

斩波电路课程的教学方案设计及仿真实验

卢淑明, 张海玮, 武波, 李婧

天津仁爱学院 信息与智能工程学院, 天津 301636

DOI: 10.61369/VDE.2025170024

摘要 : 电力电子技术作为一门典型的工科专业基础课程, 知识体系中计算推导相对复杂, 数学基础较薄弱降低了学生学习兴趣, 且掌握复杂计算并不能有效解决工程实践中相关问题。因此以学生为中心提出一种针对教学内容的改革方式, 对电力电子技术课程教学内容不再强调理论计算推导, 而以多角度分析及工程应用为抓手, 引导学生自主学习, 提高系统工程问题的分析和解决能力。案例中从多角度分析升压斩波电路, 结合工程案例及仿真实验, 层层递进, 激发学生的主观能动性, 从而获得高效的教学效果。

关键词 : 电力电子技术; 教学改革; 多角度分析; 教学效果

Teaching Plan Design and Simulation Experiment of Chopping Circuit Course

Lu Shuming, Zhang Haiwei, Wu Bo, Li Jing

School of Information and Intelligent Engineering, Tianjin Renai University, Tianjin 301636

Abstract : As a typical foundational course in engineering, power electronics technology has a relatively complex knowledge system of calculation and deduction, weak mathematical foundation, which reduces students' interest in learning, and mastering complex calculations cannot effectively solve related problems in engineering practice. Therefore, a student-centered reform approach is proposed for the teaching content of power electronics technology courses, which no longer emphasizes theoretical calculation and deduction, but instead focuses on multi angle analysis and engineering applications, guiding students to learn independently and improving their ability to analyze and solve system engineering problems. Analyzing the boost chopper circuit from multiple perspectives in the case, combined with engineering cases and simulation experiments, layer by layer, to stimulate students' subjective initiative and achieve efficient teaching results.

Keywords : power electronics; teaching reform; multi-angle analysis; teaching effect

电力电子技术 (Power Electronics Technology) 作为电子学科的重要分支, 是电气自动化、智能控制及可再生能源等专业的必修课程, 属于电力工程、电子技术和自动控制等多学科的交叉领域。该课程以功率半导体器件为核心, 探讨电能的高效变换与控制技术, 其技术成果已广泛应用于可再生能源并网、新型电力系统、电动交通工具、工业自动化设备及家用电器等多个领域, 被认为是推动现代电力工程发展的关键支撑技术^[1,2]。

在经典的教学模式中, 电力电子技术课程主要聚焦于四大类电能转换电路, 即整流 (将交流电转换为直流电)、逆变 (将直流电转换为交流电)、斩波 (调节直流电压) 以及调压调频 (控制交流电压) 等核心知识体系。由于电力电子技术课程具有以下特点: 以波形分析为主, 变换电路灵活多变, 公式多、波形复杂。授课现状是任课教师授课困难, 学生接收效果差。针对应用型本科特征, 有必要减少以往繁杂的数学推导, 加强直观的波形分析内容及工作过程分析, 有必要进行教学内容的改革, 以学生为中心达到良好的教学效果, 并满足学生学习需求及未来工作需求^[3]。

本文以升压斩波电路为例, 从多角度分析该电路的工作过程, 以保障学生对升压电路全方位的理解^[4]。

一、教学设计理念

在课程案例设计中突出学生的主体作用, 通过启发式、互动

式、讨论式、对比式等教学方式, 从电路结构、能量转换关系等多维度组织教学内容, 提高学生主动学习、工程实践和创新能力。以升压电路45分钟课堂教学为例, 教学内容设计如图1所

基金项目: 天津市教委科研计划项目 (项目编号: 2020KJ064)

作者简介: 卢淑明(1985-), 女, 汉族, 河北沧州人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力电子与电力传动。

