

“电力电子技术”课程教改与实践

——以“无线充电技术”为例

李振杰, 刘一琦, 刘大洋, 姚婷婷, 班明飞

东北林业大学计算机与控制工程学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2024年6月12日; 录用日期: 2024年8月22日; 发布日期: 2024年8月30日

摘要

电力电子技术是对电能进行变换及控制的一种现代化技术, 是电气自动化技术的理论基础。在新型电力电子器件、前沿技术和新兴应用层出不穷的情况下, 为确保教育目标能够与新技术环境下对工程师技能的期望相契合, 对“电力电子技术”课程进行教学改革显得尤为迫切。文章着眼于无线充电系统的背景, 对课程教学进行改革, 通过结合实际工程问题提出具体的改革目标和措施。

关键词

电力电子技术, 无线充电问题设计, 多模式交融

Teaching Reform and Practice of “Power Electronics Technology” Course

—Taking “Wireless Charging Technology” as an Example

Zhenjie Li, Yiqi Liu, Dayang Liu, Tingting Yao, Mingfei Ban

College of Computer and Control Engineering, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang

Received: Jun. 12th, 2024; accepted: Aug. 22nd, 2024; published: Aug. 30th, 2024

Abstract

Power electronics technology is a modern technology for transforming and controlling electrical energy, and is the theoretical foundation of electrical automation technology. With the emergence of new power electronic devices, cutting-edge technologies and novel applications, it is particularly urgent to reform the teaching of the “Power Electronics Technology” course to ensure that the educational objectives are in line with the expectations of engineers' skills in the new technological

文章引用: 李振杰, 刘一琦, 刘大洋, 姚婷婷, 班明飞. “电力电子技术”课程教改与实践[J]. 职业教育, 2024, 13(5): 1276-1282. DOI: 10.12677/ve.2024.135201

environment. This paper focuses on the background of wireless charging systems to reform the teaching of the course and puts forward specific reform objectives and measures by combining practical engineering problems.

Keywords

Power Electronics Technology, Wireless Charging Problem Design, Multi-Modal Integration

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

电力电子技术作为当今高校电气工程及其自动化专业的必修课，课程的开设适应了当代新技术的发展。如今电力电子技术在各行各业工程上的应用日益扩大，除了在传统的电力运输、交通控制、自动化等领域，电力电子技术的运用还在推动无线充电技术(Wireless Power Transfer, 简称 WPT)领域研究发展的进步[1]。自二十世纪九十年代开始，电力电子技术便深入到 WPT 系统中发、输、配各个环节中[2]，例如，接收侧要选取合适的整流电路，将高频交流电源转换成直流电源。电力电子以其灵活的交流输电技术、高压直流输电技术和自身独有可以定制的电力技术为 WPT 系统带来了新的灵活性、效率和可控性[3]。

2. 电力电子技术课程传统教学存在的问题

传统的“电力电子技术”课程在内容上繁多，体系陈旧，与当前电力产业结构的迅速发展不相适应。在新时代电力电子技术发展迅速的背景下，当前“电力电子技术”课程存在着多个亟待解决的问题。

2.1. 课程内容抽象冗杂

电力电子技术是一门应用于电力领域的电子技术，其目标主要是通过利用电力电子器件对电能进行灵活变换和精密控制。作为一门以“电路”、“高等工程数学”、“自动控制原理”等为基础的专业必修课，不仅需要学生扎实地掌握复杂的微积分、矩阵分析和传输线等理论，还要想象复杂的电力电子器件和系统的运作方式。在 WPT 系统中，电力电子器件还涉及到电路、电磁场、热场等多个物理场的耦合，这使得系统分析更为复杂。此外，课程还包含 PWM 控制技术，软开关技术等相关内容[4]。电力电子有着拓扑结构多样化，特征波形多且复杂等特点，增加了学生理解的难度。

