

新工科背景下“电力电子技术”实践教学改革

王玉斌 于 静 王 璠

(山东大学 电气工程学院, 济南 250061)

摘要:新工科背景下电力电子技术的实践教学的改革和创新势在必行。电力电子实践教学改革以电力电子变换器拓扑分析、设计、模拟仿真、实验等过程进行问题导向学习,注重培养学生从理论‘仿真’实践的进阶式开发设计能力。本文以基于PEK-110的谐波电流源设计与实现为实例,阐述电力电子创新实践教学的全过程。实践证明,电力电子实践教学改革满足工程教育创新和新工科建设的发展要求。

关键词:电力电子技术;实践教学改革;新工科

中图分类号:TM46

文献标识码:A

文章编号:1008-0686(2023)0 -0000-00

Experiment Teaching Innovation of Power Electronics under the New Engineering Background

WANGYubin YU Jing WANG Fan

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Under the new engineering background, it is imperative to reform and innovate the experiment teaching of power electronics. The power electronics experiment teaching reform focus on the power electronics converter topological analysis, design, simulation, experiment and other processes to conduct problem-oriented learning, and pay attention to cultivating students' advanced development and design ability from theory to simulation and practice. In this paper, the design and implementation of harmonic current source based on PEK-110 is taken as an example to expound the whole process of power electronics experiment teaching innovation, which proves that the experiment teaching reform of power electronics meets the development requirements of engineering education innovation and the new engineering construction.

Key words: power electronics; experiment teaching innovation; the new engineering

近年来,国家做出走中国特色的新型工业化道路、建设人才强国及创新型国家等一系列的重大战略部署。对高等工程教育的新要求是主动服务国家的战略要求和行业、企业的需求,改革人才培养模式,锻炼学生的工程实践能力和创新能力,构建具有中国特色社会主义的现代化高等工程教育体系,“新工科”建设是我国工程教育主动应对新一轮科技革命与产业变革的战略行动^[1,2]。

电力电子技术作为20世纪后半叶诞生和发展的一门崭新技术,在短短几十年的时间里得到迅猛发展。电力电子技术和运动控制一起,将和计算机技术共同成为未来科学技术的两大支柱^[3]。目前,电力电子技术已在工业、交通运输、电力系统、电源、家用电器等几乎所有的领域得到了广泛的应用。近期成为热点的全球能源互联网,电力电子技术在其中也起到重要作用。电力电子技术是连接

各个能源网络的纽带,是能源互联网中“互联”的技术支撑。在未来以清洁能源为主导的多种综合能源系统中,电力电子是必不可少,必将占有重要席位。

目前,“电力电子技术”是电气工程学科重要的专业技术基础课,同时也是技术性和实践性非常强的一门课程^[4,5],目前主要采用课堂加实验的模式以及综合实验或课程设计的模式进行教学。相应的电力电子技术实验教学,一般采用诸如浙江天煌、浙江求是等品牌的电力电子与电气传动实验平台,此类实验平台仅为验证性实验平台,随着电力电子技术的快速发展,验证性实验平台在实验教学中的作用,已显露出较多不足,主要表现为:以提交实验报告为考核指标,学生依实验指导书按部就班的做、只是简单地接接线、看看波形,兴趣普遍不高、主动性差;缺少电路的设计及仿真环节,学生不

能较好的理解电路的原理以及结构,不利于发现问题及故障分析;缺乏持续开发、创新实验的能力,利用效率不高等。

总之,目前传统电力电子的实验教学已明显滞后,不能满足工程教育创新和新工科建设的发展要求。

1 实践教学改革思路

电力电子实践教学模式的改革与实践,以培养创新型人才为目标,基本思路是以专业课程内容为理论基础和根本,采取“理论‘仿真’实践”逐步深入的步骤,基于固纬电子的 PTS-3000 电力电子实训系统为综合实验平台,培养电气工程自主创新人才。

电力电子实践教学改革的以电力电子变换器拓扑分析、设计、模拟仿真、实验等过程进行问题导向学习,根据变换器性能指标设计其主电路和控制器,并通过 PSIM 模拟验证、Simcoder 数字仿真验证并形成 C 程序代码、程序固化和实验验证等环节,让学生更深入了解电力电子变换器等电力电子变换器的相关特性。注重培养学生从理论‘仿真’实践的进阶式开发设计能力。实践教学改革的路线图如图 1 所示^[6]。

由图 1 可见,电力电子实践教学的改革和创新分为三个阶段,即:

