

PSIM™で学ぶ基礎パワーエレクトロニクス

# 使用PSIM™ 学习 电力电子技术基础

野村 弘  
[日] 藤原宪一郎 著  
吉田 正伸

胡金库 贾要勤 王兆安 译



西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

# 使用 PSIM™ 学习 电力电子技术基础

野村 弘

〔日〕 藤原宪一郎 著

吉田 正伸

胡金库 贾要勤 王兆安 译



西安交通大学出版社

※ PSIM 是美国 Powersim Inc. 公司的商标。本书中用™来注明。

## PSIM™で学ぶ基礎パワーエレクトロニクス

© 野村 弘, 藤原宪一郎, 吉田 正伸 2007

---

### 图书在版编目(CIP)数据

使用 PSIM™学习电力电子技术基础/(日)野村 弘,(日)藤原宪一郎,  
(日)吉田 正伸著;胡金库,贾要勤,王兆安译. —西安:西安交通大学出版社,2009.9

ISBN 978-7-5605-3163-2

I. 使… II. ①野…②藤…③吉…④胡…⑤贾…⑥王… III. 电力电子  
学-高等学校-教学参考资料 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009) 第 150729 号

---

书 名: 使用 PSIM™学习电力电子技术基础  
著 者: [日]野村 弘 藤原宪一郎 吉田 正伸  
译 者: 胡金库 贾要勤 王兆安

---

出版发行: 西安交通大学出版社  
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)  
网 址: <http://www.xjtupress.com>  
电 话: (029)82668357 82667874(发行中心)  
(029)82668315 82669096(总编办)  
传 真: (029)82668280  
印 刷: 西安交通大学印刷厂

---

开 本: 880mm×1230mm A5 印 张 6  
印 张: 0001~3000 字 数 167 千字  
版次印次: 2009 年 9 月第 1 版 2009 年 9 月第 1 次印刷  
书 号: ISBN 978-7-5605-3163-2/TM·78  
定 价: 28.00 元

---

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。  
订购热线:(029)82665248 (029)82665249  
投稿热线:(029)82665380  
读者信箱:banquan1809@126.com

版权所有 侵权必究

## 译者序

电力电子技术是一门综合性学科,学习电力电子技术的读者,需要先修微电子技术(包括模拟电子技术和数字电子技术)和控制理论两门基础课程。通俗地讲,电力电子技术就是通过微电子技术(弱电),应用控制理论来控制电力(强电)变换的技术。电力变换是由电力半导体(开关器件)和电感、电容等无源元件构成的主电路拓扑实现的,主电路中包含的开关器件少则一两个,多则几十个,各种各样的主电路拓扑想要实现预定的电力变换目标,就需要对主电路拓扑中的开关器件,即功率半导体进行高速开通或关断,这样若干开关器件在不同的时间以不同的组合开通和关断,就在主电路的各个环节产生了与其相对应的电压或电流波形及其时序,分析这些波形和时序是理解主电路工作原理的关键。由于电力电子主电路开关器件繁多,动作复杂,单靠理论分析还是比较困难的,尤其对于初学者更是比较难理解和掌握的。

电力电子又是一门实践性很强的学科,初学者要想学好电力电子技术,实验环节很重要,只有对课堂上学过的内容进行细致的实验验证,才能变抽象为具体,才能从繁杂的电路拓扑结构中整理出有条理的头绪,只有认真分析实验中的现象和原因,才能理解主电路拓扑每个环节的原理和作用,只有彻底理解了主电路的工作原理,才能设计适合的控制电路或数字控制程序,最终实现电力电子装置的设计功能。但是进行电力电子技术的实验并不像微电子技术试验那样在一小块面包板上就可以进行了。电力电子电路所处理的不仅是微电子

技术中的信号,更重要的是“功率”或者“电力”,因此功率大的电力电子装置就具有工作电流大、电压高以及体积大的特点,初学者在不充分了解主电路原理的情况下进行实验有可能会产生触电等人身危险或损坏装置。利用仿真的方法可在很大的程度上代替实验,可大大缩短电力电子装置的研发时间。

