

项目编号：CQALK2019006

重庆市专业学位研究生教学案例库

《电力电子系列课程创新实践》案例 教学指导手册

负 责 人： 曾正

工作单位： 重庆大学

学位类别： 能源动力

2021 年 12 月

1 实验安全与安生设计案例教学指导手册

1.1 教学目的与用途

本教学案例涉及实验安全与安全设计，支撑《开关电源设计》、《直流调速系统设计》、《电力传动系统设计与实现》等课程。

1.2 教学内容

针对电力电子创新实践过程中出现的可能伤害，本案例给出了电气安全、机械安全和消防安全的典型案例和防护措施，阐述了电力电子产品安全设计的注意事项，避免实践过程中的风险，提升所设计产品的安全性和可靠性。

电气安全基础

- 1、触电现象
- 2、触电方式
- 3、安全急救
- 4、安全防护

机械安全基础

- 1、机械伤害的成因
- 2、机械伤害的防护

消防安全基础

- 1、火灾的成因
- 2、火灾的处理

安全设计

- 1、安全设计的目的

- 2、产品基本安全要求
- 3、电气安全设计的要点
- 4、机械安全设计的要点
- 5、温度安全设计的要点
- 6、防火安全设计的要点

1.3 启发思考题

- 1、灯坏了，会不会继续耗电？
- 2、先接设备，还是先接电？
- 3、插线板，再接插线板？
- 4、充电器插头，拔还是不拔？
- 5、饮水机，关还是不关？
- 6、在北京，小明的家里，电冰箱外壳由于某些故障带电 50V，在干燥环境、大的接触表面积条件下，小明从手到手的电阻为 2000 欧姆，此时小明双脚着地，用双手触摸电冰箱外壳时，流过小明身体的电流应该是多少？

1.4 建议课堂计划

建议课堂讲授 4 学时。

1.5 参考文献

- [1] 杨岳. 电气安全[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.

2 电子创新实践能力培养案例教学指导手册

2.1 教学目的与用途

本教学案例涉及电子制作创新设计，支撑《开关电源设计》、《直流调速系统设计与实现》、《电力传动系统设计与实现》等课程。

2.2 教学内容

面向电力电子课程的实践能力训练，通过本案例，掌握常见接插件、电子元件、PCB 布局布线、散热设计、手工焊等，认识常用元件和工具的形貌特征、参数规格和使用方法，为创新实践奠定基础。

- 1、常用接插件
- 2、强电接头
- 3、开关按钮
- 4、电路板
- 5、常用电子元器件
- 6、PCB 板制作工艺与布局规范
- 7、散热器
- 8、手工焊工艺

2.3 启发思考题

- 1、常用的接插件有哪些？
- 2、电路板分为哪些类？制造工艺如何？
- 3、散热器设计的基本方法是什么？
- 4、手工焊需要注意哪些事项？

2.4 建议课堂计划

建议课堂讲授 4 学时。

2.5 参考文献

[1] 张校铭. 从零开始学电子制作[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.

3 反激式开关电源案例教学指导手册

3.1 教学目的与用途

本教学案例涉及开关电源设计，支撑《开关电源设计》、《功率变换器建模、分析与设计》等课程。

3.2 教学内容

面向数据中心、5G 基站的未来持续供电需求，通过本案例，剖析 48V/120W 开关电源的设计选型方法，掌握反激式开关变换器的基本工作原理、设计制作方法和测试验证方法。

实践任务

对明纬公司的通信电源产品，制作一款 48V/120W 通信开关电源，详细的规格参数如表 3.8 所示，该产品的市场零售价为 100 元左右。

详细方案

1、电路拓扑设计。电路设计是开关电源实践的基础。可以借助设计工具，完成开关电源的设计工作。

2、元器件选型设计。以隔离变压器为分解面，将该通信电源电路分为初级和次级两部分，进行详细设计。

3、损耗分析与成本估算。损耗计算可以为 RCD + Z 钳位电路、开关管及输出整流二极管的散热设计提供理论依据，成本分析可以评估设计的可用性。

案例效果

1、仿真结果。在仿真软件中没有 TOPSwitch 芯片，因此采用驱动芯片 UC3842 代替芯片 TOPSwitch，设计开关电源仿真图。

2、样机与实验结果。基于电路拓扑设计和元器件选型设计，采用 Aultium

Designer 软件，设计开关电源样机。

3.3 启发思考题

- 1、开关电源的主要构成部分有哪些？
- 2、开关电源主要元器件的设计方法有哪些？
- 3、开关电源的仿真设计工具有哪些？
- 4、开关电源的设计工具有哪些？

3.4 建议课堂计划

建议课堂讲授 4 学时。

3.5 参考文献

- [1] Abraham I. Pressman, Keith Billings, Taylor Morey, 著；王志强, 肖文勋, 虞龙, 译. 开关电源设计(第 3 版)[M]. 电子工业出版社, 2010.
- [2] Simon Ang, Alejandro Oliva, 著；张懋, 徐德鸿, 张卫平, 译. 开关功率变换器：开关电源的原理、仿真和设计(第 3 版)[M]. 机械工业出版社, 2014.
- [3] 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, 2021.