通讯作者: 张海玮, 博士, 副教授, 研究方向电力电子技术与传动。

示。图1中空箭头表示授课时序，实箭头表示知识结构。

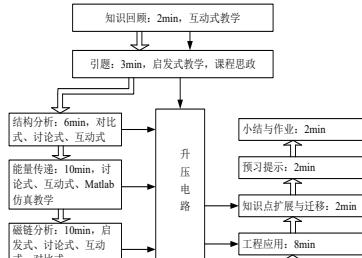


图1 教学设计总体思路

二、教学过程设计

随着电力电子技术的飞速发展，高压开关电源在计算机系统、现代通信、工业制造及航天科技等多个行业得到了大规模应用。现代电子装置对电源供电质量提出了严格要求，电源转换设备的核心功能在于将电网或电池提供的原始电能转换为各类电子系统所需的交直流电能。其中，DC-DC 功率转换模块在电动驱动系统、储能充电装置、高效电源系统及各类用电终端中扮演着关键角色。为满足不同应用场景的需求，业界相继开发出了降压型（Buck）、升压型（Boost）以及升降压型（Buck-Boost）等多种拓扑结构的直流变换电路^[5]。特别是在便携式电子设备领域，由于常需将电池输出电压提升至工作电路所需电平，基于 Boost 拓扑的直流升压转换技术得到了重点发展，并广泛应用于智能手机、平板电脑等消费电子产品中。

（一）升压斩波电路结构分析

升压斩波电路的基本拓扑结构包含直流电源 E 、电力电子器件 IGBT、二极管 VD 、电感 L 、电容 C 、负载 R 。在该电路中，电感 L 通过周期性的储能 – 释能过程实现电压提升，而输出电容 C 则起到平抑电压波动、维持输出电压稳定的重要作用。升压斩波电路拓扑结构如图2所示^[6,7]。

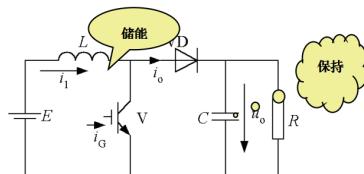


图2 升压斩波电路拓扑结构

电路工作处于稳态时，可将一个开关周期 T 按照全控型器件 IGBT 的状态分成两个阶段：器件处于通态的时间 t_{on} 及器件处于断态的时间 t_{off} 。

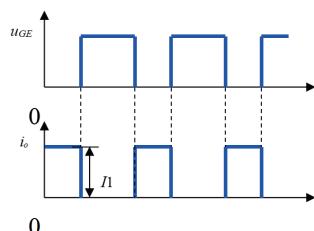


图3 升压斩波电路输出波形分析

(1) V 处于通态时， $E-L-V$ 构成一个回路，电源 E 向电感 L 充电，电流 i_1 近似恒定，呈上升趋势；同时电容 C 向负载 R 供电，输出电压 U_o 基本恒定。

(2) V 处于断态时， $E-L-VD-R (C)$ 构成一个回路，电流 i_1 呈下降趋势，电源 E 和电感 L 同时向电容 C 充电，并向负载提供能量。波形图如图3所示。

（二）能量传递关系分析

在理想工况下，当电路中的储能电感量足够大时，电感电流可保持连续状态；同时，当滤波电容容量充分时，输出电压纹波可被有效抑制至最低水平。

(1) 设 V 通态的时间为 t_{on} ，电流处于上升阶段，此阶段 L 两端电压与电流为关联参考方向，电源 E 提供能量， L 吸收能量，并且 L 上积蓄的能量为： $EI_1 t_{on}$ 。

(2) 设 V 断态的时间为 t_{off} ，电流为下降阶段，此阶段 L 两端电压与电流为非关联参考方向， L 释放能量，与电源 E 共同为负载 (RC 并联支路) 提供能量，则此期间电感 L 释放能量为： $(U_o - E)I_1 t_{off}$ 。

静态时，一个开关周期 T 中 L 积蓄能量与释放能量相等，如下所示：

$$EI_1 t_{on} = (U_o - E)I_1 t_{off}$$

化简后，得：

$$U_o = \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} E = \frac{T}{t_{off}} E = \frac{1}{\beta} E$$

$T/t_{off} > 1$ ，输出电压高于电源电压，故为升压斩波电路。

$$\beta = \frac{t_{off}}{T} \text{ 与占空比 } \alpha \text{ 满足关系为 } \alpha + \beta = 1。$$

