

“双碳”背景下电气工程及其自动化专业实践课程开发

张新闻 师洪涛 刘凡齐

(北方民族大学电气信息工程学院, 宁夏银川 750021)

摘要:为促进电气工程及其自动化专业更好地服务于“双碳”战略,开发了一门基于电力电子技术应用的专业实践课程。本课程综合应用了十余门理论课与实践课专业知识,要求学生完成指定任务。实践证明,通过本课程的训练,学生应用专业知识和解决实际问题的能力得到了显著提高,为未来从事“双碳”领域中新能源发电与电能高效变换方面的工作打下了坚实基础。

关键词:双碳;电气工程及其自动化;专业实践;课程开发

“双碳”目标对我国社会经济可持续发展具有重大战略意义,不少学科或专业都在思考探索“双碳”目标下自身的发展,以期争取先发优势,取得更好成绩。电气工程是现代科技领域中的核心学科,该学科与“双碳”目标密切相关。该学科中的电能生产环节,要求以化石能源为主体的一次能源向可再生能源方向转变;为降低线路损耗,电能变送环节将更多的转变为直流输电方式;在数量庞大的电能消费终端,要求用电设备尽可能提高其能量转化效率。最终,在现代信息技术与管理手段的强力支撑下,构建一个坚强稳定的“源网荷储”高效运作的新型电力系统,进而为“双碳”目标实现做出电气工程学科应有的贡献。

电气工程及其自动化是电气工程学科本科专业,为了使该专业紧跟社会发展需求,推动经济技术发展,国内高校不断调整完善人才培养方案。例如,文献根据工程教育认证的要求,提出完善实践教学体系和创新创业平台建设,强化教学管理与质量监控;文献采用以成果为导向的教育理念,分析了高校工程专业培养目标与课程体系,设计了适合本校该专业的课程体系;文献针对“新工科”建设需求,秉承以学生为中心的培养理念,开展了多元化、层次化的实验教学改革,以稳步提高电气类专业学生的综合能力与创新意识;文献为实现知识、能力和素质“三位一体”的人才培养目标,对所在学校电气类专业实验课程进行重构,帮助学生养成积极主动的学习观;文献为充分体现能源互联网、人工智能等领域的学科交叉性,提出了构建“双碳”目标下的课程知识体系。

在借鉴各高校办学经验上,本文根据服务高校地处西部民族地区地方高校的现实情况,以服务国家“双碳”战略为指引,以综合化等为特色,培养“双碳”背景下满足社会需求的电气工程本科人才为目标,根据学生培养过程中存在的问题与不足,制定了新的培养方案,开发了“电源装置设计与制作”的综合性实践类课程。

一、专业实践课程开发

电气工程学科的部分任务是促进新能源发电的规模化利用、提高电能传输或使用效率,这些任务本质上都是设计与研究基于电力电子技术的电源。高校电气工程及其自动化专业购置的实验电源装置,通常只会留出一些接线端子。这样虽然能够显著降低装置损坏的风险,但学生无法观察到实验电路所用元器件,了解元器件功能与软硬件互动的逻辑关系,只能按照实验说明书完成相关节点的接线与测试,难以达到用人单位的要求。为此,结合本校电气工程及其自动化专业人才培养方案的修订,2020年开发了“电源装置设计与制作”这门综合性专业实践课程,对提高本专业人才培养质量进行探索。

(一) 课程内容

本课程的主要内容是设计和调试电源,目前课程电源装置主电路主要基于电力电子技术教材中的典型拓扑。课程要求学生根据给定电源容量与工作电压,完成主电路选择、参数计算和控制

方案设计,并运用 Matlab/Simulink 软件完成仿真;其次,教师设计实验电源的主电路、信号检测电路、保护与控制电路,学生在给定电路原理图的基础上,完成部分电路板焊接、功能模块导线连接、实验电路调试、信号测量与 DSP 程序解读标注;最后,将实验与仿真结果进行比较分析,撰写设计报告并进行课程答辩。