4 LLC 谐振变换器案例教学指导手册

4.1 教学目的与用途

本教学案例涉及 LLC 谐振变换器设计，支撑《开关电源设计》、《功率变换器建模、分析与设计》等课程。

4.2 教学内容

面高效率、高功率密度的 DC/DC 变换器，通过本案例，掌握 LLC 变换器软开关的工作原理、损耗分析方法、控制方法、电-热设计方法，提升高效率、高功率密度变换器的创新实践能力。

1、实践任务

基于 LLC 谐振变换器，设计一款高效率、高功率密度电源。低成本设计，主板结构不超过四层板；无风冷自然冷却，要求 40℃环境温度下持续工作 30 分钟。输出功率 200W；输入电压 300-400 Vdc；输入纹波小于 50mA；输出电压 12 Vdc，单路；输出纹波小于 200mV；功率密度不低于 10W 每立方英寸，不限定具体尺寸；变换效率最佳不低于 95%；绝缘耐压不小于 2kV。

2、详细方案

电路拓扑分析。在众多的谐振变换器中，LLC 谐振变换器具有原边开关管易实现全负载范围内的零电压开通（ZVS），次级二极管易实现零电流开通（ZCS），谐振电感和变压器易实现磁性组件的集成，以及输入电压范围宽等优点，因而得到了广泛的关注。

LLC 谐振变换器的工作原理。LLC 谐振变换器是在传统的串联和并联 LC 谐振变换器基础上改良产生的，它既包括了串联谐振变换器谐振电容所起到的隔直作用和谐振槽路随负载轻重而变化，轻载时效率较高的优点，同时又兼具了并联谐振变换器可以工作在空载条件下，对滤波电容的电流脉动要求小的特点，是一种比较理想的谐振

变换器拓扑。

实施效果

- 1、电路仿真。在 PSIM 中搭建电路主回路。
- 2、电-热仿真。利用 SOLIDWORKS 建立样机的机械结构图，在 COMSOL 中建立实物模型。
- 3、实验样机。在 Altium Designer 15 中，搭建基于 GaN 器件的 LLC 谐振电路的原理图。
- 4、实验结果。测试平台包括直流稳压电源，示波器，可调负载以及红外热成像仪。通过实验平台可以自主调节负载功率，直流母线电压，实时观测电路各部分温度分布，减小由于温度过高导致炸管的机率。

4.3 启发思考题

- 1、LLC 谐振变换器的工作原理是什么？
- 2、LLC 谐振变换器的设计方法有哪些关键步骤？
- 3、LLC 谐振变换器的仿真设计工具有哪些？
- 4、LLC 谐振变换器的控制芯片有哪些？

4.4 建议课堂计划

建议课堂讲授 4 学时。

4.5 参考文献

[1] Abraham I. Pressman, Keith Billings, Taylor Morey, 著；王志强，肖文勋，虞龙，译. 开关电源设计(第 3 版)[M]. 电子工业出版社, 2010.

[2] Simon Ang, Alejandro Oliva, 著; 张懋, 徐德鸿, 张卫平, 译. 开关功率变换器: 开关电源的原理、仿真和设计(第 3 版)[M]. 机械工业出版社, 2014.

[3] 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, 2021.

5 双移相有源全桥案例教学指导手册

5.1 教学目的与用途

本教学案例涉及双移相全桥变换器设计，支撑《开关电源设计》、《功率变换器建模、分析与设计》等课程。

5.2 教学内容

面向海上风电、储能变电站等固态变压器应用场景，通过本案例，掌握双移相有源全桥电路的工作原理、模态分析和设计方法，为隔离型 DC/DC 变换器的创新设计和应用设计，提供参考。

案例背景

直流固态变压器中的 DC-DC 变换器，通常采用双有源桥(dual active bridge, DAB)电路。相对于其他隔离型 DC-DC 变换器，DAB 的能量传输能力最强，具有双向功率传输能力，容易实现模块化和软开关。

