

电力电子技术课程的关键知识点解析

李文磊

(宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 电力电子技术由于其器件和电路本身具有的特殊性, 在理论教学过程中容易使学生对一些概念和电路的理解存在一定的难度. 因此文章对课程的主要教学难点和关键知识点进行了详细分析, 以弥补教材分析的不足. 实际应用结果表明, 澄清这些关键点和难点不仅对学好相关内容起到非常重要的作用, 也为后续内容的过渡以及顺畅衔接有很好的效果.

关键词: 电力电子技术; 教学难点; 课堂教学

中图分类号: G642

文献标识码: A

文章编号: 1001-5132 (2012) 03-0048-05

我校自动化专业开展电力电子技术教学已有多年, 使用的教材是机械工业出版社出版的王兆安等主编的《电力电子技术》^[1]. 该教材第5版虽然结构更加合理, 内容也有所丰富, 但教材中个别知识点的介绍仍然比较简略, 使得学生在学习一些章节的过程中存在不少问题. 而这些问题如果不能得到及时地解决、消化和处理, 将大大影响后续内容的学习和学生学习的主动性和积极性. 基于此, 笔者针对学生经常在教学中提出的一些共性问题, 经过多年来整理, 归纳了可能对基本概念和电路工作特点的理解上以及对后续内容学习上有影响的一些关键知识点, 并对其进行了详细分析, 期望对学生的学习和教师的教学有所帮助.

1 关键知识点及解析

1.1 整流电路的相关计算

可控整流的电路和计算相对较多, 为便于比较, 现将典型整流电路的相关计算整理于表1, 表中主要按电阻性负载和电感性负载进行了归纳整理. 电感性负载进行分析计算时, 教材中一般都假设了电感足够大以使负载电流连续的情况, 但这并不包括单相半波整流的情况. 因为单相半波整流电路带电感性负载, 即使电感足够大也不能使电流连续, 即负载电流始终断续, 且器件导通角 θ

随 $\Omega L/R$ 变化, 并不固定, 因此计算输出量时的积分区间也不固定, 不能像其他可控整流电路那样给出确定的统一公式, 故只能根据定义使用瞬时值计算相关电流的平均值和有效值. 另外需要说明的是, 电感性负载中 $I_d = U_d / R$ 的计算不适用 $R = 0$ 的特殊情况, 此时也需要使用瞬时值计算相关电流的平均值和有效值.

1.2 单相半控桥整流电路阻感负载时的工作过程与失控现象

单相半控桥整流电路带阻感负载时的工作过程教材已有叙述, 但失控并未详细解释. 为说明该电路工作特点, 这里结合工作波形先介绍其基本工作过程, 再说明失控产生的机理.

1.2.1 无反并联续流二极管时的正常工作情况

该电路无反并联二极管时的工作过程具体如下(电路结构、工作波形及说明如图1所示), u_2 过零变负时, 因电感作用使电流连续, VT_1 继续导通. 但因a点电位低于b点电位, VD_2 导通, VD_4 关断, 使得电流从 VD_4 转移至 VD_2 , VD_4 关断, 电流不再流经变压器二次绕组, 而是由 VT_1 和 VD_2 续流, $u_d = 0$; 在 u_2 负半周触发角 α 时刻触发 VT_3 , VT_3 导通, 则向 VT_1 加反压使之关断, u_2 经 VT_3 和 VD_2 向负载供电. u_2 过零变正时, VD_4 导通, VD_2 关断. VT_3 和 VD_4 续流, u_d 又为零. 因此该电路工作特点

