

# Teaching Objectives of Power Electronic Technologies Applicable to Outcomes Based Education

Xijun Yang<sup>1,\*</sup>, Shuang Wu<sup>1</sup>, Wei Jiao<sup>1</sup>, Shuxin Tian<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dept. of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China

<sup>2</sup> Electric Engineering College, Shanghai University of Electric Power, Shanghai, China

\*Corresponding author. Email: yangxijun@sjtu.edu.cn

## ABSTRACT

In order to promote the new scientific and technological revolution as well as industrial change, the Ministry of Education has timely launched the concept of Outcomes Based Education (OBE). In order to comply with this new teaching concept, as a professional basic course, the teaching and learning of "Power Electronic Technology" need to follow up in time, and long-term teaching objectives should be made out. In this paper, some of the main knowledge in this course, combined with teaching experience, many a teaching objectives and teaching effects are proposed for the teachers and students to achieve, including classroom teaching, homework arrangement and experimental verification, hereby in order to get more satisfactory teaching outcomes.

**Keywords:** Outcomes based education, Power electronic technologies, Teaching objective, Teaching effect.

## 成果导向教育背景下电力电子技术的教学目标

杨喜军<sup>1,\*</sup>, 吴双<sup>1</sup>, 焦伟<sup>1</sup>, 田书欣<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 上海交通大学电气工程系, 上海, 中国

<sup>2</sup> 上海电力大学电气工程系, 上海, 中国

\*通讯作者. 邮箱: yangxijun@sjtu.edu.cn

## 中文摘要

为了推动新一轮科技革命与产业变革, 教育部及时推出成果导向教育理念。为顺应这一全新教学理念, 作为一门专业基础课, “电力电子技术”教学需要及时跟进, 并制定长远的教学目标。本文就本课程一些主要知识方面, 结合教学经验, 给出一些师生需要达到的教学目标和获得的教学效果, 包括课堂教学、作业安排与实验验证等方面, 以此期望获得更加满意的教学效果。

**关键词:** 成果导向教育; 电力电子技术; 教学目标; 教学效果。

## 1. 引言

2016年06月02日, 我国工程教育正式签署《华盛顿协议》, 表明我国工程教育质量实现了国际实质等效, 工程教育质量达到了国际标准。同时, 为强力推动新一轮科技革命与产业变革, 促使现代服务创

新驱动进展以及“中国制造2025”等国家战略, 自从2017年02月, 教育部推进新工科教育 (Emerging Engineering Education, EEE) 建设, 诞生了“复旦共识”、“天大行动”以及“北京指南”, 探索领跑全球工程教育的中国模式以及中国经验, 着力加强高等教育强国建设<sup>[1-6]</sup>。为了巩固我国工程教育质量, 需要改变

先前单一的内容导向教育(CBE)模式,转移到成果导向教育(OBE)模式。在2018年01月30日,教育部首次颁布了《普通高等学校本科专业类教学质量国家标准》。为了符合该国家标准,必须改变传统内容导向教育(CBE)方式,快速转移到成果导向教育(OBE)轨道上<sup>[7-9]</sup>。2021年3月12日政府工作报告正式发布。其中提到,努力做好碳达峰以及碳中和工作。制定2030年前碳排放达峰行动方案。尽快建成全国范围的用能权和碳排放权的交易市场,不断建立健全能源消费双控制度。为响应教育部号召和适应新形式,每一门专业基础课来都必须重新制定培养方案、完善课程体系和提供实践机会。“电力电子技术”作为电气工程领域一门专业课程,涉及电力技术(电力设备与电力网络)、电子技术(电子器件与电子电路)与控制技术(连续域与离散域),是新能源变换技术的基础<sup>[10]</sup>,在当前形式下,该课程的地位显得更加重要。本文基于课程思政、课堂教学、作业安排与实验验证等方面,给出一些经验、体会和思路,为达到更好的教学效果提供借鉴。

