和方波逆变器输出谐波	177
4.2.2 可控整流电路	103	6.2.4 负载为感性负载的方波逆变器特性	179
4.2.3 半控整流电路	105	6.2.5 方波逆变器输出滤波	181
4.3 三相整流电路	106	6.2.6 三相方波逆变器	182
4.3.1 三相不可控整流电路	106		
4.3.2 三相半波可控整流电路	106		
4.3.3 三相桥式全控整流电路	111		
4.3.4 三相半控桥式整流电路	114		
4.4 相控整流电路的主要指标	116		
4.5 AC-DC 电路的网侧功率因数	116		
4.5.1 AC-DC 相控整流电路的网侧谐波			

6.3 脉冲宽度调制	186	第9章 交流小信号模型	254
6.3.1 PWM 波形生成原理	187	9.1 平均模型的物理意义	254
6.3.2 PWM 的调制方式和相关术语	188	9.2 线性化模型	256
6.3.3 PWM 生成方法	190	9.3 变换器的交流小信号模型	257
6.4 交流滤波器设计	199	9.3.1 电感电压和电流的平均	258
练习题	205	9.3.2 电容电压和电流的平均	258
第7章 AC-AC 变换技术	208	9.3.3 输入电流的平均	259
7.1 性能指标	208	9.3.4 平均方法的一些讨论	259
7.2 交流控制器	208	9.3.5 摄动和线性化	260
7.2.1 开关控制	209	9.3.6 构造小信号等效电路模型	262
7.2.2 触发延迟角控制	209	9.3.7 交流小信号模型的传递函数	263
7.2.3 PWM 控制	217	9.4 状态空间平均模型	265
7.3 周波变换器	218	练习题	267
7.3.1 单相周波变换器	218	第10章 几种应用设计举例	268
7.3.2 三相周波变换器	219	10.1 小灵通基站的电源设计	268
练习题	222	10.1.1 技术指标	268
第8章 软开关变换器	223	10.1.2 基于 UC3846 的电源设计	268
8.1 软开关的概念	223	10.2 直流电动机调速	279
8.2 软开关技术的实现及其类型	224	10.2.1 专用集成电路 UC3637 控制器的	
8.3 谐振电路	226	电路设计	279
8.3.1 串联谐振电路	226	10.2.2 主电路设计	281
8.3.2 电压型串联谐振式逆变器	229	10.3 基于 DSP 的直流电动机弱磁调速	
8.3.3 串联负载串联谐振 DC-DC 变换		示例	283
器	230	10.3.1 性能指标	283
8.3.4 并联谐振电路	235	10.3.2 系统组成	283
8.3.5 并联负载串联谐振 DC-DC 变换		10.3.3 直流电动机的调速方法	284
器	235	10.3.4 功率电路的结构设计	284
8.3.6 E 类变换器	237	10.3.5 IGBT 模块及驱动	285
8.4 准谐振和多谐振变换器	238	10.3.6 控制电路设计	285
8.4.1 零电流开关准谐振变换器	239	10.3.7 控制系统软件设计	288
8.4.2 多谐振开关变换器	241	10.4 高频弧焊的电源设计	292
8.5 软开关的 PWM 技术	244	10.4.1 技术指标	293
8.5.1 零电流 PWM 变换器	245	10.4.2 主电路设计	293
8.5.2 零电压 PWM 变换器	247	10.4.3 控制电路设计	297
8.6 零电压/电流转换 PWM 变换器	250	参考文献	300
练习题	253		

第 1 章 变换器概述

电力电子技术就是用电力半导体器件组合成合适形式的控制技术。本章全面地叙述现代电力电子技术的主要内容，从变换器的分类出发，介绍了变换器的工作原理及其主要部件——电感、电容和变压器等的基本特点，给出了电容和电感与电力电子器件连接的要求，对于变换器的指标和保护也作了简单的叙述。

