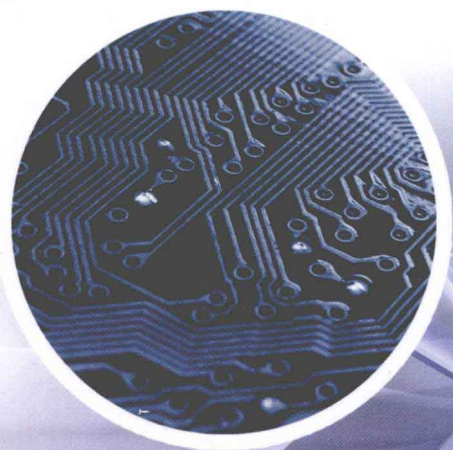


XIANDAI DIANLI DIANZI
JISHU YU YINGYONG

现代电力电子 技术与应用

张 淼 冯焱生 编著



 中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

现代电力电子 技术与应用

张 淼 冯焱生 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

电力电子技术是利用电力电子器件对电能进行控制和转换的学科,它包括电力电子器件、变流电路和控制电路3个部分,是电力、电子、控制三大电气工程技术领域之间的交叉学科,在节能、减小环境污染、改善工作条件等方面有着重要的作用。

本书根据高校的教学要求,由作者根据多年的教学经验和科研成果的总结编写而成。本书阐述了现代电力电子技术的基本内容,保留了经典电力电子技术部分内容,全书分11章,可分为五大单元,分别介绍现代电力电子技术的分析方法、功率器件、换流变换技术、SPWM产生及控制方法与典型应用。

本书结构合理,内容新颖,阐述清楚,可作为电力电子和电力传动专业本科和研究生教材,也可作为从事本专业工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代电力电子技术与应用/张森,冯焱生编著. —北京:中国电力出版社,2010.10

ISBN 978-7-5123-0920-3

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第189806号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011年2月第一版 2011年2月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 13.25印张 318千字

印数0001—3000册 定价28.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



前 言

当今世界能源消耗增长迅速，其中电力能源约占40%，而电力能源中有40%是经过电力电子设备的转换才被使用。预计十年后，电力能源中的80%要经过电力电子设备的转换才能被使用。电力电子技术是利用电力电子器件对电能进行控制和转换的学科，它包括电力电子器件、变流电路和控制电路3个部分，是电力、电子、控制三大电气工程技术领域之间的交叉学科，在节能、减小环境污染、改善工作条件等方面有着重要的作用。

本书针对当前电力电子技术的发展特点，依据应用型人才培养目标，注重教学科学性、实用性、通用性、新颖性，力求做到理论联系实际，加强基础知识、突出时代信息，注重培养学生的实践、分析电路和解决问题的能力。本书着重阐述了各种电力电子电路的建模方法，介绍了各种电能变换电路的基本工作原理、电路结构、波形分析参数计算方法、电气性能等。

本书对传统电力电子技术教材的内容及所编章节顺序进行了调整，删减了传统电力电子技术教材中部分过时的内容，增加了电力电子技术领域的最新成果。全书可分为五大部分：第一部分由第1章和第4章组成，介绍了现代电力电子技术开关控制基本概念和电力电子开关电路的建模分析方法；第二部分由第2章和第3章组成，介绍了电路运行条件对功率器件性能的影响，开关状态下电力电子器件的功耗，以及减少开关损耗的方法和软开关技术；第三部分由第5~7章组成，介绍了换流变换电路的工作原理和特点，分章阐述了整流电路、交流变换电路、直流变换电路(DC/DC)和逆变电路的基本工作原理；第四部分由第8~10章组成，介绍了SPWM产生、控制方法及其在换流变换电路中的应用，分章阐述了SPWM的特点和产生方法，高频逆变器的工作原理和软开关技术在高频逆变器中的应用和提高高频逆变器效率的方法，以及自励式有源整流器(APFC)、PWM整流器和有源电力滤波器的工作原理；第五部分由第11章组成，介

绍了 UPS 不间断电源和各类电机调速器的基本结构和工作原理, 以及电力电子技术在电力系统和太阳能发电控制技术中的应用, 并对电力电子装置应用过程中所引起的电力公害及其抑制方法做了介绍。