对于电力电子电路进行仿真的软件已有 P-Spice、Matlab 和 Saber 等,本书主要介绍的是电力电子电路的仿真软件 PSIM,但它同时也是一本电力电子技术的入门书,内容包括了大多数电力电子教科书所具有的基本内容,如半导体开关、AC/DC、DC/DC、DC/AC、AC/AC 等典型变换电路的原理和应用。全书内容条理清楚,讲解通俗易懂,最重要的是全书结合 PSIM 电力电子仿真软件对电力电子的电路拓扑结构进行了讲解和分析。采用仿真软件介绍电力电子技术,有助于对电路拓扑的细节进行展现和分析,使得抽象的原理更加具体和生动,帮助读者“验证”和“查验”电路的每个环节,摆脱单靠纯粹理论分析的困境。通过一边学习理论知识,一边仿真验证,可进一步加深对电力电子各种拓扑结构的理解,在此基础上,再进行实验验证,就会更加得心应手,达到事半功倍的效果。

PSIM 电力电子仿真软件不同于其它的电力电子仿真软件,半导体开关器件采用的是理想开关模型,因此仿真的收敛速度很快,仿真结果在基本原理上和实际很接近,仿真电路原理图和实际的电路接近,非常形象和逼真,用户界面十分友好。PSIM 的控制系统仿真功能也十分完善,具有常用的电路控制芯片,如 UC3842 等,数字控制系统的仿真功能也很强,可以模拟 DSP 控制中的 A/D 采样变换、中断程序执行等方面的细节,借助 PSIM,可以对主电路及模拟控制系统和数字控制系统进行设计和验证。对于初学者,PSIM 软件也易于掌握,其仿真模型的搭建、仿真结果的分析都十分简单。

本书的译者胡金库为西安交通大学电气工程学院电力电子专业的硕士研究生,2009年毕业,目前在荷兰代尔夫特大学费雷拉教授处攻读博士学位。贾要勤为西安交通大学电气工程学院副教授,攻读博士学位期间曾于2000~2002年在日本东京工业大学进修两年。王兆安为西安交通大学电气工程学院教授,于1984~1989年在日本大阪大学做访问学者,并获得博士学位,现兼任中国电源学会理事长,全国电气工程专业教学指导分委员会主任。

本书的翻译出版得到了原书作者日本高知工业高等专门学校电气工学科野村弘教授的大力协助,野村教授无偿转让版权,对此表示衷心的感谢;美国 Powersim Inc. 公司的金华博士、日本 Myway 公司的杨仲庆博士对本书的出版发行也提供了不少帮助,在此一并表示感谢。此外,本书的翻译稿还得到了西安交通大学薛培鼎教授的认真审阅和责任编辑赵丽平的悉心编校,在此谨表衷心谢忱。

本书虽然是经过多次修改和完善才出版的,但由于时间仓促、译者水平所限,遗漏和错误之处在所难免,敬请各位读者批评指正。

**译者**

# 前 言

电力电子技术从诞生到现在虽然只有 30 年的发展历史,但作为电能高效变换控制的技术,它已经成为 21 世纪电气技术人员的必修科目。电力电子技术也是一种节能技术,从近年来的能源和环境问题也可看出,人们对电力电子技术的期待也是越来越高。

日本的电力电子技术课程以前是作为电机学的一部分来讲授的,随着近年来对其重要性的认识,它已经变为独立的学科并且增加了相应的教学环节。但这种比较新的学科和讲授科目,融合了电力、电子和控制工程等领域的技术,它所涉及的内容也复杂多样,在有限的课程时间内如何进行有效的教学现在还处于摸索阶段。

本书是面向大学本科、短期大学、高等专科学校高年级学生而编写的教科书,学分为 2 个学分,内容仅限基础知识,除了进行浅显的讲解外,引入对例题和练习题的仿真分析是本书的特色。迄今为止出版的优秀电力电子教材很多,但积极采用仿真软件进行分析的教材还不多见。

电力电子技术的核心是各种各样的半导体电力变换电路,其课程内容与一般的电子电路课程不同,对于初学者来说,理解其工作原理困难较多。为此,本书作者采取了电路工作原理解说和软件仿真演示相结合的办法,通过观测工作波形,使学生参与到教学当中,这应该是非常有效的。另外,以前只局限在计算机机房内才可以进行的软件仿真练习,现在随着人手一台电脑时代的到来,这种仿真练习已经不受时间