2.2. 陈旧的课程内容不满足当今工程问题

目前，大部分高校的课程仍然以 2009 年出版的《电力电子技术》作为参考教材，并采用此教材的相关内容作为教学参考大纲。随着工程的不断发展，会不断出现更新颖的工程实际问题[5]，电力电子技术也随之在过去的十多年里经历了飞速的发展，涌现出越来越多的新技术和拓扑结构。尽管这些技术都是在经典电力电子结构中发展出来的，但是它们之间还存在着很多的差异。例如在 WPT 系统中，针对磁耦合谐振补偿电路的设计问题，若采用传统的串-串联补偿谐振，当磁耦合线圈的互感降低时，接收侧一端的反射阻抗也会减小，发射端的谐振电流也将会增大。当然实际工程中还存在着谐振回路的内阻，

虽然谐振回路电流由输入电压和谐振回路的内阻而决定，但依然会造成谐振回路电流过大的情况。有学者提出了一种 LCL-LCL 共振式无线电能传输系统[6]，其发射端的谐振回路表现出优异的恒流特性，可以很好地解决传统拓扑结构的缺点，在无线充电的背景下，可以满足负载端的充电电池恒流充电的要求。其互感模型如图 1 所示。

电力电子技术的迅猛发展表明当前的课程内容已经无法适应新时代的要求，因此有必要对“电力电子技术”课程进行更新和改革。尽管原有的知识点较为陈旧，但是它们在帮助学生理解最基本原理方面担任着不可或缺的角色。因此，对现有的课程改革应在保留原有基本知识点的基础上，通过对工程问题的探索融入新的知识点。这样的改革不仅能够确保学生对基础知识有着更为深刻的认识和理解，具备更扎实的基本功来保证此门课程的实用性和持续性，还适应了新时代国家对工程人才培养的需求。

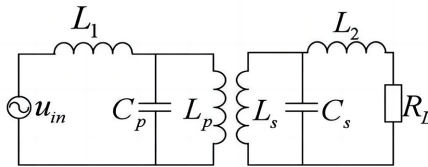


Figure 1. LCL-LCL mutual inductance model
图 1. LCL-LCL 互感模型

2.3. 实践教学与理论教学脱轨

“电力电子技术”作为集强电电路和单片机等弱电控制电路于一体的学科，具有很强的实践性。目前大部分高校的电力电子课程教学手段单一，教学手段还停留在包括幻灯片、黑板笔书和模型仿真等层面。如果缺乏足够的实践经验，只靠书本上理论教学的讲解和仿真软件，很难达到理想的教学效果。现如今，电力电子仿真软件具有更多样化和高精度化的特点，大部分高校都会使用 Matlab 中的 Simulink 工具箱[7]或者 PLECS 等软件进行电力电子课程教学延伸的课程设计。虽然这些仿真软件提高了每位学生对电力电子电路构建的方便性，却缺乏了工程问题的实际性。在 WPT 系统中，电力电子器件因受到各种各样的电气环境的影响会有很强的非线性特征[8]，而基础的理论教学和仿真软件的构建皆以理想化或特定的条件为基础展开分析，使学生在解决今后实际工作中所遇见的问题时，会对相关的波形和电力器件达到不理想的效果所疑惑。这不符合高校培养新时代电气工程的标准，没有达到学以致用目的。