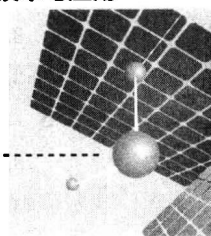
为了便于教师讲授和学生学习, 本书还融入适当的例题、习题和思考题, 并附有习题答案。

本书由广东工业大学张森和冯焱生教授主编, 全书共 11 章, 其中第 1~4 章和第 9 章由冯焱生教授编写, 第 7 章由冯焱生和张森教授编写; 第 5、6、8、10、11 章由张森教授编写。

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, 同时得到了广东轻工职业技术学院赵慧老师和广东工业大学韦丽兴、韩光、李运德、孙兴中、刘金山、崔国祥、刘文等同学的帮助, 在此谨表衷心的感谢。由于电力电子技术发展迅速, 而作者水平有限, 其中疏误之处, 敬请读者指正。

作者

目 录



前言

第 1 章 现代电力电子技术学习的新概念和要点	1
1.1 开关控制的概念	1
1.2 开关电路的过渡过程分析	3
第 2 章 电力半导体器件原理和特性概述	5
2.1 电力电子器件 (大容量)	5
2.1.1 二极管	6
2.1.2 SCR	7
2.1.3 GTO	8
2.2 电力电子器件 (中、小容量)	9
2.2.1 GTR	10
2.2.2 P-MOSFET	10
2.2.3 IGBT	10
2.2.4 控制极驱动电路	11
2.3 功率模块	12
2.3.1 逆导 SCR	12
2.3.2 双向晶闸管	13
2.3.3 智能化模块——IPM	13
习题和思考题	13
第 3 章 电力电子器件处于开关状态下的功耗研究	14
3.1 开关损耗的概念	14
3.1.1 开关时间对功耗的影响	15
3.1.2 二极管恢复阻断时间大小对功耗产生影响分析	16
3.1.3 分布电感和电容产生的功耗	16
3.1.4 电压电流轨迹对功耗的影响	17
3.2 如何减少开关损耗	17
3.2.1 软开关和硬开关的区别	17

3.2.2	串联电抗、并联电容减少功耗	18
3.2.3	反并联二极管	18
3.3	软开关电路的实现	19
3.3.1	高频逆变器概述	19
3.3.2	ZCS 型谐振式变换器	20
3.3.3	ZVS 型谐振式变换器	21
3.3.4	部分谐振变换	22
3.4	高频软开关的最新进展	23
3.4.1	谐振换流型桥臂	23
3.4.2	部分谐振 PWM 开关	24
	习题和思考题	25
第 4 章	电力电子电路的分析方法	26
4.1	电力电子电路的数学模型	26
4.2	含开关的电路分析	27
4.2.1	简单电路	27
4.2.2	基于状态变量的分析方法	29
4.3	电力电子电路的分析	32
4.4	平均化数模分析法	34
4.4.1	状态空间平均化数模的推导	35
4.4.2	线性化数模的分析	36
	习题和思考题	38
第 5 章	整流电路	39
5.1	单相半波相控整流电路	39
5.2	单相全波整流电路	42
5.2.1	单相桥式半控整流电路	42
5.2.2	单相桥式全控整流电路	45
5.3	三相整流电路	49
5.3.1	三相半波可控整流	49
5.3.2	三相桥式全控整流电路	53
5.4	变压器漏感对整流电路的影响	60
	习题和思考题	63
第 6 章	交流调压与交交变频 (AC/AC 变换)	65
6.1	交流调压	65
6.1.1	相控调压	65
6.1.2	斩控调压	69
6.2	交交变频	78