晶闸管的出现标志着电力电子技术的诞生，它以电子学、自动控制等学科为前导，广泛应用于各种功率变换装置中。电能是现代工业的基础，电能必须变换成其他形式的能量如热能、光能、声能和机械能，才能为人类所应用，电能几乎应用于现代人类生活的各个方面。提高电能的应用效率具有巨大的效益，电力电子的研究目的就是改善电能应用的质量。发电、输电、配电以不同的电压形式满足用户的应用需要，不同电压形式的电能变换需要不同的控制技术和变换技术。电力电子（Power Electronics）的研究重点是电能变换、变换效率和能量控制。

电力电子技术（Power Electronics Technology）是研究电能变换原理及功率变换装置的综合性学科，包括电压、电流、频率和波形变换，介于当代最活跃的电子与自动控制这两门学科之间，涉及电子学、自动控制原理和计算机技术等学科。电力电子技术主要是电力半导体器件及其应用技术，随着电子技术的不断发展，新器件的不断出现，控制技术和微电子技术使器件向高频化、小型化和智能化方向发展，电力电子技术已成为推动工业、农业和国防工业发展的重要学科。

电力电子技术与信息电子技术的主要不同就是效率问题，对于信息处理电路来说，效率大于 15% 就可以接受；而对于电力电子技术而言，大功率装置效率低于 85% 就无法忍受。目前能源问题已是我国面临的主要问题之一，提高电源变换效率是电力电子工程师的主要任务。

电力电子技术的发展方向是高频、高效、高功率密度和智能化，最终使人们进入电能变换和频率变换更加自由的时代，并充分发挥其节能、降耗和提高装置工作性能的作用。现代电力电子技术将成为跨世纪的主导技术。

功率半导体器件是现代电力电子技术（Modern Power Electronics Technology）的基础，它的应用范围非常广泛，从毫瓦级的个人无线通信设备，到百万千瓦的高压直流输电（High Voltage DC Transmission）系统。电力电子技术的应用领域主要有：

- 1) 大功率直流电源。它的发展主要以提高单机容量和增加效率为主要目标。
- 2) 电机控制。无论是交流电机还是直流电机均采用电力电子技术来完成电机的速度、转矩、跟随性等控制，但目前更多的是研究直流调速不能涉及的应用领域。
- 3) 高压直流输电。
- 4) 电源变换。它的发展主要以增加效率和提高控制性能为主要目标，如电焊机、电磁感应加热、电动机车、电动汽车、电镀电源、电冰箱、洗衣机等控制。

5) 无功功率补偿。

1.1 简单的变换器

如果设计一个直流电源，从 12V 变为 3.3V，采用图 1-1a 所示的电路，即分压器，列出公式

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{3.3}{12}$$

若 $R_1 = 1\text{k}\Omega$ ，可以算出 $R_2 \approx 0.3793\text{k}\Omega$ ，运用电工学中所学的知识，可得到所设计的电源等效内阻为

$$R_s = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 0.275\text{k}\Omega$$

如图 1-1b 所示，显然这个电源在没有电流输出时，其输出电压为 3.3V；有电流输出时，其输出电压为 $V_o = 3.3 - 275I_o$ ， I_o 为输出电流或负载电流。

可以看出，随着电流的增加，输出电压线性下降，当输出电流为 12mA 时，所设计的电源输出电压为零。也就是说，这个电源对负载变化没有调节能力。

理想电压源输出电压不会随输出电流的增大而下降，也就是说输出电压对负载变化应该具有 100% 的调节能能，从电路角度看，即电源的等效内阻为零。

从效率方面看，当这个电路的输出电流为零时，电路损耗 $V_s^2 / (R_1 + R_2) = 104\text{mW}$ ，这些能量通过电阻转化为热能。当输出电流为 5mA 时，输出功率 $P_o = V_o I_o = 9.6\text{mW}$ ，此时输出电压为 1.925V，流过 R_1 的电流为 $V_o / R_2 + 5 = 10.07\text{mA}$ ， R_1 损耗 101mW， R_2 损耗 9.7mW，共损耗 110.7mW，电源效率约为 7.9%，效率太低。