## 2. 课堂教学

在教学活动中也体现着一些哲学的观点和方法,本课程的教学过程也体现着普遍性与特殊性问题、普遍联系与变化发展的观点。为真正地学好这门课程,给出以下16个方面的教学目标:

(1) 对于两类功率开关,即相控晶闸管一类和斩控功率MOSFET和IGBT一类,所有的变换电路和相应调制算法都是基于开关特性的,在讲解这一部分时,一定要阐明功率开关物理结构与开关特性之间的关系,包括内部寄生开关的类型以及典型驱动电路,驱动电路包括晶闸管、GTR/BJT一类电流型驱动器和IGBT、功率MOSFET一类电压型驱动器。为便于学生掌握和持久记忆,要对所有半导体类型和功率开关进行归类总结;

(2) 对于四类电力电子变换电路,即相控/斩控AC-DC变换器、相控/斩控DC-AC变换器、相控/斩控AC-AC变换器、隔离/耦合型斩控DC-DC变换器,其中涉及到波形合成原理和软开关方式,需要明确某些复杂变换电路是由基本变换电路级联而成,如交直交工业变换器,耦合方式包括电压耦合、电流耦合、直接耦合和高频变压器耦合等;

(3) 对于两类保护方式,即电流保护和电压保护,包括面向功率开关的快速器件级保护和面向变换电路的慢速系统级保护,器件级电压保护一般采用无感电容、RC、RCD网络,系统级电压保护一般采用压敏电阻、TVS、浪涌电压吸收器,器件级电流保护包括抗饱和电路、霍尔电流传感器和分流电阻等方式,有效保护时间不超过10 $\mu$ s;

(4) 对于两类功率器件,即有源功率开关和与无源器件,无源器件包括电阻、电感、电容、变压器、互感器等,任何电力电子变换电路离不开无源器件的

使用,它们在功率变换中的作用并不相同。在讲解每一种变换电路工作原理时,要适时地联系起来无源器件的作用。例如,在讲解反激式开关电源时,电压输出端必须使用电阻假负载。除了电阻外,无源器件的尺寸需要通过增加开关频率来降低;

(5) 对于晶闸管变换器的相位控制和IGBT变换器的斩波控制,从调制的角度可以建立二者之间的相同联系,但是区别也是非常明显的,表现在:载波频率不同,前者工频后者高频;载波形状不同,前者为后沿调制的锯齿波,后者为任意锯齿波或三角波;驱动方式不同,前者可以一次驱动,后者需要连续驱动;

(6) 为了增加学生的感性认识,尽量提供清晰完整的电路图,做到看图说话,包括各种电路拓扑和变换波形,要求学生能够准确地识别和绘制各种电路原理图、理想状态下和实际状态下的变换波形,要求教师必须配合使用ppt和板书,在正式上课之前,在黑板上绘制标准清晰的图形,符号要规范,适当使用不同颜色粉笔,建议教师采用中文ppt,板书采用英文,做到准双语教学;

(7) 本课程是一门交叉学科,涉及电力技术、电子技术与控制技术,除了电工原理和模拟电路外,电力技术、控制技术以及电力传动技术均为同期和后期才开始上课,因此造成了某些技术之间相互脱节。针对这一情况,在授课期间,需要安排讲解变换电路不同类型负载的工作原理。这些内容至少包括:电压源逆变器的开环控制、并网电压源逆变器的闭环控制、DC-DC变换电路的闭环控制、AC-DC变换器-直流电动机传动系统、晶闸管-感应电动机软启动器、AC-DC-AC工业变频器、晶闸管HVDC与IGBT HVDC-light等;

(8) 电力电子变换最基本的原理就是波形合成原理,包括阶梯合成、高频合成以及二者的综合,阶梯合成涉及HVDC与HVDC-light、方波调制的电源逆变器等,高频合成涉及DC-DC变换器、电压源逆变器、矩阵变换器等,二者结合的变换电路包括级联多重化变换器、三电平变换器、模块化多电平变换器等。学生需要了解波形合成原理,明白所需波形是如何合成出来的,有条件时可以进行深度讲解;