6.2.1	相控式交交变频	79
6.2.2	矩阵变换器	82
6.2.3	新型控制电路	87
	习题和思考题	87
第7章	DC-DC的控制	88
7.1	直流开关、斩波器	88
7.1.1	斩波器的基础理论	88
7.1.2	降压型斩波器	90
7.1.3	升压型斩波器	90
7.2	含高频变压器的DC-DC变换器	92
7.2.1	反激式DC-DC变换器	93
7.2.2	自激RCC变换器	95
7.2.3	正激式变换器	96
	习题和思考题	97
第8章	逆变器	98
8.1	有源逆变电路	98
8.1.1	有源逆变的基本概念	98
8.1.2	逆变角的确定	100
8.1.3	有源逆变电路的分析	100
8.1.4	逆变角的限制与逆变失败	103
8.2	无源逆变电路	105
8.2.1	电压型逆变电路	105
8.2.2	三相逆变电路	108
8.3	电流型逆变电路	110
8.3.1	单相电流型逆变电路	110
8.3.2	三相电流型逆变电路	112
8.4	逆变器输出电压波形的改善	113
8.4.1	逆变器产生的高次谐波	113
8.4.2	矩形波逆变器的波形改善	113
8.4.3	PWM对逆变器输出波形改善的影响	117
8.5	SPWM产生方法	118
8.5.1	SPWM的调制方式	118
8.5.2	SPWM的调制方式	119
8.5.3	SPWM的谐波特性	121
8.5.4	三相PWM的优化	124
	习题和思考题	132

第 9 章 高频逆变器	133
9.1 高频逆变器的特点	133
9.2 不同的电路形式	135
9.3 单元件高频逆变器	136
9.4 二元件高频逆变器	138
9.4.1 电压型电流谐振半桥式逆变器	139
9.4.2 电压型 ZCS 桥式逆变器	140
9.5 高频全桥逆变器	142
9.5.1 电压型和电流型	142
9.5.2 电压型 ZCS 全桥逆变器	143
9.5.3 输出控制及提高输出功率方法	146
习题和思考题	147
第 10 章 有源整流器	148
10.1 自励式有源整流器	148
10.1.1 概述	148
10.1.2 有源整流器的工作原理	148
10.1.3 电感电流的控制方法	150
10.1.4 电流控制方法	150
10.1.5 有源整流器稳态和动态过程分析	151
10.1.6 有源整流器的波形分析	154
10.2 PWM 整流器	155
10.2.1 间接电流控制	157
10.2.2 直接电流控制	158
10.2.3 三相电压型 PWM 整流器	160
10.3 有源电力滤波器	162
10.3.1 有源电力滤波器的特点	163
10.3.2 有源电力滤波器主电路的结构	164
10.3.3 并联型有源滤波器工作原理	168
第 11 章 电力电子技术应用	174
11.1 电源控制领域——UPS 不间断电源	174
11.1.1 UPS 的分类	175
11.1.2 UPS 的主要性能指标	176
11.1.3 UPS 的基本电路和工作原理	177
11.2 电动机调速	183
11.2.1 在直流电动机调速中的应用	183
11.2.2 在交流电动机调速中应用综述	185
11.2.3 异步机变频调速的应用实例	187

11.2.4 PM 电动机变频调速驱动的应用	189
11.3 在电力系统中的应用	190
11.3.1 在电力系统调压中的应用	190
11.3.2 在太阳能发电中的应用	191
附录 部分习题和思考题答案	193
参考文献	202

第 1 章

现代电力电子技术学习的新概念和要点

1.1 开关控制的概念

一般都将电力电子定义为：电力，电子及其技术的综合，属于电力变换和电力开关技术的领域。大部分教科书都用一个倒 Δ 来表述电力电子，三角的左右两角分别为电子（元件、电路）和电力（电机和动力装置）、三角的另一角则表示控制（连续、离散控制）。

研究电力电子，第一要务是利用开关进行电力变换。例如：图 1-1 所示的直流调压电路，是简单地采用可变电阻进行调压，无需进行任何控制。而图 1-2 可用晶体管代替可变电阻进行调压。其特点是可通过晶体管的基极电流进行控制，除调压外，还可稳压。两者相同之处是都可以调压，但不同之处是前者能耗大且不可控；而后者损耗可控。在同样达到调压效果的情况下，可以利用开关管通过适当的控制减少功耗。在功耗减少的同时，当然冷却装置也大大节省。所以对现代电力电子技术必须好好学习，学会利用开关器件，特别是大功率电力电子装置。图 1-3 和图 1-4 分别为开关 S 反复通断电路及负荷上输出波形。