(二) 电源装置设计

常规电源实验装置中某个部件一旦损坏,整个实验装置可能无法继续使用,这对实验教学的顺利开展是一项巨大挑战。为了能够快速对毁损的电源进行修复或对其进行升级,同时锻炼学生的动手实践能力,本课程开发的电源采用模块化结构设计。具体方法是将电源分为三个大模块,包括功率电阻/电容器/电抗器模块、功率开关器件模块、功率器件驱动与检测/保护/控制电路板模块。每个大模块中又划分为最小功能子模块插槽,用于插接设计的子电路。此外,各个大模块中均配有冗余的接线端子插槽,用于连接适配导线。

基于上述方案,设计的电源装置系统如图1所示。为保证安全,实验电源由三相调压器连接隔离变压器,实验中使用的交流电压为20V,变流器直流侧电压幅值为30V,即实验电压均在人体安全电压以下进行。



图1 模块化电力电子实验系统

二、案例分析

为了说明本课程实施过程,下面以单相并网变流器的设计为例,学生主要完成变流器的电路仿真、硬件测试、程序功能标注,下面对其逐一进行说明。

(一) 电路仿真

单相变流器具体电路拓扑及其控制逻辑结构如图2所示。图示主电路中, T1~T4 为电压源换流器开关元件, L 为并网滤波电抗器, u_s 与 i_s 为网侧交流电压与电流, U_{dc} 与 C_{dc} 分别表示电压源换流器直流侧电压与电容器。图中, I_{ref} 表示变流器输出的电流指令, 其与 i_s 的 d-q 变换分量分别作差, 作为调节器的输入, 再与基于 u_s 锁相 (PLL) 得到的同步信号, 构造电压源换流器的脉冲宽度调制 (PWM) 信号驱动 T1~T4, 进而形成一个闭环控制系统, 使 i_s 跟随 I_{ref} , 下面将对各部分进行介绍。

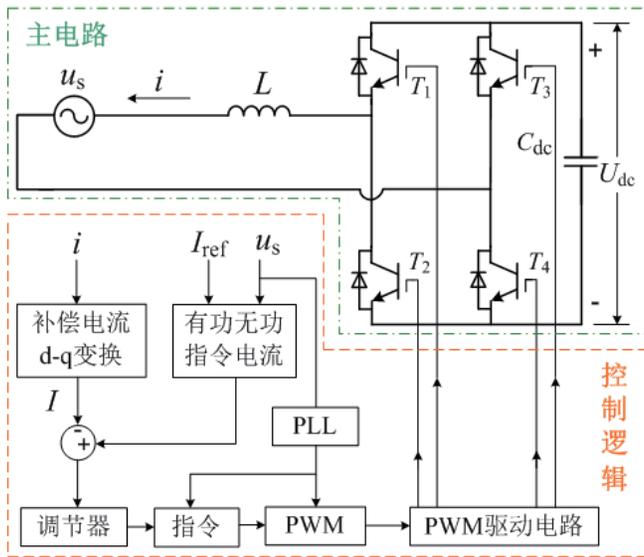


图2 并网变流器主电路及其控制逻辑

1. 信号电路设计

实现并网变流器的控制目标，首先需要对图2中所示电压、电流信号进行检测、变换和处理，同时为了确保装置安全，还需对过压过流等危险工况进行软硬件保护设计。文中根据输出电流的额定值，选择合适的电流互感器，将电流信号转换为电压信号，并进行调理和抬升，使其满足与微处理对信号的处理要求。

2. 主电路元件选择与计算

主电路中电抗值一般与电源装置输出总谐波畸变率 (THDi)、网侧电压谐波、装置容量 (SN) 等因素有关，具体如下式所示。

$$L \geq \frac{1}{\omega \text{THD}_i} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{k_h}{h}\right)^2} \frac{U_s U_{dc}}{S_N} \quad (1)$$

式中， ω 为网侧工频电压角频率， k_h 为 h 次谐波电压有效值与 VSC 直流侧电压之比。L 的取值通常按其工频电抗率 X^* ($X^* \in [0.10, 0.25]$) 选择。