既然分压器作为电源，输出电压特性太软，并且效率太低，此时用射极跟随器组成的线性电源，如图 1-1c 所示， R_1 、 R_2 作为晶体管的偏置电路，其输出电压总是跟随晶体管基极电压 V_b ， R_L 为负载电阻，其等效电路如图 1-1b 所示，电源等效内阻为

$$R_s = R_e \parallel \frac{R_1 \parallel R_2 + r_{be}}{1 + \beta} \quad (1-1)$$

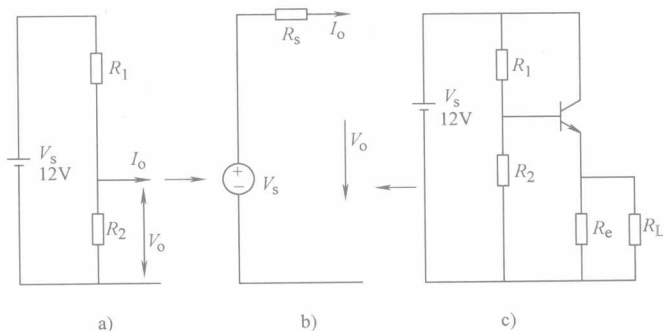


图 1-1 分压器、电压跟随器及等效电路

由于晶体管的电流放大倍数 $\beta \gg 1$ ，其等效电阻较分压器要小得多，因此输出电压变化要小于分压器。

电路中除了电阻损耗外，另附加了晶体管损耗，晶体管损耗为

$$P_{\text{loss}} = (V_S - V_O)I_O \quad (1-2)$$

在大功率应用中，大量的能量损耗在晶体管上，这些热量必须通过散热器散掉，其效率也很低。

通过上述分析，可以看出变换器必须考虑至少两个方面的问题：一是输出电压的稳定问题；二是变换的效率问题。电源变换电路和信号电路的根本区别就是效率问题，信号电路中基本不考虑效率问题或者考虑很少，但电源变换电路中效率问题是至关重要的，效率很低的变换电路几乎没有应用价值。

理想的变换电路如图 1-2 所示，用开关代替晶体管，这个开关可以是 GTR、电力 MOSFET、SCR 或者 IGBT（在后续章节将专门谈到），这些开关工作在饱和导通和截止两种状态，周期性地导通和截止形成了方波电压，方波电压通过滤波后得到直流电压，在周期恒定时，控制导通时间就可控制输出电压。假定开关是理想开关，则损耗为零。当然由于分布参数的影响，功率开关也不是理想开关，总有损耗存在，但效率大大增加，这就是现代电力电子技术中采用的开关工作模式。现代电力电子技术中的所有半导体器件都工作于饱和导通和截止两种工作状态，极力避免工作于放大状态，这也是和信号电路的又一本质区别。

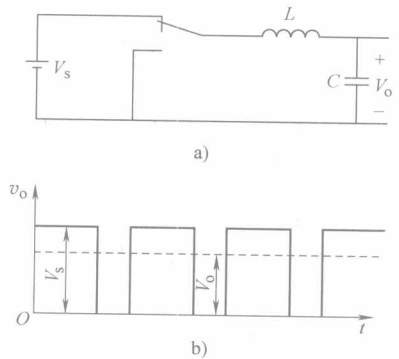


图 1-2 开关电源及其输出波形

1.2 理想开关和实际开关

将电力高效地变换需要开关，所谓理想开关究竟是什么？一般认为满足如下条件的就是理想开关：

- 1) 开关处于关断状态时能够承受较高的端电压，并且漏电流为零。
- 2) 开关处于导通状态时能够流过大电流，并且此时端电压（导通电压）为零。
- 3) 导通、关断状态切换时所需的开关时间为零。
- 4) 即使反复使用开关也不老化。
- 5) 小信号也能控制导通、关断，对信号延迟时间为零。