和场所的限制了。

适合电力电子电路和系统仿真的软件有很多,本书介绍的 PSIM 的特点是将半导体器件按理想开关处理,因此能够提高仿真速度,初学者也容易掌握。试用版的 PSIM DEMO 任何人都可以免费下载使用,而且还提供了用户手册(英文)。虽说是试用版,作为教学用的软件,其性能是很完善的。本书的编写,就是在笔记本电脑和上述仿真软件的环境下完成的。

仿真中的一个不可忽视的问题是,不明白物理现象的人也能得出仿真结果。不加分析,囫囵吞枣式地接受仿真结果是有危险性的,这一点务请指导教师时时留意。作者希望,在验证课堂上所学过的内容和解答由这些内容引伸出来的练习题时,让学生自己用仿真软件来完成。另一方面,也希望教师在讲课中安排一些实物演示或照片提示,并给出适当的实验数据。“仿真实训进课堂”肯定能激发学生的学习学趣,积极性高的学生甚至可以把 PSIM 灵活运用到毕业设计或其他课程中去。作者期待着本教科书的使用能取得让学生兴奋不已、跃跃欲试的教学效果。

本书没有进行充分的推敲就发行出版了,难免会出现错误和不完善的地方,希望能够得到读者的批评和指正,以便在今后能够进一步改进。

这里对本书在编写时所参考的诸多文献和书籍的作者以及允许本书介绍 PSIM DEMO 和使用的 Myway 电气株式会社的杨仲庆社长表示感谢。同时本书的出版还得到了电气书院社长田中久米四郎先生和企画部部长田中建三郎先生的大力帮助,在此一并表示感谢。



# 目 录

译者序

前言

<b>第 1 章 电力电子技术概述</b> .....	(1)
1.1 电力电子技术 .....	(1)
1.2 电能的变换控制方法及应用 .....	(1)
1.3 电力电子技术的特点 .....	(4)
1.4 电力电子技术与仿真 .....	(7)
练习题 .....	(9)
<b>第 2 章 理想开关和半导体开关</b> .....	(10)
2.1 用开关来进行电能变换 .....	(11)
2.2 电力半导体器件的分类 .....	(12)
2.3 二极管 .....	(14)
2.4 晶闸管 .....	(15)
2.5 电力晶体管 .....	(16)
2.6 电力 MOSFET .....	(20)
2.7 IGBT .....	(22)
2.8 半导体开关损耗 .....	(25)
2.9 缓冲电路 .....	(28)
练习题 .....	(29)
<b>第 3 章 电力电子技术基础知识</b> .....	(31)
3.1 平均值和有效值 .....	(31)
3.2 功率 .....	(31)
3.3 畸变波和傅里叶级数展开 .....	(34)

3.4	波形畸变率和功率因数 .....	(37)
3.5	RLC 电路的过渡过程 .....	(39)
3.6	电感和电容 .....	(42)
	练习题 .....	(46)
<b>第 4 章</b>	<b>AC/DC 变换电路 I</b> .....	(49)
4.1	带电阻负载的单向整流电路 .....	(50)
4.2	带感性负载的单向整流电路 .....	(54)
	练习题 .....	(64)
<b>第 5 章</b>	<b>AC/DC 变换电路 II</b> .....	(66)
5.1	带电阻负载的三相整流电路 .....	(66)
5.2	带感性负载的三相整流电路 .....	(71)
5.3	他励式逆变器 .....	(73)
5.4	交流条件和直流偏磁 .....	(74)
5.5	电流交叠和直流电压特性 .....	(76)
5.6	具有容性负载的整流电路 .....	(80)
	练习题 .....	(82)
<b>第 6 章</b>	<b>DC/DC 变换电路</b> .....	(85)
6.1	降压型斩波器 .....	(85)
6.2	升压型斩波器 .....	(92)
6.3	升降压型斩波器 .....	(95)
	练习题 .....	(99)
<b>第 7 章</b>	<b>DC/AC 变换电路 I</b> .....	(101)
7.1	逆变器的基本原理 .....	(101)
7.2	电压型逆变器 .....	(102)
7.3	电流型逆变器 .....	(109)
7.4	输出电压的调整 .....	(111)
	练习题 .....	(113)
<b>第 8 章</b>	<b>DC/AC 变换电路 II</b> .....	(115)
8.1	谐波成分和脉冲调制方式 .....	(115)