3. 基于无线充电问题设计的“教学模式”探索

3.1. 工程问题中基本电路的设计

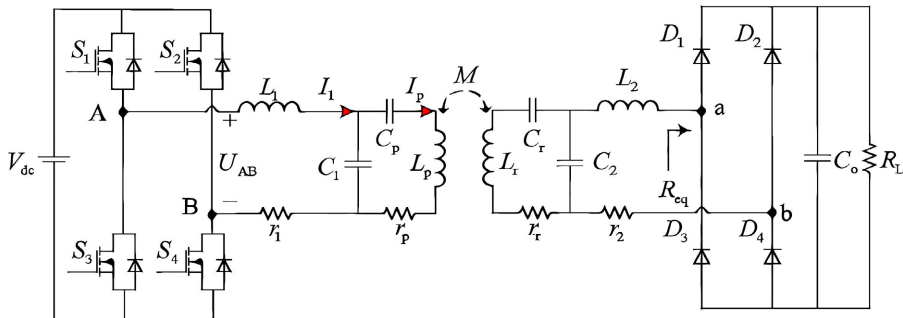


Figure 2. LCC-LCC compensation topology circuit
图 2. LCC-LCC 补偿拓扑电路

电力电子技术涉及到复杂的理论知识和电路拓扑结构，且存在着教材内容脱离工程实际的问题，导致理论学习与工程实践脱轨。所以在讲解基本电路时，我们采用基于无线充电工程问题的课程教学方法，以引导启发的形式逐步让学生深入理解涉及到电磁感应、功率传输以及教学中复杂拓扑结构电路的结构、构成和工作原理，培养学生解决问题和创新思维的能力。如讲解最基本的原边补偿电路拓扑结构时，教师应先建立无补偿电路的传输线圈理想互感模型，通过数学模型对系统的传输效率进行分析，介绍串联谐振和并联谐振的概念。启发学生提出改进 WPT 系统中磁耦合谐振电路的方法，并提出一系列问题：①如何选取合适的补偿拓扑结构实现磁耦合机构的谐振？②为了得到更优的系统传输性能，能否再设计一个合适的复合拓扑结构？随着在课堂上电路设计中问题的深入分析，最终得到 LCC-LCC 谐振电路的互感模型[9]，如图 2 所示。

在此教学讲解的过程中，能够将应用实例增加到课程教学中，培养学生能够独立分析的能力以及对磁耦合谐振系统的初步设计思想。例如在讲解拓扑补偿电路时，以系统的传输效率为目标，通过对电感电容工作特性的分析，得出系统传输效率的公式，推导出电路输入侧和接收侧的能量传输效率关系。该过程减少了课堂的枯燥性，以新颖的工程实际问题为背景来丰富教学内容，提高学生的学习兴趣和汲取知识的效率。

3.2. 多模式交融的课程教学

为了使能够更直观、形象地学习理解电力电子器件相关内容，实践教学与理论教学相互交融的方式是分不开的。在传统的电力电子电路的教学中，不管是传统的课本教学还是更精细的仿真软件教学都要以理想或者特定的条件为基础展开分析。针对“电力电子技术”课程，有必要将真实的工程案例、线上的教学平台、虚拟仿真软件和实践工作平台等多方面教学手段进行融合。形成一套以工程背景下的理论教学与实验教学为主，利用先进的工具为辅的多种手段相互交融的课程模式，用创新型的教学改革措施来优化教学内容，以达到提升学生的学科水平和实际应用能力的目的。下面以 WPT 系统中无线电能传输的工作原理为例，说明多模式交融的课程的教改措施。

3.2.1. 选取合适的数学模型分析

通常无线充电等电磁工程问题会利用互感耦合理论和电路理论对电路结构进行数学建模分析。WPT 系统的拓扑结构如图 3 所示。

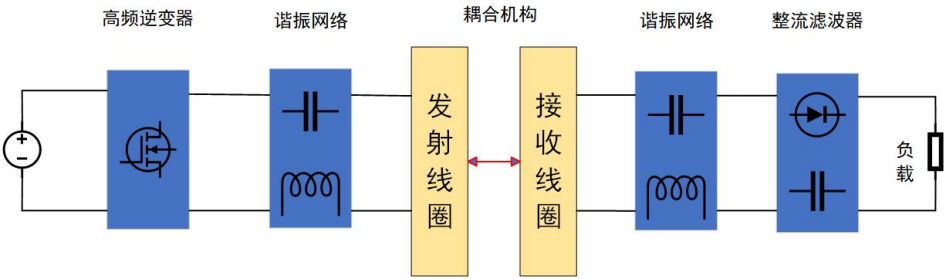


Figure 3. Block diagram of WPT system structure
图 3. WPT 系统结构框图

接下来以问题式启发学生如何提高系统的性能，引出 SS 拓扑结构、SP 拓扑结构、PP 拓扑结构、PS 拓扑结构。教师应根据不同的工程问题选取合适的理论模型对拓扑结构进行研究分析，例如在 WPT 系统中，相比于耦合理论模型理论，电路理论对整体模型结构的研究更加方便简单。图 4 为 WPT 系统基本补偿拓扑结构。