工作原理

以单移相控制的 DAB 电路为例，直流固态变压器的电路拓扑，其中 V_i 和 V_o 分别为 DAB 的输入和输出电压， C_i 和 C_o 为对应的稳压电容， i_o 为输出电流， $S_1\sim S_4$ 和 $D_1\sim D_4$ 为原边的开关管和二极管， $Q_1\sim Q_4$ 和 $M_1\sim M_4$ 为副边的开关管和二极管， L 为辅助电感， i_L 为辅助电感的电流，高频率变压器 T 的变比为 $n:1$ ， v_{h1} 和 v_{h2} 分别为原边 H 桥和副边 H 桥的输出电压和输入电压，原副边开关管的占空比 D 均为 0.5，通过调节副边开关管的移相角 φ 可以控制输出电压 V_o 为给定值 V_{ref} 。

仿真分析

针对特定工况：输入电压 400V，额定输出电压 200V，高频变压器变比 2:1，电阻负载功率 3kW，采用单移相控制，基于 PLECS 仿真软件，搭建 DAB 的仿真模型。

实践效果

基于一台 3kW 的 DAB 样机, 对比研究 Si IGBT 和 SiC MOSFET 在直流变压器中的应用。

5.3 启发思考题

- 1、画出双移相有源桥的电路拓扑。
- 2、阐述双移相有源桥的工作原理。
- 3、双移相有源桥的仿真设计方法。

5.4 建议课堂计划

建议课堂讲授 4 学时。

5.5 参考文献

- [1] Abraham I. Pressman, Keith Billings, Taylor Morey, 著; 王志强, 肖文勋, 虞龙, 译. 开关电源设计(第 3 版)[M]. 电子工业出版社, 2010.
- [2] Simon Ang, Alejandro Oliva, 著; 张懋, 徐德鸿, 张卫平, 译. 开关功率变换器: 开关电源的原理、仿真和设计(第 3 版)[M]. 机械工业出版社, 2014.
- [3] 赵彪, 宋强. 双主动全桥 DC-DC 变换器的理论和应用技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [4] 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, 2021.

6 功率因数校正电路案例教学指导手册

6.1 教学目的与用途

本教学案例涉及功率因数校正电路设计，支撑《开关电源设计》、《功率变换器建模、分析与设计》等课程。

6.2 教学内容

在消费电子领域，为了降低对电网的冲击，85W 以上的电源要求配备功率因数校正功能，本案例将分析功率因数校正电路的工作原理、设计方法、仿真分析和实物制作，提升消费电子产品的的设计实践能力。

实践任务

对标商业化产品，设计制作一款功率因数校正电路。输入交流 220VAC，输出直流 380VDC，0.9A，350W；输入电压范围 85~265VAC；输出电压纹波<10%；稳态电压精度<5%；线性调整率<5%；负载调整率<5%；效率≥80%；输入电流 THD<10%；功率因数>0.95；输出过压、欠压保护 420V、360V。

详细方案

基于 TI 公司的 UCC28019D 芯片，设计功率因数校正电路。主要分为 EMI 和保护、整流器、Boost 电路、反馈控制电路等部分。

仿真分析

PSIM 具有仿真高速、用户界面友好、波形解析等功能，为电力电子电路的解析、控制系统设计、电机驱动研究等有效提供强有力的仿真环境。基于 PSIM 的易操作性和易实现性及其在电力电子仿真中的强大功能，本实验设计利用 PSIM 软件进行仿真验证。

实物样机

根据前述设计，制作功率因数校正电路样机。

实验结果

完成硬件制作后，调试板子正常工作得情况下，测试了电路的关键波形和各种动态稳态性能。主要包括：开关信号和电感电流，在不同输入电压下的输入电流波形测试，功率因数测试，负载性能测试，和各种瞬态测试。

6.3 启发思考题

- 1、功率因数校正电路的用途有哪些？
- 2、阐述功率因数校正电路的工作原理。
- 3、功率因数校正电路的仿真设计方法。

6.4 建议课堂计划

建议课堂讲授 4 学时。

6.5 参考文献

- [1] Abraham I. Pressman, Keith Billings, Taylor Morey, 著；王志强，肖文勋，虞龙，译. 开关电源设计(第 3 版)[M]. 电子工业出版社, 2010.
- [2] Simon Ang, Alejandro Oliva, 著；张懋，徐德鸿，张卫平，译. 开关功率变换器：开关电源的原理、仿真和设计(第 3 版)[M]. 机械工业出版社, 2014.
- [3] 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, 2021.