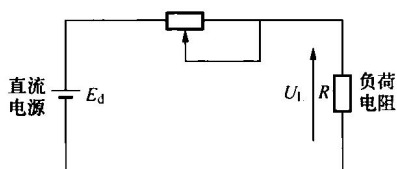


图 1-1 可变电阻调压

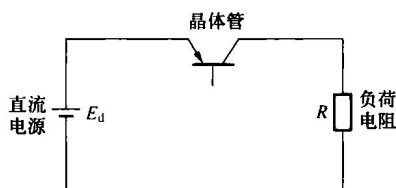


图 1-2 晶体管调压

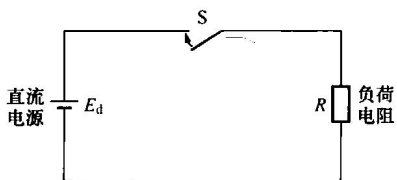


图 1-3 开关 S 反复通断电路

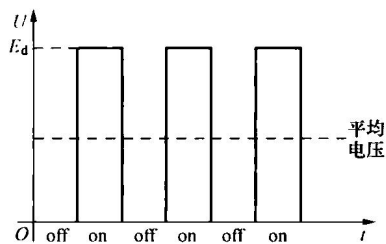


图 1-4 S 通断时负荷上的输出波形

设 S 闭合时间为 $t_{on}(s)$ ，打开时间为 $t_{off}(s)$ ，则负荷上的平均电压为

$$u_1 = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} E_d$$

改变 t_{on} 即可实现电压控制。这就给我们提出如下值得研讨的课题。

- (1) 控制开关 S 的通断需要大功率开关器件；
- (2) 负荷上电压的变化范围很大。

课题 (1) 的解决方法是选用大功率电力电子器件；

课题 (2) 由于输出电压是脉冲电压，电流不够平滑需用滤波电路，实际的开关电路如图 1-5 所示，增加滤波电感 L 和续流二极管 VD。

假设图 1-5 中晶体管和二极管是理想元件，即元件导通时电压降为 0，关断时其电阻为无穷大，图 1-6 为其导通和关闭时的等值电路，电路分析将在以后章节内详述。

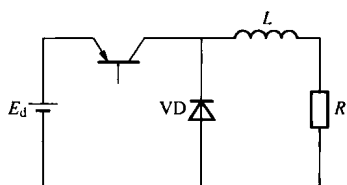


图 1-5 实际的开关电路

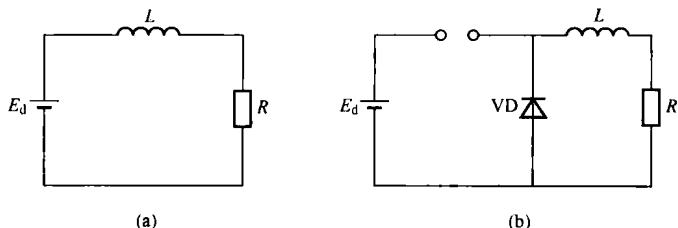


图 1-6 图 1-5 所示电路的等值电路
(a) 晶体管导通；(b) 晶体管关闭

在分析各种电力电子电路时，不可避免地会结合开关的通断状态进行分析、计算。电路中开关可能带来不同的拓扑组合模式。以图 1-6 为例，图 1-6 (a) 的电路我们命名为模式 1，图 1-6 (b) 命名为模式 2。

该电路如果作为负荷稳压电路，用晶体管很合适，但这时晶体管就不能作为开关来用了。因此，同一个电路拓扑用相位控制和开关控制意义大不一样，需加注意。

再举一个例子来说明。众所周知的单个晶体管放大器，如射极接地放大器，它可以把一个交流信号通过直流电源放大为另一个交流信号，其电路如图 1-7 所示。晶体管的 $U_{CE}-I_C$ 特性如图 1-8 所示。