表 1 典型可控整流电路的计算

可控 整流 电路 类型	电阻性负载		电感性负载(L 足够大, 单相半波除外)					
	直流侧电压电流		直流侧电压电流		晶闸管电压电流			变压器二 次侧电流
	U_d	I_d	U_d	I_d	U_{RRM}	I_T	I_{dT}	I_2
单相 半波	$0.45U_2 \frac{1+\cos\alpha}{2}$		$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_1}^{\pi+\alpha_2} \sqrt{2}U_2 \times \sin\omega t d(\omega t)$	$i_d = -\frac{\sqrt{2}U_2}{Z} \sin(\alpha - \phi) \times e^{-\frac{R}{\omega L}(\omega t - \alpha)} + \frac{\sqrt{2}U_2}{Z} \sin(\omega t - \phi)$ 因此: $I_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_1}^{\pi+\alpha_2} i_d d(\omega t)$	$\sqrt{2}U_2$	按实际 波形根 据定义 计算方 均根值	I_d	I_T
单相 桥式	$0.9U_2 \frac{1+\cos\alpha}{2}$	U_d / R	$0.9U_2 \cos\alpha$		$\sqrt{2}U_2$	$\frac{1}{\sqrt{2}}I_d$	$\frac{1}{2}I_d$	I_d
三相 半波	$\alpha \leq 30^\circ: 1.17U_2 \cos\alpha;$ $\alpha > 30^\circ: 0.675U_2[1 + \cos(\frac{\pi}{6} + \alpha)]$		$1.17U_2 \cos\alpha$	U_d / R	$\sqrt{6}U_2$	$\frac{1}{\sqrt{3}}I_d$	$\frac{1}{3}I_d$	$\frac{1}{\sqrt{3}}I_d$
三相 桥式	$\alpha \leq 60^\circ: 2.34U_2 \cos\alpha$ $\alpha > 60^\circ: 2.34U_2[1 + \cos(\frac{\pi}{3} + \alpha)]$		$2.34U_2 \cos\alpha$		$\sqrt{6}U_2$	$\frac{1}{\sqrt{3}}I_d$	$\frac{1}{3}I_d$	$\sqrt{\frac{2}{3}}I_d$

是晶闸管在触发时换流, 二极管则在电源过零时换流.

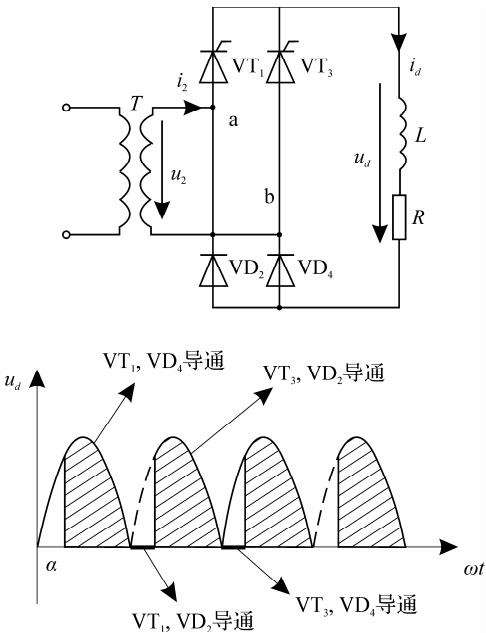


图 1 单相半控桥原理及工作波形图

1.2.2 半控桥的失控

当 α 突然增大至 180° 或触发脉冲丢失时, 会发

生 1 个晶闸管持续导通, 而 2 个二极管轮流导通的情况, 这使 u_d 成为正弦半波, 其平均值保持恒定, 即 α 失去控制作用, 称为失控.

例如, VT_1 和 VD_4 正处于通态时, 关断触发电路, 当电源 u_2 过零变负时, VD_4 关断, VD_2 导通, 形成内部续流. 若 L 中所储存的能量在整个电源 u_2 负半周都没有释放完, VT_1 和 VD_2 的内部续流可以维持整个负半周, 而当又到了 u_2 的正半周时, VD_2 关断, VD_4 导通, VT_1 和 VD_4 又构成单相半波整流. 失控时的波形如图 2 所示.