8.2 通过正弦波、三角波比较的 PWM .....	(119)
8.3 三相逆变器 .....	(124)
练习题 .....	(129)
<b>第 9 章 AC/AC 变换电路 .....</b>	<b>(130)</b>
9.1 交流调压电路 .....	(130)
9.2 周波变换器 .....	(137)
练习题 .....	(140)
<b>附录 PSIM DEMO 版的使用方法 .....</b>	<b>(144)</b>
1 PSIM 简介 .....	(144)
2 PSIM 的特征 .....	(144)
3 PSIM 使用方法(基础) .....	(145)
习题答案 .....	(152)
参考文献 .....	(176)
索引 .....	(177)

# 第 1 章 电力电子技术概述

## 1.1 电力电子技术

电子技术的发展有两大方向,一个是**微电子技术**(Micro Electronics),一个是**电力电子技术**(Power Electronics)。微电子技术领域的处理对象是信号和信息,即如何对信号和信息进行快速处理和真实传送。这一领域中所使用的器件主要是晶体管、IC、LSI 等半导体器件。电力电子技术领域处理的对象是较大的电能,即如何对电能进行高效的变换控制,使之成为适合于负载需要的状态,所处理电能的大小,小到数瓦,大到数百兆瓦。这一领域中所使用的器件为大功率二极管、大功率晶体管、晶闸管、IGBT 等。

电力电子技术作为一个技术领域确立于 20 世纪 70 年代,如图 1.1 所示,它是由**电力**、**电子**和**控制**三个基本技术融合而成的交叉学科。虽然作为新的学科领域只经过了三十多年的发展,但是已经取得了令人瞩目的成就,现在,电力电子技术已成为电气技术人员不可或缺的知识。

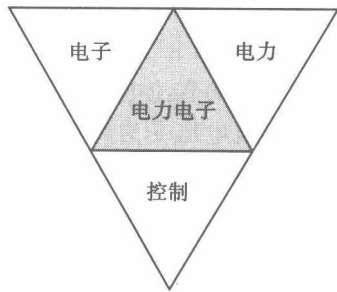


图 1.1 电力电子技术的相关领域

## 1.2 电能的变换控制方法及应用

如前所述,电力电子是使用电力电子器件对电能进行高效变换控制的技术。表征电能状态的参数有**电压**、**电流**、**频率**、**相位**以及**相数**。

电力电子技术中所说的电能变换控制,就是将这些电能状态的一个或多个参数进行变换控制,理想的情况下,电能的变换可趋近即无时间延迟也无电能损失。

如表 1.1 所示,电力变换的方式基本上可以分为 4 类。它是根据变换器的输入(电源)是直流还是交流以及输出是直流还是交流来进行分类的。图 1.2 所示是用波形来表示这些变换的原理。

表 1.1 电能变换的基本类型

输出 输入(电源)	DC	AC
DC	直流变换	逆变换
AC	正变换	交流变换

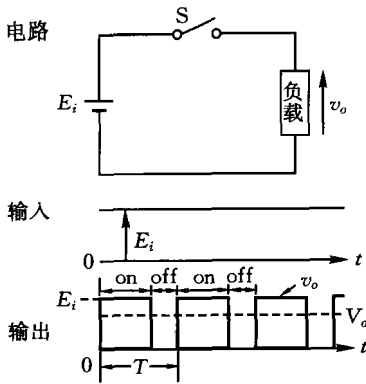
### (A. 直流变换(DC/DC 变换))

图 1.2(a)是直流变换原理的示意图。随着开关 S 导通和关断,负载两端电压  $v_o$  变成了幅值为  $E_i$  的脉冲序列。如果开关周期  $T$  一定,通过改变 S 导通时间和关断时间的比例(占空比或导通率),可以改变  $v_o$  的平均值  $V_o$  的大小。这就是说,通过改变开关 S 的通断间隔,可以由某一固定的直流电压得到相应的可变稳定直流电压。

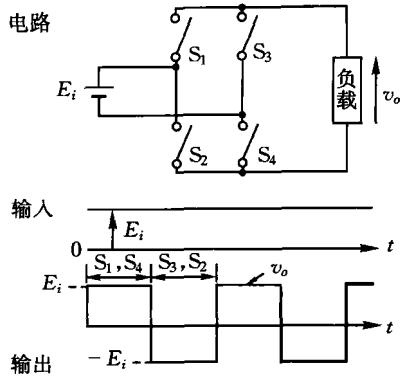
将直流电压变为高频的交流电压,再通过变压器的隔离、变压,此后再经过整流而得到直流电压输出的间接变换方式,称为**开关调节器式**(switching regulator)或者**DC/DC 变换器**,电子电路的电源多采用这种方式。没有经过交流而直接得到别的直流电压的直接方式称为**斩波电路**(chopper circuit),电力机车和电动汽车的直流电机控制中多采用这种方式。