(9) 对于电力电子变换电路,根据需求的不同,期望得到波形会出现在变换电路的输出侧或输入侧,对于常用的电压源,一般情况是电压派生出电流、电压与电流派生出功率。功率形式包括瞬时值表示的瞬时有功功率和瞬时无功功率,还包括有效值表示的有功功率(即平均功率)、无功功率与视在功率,进而又分化出效率和功率因数。对于复杂的级联型变换电路,假定效率为100%时,不同环节的有功功率平衡,无功功率、畸变功率与视在功率不一定平衡。在讲解功率因数校正电路时,需要向学生明确这一观点。另一方面,阻抗是电路的一种属性,电力电子变换电路可以调节线路的等效阻抗,又称为阻抗变换器,在工程应用中具有潜在的应用价值;

(10) 电力电子变换电路产生的最终波形或中间波形,一般为高频脉冲序列,其按开关周期的平均值是按照期望波形变化的,也就是说,当开关频率足够高时,在时域上期望波形与按开关周期的平均值形成波形的偏差足够小时,或在频域上期望波形与按开关周期平均值形成的频谱除了高频分量外偏差足够小时,说明波形合成算法是正确的。学生必须学会利用时域与频域掌握电力电子变换电路的波形合成原理,并学会换“域”思考。在条件允许的情况下,可以向学生讲解自然坐标系(即abc坐标系)、静止坐标系(即 $\alpha\beta$ 坐标系)与旋转坐标系(即dq坐标系)之间的相互转换原理,并学会换“坐标”思考;

(11) 在电力电子变换电路中,控制电路包括模拟电路和数字电路,数字电路如DSP或MCU控制器,通过给定的信息和检测到的电量,完成系统控制和调制算法,产生驱动脉冲,经过驱动电路,控制功率电路中功率开关的通断过程,即开关状态,致使电路结构有规律地快速变化,即电路变结构,其结果是,功率电路中节点电压或支路电流瞬时值与平均值发生相应的变化,其实电力电子变换电路的这种工作原理可以称为“功率级的调制解调器”,而电路变结构是通过开关动作实现的,为了获得较低开关损耗和清晰变结构,要求功率开关工作在快速通断状态,而不能工作在线性放大状态,这一点与信息电路中半导体开关的工作状态不同,也是开关电源与线性电源的重要区别之一;

(12) 对于电压源型变换电路,需要处理好安全换流问题,一是防止电压源短路而加入死区时间,如电压源逆变器和矩阵变换器,死区会使实际按照开关周期求平均的输出在幅值、相位、波形上发生偏差,需要采取适当的补偿措施;二是防止感性线路开路而产生浪涌电压。对于二极管类、晶闸管类整流电路,由于存在整流变压器漏感或线路分布电感,会出现换相重叠角问题,换相重叠角的出现会使得开关状态增加,在整流状态和逆变状态下输出电压平均值下降;

(13) 在讲解电力电子变换电路工作原理时,要重视波形变换和波形绘制,正确的波形绘制是电量计算的基础。在课堂授课和课后作业中,需要增加在正常条件下或异常条件下电力电子变换电路的波形绘制。对于正弦交流电压供电的电力电子变换电路,网侧电压与网侧电流之间将形成有功功率、无功功率、畸变功率和视在功率,电压全波有效值与电流全波有效值之间形成视在功率,相同频率的电压与电流之间形成有功功率和无功功率,不同频率的电压与电流之间形成畸变功率,畸变功率为零的负载为线性负载。畸变功率与无功功率为零的负载其网侧功率因数为1。表征谐波含量多少的指标为总谐波畸变率(THD),表征高次谐波含量多少的指标为部分权重谐波畸变率(PWHD);