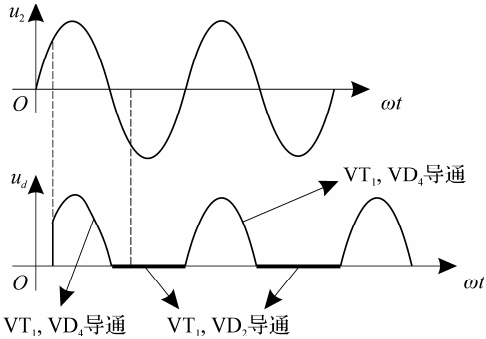


图 2 单相半控桥失控波形图

所以, 即使去掉了触发电路, 电路也会出现正

在导通的晶闸管一直导通, 并且 2 只二极管轮流导通的情况, 但波形是单相半波不可控的整流波形, 因此对负载来说这是不满足要求的. 由此看出, 单相半控桥阻感负载情况下, 失控的产生是有条件的, 即当 α 突然增大至 180° 或触发脉冲丢失, 而单相全控桥带阻感负载在这个条件下并不会产生失控问题, 因为按照上面的过程简单分析可知, 全控整流电路在下一个周期会没有输出电压, 相当于整流电路在出现触发故障时, 电路不再工作, 单相半控桥阻感负载用反并联续流二极管来解决失控与此是一样的道理.

1.3 带中心抽头变压器的逆变电路

带中心抽头变压器的逆变电路如图 3, 教材中并没有详细介绍该电路, 但关于该电路的基本工作原理, 尤其是其中的二极管如何进行能量反馈, 经常有的同学会产生疑问, 所以笔者在此对其加以分析.

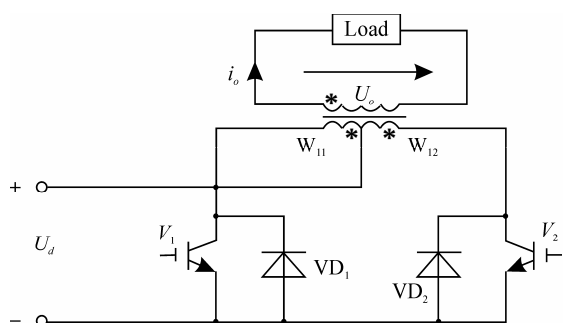


图3 带中心抽头变压器的逆变电路

电路工作方式如教材所述, 需要交替驱动 2 个 IGBT, 经变压器耦合给负载加上矩形波交流电压. 2 个二极管的作用是电感负载时提供无功能量的反馈通道.

假设变压器同名端如图 1 中所示, 一次绕组在中心抽头左侧的记为 W_{11} , 右侧为 W_{12} , 则具体工作波形如图 4 所示. 在输出电压 U_o 的正半周, 输出电流 i_o 为正时, 电源的电能向负载输送, 折算到初级的负载电流通过 V_1 ; 而当触发 V_1 关断、 V_2 导通时, 原来在绕组 W_{11} 中的电流因 V_1 关断而转移到绕组 W_{12} 中, 电流方向不变, 此时二极管 VD_2 续流. 当 $t = (3/4)T$ 时, 负载电流下降到零, 而后才通过 V_2 反向增加. VD_1 续流过程与此类似.

1.4 电感耦合式强迫换流

电感耦合式强迫换流原理如图 5 所示, 图 5(a)