(1) 变换器原理、设计与 PSIM 模拟仿真阶段:要求学生理解并掌握电力电子变换器电路原理及设计方法,首先设计电力电子变换器的主电路和控制电路,并搭建相应的 PSIM 模拟仿真电路、进行仿真分析,使仿真结果满足设计指标;

(2) PSIM Simcoder 数字仿真阶段:将第一阶段的 PSIM 仿真电路中控制电路部分(含 PI 调节器、PWM、开关量输入输出、AD 转换等)数字化、搭建相应的 PSIM Simcoder 仿真电路并进行仿真,使仿真结果满足设计指标;然后在 PSIM 中将 Simcoder 仿真电路部分一键生成 TI DSP 的 C 程序代码,并通过 TI 的 CCS 集成编程环境软件编译、链接,最后通过 JTAG 固化工具将 C 代码固化到目标 DSP 的 FLASH 中;

(3) 实验验证阶段:搭建并调试实际的电力电子变换器进行实验验证,观测实验波形、测试相应的指标,使之满足设计要求。本文通过 PTS-3000 电力电子实训平台进行实验项目的测试验证,同时通过 PEK 模组的相关接口进行实验数据的获取与参数的设定。

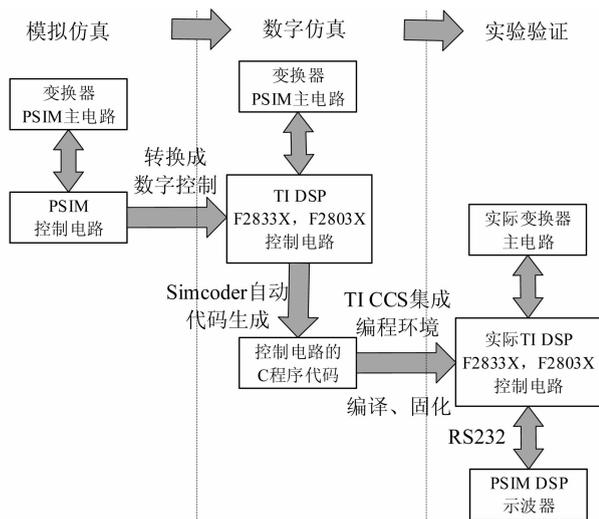


图 1 电力电子实践教学改革路线图

2 实践教学的综合实验平台

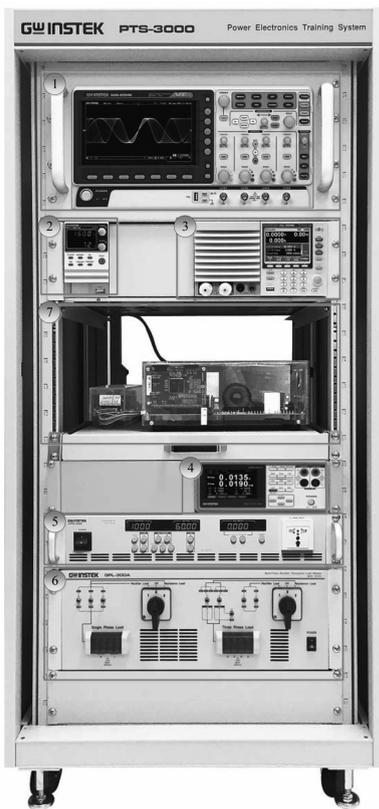
固纬电子最近推出的 PTS 系列电力电子实训系统,是对传统的验证性实验平台的改革和创新,该 PTS 电力电子实训系统以电力电子电路分析、设计、仿真、实验等过程进行问题导向学习,使学生彻底深入了解电力电子变换器原理及相关控制技术,注重培养学生从理论、仿真、实际产品的进阶式开发设计能力和创新实践能力,满足工程教育创新和新工科建设的发展要求,因此本文将 PTS-3000 电力电子实训系统作为电力电子技术的创新实践教学的综合实验平台。

固纬 PTS-3000 电力电子实训系统配置如图 2 所示^[6]。PTS-3000 的标准配置包括:PEK 系列模组、4 通道数字存储示波器 GDS-2204E、可编程直流电源 PSW 160-7.2、单/三相交流电源 APS-300、单/三相交流负载 GPL-300、交/直流功率表 GPM-8213、可编程直流电子负载 PEL-3031E 等。另需配置台式计算机或笔记本电脑作为 PSIM 仿真、固化程序与监控的实验工具。