(14) 调制算法是电力电子变换电路的关键技术之一,脉冲调制包括脉冲宽度调制(PWM)、脉冲

频率调制(PFM)和脉冲相位调制(PPM)。PWM应该描述为脉冲占空比调制(PDM)。广义而言,载波可以为三角载波和锯齿波,包括双沿调制、前沿调制和后沿调制,载波不同时会影响输出电压频谱的一些细节,但是总体上分布规律不变。DC-DC变换器的控制信号为直流分量,DC-AC变换器的控制信号为交流分量,控制信号又称为调制波、调制函数、目标函数、存在函数和开关函数。所谓调制概念是指在控制信号和载波之间进行比较,产生原始驱动脉冲序列,控制信号和载波都可以为可变信号,调制需要的是比较二者之间的大小关系。

(15) 由简单变换电路合成出复杂电路也是学生应该掌握的技能,比如由单相二极管不控整流器、BOOST DC-DC变换器可以构成单相有源功率因数校正电路(APFC)。正式因为BOOST DC-DC变换器中升压电感电流可以连续,而BUCK DC-DC变换器输入电流只能断续,因此单相APFC为升压型变换电路。如果时间允许,可以采用两个学时讲解单相APFC的工作原理,这样可以扩大学生的视野和扩展分析能力;

(16) DC-DC变换器是学生喜欢和易于接受的电路,最基本的BUCK、BOOST、BUCK-BOOST、BOOST-BUCK(CÚK)、SEPEC、ZETA的共同特点是只使用一只功率开关。条件允许时,鼓励学生基于基本变换电路设计出升降压能力和极性不同的DC-DC变换电路。例如,为了扩大BUCK DC-DC变换电路的降压能力(如1500V-15V),可以设计占空比为d2、或串充并放型、或续流能量回馈电源型BUCK DC-DC变换电路。为了扩大BOOST DC-DC变换电路的升压能力(如15V-1500V),可以设计并充串放型BOOST DC-DC变换电路。

### 3. 作业安排与实验验证

#### 3.1. 作业安排

进入大学阶段,已经没有条件重复高中阶段的题海战术,主要原因包括(1)课程多,学生缺乏足够空闲时间进行深度学习;(4)题型多,学生无法全部覆盖题目类型;(3)偏应用,学生缺乏工程技术经验且不掌握工程实现手段;(4)少数学生综合能力出现不足,为此教师需要每次课都精心设计一些题目,通过适量和适度的题目来提升学生的理解能力。不仅解决本次课应该掌握、理解的内容,而且还要呈上起下,将各门课程内容穿插起来,形成知识线索,便于学生长久记忆。

题目应该偏重波形变换,包括变换电路正常与异常、理想与不理想运行条件下的工作波形。题目数量不宜过多,难度不宜过高,题目类型可以包括填空、选择、计算和波形,计算和波形题的设计一定要明晰,也可以设计填空与选择题,题目中将波形曲线绘制成虚线状,便于学生选择性绘制,以便节约时间。设置

题目时,按照难易程度分成三档:(1)概念题,要求人人精通;(2)应用题,要求人人掌握;(3)扩展题,要求人人了解,且不列入考试范围。作业包括课上作业和课后作业,前者提供一些讲课要点和注意事项,课上作业和课后作业合并后下次上课一起提交。教师给出参考答案,助教批阅和统计次数,发现问题及时汇报,以便不断改进出题方式。如果学生有疑问,可以采取线上与线下方式进行答疑。必要时可以进行期中考试,考试成绩作为平时成绩的一部分,考试类型与难易程度一定要与期末考试题目一致,防止期末考试时学生对题型、题面设计、难易程度等表现出不适应。可以适当增加难度,防止学生错误认为本课程轻松易学。适当预留一些仿真作业,仿真软件仅限于MATLAB/Simulink或PLECS。仿真程序由教师提供,仿真条件由学生自行设置。通过仿真分析获得结果来完成作业。仿真作业的好处在于:(1)学生可以根据需要随意修改仿真条件,增强学习效果;(2)学生可以根据需要设计出不同的仿真电路,扩大认知范围;(3)在教师不在身边时,学生可以借助仿真分析做到自学和终身学习。