电感 L 值足够大，器件开通过程中电流的上升及器件关断过程中电流的下降可忽略，即电感电流视为恒定不变。

器件开通时，二极管中没有电流通过， $i_0 = 0$ ；器件关断时，二极管流过电流，并且与电感电流为同一电流， $i_0 = i_1$ 。根据高等数学连续函数在区间上的平均值求解方法，可计算出输出平均电流 I_o ：

$$I_o = \frac{t_{off}}{T} I_1$$

如果忽略电路中的损耗，则由电源提供的能量仅由负载 R 消耗，即：

$$EI_1 = U_o I_o$$

从能量守恒的角度分析，升压斩波电路在稳态工作时满足输入输出功率平衡的特性，其功能等效于直流升压变压器。

（三）磁链角度分析

根据磁链守恒，即换路前后电路中电感的总磁链不变。由于

$$u_L = L \frac{di}{dt} \text{，则电感线圈的电压对时间的积分等于磁链：}$$

$$\int u_L dt = \int L \frac{di}{dt} dt = \int L di$$

一个周期内电感 L 电流不变，两端电压对时间的积分为 0。假设电感电压的参考极性为左正右负：

$$\int_0^T u_L dt = 0$$

将上式展开, 可得不同时间段磁链:

$$\int_0^{t_{on}} u_L dt + \int_{t_{on}}^T u_L dt = 0$$

0~ t_{on} 期间, 根据KVL方程可得 $u_L = E$, 极性与参考方向相同; $t_{on} \sim T$ 即 t_{off} 期间, $E + u_L = U_o$, 则 $u_L = U_o - E$, 极性与参考方向相反, 计算时应代入负值, 代入上式, 可得

$$t_{on}E - t_{off}(U_o - E) = 0, \text{ 即 } U_o = \frac{T}{t_{off}}E.$$

由以上分析可知, 从一个开关周期内能量传递关系及磁链角度分析, 可得出升压斩波电路相同的结论——输出电压高于输入电压^[9,10]。

(四) 升压斩波电路的典型应用

1. 升压斩波电路的典型应用

升压斩波电路作为DC-DC变换器的重要拓扑结构, 在电压提升需求场景中具有不可替代的作用。其典型应用场景主要包括以下三个方面: 首先, 在直流电机驱动系统中实现能量转换; 其次, 作为单相PFC(功率因数校正)电路的核心组成部分; 此外, 该电路还被集成于各类交直流供电装置中。

2. 工程应用

在直流电机系统中, 升压斩波电路主要应用于再生制动工况, 实现制动能量向直流电源的回馈。由于实际电路中电感参数存在限制($L \neq \infty$), 系统会呈现两种不同的运行模式: 电枢电流连续导通模式(CCM)和断续导通模式(DCM), 如图4所示。

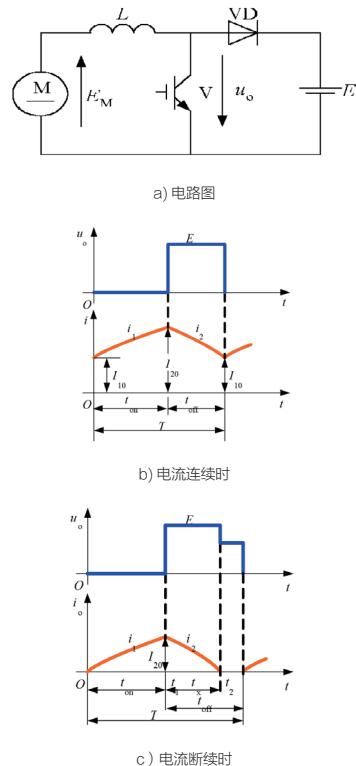


图4 用于直流电动机回馈能量的升压斩波电路及其波形

当V处于通态时, 设电动机电枢电流为 i_1 , 则有:

$$L \frac{di_1}{dt} + Ri_1 = E_M$$

式中, R 为电机电枢回路电阻与线路电阻之和。

当V处于断态时, 设电动机电枢电流为 i_2 , 满足:

$$L \frac{di_2}{dt} + Ri_2 = E_M - E$$

(1) 当电流连续时, 考虑到初始条件, 近似L无穷大时电枢电流的平均值 I_o , 即

$$I_o = (m - \beta) \frac{E}{R} = \frac{E_M - \beta E}{R}$$

式中, $m = \frac{E_m}{E}$, $\beta = \frac{t_{off}}{T}$ 为升压比的倒数, 该式表明, 以电动机一侧为基准, 可将直流电源电压看作是被降低到了 βE 。