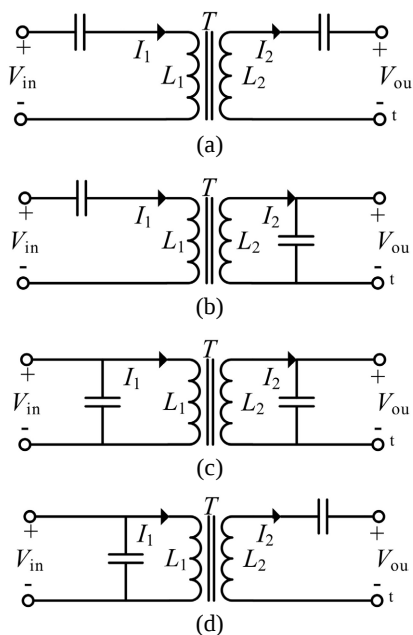


Figure 4. Basic compensation topology of WPT system: (a) SS topology; (b) SP topology; (c) PP topology; (d) PS topology

图 4. WPT 系统基本补偿拓扑结构: (a) SS 拓扑结构; (b) SP 拓扑结构; (c) PP 拓扑结构; (d) PS 拓扑结构

3.2.2. 利用 Simulink 仿真对比分析

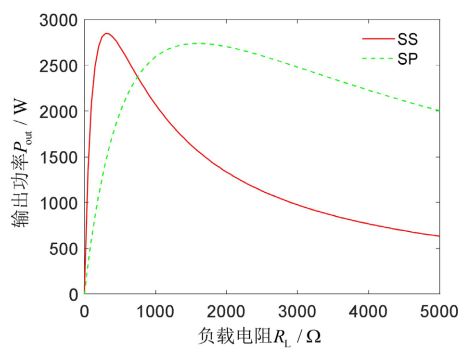


Figure 5. Output power versus resistive load

图 5. 输出功率与电阻负载

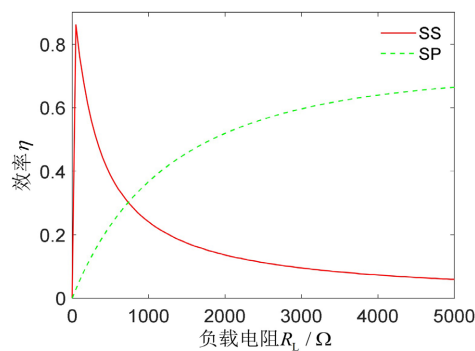


Figure 6. Transmission efficiency versus resistive load

图 6. 传输效率与电阻负载

教师以数学模型讲解各个拓扑结构工作原理以及各种拓扑结构结构并进行对比分析后，可以利用 Simulink 工具箱对其进行仿真对比。这里以 WPT 系统 SS 与 SP 拓扑结构的仿真对比进行分析为例。

在磁耦合机构的实际问题中，输出功率、输出效率与负载电阻变化规律是工程中重点关注的问题。对上述两个基本拓扑结构进行仿真分析，利用坐标平面图让学生更直观地分析观察其特点。仿真二维平面图如图 5，图 6 所示。

从上图中，学生可以更清晰明了地看出，当耦合系数较低的时候 SS 拓扑结构的输出功率和传输效率都比 SP 拓扑结构低。然而，随着耦合系数的增加，SS 拓扑结构的输出功率和传输效率的能力反超 SP 拓扑结构。通过此仿真分析，增加了学生针对不同情况下无线充电问题的独立思考与分析的能力，启发学生在此基础上设计更加复杂的拓扑结构以满足不同工程问题的需求。