### 3.2. 实验验证

作业是为了促进学生掌握基本理论,处理问题都是在理想或假定条件下进行的,那么实验则是理论与实践的有机结合,处理问题是在实际条件下进行。实验分为两类:验证型实验和开放型实验,其中验证型实验是本课程的主要实验方式,主要实验内容包括常用功率开关的开关特性、正激与反激开关电源、BUCK与BOOST DC-DC变换器、单相全桥相控整流器、三相全桥相控整流器及有源逆变以及单相功率因数校正器等。实验目的不仅在于学生要亲自完成实验规范、获得实验波形和实验数据,还需要对照理论分析、仿真分析结果,发现其中的共性和差异性,并能够进行合理解释。验证型实验的另一个目的在于增加学生的感性认识,为以后参加PRP、大学生创新计划、大学生电子竞技打下基础。

## 4. 结语

为主动迎接成果导向教育,需要对传统学科授课方式进行升级改造。本文根据过去积累的一些经验,给出了“电力电子技术”一些教学观点和教学方法以及期望达到的教学目标。通过教学目标的达成,学生需要融会贯通多门专业知识,学生发现问题、总结问题、阐明问题、解决问题的能力以及考虑问题方式必然得到加强,使之具备形成成果的能力。

## 致谢

2020年上海交通大学教学发展中心基金项目:成果导向的电力电子课程实践模式探索,CTLD20J0037。

## REFERENCES

- [1] Zi-yun WANG, Yan WANG, Zhi-cheng JI. Ideological and political teaching reform of power electronic technology course for new engineering [J]. Journal of Higher Education, 2020(35):140-143 (in Chinese)
- [2] Cui WANG, Xiao-pin YANG, Jin LI, Xiao-qiang SUN, Li LU. Problems and countermeasures of course teaching of power electronics background of new engineering [J]. Journal of Hubei Polytechnic University, 2020, 36(05): 63-66 (in Chinese)
- [3] Lei-lei GUO, Yan-yan LI, An-ping ZHENG, Nan JIN, JIE WU, Zhi-feng DOU. Exploration on teaching methods of power electronic technology in the context of emerging engineering [J]. Education Teaching Forum, 2020(38): 303-304 (in Chinese)
- [4] Zi-cheng LI, Jian LIU, Li ZENG, Xiao-ling WEN. Reform and Exploration of Teaching Reform for Power Electronics Device and System under the Background of Emerging Engineering Education [J]. China Modern Educational Equipment, 2020(13): 48-50 (in Chinese)
- [5] San-yi MEN, Xian-li WANG, Ying-wen ZHANG. Course Reform and Practical Exploration of Power Electronics Technology Based on Emerging Engineering [J]. Electronic quality, 2020(06):91-93 (in Chinese)
- [6] Mi LI, De TANG, Shao-wu LI, Chen SHEN. Development and design of virtual power electronics experiment system under the background of new engineering [J]. Science and Technology & Innovation, 2019(19):16-19 (in Chinese)
- [7] Dan-jiang CHEN, Hui-li FAN, Ya-ping YANG. Reform idea of electrical engineering based on OBE [J]. Journal of EEE, 2019, 41(06): 37-40 (in Chinese)
- [8] Ke-cai CAO, Min YANG, Ying-jiang ZHOU, Bo ZHAO, You-hong WAN. The teaching reform of principles of automatic control based on OBE [J]. Journal of EEE, 2019, 41(03):17-21 (in Chinese)
- [9] Xiao-ying LI, Xing-gui WANG, Wei-man YANG. Teaching reform of power electronic technology based on outcome oriented education [J]. Journal of EEE, 2018, 40(01): 45-48 (in Chinese)
- [10] Seddik Bacha, Iulian Munteanu, Antoneta Iuliana. Power electronic converters modeling and control with case studies [M]. Springer-Verlag London 2014. ISSN 1439-2232, ISBN 978-1-4471-5477-8.