(2) 当电枢电流断续时, 可求得 i_2 持续的时间 t_x , 即

$$t_x = \tau \ln \frac{1 - me^{-\frac{t_{on}}{\tau}}}{1 - m}$$

当 $t_x < t_{off}$ 时, 电路为电流断续工作状态, $t_x < t_{off}$ 是电流断续的条件, 即

$$m < \frac{1 - e^{-\beta \rho}}{1 - e^{-\rho}}$$

可根据此式对电路的工作状态做出判断。

三、仿真教学

为了更进一步理解升压斩波电路的功能特点, 对其进行MATLAB仿真。运用MATLAB展示仿真结果, 以此帮助学生获得直观认识, 变抽象为具体。图5为升压斩波电路的仿真模型, 其中, 电力电子器件采用IGBT(占空比可调), 设置 $E=100V$, $L=20mL$, $C=100\mu F$, $R=25\Omega$, 采用开环PWM控制方法控制集电极电流 i_C 。

波形分析帮助学生更加直观的分析和理解升压电路的工作过程^[8]。图6中所示 u_{GE} 为电力电子器件的栅极信号, 该信号呈现周期性变化, 周期为 T , $T=1ms$, $T=t_{on}+t_{off}$ 。其中 t_{on} 时间内为高电平 $t_{on}=0.7ms$; t_{off} 时间内为低电平状态 $t_{off}=T-t_{on}=0.3ms$, 高电平时器件开通, 低电平时器件关断, 此时 $\alpha=0.7$, $\beta=0.3$ 。 i_o 为负载电流, 即二极管中通过的电流, 显然器件开通时二极管中无电流, 即 $i_o=0$ 。器件关断时, 二极管中通过电感电流, 即 $i_o=i_L$ 。 u_o 为负载电压, 即电容两端电压。 u_{D1} 为二极管电压波形, 器件开通时理想管压降为0, 此时 $u_{D1}=-u_o$, 器件关断时二极管开通, 此时 $u_{D1}=0$ 。

代入相关参数, 负载电压 $U_o=333.3V$, 因电容存在充放电, 所以电压呈现锯齿波变化, 整体趋于稳定, 并且与理论计算值一致。

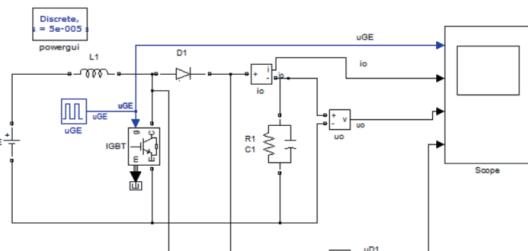


图5 升压斩波电路仿真模型

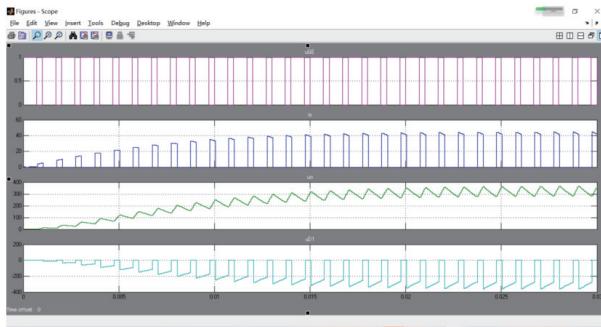


图6 $\alpha=0.7$ 时电路输出波形仿真图

周期 T 不变, 改变占空比, $t_{on}=0.5\text{ms}$, 此时 $\alpha=0.5$, $\beta=0.5$, 得输出波形如图7所示, 此时负载电压 $U_o=200\text{V}$, 与理论推导一致, 波形仍呈锯齿波变化。