其中,PEK 系列模组,含降压 DC/DC 变换器模组 PEK-120、单相逆变器模组 PEK-110、三相逆变器模组 PEK-130、永磁同步电机驱动与控制模组 PEK-190 等,可依不同的实验项目选用不同的 PEK 系列模组。

3 实践教学改革实例

本节以基于 PEK-110 的谐波电流源设计与实现为实践教学实例,阐述电力电子创新实践教学的全过程。本实例的具体要求是:基于模组 PEK-110,设计并实现单相并网谐波电流源^[7],即在输出基波电流



PTS3000系列标准配置:
1. GDS-2204E 数字存储示波器
2. PSW 160-7.2 可编程直流电源
3. PEL-3031E 可编程直流电子负载
4. GPM-8213 交流功率表
5. APS-300 单/三相交流电源
6. GPL-300A 多相被试负载
7. PEK-130 三相逆变器模组

* 依所做实验需求, PEK系列模组或仪表等配置可能会有所不同。

图2 PTS-3000 电力电子实训系统

基础上,叠加一种或两种次数的谐波,谐波次数不高于 1 kHz。谐波幅值如无特别说明,可为基波电流的 1/n。该谐波源可用来模拟晶闸管可控整流电路交流输入侧的谐波电流等,用于电能质量监测、分析和控制。

学生按任务进行分配,每组 3-4 人。首先,各组一起查阅相关资料,并共同讨论设计方案。然后,根据各人的兴趣进行分工,分别负责锁相环和 PI 调节器设计、PSIM 模拟仿真和 PSIM Simcoder 数字仿真、程序生成和实验验证、报告撰写等。小组成员之间既有协作又有分工,不仅锻炼个人的技术能力,也能培养团队协作能力。

3.1 谐波电流源的原理

单相谐波电流源的实现原理如图 3 所示。其中主电路基于模组 PEK-110、采用单相全桥逆变器结构。控制回路采用单输出电流控制,即逆变器按受控电流源控制,使输出电流跟踪指令电流。如图 3 所示,其电流指令信号 i_{oc} 来自谐波电流计算单元,电流反馈信号 i_o 取自逆变器输出电流,两者误差用以产生 PWM 的控制电压 V_{con} 。PWM 产生的开关控制信号用来驱动主电路的开关,主电路的桥式输出经低通滤波器,用以衰减逆变器高频开关产生的高频谐波,使输出电流为给定的低次谐波电流。

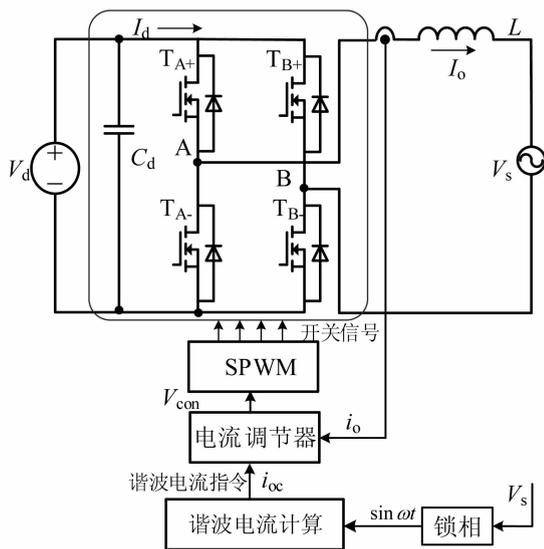


图3 单相谐波电流源原理

在进行指令谐波电流计算时,需要用到相位信息。一般并网逆变器的基波电流与电网电压同相,为此可用锁相环锁定电网电压的实时相位,作为谐波电流源中基波和各次谐波的相位基准,锁相环的实现框图如图 4 所示。

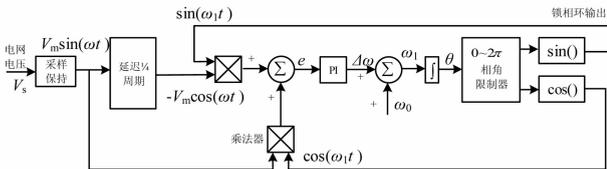


图4 锁相环原理

利用锁相环实时锁定电网电压相位后,作为谐波电流给定基波的相位基准,将此相位基准与所需输出的谐波次数相乘即可得到该次谐波的相位,该次谐波瞬时值与基波电流瞬时值相加即可得到指令谐波电流。