若定义串联电抗器的工频电抗 X 和直流电容器的等效工频容抗 X_{dc} 分别为 ωL 和 $1/(\omega C_{dc})$ ，直流电容器容量一般取值为

$$C_{dc} \geq 30X \quad (2)$$

主电路仿真中直流电容器额定电压、开关管额定电压电流、滤波电抗器额定电流的大小不用考虑，但实际应用中这些参数直接决定了电源装置能否安全正常工作。因此，在学生设计过程中，必须考虑这些元件的各项参数，且留有一定裕量。

3. 控制器算法设计

依照图2所示的控制逻辑，图3给出了并网变流器的控制结构框图。框图中各环节传递函数含义分别为： $G_L(s)$ 表示滤波电抗器， $G_{PWM}(s)$ 表示控制输出延时， $G_i(s)$ 表示目标电流控制器。

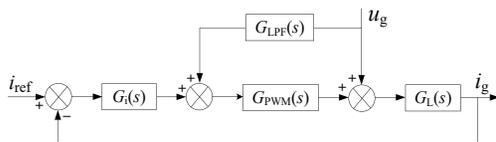


图3 并网变流器控制结构框图

控制器 $G_i(s)$ 采用 PR 控制，其表达式为

$$G_i(s) = k_p + \frac{2k_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0} \quad (3)$$

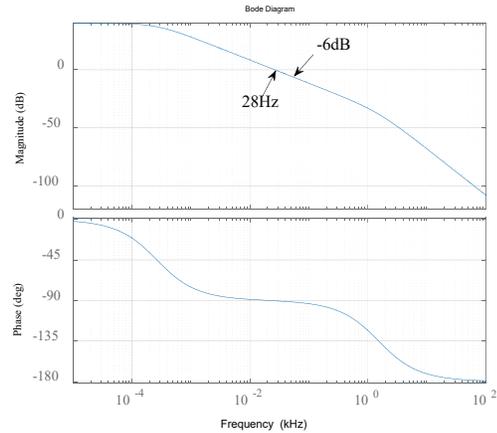
式中， k_p 为比例系数， k_r 为谐振系数， ω_c 为控制器的带宽， ω_0 为谐振频率。

由于给定的电流信号为工频，因此 $\omega_0=100\text{p}$ 。由图3可知，电流环的开环传递函数 $G_O(s)$ 为

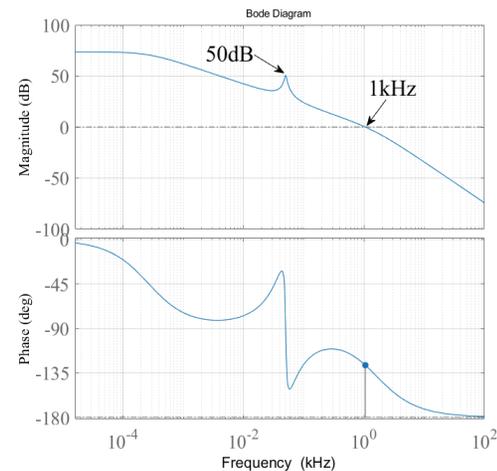
$$G_O(s) = G_i(s)G_{PWM}(s)G_L(s) \quad (4)$$

式中， $G_{PWM}(s)=1/(1+T_{ss})$ ， T_s 为控制系统采样时间， $G_L(s)=1/(RL+Ls)$ 。

校正前系统的开环伯德图如图4(a)所示，此时系统的开环穿越频率为 28Hz，在工频下的增益仅为 -6dB。通常电力电子控制系统开环穿越频率设置在开关频率的 1/10 附近，由于系统开关频率为 9.6kHz，因此将系统的开环穿越频率设置在 1kHz 附近，若要求控制系统在工频下的增益不低于 50dB，则选择 $k_p=48$ ， $k_r=600$ ，按实际中电网频率波动 $\pm 1\text{Hz}$ 考虑，取 $\omega_c=4\text{p}$ 。引入 PR 控制器校正后系统的开环伯德图如图4(b)所示，此时系统的开环穿越频率为 1kHz，在工频下的增益为 50 dB，相角裕度为 52.8° ，满足设计指标要求。