目前电力半导体器件不是理想器件，实际开关特性：

- 1) 关断时能承受的端电压是有限的（目前最高为 12kV），关断时的阻抗也不是无穷大，总有漏电流流过，产生关断损耗。
- 2) 导通时能够流过的电流是有限的（目前最大为 4 ~ 6kA），导通时阻抗也不为零，正向导通电压和电流的乘积产生导通损耗，随着技术进步，导通损耗正在减少。
- 3) 从关断到导通以及从导通到关断的时间也不是零，这时的电压和电流乘积产生开关损耗。

由于端电压有限，所以在需要耐高压时，需要将电力半导体器件串联；同时由于流过的最大电流有限，在需要流过大电流时，需要将电力半导体器件并联。详细的电力半导体器件将在第 3 章介绍。

需要指出的是：采用理想开关并不是可以解决一切问题。例如，如果出现了理想开关，也是只解决了损耗问题，与此同时会面临新的问题，如由于理想开关在零时间内完成开通和关断，即零时间强制切换大电流， di/dt 将非常大，由于分布电感会产生大的过电压，因此抑制这个过电压的安装技术是非常重要的。

1.3 变换器的分类

图 1-3 为一个单输入单输出变换器，电源可以是直流，也可以是交流；可以是电压源，也可以是电流源；负载可以是 L 、 R 或 C ，也可以是有源负载或者是把电能转化成其他形式能量的装置； V_c 是具有输出变量特征的控制信号，输入和输出侧的电压或电流波形可以单相，也可以是三相或多相形式，变换器由开关、电感、电容和变压器组成，开关包含两端开关（如二极管）和三端开关（如晶闸管）。

为了方便分析，假定这些器件都是理想器件，即具有线性、非时变特征，开关的电压和电流容量满足要求。

电力电子变换器根据输入和输出电源特征分为 4 大类：

- 1) DC-AC 变换器。
- 2) AC-DC 变换器。
- 3) DC-DC 变换器。
- 4) AC-AC 变换器。

通常用大写字母表示（如 DC-AC、AC-DC 等），有时也用小写字母表示（如 dc-dc、ac-dc 等），两者并无差别。

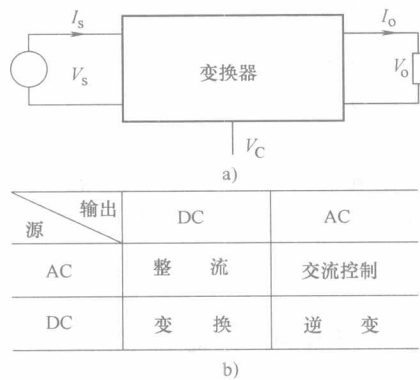


图 1-3 变换器及其分类

1.3.1 DC-AC 变换器——逆变器

将直流电源变换成一个交流电源（单相或多相）称之为逆变，这种装置称为逆变器（Inverter）。

基本电路如图 1-4a 所示，通过采用一个开关把直流电源变换成低频或高频交流源，输出波形为脉动直流波形，输出波形经过滤波电路整形形成希望的波形，一般希望输出为正弦波形。

三相输出通过采用 3 个开关完成，如图 1-4b 所示。3 个开关轮流导通 120° ，输出三相 120° 直流脉动波形。

交流电的频率、幅度大小和相位是交流电的 3 要素，使用电力电子技术如何自由地变换 3 要素，是 DC-AC 变换技术研究的主要内容。

DC-AC 变换器应用范围很广，如飞机和空间站电源、UPS、闪光灯充电、太阳能发电、交流电机调速、变速恒频电源和感应加热电源等，它们输出交流频率从 50Hz 到 1MHz 不等。