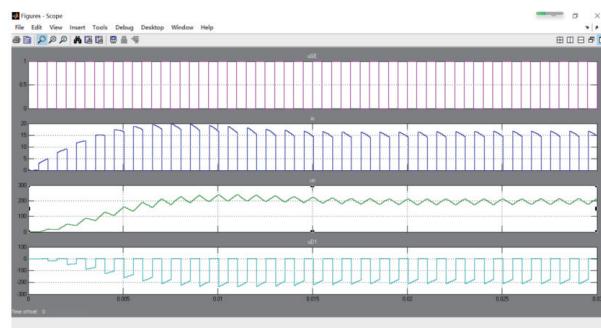


图7 $\alpha=0.5$ 时电路输出波形仿真图

四、教学效果

在电力电子技术课程的教学创新中, 我们采取了一系列改革措施: 首先重构了知识体系框架, 精简了复杂的理论推导环节; 其次加强了计算机仿真实验教学环节, 并引入典型工业应用案例

进行项目式教学。这些举措有效改善了学生的知识掌握程度和工程实践技能。自教学改革以来, 学生课堂表现良好, 历年成绩均呈现正态分布, 学生评教结果均在90分以上。2017级自动化专业学生成绩分布如图8所示。

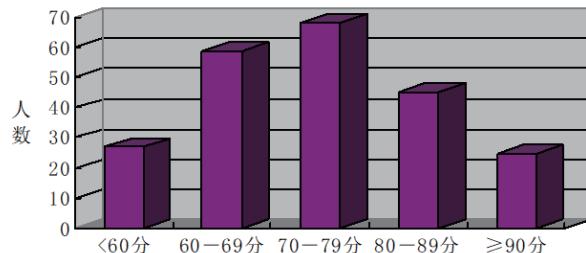


图8 2017级自动化专业学生成绩分布

五、结语

该文以升压斩波电路为例, 通过多角度理论分析—工程应用—仿真的学习和训练过程, 使学生逐层加深和掌握核心技术的知识、基本应用和系统应用。课堂教学中, 选取一些工程中典型实例来分析, 让学生熟悉各种电力电子器件和变换电路的工程分析方法、应用范围及技术经济指标, 培养学生工程实践的意识。配合培养计划中其它相关能力培养课程, 使学生成为一个合格的电气工程及其自动化专业的应用型人才。

因此, 扩展了学生的视野, 使学生了解电力电子领域的最新成就和技术动态, 力求做到在有限的学时内, 使学生尽可能多地了解电力电子技术的概况, 多掌握一些基础知识和基本技能, 提高学习和钻研的兴趣, 教学改革实践紧密联系实际, 毕业生在就业中更有竞争力, 为今后的教学奠定良好的基础。

参考文献

- [1] 屈克庆, 潘雪涛, 赵晋斌, 等. 案例教学在研究生“电力电子系统分析与应用”课程中的探索 [J]. 中国电力教育, 2021, 000 (S01) : 119-120.
- [2] 薛荣辉. “电力电子技术”课程斩波电路教学方法研究 [J]. 现代信息技术, 2022, 9: 195-198.
- [3] 马飞, 李琦. 以学生为中心的《电力电子技术》课程教学改革研究 [J]. 创新创业理论研究与实践, 2022, 11(6): 18-20.
- [4] 赵梅花. 升压斩波电路教学改革方案设计 [J]. 中国现代教育装备, 2017, 001: 39-41.
- [5] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术 [M]. 第5版. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [6] 刘志刚. 电力电子学 [M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2004.
- [7] 李建萍, 魏巍. 教育学导论 [M]. 北京: 人民出版社, 2006.
- [8] 路勇, 佟毅, 等. 电子电路实验与仿真 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [9] 马飞, 李琦. 以学生为中心的《电力电子技术》课程教学改革研究 [J]. 创新创业理论研究与实践, 2022, 11 (6) : 18-20.
- [10] 李飞, 刘孟桃, 张兴, 等. “电力电子技术”课程启发式教学的探索与实践 [J]. 电气电子教学学报, 2021, 43 (6) : 39-41, 51.