(a) 校正前



(b) 校正后

图4 校正前后并网变流器开环伯德图

4. 仿真结果

搭建图2所示并网变流器仿真系统，对上述分析结论进行仿真验证。图5给出了并网变流器输出电流与采用单极性调制的 PWM 输出电压波形。通过仿真学生能够进一步分析滤波电感量、开关频率对并网电流质量的影响，同时可以通过放大纹波电流，观察纹波电流变化规律与开关管开断之间的逻辑关系。

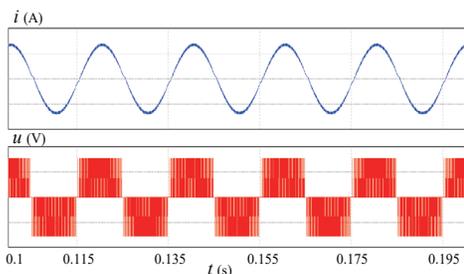


图 5 单极性 PWM 调制仿真参数波形

(二) 电源装置功能测试

在图 3 所示的实验平台上，可以对信号检测电路、主电路及其驱动电路、锁相与并网电流控制算法的分析结论与仿真结果的正确性进行测试验证。

1. 输出测试

在图 1 所示的实验平台上，学生可以对信号电路、主电路、锁相与并网电流控制等模块的分析结论与仿真结果正确性进行测试验证。为了降低实验平台功能测试对测量仪器的需求，设计时已将需要测量的电流转换为电压信号，同时为便于测量，将所有需要测试的信号通过特定测试端子引出。文中以并网控制控制输出为例，对其电流电压的测量进行说明。图 6 给出了变流器采用单极性 PWM 调制的并网输出电流和电压，学生通过示波器对其进行缩放，对其进行观察分析，并与仿真结论比较，进一步加深对相关知识点的理解。

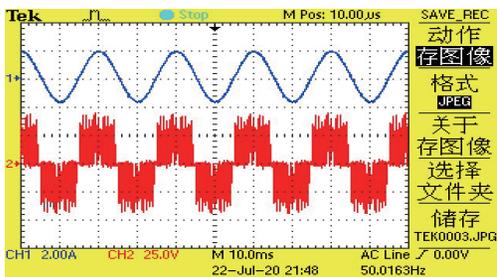


图 6 单极性 PWM 调制实验参数波形

2. 程序注解及锁相功能

对本校电气工程及其自动化本科生而言，在规定的时间内完成电路设计与仿真，再通过软件编程实现，一些题目的难度非常大。为此，只需在熟悉硬件平台的基础上，对指导教师提供的控制算法程序进行阅读，绘制流程图并对相关语句进行注解，图 7 以并网锁相控制为例，给出了学生对程序的注解示意图，同时在课程答辩过程中该环节的相关问题。

```

void PLL(void)
{
    float32 alpha,beta,u_id,u_iq; //并网锁相控制程序**
    float32 err_uq,sr1,sr2; //定义 abc dq 变换用变量**
    Uint16 m;
    sinwt = sin(Delph * (AverageAngle)); //获取同步角的正弦余弦值**
    coswt = cos(Delph * (AverageAngle));
    .....
    alpha = ua_sample - 0.5*ub_sample - 0.5*uc_sample; //abc-dq 坐标变换**
    beta = HALF_SQUARE3 * (ub_sample - uc_sample);
    u_id = sinwt * alpha - coswt * beta;
    u_iq = coswt * alpha + sinwt * beta;

    err_uq=0-u_iq; //采用 PI 控制的锁相算法**
    sr1 = PLLKP_I * err_uq - PLLKP * Last_err_uq;
    Last_err_uq = err_uq;
    sr2 = fPWMPeriod + sr1;
    fPWMPeriod = sr2;
    ..... //锁相控制输出**
    if (sr2 > 1.1 * fsVar * PWM_PERIOD) sr2=1.1 * fsVar * PWM_PERIOD;
    if (sr2 < 0.9 * fsVar * PWM_PERIOD) sr2=0.9 * fsVar * PWM_PERIOD;
    uPWMPeriod = (Uint16)fPWMPeriod;
    EPwm1Regs.TBPRD = uPWMPeriod;
    EPwm2Regs.TBPRD = uPWMPeriod;
    EPwm3Regs.TBPRD = uPWMPeriod;
}