DC-AC 变换技术将在第 6 章介绍。

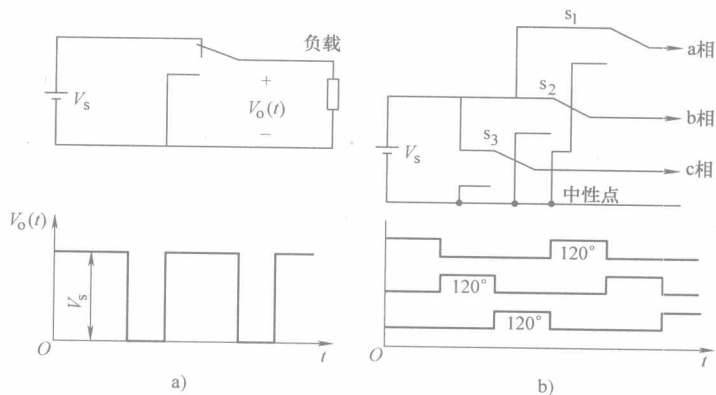


图 1-4 基本的单相或三相 DC-AC 变换电路

1.3.2 AC-DC 变换器——整流器

将单相或多相交流电源变换成一个直流电源称之为整流，这种装置称为整流器 (Rectifier)。

基本电路如图 1-5a、b 所示。图 1-5a 中交流电源通过二极管整流，二极管阳极承受正电压时导通，承受负电压时截止，因此称二极管为不可控或极性控制开关。二极管的波形包含交流成分和直流成分，交流成分称为纹波，因此在二极管之后需要 LC 滤波电路。

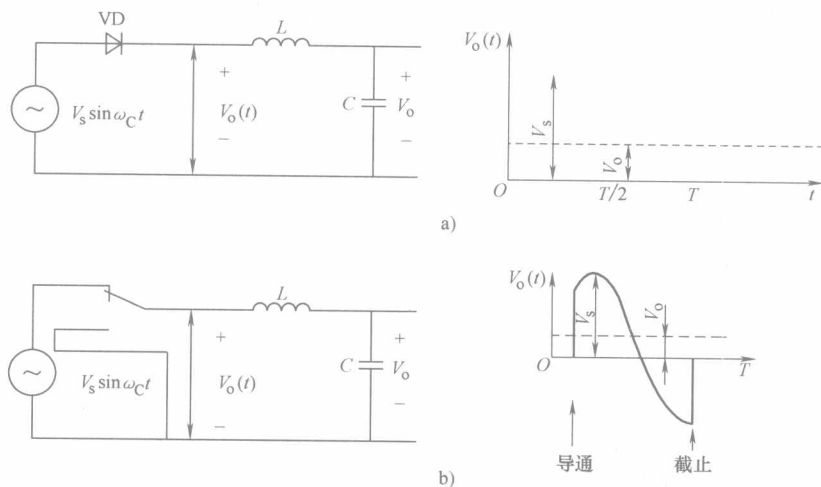


图 1-5 两种整流电路

图 1-5b 中用开关取代了二极管，其主要特点是可以在输入交流波形的任何时刻进行开关，而不是像二极管那样阳极正电压时导通负电压时截止。因此，可以控制输出电压的交流分量和直流分量， LC 滤波电路仍然需要。

AC-DC 变换器的应用范围很广，典型的如电池充电、直流电机驱动、高压直流输电和风力发电等。不可控整流和可控整流将在第 4 章介绍。

1.3.3 DC-DC 变换器

将直流电源变换成一路或多路直流电源称之为 DC-DC 变换。图 1-1 实际上是一个 DC-DC 变换器。DC-DC 变换器也可以由 DC-AC 变换器和 AC-DC 变换器串联取得，输入直流电压首先逆变为高频的 AC，接着把 AC 通过整流变换成 DC，如图 1-6 所示。整流电路用二极管或者用开关器件，用开关器件整流称之为同步整流。