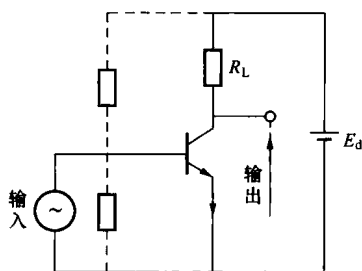


图 1-7 射极接地放大器

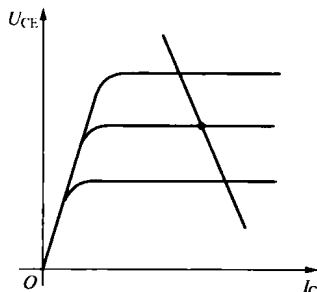


图 1-8 晶体管的 $U_{CE}-I_C$ 特性

由图 1-8 可见，工作点上的电流为 $E_d/2R_L$ ，负荷上消耗的功率 P_C 为

$$P_C = \frac{E_d \times E_d}{2R_L} = \frac{E_d^2}{2R_L} \quad (1-1)$$

负荷电阻上的交流电流振幅较小为 $E_d/2R_L$ 。

若输入信号为 $E_d \sin \omega t$ ，则负荷电阻上的功率亦可写成

$$p_L \leq R_L \left(\frac{E_d}{2R_L} \sin \omega t \right)^2 = \frac{E_d^2}{8R_L} (1 - \cos \omega t) \quad (1-2)$$

由式(1-2)可见,得到的平均功率 p_L 比较低,若要用这种电路其效率将会在 25% 以下。因此,把直流变为交流(或把交流变为另一频率的交流)常用开关电路有利得多。图 1-9 所示开关电路的开关 S1~S4 通断规律见表 1-1。

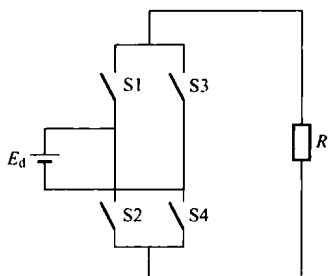


图 1-9 直流变交流的电路

表 1-1 开关通断规律

开关	状态			
	on	off	on	...
S1	on	off	on	...
S2	off	on	off	...
S3	off	on	off	...
S4	on	off	on	...

诚然,图 1-10 的波形距离我们所需的正弦波相差甚远;但从开关损耗(即功耗)的角度来看,其效率从理论上说可达 100%。因此,用于直-交变换最理想。

综上所述,用开关电路来实现电力变换,例如 AC/DC、DC/AC、DC/DC、AC/AC 等,从效率的角度看是最佳的,但还存在波形问题(接近正弦波)。这些问题需通过控制来解决。这就是本书拟从开关电路着手解决电路拓扑、电路分析及其应用(从系统角度)成为本书的指导思想和要点。

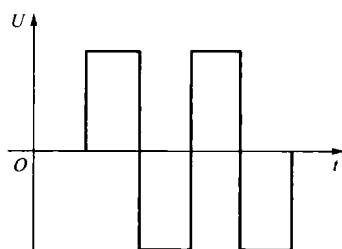


图 1-10 图 1-9 所示电路的输出电压波形

现今电力电子已被广泛应用,从大功率能量变换(如直流输电)到小功率家电(如空调、荧光灯、小家电等)。

当然从能量的角度研究电力能量变换(AC/DC, DC/DC)其内容是占相当大的份额,且有逐年上升的趋势,这是和电力电子技术发展密不可分的。

本书第 2 章将讲述电力电子器件,重点是从原理及能耗的角度进行分析,以后分章学习各种电力变换技术,如整流器(从交流变换为直流)、交流电压变换(只是交流电压的调节)、交流电压与频率变换(亦称环形整流、交交变频)、直流斩波(直流变换)、逆变器(由直流变为交流)等。

在电力电子电路的学习中还有一个重要课题是对过渡过程的分析,它对电力电子装置实际运行产生很大影响。本章先从图 1-5 这类简单电路进行电路过渡过程分析。

1.2 开关电路的过渡过程分析

在如图 1-5 所示电路中,设图 1-6 (a) 所示等值电路模式 1 导通时间为 T_1 秒,模式 2 关断时间为 T_2 秒,且以高速反复通断。晶体管稳态时的分析前面已学习过,现假设电阻为 R ,电感为 L ,晶体管和二极管在晶体管关断时电阻为无穷大,开通时电阻为 0。

下面进行该电路过渡过程的分析。

假设某一时间电路开始工作，则模式 1 和模式 2 电感上的电流分别为 i_1 和 i_2 。

开关反复进行通断，模式 1 开始时电感 L 上流过电流设为 i_0 ，则可列出模式 1 时的方程式，即

$$Ri_1 + L \frac{di_1}{dt} = E \quad (1-3)$$

考虑到 i_0 的初始条件，则有

$$i_1 = \frac{E}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}t}) + i_0 e^{-\frac{R}{L}t} \quad (1-4)$$