3.2 PSIM 模拟和数字仿真

固纬 PEK-110 单相并网逆变器的主电路参数如表 1 所示,基于上述原理设计的电流环的采用标准 PI 调节器^[8],参数如表 2 所示。

表 1 PEK-110 主电路参数

参数	数值
输出功率 P_o/W	115
输入直流电压 V_d/V	70
输出电压有效值 v_o/V	40
输入侧电容值 $C_d/\mu F$	330
输出滤波电感 L/mH	1.323
输出滤波电容 $C_o/\mu F$	10
开关频率 f_s/Hz	18000
PWM 环节增益 k_{PWM}	28

表 2 电流调节器参数

参数	数值
PI 积分系数 K_i	70910
PI 比例系数 K_p	10.6
剪切频率 f_c/Hz	1800

根据上述参数建立单相谐波电流源的 PSIM 仿真电路,并进行相应的仿真(仿真结果与下一步 PSIM Simcoder 数字仿真相同,此处从略)。接着将 PSIM 仿真电路中控制电路部分数字化、搭建相应的 PSIM Simcoder 仿真电路并进行数字仿真,仿真结果如图 5 所示。PSIM Simcoder 仿真电路中,谐波电流指令是基波电流同时叠加了 3 次和 5 次谐波电流(3 次、5 次谐波幅值分别为基波电流的 1/3、1/5)。图 5 中,分别给出了电网电压、锁相环输出、谐波电流指令和输出谐波电流的仿真波形,可以看出输出谐波电流与其指令相同,有效地实现了谐波电流源的功能。

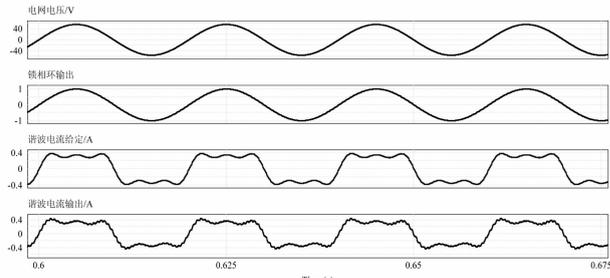


图 5 PSIM Simcoder 仿真波形

3.3 谐波电流源的实验验证

在 TI CCS 中将 C 程序编译、连接后固化到 PEK-110 的 DSP 中,即可进行谐波电流源的实验验证。

将可编程直流电源 PSW160-7.2(调至 80V, CC 挡位调至 1A)作为 PEK-110 的直流输入,用交流电源 APS-300(其运行模式设定为单相输出,电压设定为 40Vac,50Hz)来模拟交流电网,实验设备配置如图 6 所示。

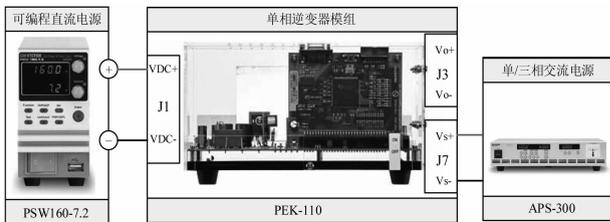
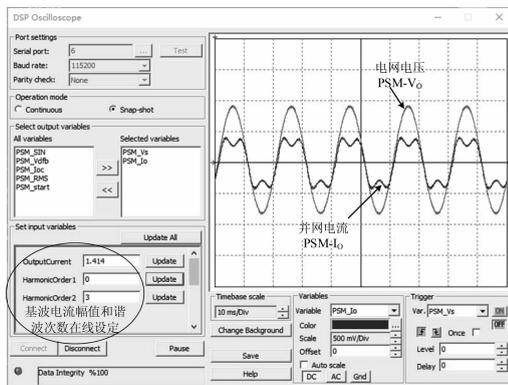


图 6 实验设备配置图

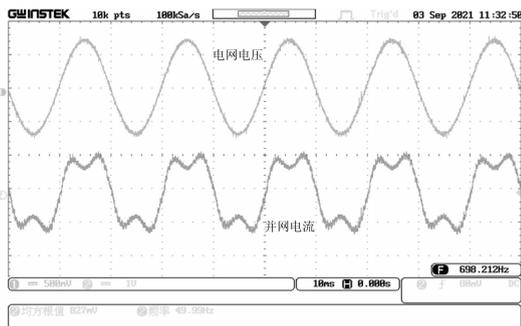
实验时先后开启可编程直流电源 PSW160-7.2 及交流电源 APS-300,接着再启动 PEK-110。PEK-110 即可输出设定的谐波电流。实验过程中 PEK-110 的 DSP 可以和上位机通过 RS-