在 DC-DC 变换器设计中开关频率起着重要的作用，频率提高可以减轻体积重量，如果需要输入和输出隔离，也可以减小变压器的重量，同时提高输入和输出电压的变化范围。

主要应用有电能传输、高性能调节电源和直流电机驱动（又称为斩波）等。DC-DC 变换将在第 5 章介绍。

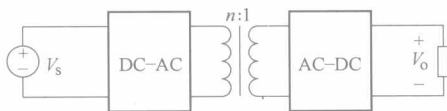


图 1-6 具有隔离变压器的 DC-DC 变换器

1.3.4 AC-AC 变换器

将一个交流电源（单相或多相）变换成另一个交流电源（单相或多相，同频率或不同频率）称为 AC-AC 变换。AC-AC 变换输出频率低于输入电压频率的变换器称为周波变流器（Cyclo-converter）。周波变流器输出频率一般是输入电源频率的几分之一，通常应用于大功率的工业领域。电源频率和输出频率相同的 AC-AC 变换器称为交流控制器。

AC-DC 变换器的基本电路如图 1-7 所示，其输出频率与电源频率相同，在输入电源波形的每半个周期结束时关断开关，开关时刻决定了输出电压波形的形状。

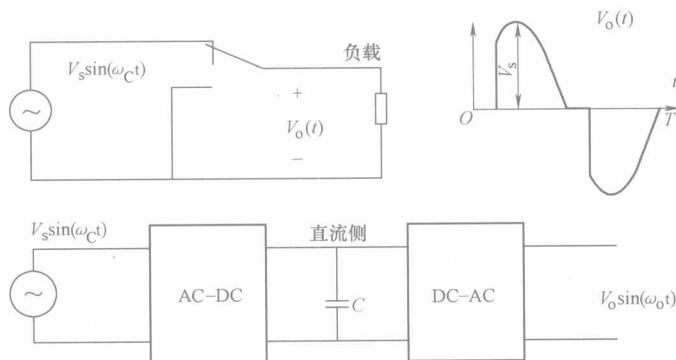


图 1-7 基本的 AC-AC 变换和 DC-Link AC-AC 变换

另一种 AC-AC 变换器由 AC-DC 变换器和 DC-AC 变换器串联而成，从而得到希望的输出电压幅度、频率和相数。这样的 AC-AC 变换器称为直流侧 AC-AC 变换器，这种变换器输出频率与输入电源频率无关。

主要应用领域有调光器、调压器、交流电机调速、固态继电器和无功调节（VAR）等。主要内容将在第 7 章介绍。

1.3.5 软开关与硬开关

提高变换器工作频率可以减小变换器体积，但增加工作频率会大大增加变换器损耗，降

低变换器效率，为了同时提高变换器效率和减小变换器体积，软开关技术应运而生。

所谓软开关技术，是指电力电子器件导通或关断时损耗为零的技术，与此相应，若导通或关断时损耗不为零则为硬开关。软开关技术将在第8章介绍。

1.4 变换器的组成要素

变换器的组成要素有控制器、驱动器、电阻器、电感器、电容器、变压器和开关器件。

1.4.1 电阻

在现代电力电子器件中，电阻是唯一的能量损耗元件，欧姆定律定义了电阻、电压和电流的关系

$$v = iR \quad (1-3)$$

电阻作为单独的一个元件，在变换器中是不存在的，但存在于负载和寄生参数中。例如，电源的等效电阻（源电阻），电感器、变压器和电机中的线圈电阻，导线电阻和电容的等效电阻等。