3.2.3. 创设实训教学环境

为了满足当今培养工程人才的教育目标，创设良好的实训环境是电力电子课程教学中最重要的一环。在课堂教学中，应强调理论知识和实践的密切联系，使其建立在理论知识和仿真软件的基础之上，以学生为中心，重点培养学生的实践动手能力，让学生根据工程目标搭建出电力电子电路，并寻找不同工作环境下电力电子器件的运行模式与理想条件下的不同之处。例如在 WPT 系统中，线圈和磁芯的损耗会引起温度的升高，继而会影响电力电子电路的工作性能，会导致系统的传输功率降低[10]。以问题式启发学生寻求新的电力电子拓扑结构以解决功率损耗引起的温升问题。可以激发学生的自我思考，使学生掌握控制系统的设计方法，可以在硬件平台不断的变换结构，调节参数观察系统的运行状态。硬件平台如图 7 所示。

通过强化工程案例，使学生根据不同的工程问题，更好地考虑各种影响因素来寻找更好的设计方法，优化设计步骤。学生在毕业后参加工程问题的研究时，能够较快掌握设备的调试、运营、检修，甚至是技术革新。

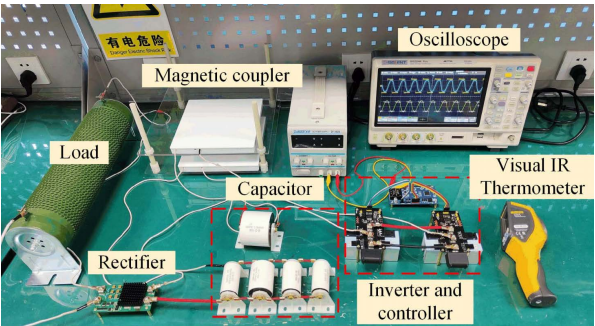


Figure 7. Hardware platform based on WPS system
图 7. 基于 WPS 系统的硬件平台

4. 总结

本文通过分析传统的电力电子教学模式所存在的问题，提出了要以电力电子技术这一前沿技术为背景，进行提炼设计相关电路，通过多模式交融的课程教学模式进行理论与实践教学的相联系。在解决工程问题的方案选择、仿真以及实验过程中，能够培养学生的学习兴趣，激发学生在电力电子领域中的积极性，锻炼创新性思维，更好地适应高校工程人才对未来国家发展的要求。

基金项目

本文系东北林业大学教育教学研究课题(项目编号：DGY2023-24)。

参考文献

- [1] 王兆安, 刘进军. 电力电子技术[M]. 第 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [2] 刘晋, 牛印锁, 文俊. 国内外“电力电子技术”课程教学研究[J]. 中国电力教育, 2012(6): 64-65.
- [3] 陈坚. 电力电子学: 电力电子变换和控制技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [4] 张兴, 张崇巍. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [5] 孙秀桂, 张洪斌, 彭建荣, 孙江波. 工程问题设计在“电力电子技术”课程教学改革中的应用与实践[J]. 大理大学学报, 2018, 3(6): 37-41.
- [6] 庄亚杰. 磁耦合谐振无线电能传输系统的拓扑结构研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.
- [7] 向军. MATLAB/Simulink 系统建模与仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2021.
- [8] 卢强, 梅生伟, 孙元章. 电路系统非线性控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 56-122.
- [9] 陈文仙, 陈乾宏. 共振式无线电能传输技术的研究进展与应用综述[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(9): 35-47.
- [10] Chae, D.J. and Kim, Y.S. (2018) Analysis for Electrical and Thermal Hazard in kW-Class Wireless Power Transmission Environment. *Proceedings of the 2018 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (Wow)*, Montreal, 3-7 June 2018, 1-5. <https://doi.org/10.1109/WoW.2018.8450930>