232 进行实时信息交互,即 PEK-110 可以将一些变量的波形数据实时上传给上位机并在 PSIM 的 DSP 示波器中显示、上位机又可将相关命令下达给 PEK-110 在线修改运行参数。

图 7 和图 8 分别给出了仅含有 3 次谐波、同时含有 3 次和 5 次谐波的谐波电流源的输出波形。图 7a 中在 DSP 示波器界面设定的基波电流幅值 1.414A、仅含有 3 次谐波(缺省谐波幅值为基波的 1/3),图 8a 中在 DSP 示波器界面设定的基波电流幅值 1.414A、含有 3 次和 5 次谐波(缺省 3 次、5 次谐波幅值分别为基波的 1/3、1/5),DSP 示波器和实际示波器分别显示了模拟的电网电压和相应的并网谐波电流,两者一致验证了谐波电流源设计的合理性和正确性。

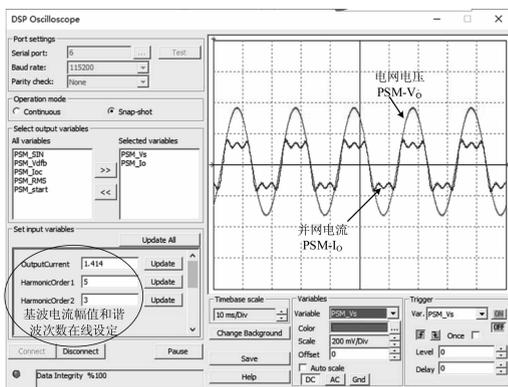


(a) DSP 示波器显示界面

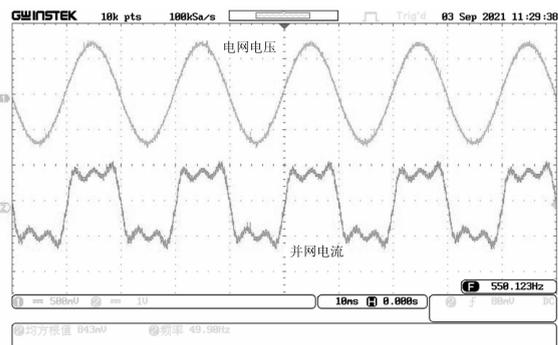


(b) 实际示波器显示波形

图 7 仅含三次谐波的并网电流实验波形



(a) DSP 示波器显示界面



(b)实际示波器显示波形

图8 同时含3次、5次谐波的并网电流实验波形

4 结语

电力电子实践教学模式的改革与实践,以培养创新型人才为目标,顺应和满足工程教育创新和新工科建设的发展要求。通过实践教学实例——基于 PEK-110 的谐波电流源设计与实现,得到以下结论:

(1)将传统的电力电子实验教学方法,改革和创新为“理论‘仿真’实践”进阶式实训锻炼,着力培养学生自主创新开发设计能力和探索研究未知新知识的方法和能力。

(2)每个电力电子实训锻炼项目都涵盖了电力电子、电路、自控理论、计算机仿真、电机等多门专业课的理论知识,通过实践教学又反过来促进了学生对所学专业理论知识的理解、掌握和提高。

参考文献

- [1]吴爱华,侯永峰,等.加快发展和建设新工科主动适应和引领新经济[J].高等工程教育研究,2017(1):1-9.
- [2]张安富,刘超.“中国制造2025”背景下的新工科构建[J].中国大学教学,2017(9):21-23.
- [3]王兆安,刘进军.电力电子技术(第5版)[M].北京:机械工业出版社,2013年6月.
- [4]章小卫,周京华,等.新工科背景下电力电子技术创新实践教学研究[J].中国电力教育,2018(5):78-80.
- [5]周岩,张腾飞,等.基于LabVIEW构建“电力电子技术”实践教学平台[J].电气电子教学学报,2018(10):129-131,135.
- [6]王玉斌.先进电力电子技术原理、设计与工程实践[M].济南:山东大学出版社,2021年1月.
- [7]王华佳,雷万钧,等.并联型重复控制器在谐波电流源中的应用[J].电力电子技术,2016(10):49-51.
- [8]徐德鸿.电力电子系统建模及控制[M].北京:机械工业出版社,2006年1月.