电阻的大小与流过电阻电流的频率无关，但是，导体中的线电阻与频率有关，随着流过电阻的电流频率增大，线电阻增大。这是由于电流流过导线时，导线周围产生磁场，磁场强度 H （注意：由于历史习惯，表示磁场强弱的物理量 B 称为磁感应强度， $B = \mu H$ ）与距离的平方成反比，因此在导线中心磁场强度最大，导线中心的感抗比靠近导线表面的区域大，电流流动趋向电抗小的区域，电流向导体表面集中，这就相当于增加了导线的电阻率，这种现象称为集肤效应（Skin Effect），集肤深度与频率的平方根成反比。解决集肤效应的办法就是增加导体的表面积，即用一束细直径导体代替大直径导体，这一束细导体称为多线头导体。

1.4.2 电感

电感是一个储存能量的元件，除了作为一个元件存在于变换器中，同时还有寄生电感，如负载的寄生电感，配电系统中导线的自感、变压器和电机的漏感。

电感和电压、电流的关系为

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \Rightarrow i_L = I_L(0) + \frac{1}{L} \int_0^t v_L dt \quad (1-4)$$

式中， $I_L(0)$ 为电感中的初始电流。

在 dt 时间内，流过一个电感电流可以认为是常数，这是因为

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_L}{L} \approx 0 \quad (1-5)$$

因此，可以认为在 dt 时间内，大电感的模型可用电流源代替。

1.4.3 电容

与电感一样，电容也是一个储存能量的元件，在变换器中作为一个元件存在，同时还存在寄生电容，如变压器中的匝间电容和层间电容，二极管、晶体管、晶闸管等内部的固有电

容。

电容和电压、电流的关系为

$$i_c = C \frac{dv_c}{dt} \Rightarrow v_c = V_c(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt \quad (1-6)$$

式中, $V_c(0)$ 为电容中的初始电压。

当以恒定电流 I_s 充电时, 式 (1-6) 可写为

$$v_c = V_c(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt = V_c(0) + \frac{I_s}{C} t$$

即恒流源向电容充电时, 电容两端电压线性增加。

在 dt 时间内, 大电容的电压可以认为是常数, 这是因为

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{i_c}{C} \approx 0 \quad (1-7)$$

因此, 可以认为在 dt 时间内, 大电容的模型可以用电压源代替。

1.4.4 电源

变换器的能量由输入电源提供, 电源可以有多种划分方法, 如电压源、电流源; 直流电源、交流电源。基于交流电源的相数多少, 交流电源可进一步划分为单相交流源、三相交流源和多相交流源。

1. 电压源和电流源

电压源和电流源的等效电路如图 1-8 所示, $v_s(t)$ 和 $i_s(t)$ 分别为电源内部的电压和电流, Z_s 为源阻抗, 由电阻和电感组成。

电压源端电压是流过其电流的函数

$$v_t(t) = v_s(t) - Z_s i_s(t) \quad (1-8)$$

一般情况下电流流出正端子, 但有时电流会反向流动, 因此, 端电压在幅度和波形上与电源内部电压不同。

理想电压源的源阻抗为零, 因此, 其端电压和电流无关。

电流源流出的电流与其端电压有关:

$$i_t(t) = i_s(t) - \frac{v_s(t)}{Z_s} \quad (1-9)$$

端电压为正或负, 端电流在幅度和波形上与电源内部电流不同。理想电流源的源阻抗无穷大, 因此流出其端子的电流与端电压无关。

2. 直流电源和交流电源

总是提供恒定幅度电压的电源称为直流电压源 (DC Voltage Source)。电池是最接近的理想直流电压源, 预先充好电的大容量电容也是直流电压源, 电容值越大储存的电荷越多, 供电时间越长。电池可以认为是一个容量非常大的电容。

在自然界中不存在电流源, 然而, 一个预先加上电压的大电感可以认为是一个电流源, 必须注意电流源必须用闭合电路储藏电能, 而电池和电容可以是开路。一个实际的电流源可以通过采用一个交流源或直流源串联一个大电感得到。