由于模式 1 的工作时间为 T_1 ，则模式 1 结束时设其电流为 $i_1(T_1)$ ，有

$$i_1(T_1) = \frac{E}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}T_1}) + i_0 e^{-\frac{R}{L}T_1} \quad (1-5)$$

该电流应为模式 2 电感 L 上流过的初始电流。模式 2 的方程可写为

$$Ri_1 + L \frac{di_1}{dt} = 0 \quad (1-6)$$

将式 (1-5) 代入式 (1-6)，可得电流 i_2 为

$$i_2 = i_1(T_1)e^{-\frac{R}{L}t} \quad (1-7)$$

前已假设模式 2 工作时间为 T_2 ，则模式 2 结束时的电流为 $i_2(T_2)$ ，亦即

$$i_2(T_2) = i_1(T_1)e^{-\frac{R}{L}T_2} \quad (1-8)$$

式 (1-8) 的电流实际是模式 1 电感上的电流初始值。

由于开关是高速通断，若考虑稳态则可令 $i_0 = i_2(T_2)$ ，即

$$i_0 = i_2(T_2) = i_1(T_1)e^{-\frac{R}{L}T_2} = \left[\frac{E}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}T_1}) + i_0 e^{-\frac{R}{L}T_1} \right] e^{-\frac{R}{L}T_2} \quad (1-9)$$

最后可求出稳态 i_0 为

$$i_0 = \frac{\frac{E}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}T_1})e^{-\frac{R}{L}T_2}}{1 - e^{-\frac{R}{L}(T_1+T_2)}} \quad (1-10)$$

则模式 1 电感上的电流 i_1 为

$$i_1 = \frac{E}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}t}) + \frac{\frac{E}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}T_1})e^{-\frac{R}{L}T_2}}{1 - e^{-\frac{R}{L}(T_1+T_2)}} e^{-\frac{R}{L}t} \quad (1-11)$$

模式 2 电感上的电流 i_2 为

$$i_2 = \frac{E}{R} \frac{1 - e^{-\frac{R}{L}T_2}}{1 - e^{-\frac{R}{L}(T_1+T_2)}} e^{-\frac{R}{L}t} \quad (1-12)$$

此外，可求出电阻上的电压为

$$U_1 = Ri_1$$

$$U_2 = Ri_2$$

电路的过渡过程分析相当复杂，电力电子工作者的任务是找出简单的分析推导方法，以提高电路设计的效率。

第 2 章

电力半导体器件原理和特性概述

由于电力电子本科教材和其他参考教材，都用较多篇幅对元件的原理和特性加以详述。本书拟从新的视点研究电力电子特性和应用，故只对元件工作原理的内容作一概述。大体分为两大类即大容量类和中（小）容量类，即使是小容量元件其电压和电流也比一般信号信息处理用电子元件电压、电流大得多，结构原理也有所不同，本书讲述的这些大、中、小容量元件统称电力电子元件或电力电子器件。

2.1 电力电子器件（大容量）

首先我们定义一下，什么叫电力电子器件。电力电子器件理想的开关伏安特性应如图 2-1 的 A、B 线所示。即 off（关断）状态元件不流过电流（A 线），而 on（导通）状态在理想情况下开关两端电压为零（B 线）。实际运行中的电力电子开关伏安特性则如图 2-1 的 A'、B' 线所示，off 状态流过微小的电流称为漏电流，特性如 A' 线。当从 off→on 时元件两端电压也不为零，称为通态压降（或管压降），当然该电压也很小，其实际伏安特性如图 B' 线。再看看开关通断时间，对于理想的开关，on 和 off 的切换是瞬时发生的，而实际上存在一定的切换时间，亦即从 on→off 称为关断时间，从 off→on 称为导通时间。