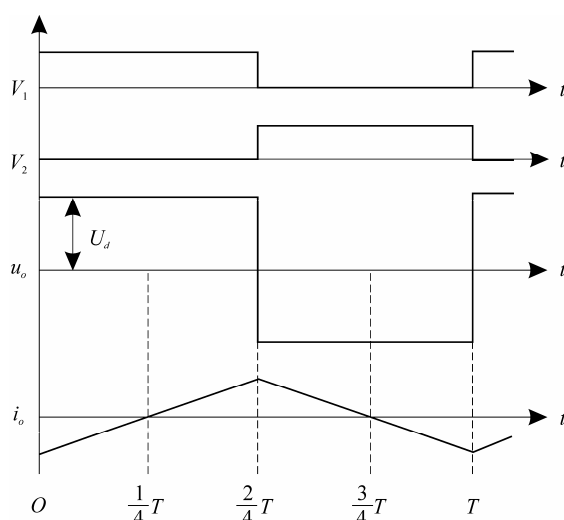


图4 带中心抽头变压器的逆变电路

和图 5(b)中换流电容上电压 u_c 极性不同, 导致产生 2 种不同的换流过程. 图 5(a)中晶闸管在 LC 振荡第 1 个半周期内关断, 图 5(b)中晶闸管在 LC 振荡第 2 个半周期内关断. 产生关断时间差异的原因很明显在于电容上所充电压的极性不同, 具体分析如下.

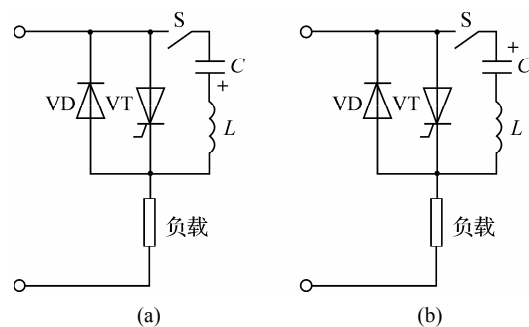


图5 电感耦合式强迫换流原理图

图 5(a)中 u_c 正极性正好施加在欲关断的晶闸管 VT 阴极上, 当接通开关 S(通常是 1 个辅助晶闸管)后, LC 振荡电流将反向流过 VT, 促使其电流减小, 在 LC 振荡的第 1 个半周期内就可使 VT 中阳极电流减小至零而关断, 残余电流经 VD 继续流动, VD 管压降构成了对 VT 的反向阳压. 而图 5(b)中 u_c 负极性施加在 VT 的阴极, 当接通开关 S 后, LC 振荡电流先正向流经 VT 使其电流加大, 但经半个振荡周期后, 振荡电流反向流过 VT, 使 VT 中合成正向电流衰减至零而关断, 残余电流经 VD 继续流动, VD 上管压降构成对 VT 的反向阳压, 确保其可靠关断.

1.5 PWM 逆变与整流

1.5.1 单相桥式 PWM 逆变电路

单相桥式 PWM 逆变电路的两种调制方式——单极性与双极性调制。

单极性与双极性调制具体工作波形如图 6 和图 7 所示。与教材不同的是, 为了理解电路调制波形的产生过程, 2 个图形中都增加了调制过程中器件开通的规律以及对应负载电流的波形。

对于单极性调制的工作过程教材已有叙述, 即 1 个周期内 V_1 、 V_2 各工作半个周期, V_3 和 V_4 则通断互补。比如在 u_o 正半周, V_1 导通, V_2 关断, V_3 和 V_4 交替通断。负载电流比电压滞后, 在电压正半周, 电流有一段区间为正, 一段区间为负: 在负载电流为正的区间, V_1 和 V_4 导通时, $u_o = U_d$, V_4 关断时, 负载电流通过 V_1 和 VD_3 续流, $u_o = 0$ (图 6 标注); 在负载电流为负的区间, 仍为 V_1 和 V_4 导通时, 因 i_o 为负, 故 i_o 实际上从 VD_1 和 VD_4 流过, 仍有 $u_o = U_d$ 。 V_4 关断, V_3 开通后, i_o 从 V_3 和 VD_1 续流, $u_o = 0$ 。此处如果不给出电流 i_o 的波形, 学生理解起来必定有困难。

同样, 对于图 7 的双极性调制, 当 $u_r > u_c$ 时, 给 V_1 和 V_4 导通信号, 给 V_2 和 V_3 关断信号, $u_o = U_d$; 如 $i_o > 0$, V_1 和 V_4 通, 如 $i_o < 0$, VD_1 和 VD_4 通 (见图 7 阴影部分); 当 $u_r < u_c$ 时, 给 V_2 和 V_3 导通信号, 给 V_1 和 V_4 关断信号, $u_o = -U_d$; 如 $i_o < 0$, V_2 和 V_3 通, 如 $i_o > 0$, VD_2 和 VD_3 通。