```

图 7 锁相控制程序注解

同时为使学生对锁相效果有更为直观的感受，图 7 给出了示波器测试控制芯片 I/O 口输出的同步信号与网侧电压之间的关系。由图可知，实现了变流器的并网锁相功能。

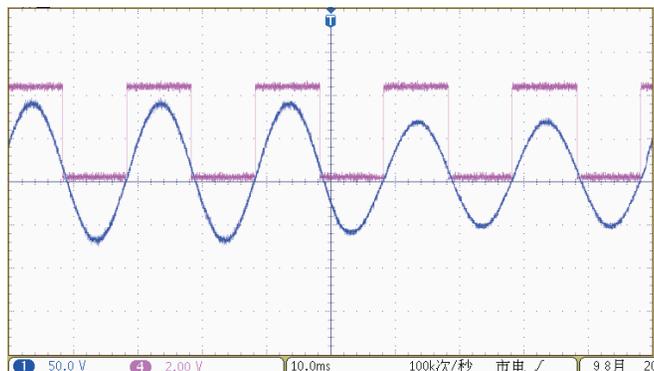


图 8 矢量变换锁相环同步波形

三、结语

面对国家能源结构转型、产业迭代的现实情况，国内开设电气工程及其自动化专业的高校均在不断修订人才培养方案，通过建立科学合理、与时俱进的课程体系，为国家经济社会发展培养合格劳动者。文中基于本地区行业、生源特点，设计开发了一门涉及十余门课程应用的综合性实践课程。课程实施后证实，经过方案设计、仿真验证与实验调试等环节的锻炼，学生对解决电气工程领域中实际工程问题的方法有了深刻的感悟，并深切体会到理论知识与工具软件在指导实践活动中的重要作用。

参考文献：

[1] 陈航, 郑雷, 刘同亮, 等. “双碳”背景下环境设计专业多学科交叉人才的培养 [J]. 实验室研究与探索, 2022, 41 (08): 253-255+277.

[2] 邓军, 贡琳慧, 刘飞宇. “双碳”目标下能动专业课程体系改革思考 [J]. 大学, 2022 (23): 71-74.

[3] 周孝信. 新一代能源系统 [M]. 科学出版社, 2021.

[4] 李昂, 马永翔, 闫群民. 工程教育认证背景下电气工程及其自动化专业建设探索与实践 [J]. 教育教学论坛, 2020 (1): 210-211.

[5] 龚立娇, 李宏伟, 鲁敏, 等. 基于工程教育专业认证的电气工程及其自动化专业课程体系构建 [J]. 教育现代化, 2019, 6(42): 117-119.

[6] 王华, 吴桂清, 刘红霞, 等. “新工科”理念下的电气信息类专业实验教学体系建设 [J]. 实验技术与管, 2020, 37 (12): 13-16.

[7] 冯学玲, 吴葛, 邓春花, 等. 综合课程设计模式在实践类课程的应用和探索 [J]. 实验室研究与探索, 2022, 41 (10): 184-189.

[8] 胡堃, 邓先明. “双碳”目标驱动下电气工程及其自动化专业人才培养模式探究 [J]. 煤炭高等教育, 2022, 40 (02): 128-132.

基金项目：本文系北方民族大学重点教研课题。“多功能型电力电子技术实验与实训装置的研制”（项目编号：JW2020020）的研究成果。

作者简介：张新闻（1976-），男，汉，宁夏中宁，博士，教授，研究方向：电能质量与电能变换控制技术。