### (B. 逆变换(DC/AC 变换))

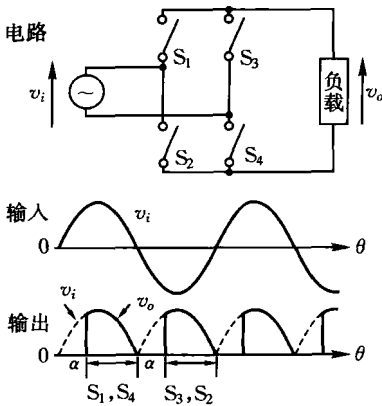
从直流到交流的变换称为逆变换,完成这种变换的装置称为**逆变器**(inverter)。图 1.2(b)中,随着开关  $S_1$ 、 $S_4$  和  $S_2$ 、 $S_3$  交互地导通和关断,负载两端的电压变为方波,固定的直流电压就变换为交流电压。如



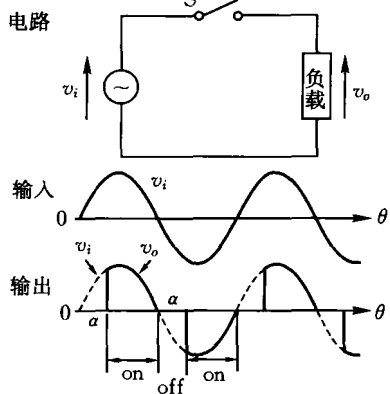
(a) 直流变换



(b) 逆变换



(c) 正变换



(d) 交流变换

图 1.2 电能变换的原理

果改变导通和关断的周期,可以自由地改变输出频率。为了改变输出电压的大小以及减少输出波形的失真,进而在输出的半周期内进行反复开关动作的方式称为 **PWM 逆变器** (Pulse Width Modulated inverter)。

逆变器作为交流电机的可变速驱动电源,从一般工业领域到电力机车、家用空调等都得到了广泛的应用,而且在计算机等设备的不断断

电源(UPS: Uninterruptible Power Supply)和太阳能发电装置等方面都得到应用。

### C. 正变换(AC/DC 变换)

交流变为直流的变换称为正变换或者整流,完成这种变换的装置称为正变换器或者**整流电路**(rectifier circuit)。图 1.2(c)中电源  $v_i$  为正弦波电压,在与此电压波形保持固定相位关系(同步)的条件下, $S_1$ 、 $S_4$  和  $S_3$ 、 $S_2$  交互的导通和关断,负载两端得到同图所示的波形。

若改变开关的相位角  $\alpha$ ,该电路即可变成能对输出电压平均值进行连续调整的**相位控制整流电路**(phase-controlled rectifier),晶闸管是适用于这种工作方式的器件。当 4 个开关全部替换为二极管后,晶闸管变成  $\alpha=0$  的自动开关,就变成了通常的二极管全波整流电路。

整流装置在通信设备、音频视频设备等需要直流的电子设备的电源,电气铁路、电镀和电解用的大容量直流电源中,都得到了广泛应用。

### D. 交流变换(AC/AC 变换)

交流变换包括:控制从交流电源向负载输送交流电压的**交流调压电路**(AC voltage regulator)和可以同时改变电压和频率的**周波变换器**(cycloconverter)。图 1.2(d)是交流调压原理的示意图,通过调整开关的相位角,可以对输出电压进行连续的调整。交流调压电路多使用被称为三端双向可控硅开关的双向器件,在电热毯等取暖装置、调光装置、电炉等方面得到实际应用。

周波变换器是一种把电源电压波形(正弦波)的一部分截下来,然后再把它们连接到一起,从而直接得到比电源频率低的交流电压的变换方式。根据其工作原理,用在超低频率的大容量可变频电源上。