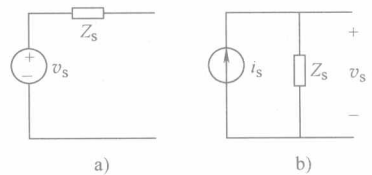


图 1-8 电压源和电流源
a) 电压源 b) 电流源

例题 利用 24V 电池，设计一个 20A 的恒定电流源，向 20kHz 的变换器供电，电流波动小于 1%。

解：一个有电压源的大电感闭合回路可以认为是一个电流源，恒流源电流大小取决于电路总回路电阻，包括导线电阻、电感电阻、负载电阻和电池内阻等，电流源如图 1-9 所示，稳态时回路总电阻 R ：

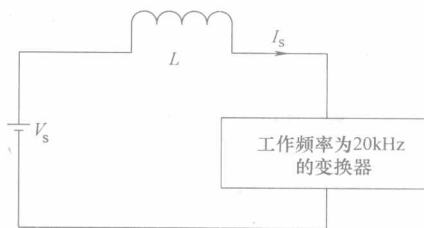


图 1-9

$$I_s = \frac{V}{R} = \frac{24}{R} = 20A, R = 1.2\Omega$$

即导线电阻、电感电阻、负载电阻、电池内阻之和等于 1.2Ω。

$$\Delta I = 0.01I_s, T = \frac{1}{f} = \frac{1}{20000}s = 50 \times 10^{-6}s$$

$$V_s = L \frac{di}{dt} = L \frac{\Delta I_s}{\Delta t} = L \frac{\Delta I_s}{T}$$

$$L = \frac{V_s T}{\Delta I_s} = \frac{24 \times 50 \times 10^{-6}}{0.01 \times 20} H = 6000 \times 10^{-6} H = 6mH$$

电压波形随时间幅度周期性变化的电源称为交流电压源 (AC Voltage Source)。在自然界中不存在交流电流源，一个实际的交流电流源可以通过一个交流源串联一个大电感得到。

正弦波是基本的交流波形，任何形状的周期性波形都可以表达为一系列正弦波之和，正如在高等数学中所学的傅里叶级数所讲述的那样

$$v_s(t) = \bar{V}_s + \sum_{n=1}^{\infty} V_{sn} \sin(n\omega_s t + \theta_n)$$

$$\omega_s = \frac{2\pi}{T_s} \tag{1-10}$$

式中， ω_s 为交流源频率，单位为弧度； T_s 为周期， t 为时间，单位为秒； \bar{V}_s 为波形的直流分量，也是每个周期的电压平均值；正弦的 $n\omega_s$ 称为 n 次谐波 (Harmonic)，电压方均根值 (Root-Mean-Square) 可以通过谐波计算

$$\tilde{V}_s = \bar{V}_s + \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \tilde{V}_{sn}^2} \tag{1-11}$$

当负载为电阻时，其输出平均功率为

$$P_s = \frac{\bar{V}_s^2}{R} + \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\tilde{V}_{sn}^2}{R}} \tag{1-12}$$

多相交流源输出波形相同，只是在相位上有移相，相互移相 $2\pi/p$ ， p 为相数。例如，三相正弦交流电源由 3 个互差 $2\pi/3 = 120^\circ$ 的同样正弦电压波形组成，多相电源传输功率大。

三相四线制交流供电，提供 3 个相电压和一个中性点 (Neutral the Common)，这种联结称为星形联结或 Y 联结；三相三线供电，提供 3 个线电压，这种联结称为三角形联结，如图 1-10 所示。

在我国，单相和三相供电电压分别为 220V 和 380V，50Hz；在美

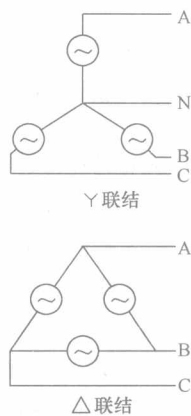


图 1-10 星星联结和三角形联结