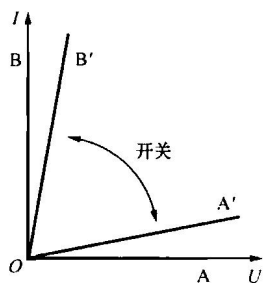


图 2-1 开关伏安特性

下面就电力电子家族的各种元件从控制通断的特点不同作一个分类。

电力电子器件是一种主要用于开关的大功率器件。从外部控制信号作用来区分可分为 3 类：①能控制通和断的元件；②只能控制导通的元件；③不能控制通断的元件。

既能控制导通又能控制关断的元件又称可自关断元件或全控元件，其代表的元件为 GTO（Gate Turn-Off Thyristor，门控晶闸管）；只能控制导通的元件称为半控元件，其代表的元件为 SCR（Silicon Controlled Rectifier，可控硅）；不能控制其通断的元件，其代表是二极管。

图 2-2 所示为电力电子元件的主要应用领域，其中高耐压、大容量的 SCR 和 GTO 最引人注目，但其缺点是开关速度慢，特别是 SCR（半控器件），但由于它耐压高、电流大，在电力系统许多领域仍有使用价值。另一类容量不太大，但开关特性速度快，故可用于高频领域，如 IGBT 和 MOSFET 等元件。

图 2-3 所示为各种电力电子元件的额定电流和额定电压。由图可见，半控器件中 SCR

的额定值最高；而全控元件中 GTO 的额定值最高，IGBT 次之。图 2-4 所示为各种电力电子元件的工作频率和容量的限制。开关的容量、开关速度、工作频率、特性是否优良、各种因素之间是存在一定矛盾的，应当综合考虑，不可追求单一指标。一般认为大功率器件的工作频率比较低。下面我们对主要元件分别简述之。