## 1.3 电力电子技术的特点

### A. 电力电子装置的构成

本章的开头曾经说过,电力电子是以电力、电子以及控制三个学科的基本技术为基础的交叉学科领域。图 1.3 是电力电子装置一般组成

的示意框图。

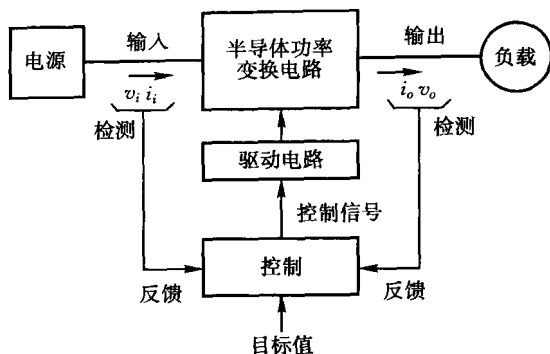


图 1.3 电力电子装置的组成

图中粗线所表示的部分是“功率”部分，称为主电路 (main circuit)。在这里，电源的电能通过半导体功率变换电路变为负载所需的形态，提供给负载。半导体功率变换电路有多种，其变换方式与图 1.2 (a)~(d) 相对应。

如果电能变换电路相当于人类的肌肉，那么就要有控制其动作的神经系统，它相当于图 1.3 的控制器、驱动电路、检测器等。根据外部的指令(目标值)、主电路中的各种状态量(电压、电流等)产生导通和关断的信号，并送到变换电路的开关器件。这一部分不仅使用了由 IC、微处理器等器件实现的电子技术，而且还有对输入输出量进行反馈的控制，所以控制技术也很重要。驱动电路是将控制信号隔离放大后，驱动电力半导体器件的接口电路。这些统称为控制电路 (control circuit)。

## B. 电力电子技术的特点

电力电子电路同其他的电子电路相比并没有多么显著的不同，其特点可归纳为以下几条。

### (1) 使用开关动作

其目的是对大功率电能进行高效转换，将在第 2 章中进行详述。



开关的导通、关断同数字电路的“1”、“0”相对应，两者存在共同的地方，但是处理的对象不同。

### (2) 伴随换流动作

电流从某一器件切换到其他器件的现象称为**换流** (commutation)。图 1.4(a)是用开关电路来表示的示意图，通过开关动作，电流从一侧支路转移到另一侧支路。具体的换流方式如图 1.4(b)、(c)所示。图 1.4(b)是交流电源电路中使用晶闸管的实例，如果  $v_2 > v_1$ ，通过向  $Th_2$  施加门控脉冲信号使  $Th_2$  导通， $Th_1$  便承受反向电压， $Th_1$  关断，电流便转而只流过  $Th_2$ 。这种一侧器件因电源电压的作用而自然关断，使电流转换到另一侧器件的动作称为**电网换流** (line commutation) 或者**自然换流** (natural commutation)。

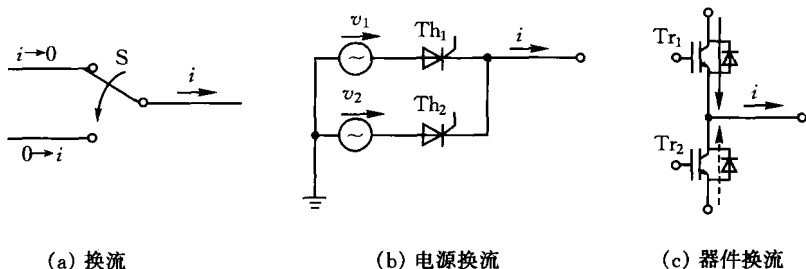


图 1.4 换流方式

另一方面，器件本身具有关断能力的情况下，可以通过控制信号使一侧器件关断，向其他器件进行换流。图 1.4(c)中，设负载电流  $i$  是按图示方向连续流通的，那么，即使在  $Tr_1$  被关断的同时向  $Tr_2$  施加控制信号， $Tr_2$  也不能导通，而是向同其反并联的二极管换流，这样的换流称为**器件换流** (device commutation) 或者**强制换流** (forced commutation)。

### (3) 由主电路和控制电路来构成，两者间的接口技术同样重要

向主电路的开关器件提供控制电路产生门极信号的接口电路，称为**驱动电路** (drive circuit)。该电路有两个功能，①将门极信号放大至开关器件驱动所需的电压等级；②将控制电路同主电路在电气上**绝缘** (isolation)。特别是②中，主电路为高电压大电流，多数情况下，控制