如此对照图形进行说明, 电路换流和工作情况一目了然, 解释也能够有的放矢, 学生自然听得明白, 学得透彻, 对电路工作过程不再感到云里雾里, 自然对调制就有了一个清楚、实际、直观地理解。

1.5.2 PWM 单相半控整流电路

PWM 单相半控整流电路虽然结构简单, 但理解其工作原理并不容易。为说明此电路, 定义电路的 2 种工作模式: V_1 或 VD_1 参与导通称为模式 1; V_2 或 VD_2 参与导通则为模式 2^[2]。电路结构参见图 8 或教材。

若电路工作在整流状态, 则当电源电压 u_s 处于正半周时, VD_1 正偏, 此时 C_1 通过 VD_1 充电, $i_s > 0$, 随着电容 C_1 两端电压的升高, 电源电流 i_s 下降, 电路工作状态为模式 1。此时如果开通 V_2 ,

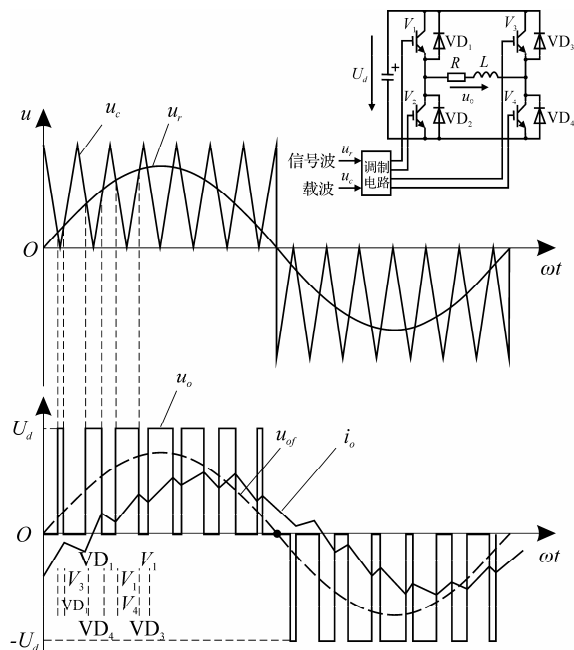


图 6 单极性 PWM 控制方式波形

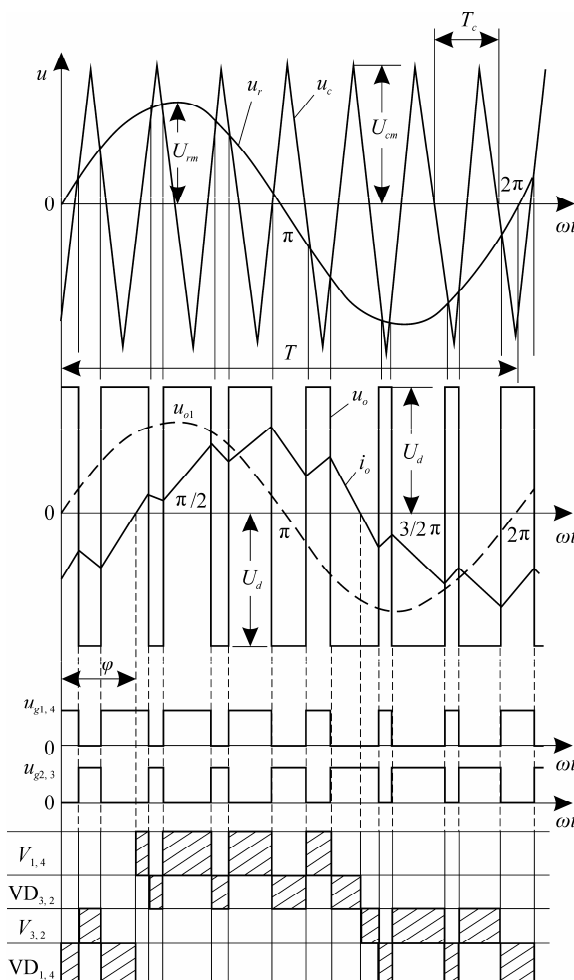


图 7 双极性 PWM 控制方式波形

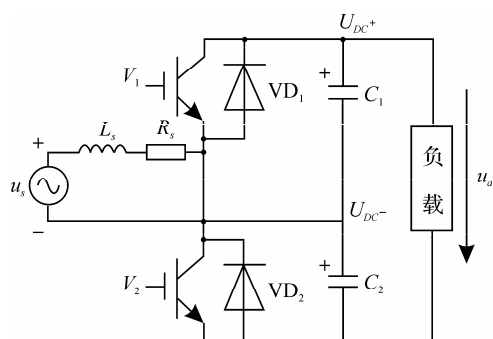


图8 PWM单相半控整流电路

由于 $u_s + U_{DC^-}$ 的共同作用, 电流 i_s 增加, 则电路将工作在模式 2.

如果关断 V_2 , 当电流有减小趋势时, 由于电感 L_s 的作用, 电感电动势将反向, 使电源电压 u_s 与电感电势的和 $u_s + L_s di_s / dt > U_{DC^+}$, 则二极管 VD_1 续流导通, 对 C_1 继续充电. 此时电路又回到模式 1.

当电源电压 u_s 处于负半周时工作过程与此类似, 此时 VD_2 正偏, C_2 即通过 VD_2 充电, 则 $i_s < 0$; 随着电容 C_2 两端电压的升高, 电源电流 i_s 下降, 此时电路工作在模式 2. 若此时开通 V_1 , 由于 $u_s + U_{DC^+}$ 的共同作用, 电流 i_s 将增加, 则电路会工作在模式 1 状态. 当 V_1 关断, 电流有减小趋势时, 由于电感 L_s 的作用, 电感电势又反向, 使电源电压

u_s 与电感电势的和 $u_s + L_s di_s / dt < U_{DC^-}$, 此时二极管 VD_2 将续流导通, 对 C_2 继续充电, 则电路又重新回到模式 2.

2 结论

针对电力电子技术教学中遇到的一些难点, 有针对性地对其进行了解析. 目的是使学生能够及时理解、避免问题积压越来越多, 从而影响后续讲授内容的过渡以及相关内容的学习, 达到传道、授业、解惑的目的. 从中我们也可以看出, 课程教学过程中补充相关教学知识, 改变教学方式和方法也是非常关键的^[3]. 这不仅需要专业教师的积极努力付出, 也需要授课对象的有效参与, 教学相长永远是课堂教学的根本.

参考文献:

- [1] 王兆安, 刘进军. 电力电子技术[M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2009:5.
- [2] 冯晓艳, 宣丽萍. 单相半桥可逆整流电路的电流控制方法[J]. 煤矿机械, 2008, 29(6):172-174.
- [3] 冀捐灶, 杜军, 吴昌林. 电力电子技术课程教学的几点探索与尝试[J]. 高等教育研究, 2007, 24(3):80-81.

Main Points in Teaching for Power Electronics Technology Curricula

LI Wen-lei

(Faculty of Information Science and Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Due to the particularities of the devices and circuits indivisible with teaching electronic technology curricula, there have been some difficulties for students to grasp some concepts and circuits from theoretical perspective. Efforts are made in this paper to analyze some difficulties identified with course teaching, and to provide some key points in detail for the better understanding of the contents for both teachers and students alike. The result of real-world application indicates that clarifying the difficult points plays a very important role not only in digesting related content, but also in producing more positive effects on the smooth transition between chapters of the given teaching materials.

Key words: power electronics; teaching difficulties; curriculum teaching

(责任编辑 章践立)