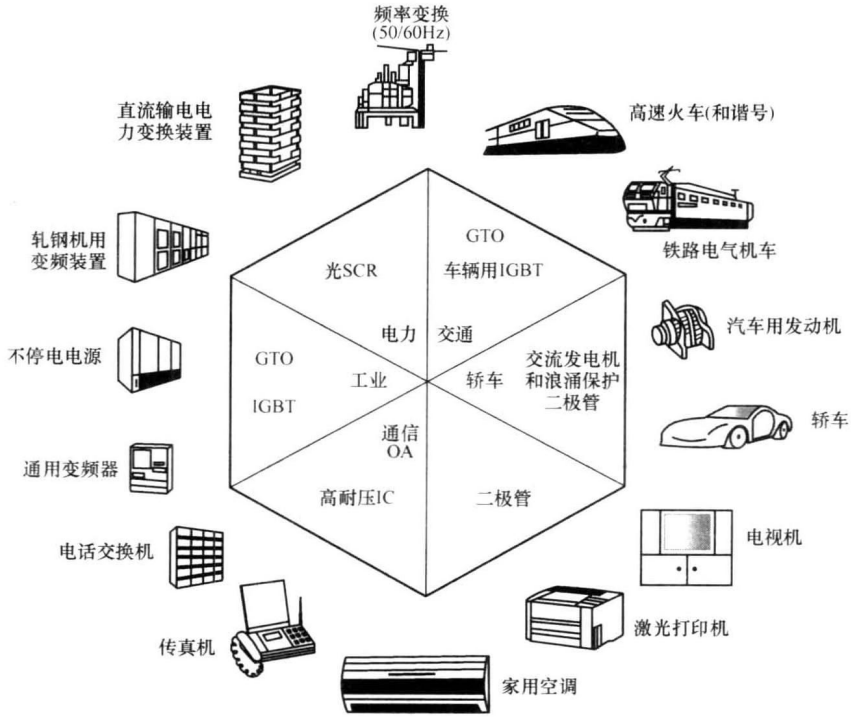


图 2-2 电力电子元件的主要应用领域

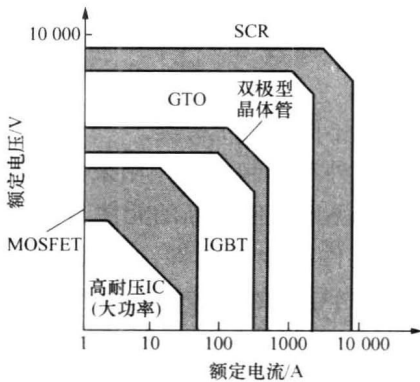


图 2-3 电力电子元件的额定电流和额定电压

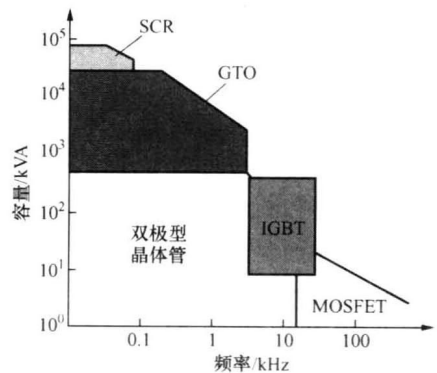


图 2-4 电力电子元件的工作频率和容量

2.1.1 二极管

二极管又称为整流管，工作原理与小功率二极管相同。其工作原理可描述成一个 PN 结，接正向电压时电流由 P 流向 N；接反向电压则不流过电流。图 2-5 所示为二极管的结

构、图形符号及伏安特性。

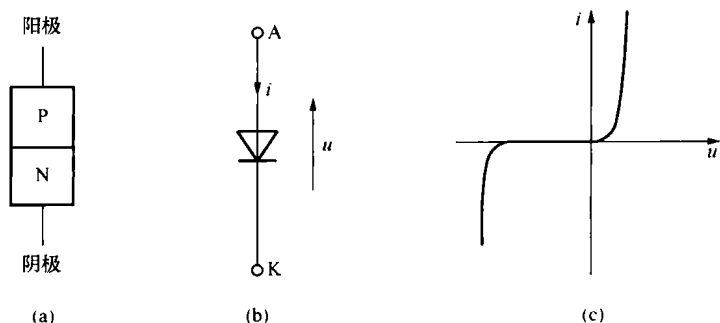


图 2-5 二极管

(a) 结构; (b) 图形符号; (c) 伏安特性

二极管的额定值有以下几方面: 反压, 额定电流、漏电流、正向管压降, 使用温度等。

二极管也可视为一个不由外部控制的开关, 仅是变换一下外部工作条件即达到正向导通、反向关断的特性。其功能主要是作为从交流变换为直流的整流器或有电感电路中的续流二极管。

2.1.2 SCR

SCR 又称晶闸管, 是一个由两个 PN 结构成的元件, 其结构图形符号及伏安特性如图 2-6 所示。它具有导通和关断两个状态。SCR 家族由很多种类的元件构成, 用得最普遍的是称为逆阻三端晶闸管, 以下将详细说明其工作原理。

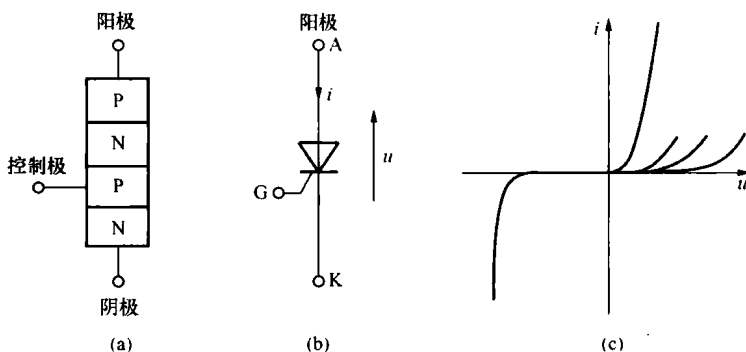


图 2-6 SCR

(a) 结构; (b) 图形符号; (c) 伏安特性

处于 off 状态的 SCR 若加上正电压, 且在控制极 G 通入数 μs (或数百 μs) 脉冲正电流, 则 SCR 由 off \rightarrow on 状态。而从 on 状态到 off 状态的条件是: ①外部电流为零; ②阳极阴极间加上反压。此外, 导通状态还需一个外加最小电压以保证有足够的维持电流。

图 2-7 为 SCR 电路及控制极 G 加上脉冲电流后负载电压和电流的波形。

图 2-8 所示为 SCR 的串联连接。SCR 一般为多个串联, 用于超高压的直流输出装置。此时控制极的信号电路与控制极之间必须保证绝缘良好。例如, 用脉冲变压器和光电耦合器。对超高压输电是用多个光 SCR 串联, 控制脉冲通过光纤直接送至触发电路则绝缘更有保证。