7 单相逆变器设计案例教学指导手册

7.1 教学目的与用途

本教学案例涉及单相逆变器设计，支撑《开关电源设计》、《功率变换器建模、分析与设计》等课程。

7.2 教学内容

面向单相系统中的光伏和储能逆变器，通过本案例，掌握逆变器的电路拓扑、控制方法、设计规律、仿真方法和硬件电路，掌握新能源逆变器的设计方法，提升逆变器产品的创新实践能力。

实践任务

设计一款单相逆变器，规格要求：输出功率 500VA，输入电压 350~400VDC，输入电流纹波 $<20\%$ ，输出电压 $220\text{VAC} \pm 1\%$ ，输出频率 $50\text{Hz} \pm 0.1\%$ ，满载输出电压总谐波 $\text{THD} < 5\%$ ，满载输出功率因数 $\text{PF} > 0.98$ ，变换效率 $>94\%$ 。此外，在控制界面与显示、直流功率解耦、并网等方面，可以自主创新。电路拓扑不限，数字控制或模拟控制均可，尽可能提高效率和功率密度。

详细方案

1、拓扑选型。单相全桥为经典电路，单相半桥结构、半桥三电平二极管钳位式逆变器、带交流旁路的全桥逆变器、带直流旁路的全桥逆变器、H5 全桥逆变器、电流型逆变器。

2、直流电容设计。采用有源方法实现脉冲功率解耦具有较好的效果，直流侧有源功率解耦电路分为并联和串联两大类。

3、功率器件的设计。功率器件的电压和电流应力。

4、滤波电感设计。输出滤波电感的主要目的在于滤出开关频率次谐波。

5、滤波电容的设计。输出滤波电感和电容形成一个低通滤波器，滤出开关频率次谐波。

6、控制规律。采用级联控制回路，来控制逆变器的输出电压。

7、调制方式。控制器的输出电压需要经过 PWM 调制，得到功率器件的开关信号，常见的调制方式有 SPWM、SVPWM 等。

案例效果

1、仿真分析。为验证本次设计的相关参数是否能够满足设计要求，本文通过在 Simulink 中搭建电路模型进行仿真。

2、样机制作。全桥逆变电路主要由直流侧滤波电路，MOSFET 构成的全桥电路和 RCD 吸收电路构成。

3、实验结果。为验证逆变器的负载跟踪能力以及调节速度，在上电测试阶段还进行了负载跳变的测试，设定负载从半载跳变至满载工作状态。

7.3 启发思考题

- 1、单相逆变器的用途有哪些？
- 2、单相逆变器直流母线电容的作用是什么？
- 3、如何抑制单相逆变器直流母线电容的二次纹波？
- 4、如何设计单相逆变器的交流滤波器？

7.4 建议课堂计划

建议课堂讲授 4 学时。

7.5 参考文献

- [1] Abraham I. Pressman, Keith Billings, Taylor Morey, 著; 王志强, 肖文勋, 虞龙, 译. 开关电源设计(第 3 版)[M]. 电子工业出版社, 2010.
- [2] Simon Ang, Alejandro Oliva, 著; 张懋, 徐德鸿, 张卫平, 译. 开关功率变换器: 开关电源的原理、仿真和设计(第 3 版)[M]. 机械工业出版社, 2014.
- [3] 曾正, 杨欢, 赵荣祥. 柔性并网逆变器控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [4] 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, 2021.

8 光伏发电系统案例教学指导手册

8.1 教学目的与用途

本教学案例涉及光伏发电系统设计，支撑《开关电源设计》、《功率变换器建模、分析与设计》、《新能源发电技术》、《三相功率变换器技术》等课程。

8.2 教学内容

面向新能源发电的三相并网逆变器共性技术，通过本案例，掌握逆变器的电路拓扑、控制框图、仿真分析、DSP 代码自动生成，实现光伏发电系统的验证。

实践任务

电路设计，请以 MATLAB 撰写程序，求得逆变器电压及电流回路模型，接着根据模型设计电压及电流回路控制器，并附上 Bode 图结果加以验证。建立仿真电路加以验证上述设计之有效性。将控制电路数字化并转换成程序刻录控制芯片，进行实作，由量测数据验证设计之正确性。

详细方案

使用 MATLAB 设计逆变器的控制参数。系统的开环 Bode 图和校正后的 Bode 图。

建立仿真电路，记录电流跟踪、直流电压、电网的电压和电流、PLL 相关波形。

实践效果

基于 DSP28335 完成三相光伏并网变流器。

8.3 启发思考题

- 1、三相光伏逆变器的用途有哪些？
- 2、三相光伏逆变器的仿真工具有哪些？
- 3、三相光伏逆变器的设计方法有哪些？

8.4 建议课堂计划

建议课堂讲授 4 学时。

8.5 参考文献

- [1] Abraham I. Pressman, Keith Billings, Taylor Morey, 著; 王志强, 肖文勋, 虞龙, 译. 开关电源设计(第 3 版)[M]. 电子工业出版社, 2010.
- [2] Simon Ang, Alejandro Oliva, 著; 张懋, 徐德鸿, 张卫平, 译. 开关功率变换器: 开关电源的原理、仿真和设计(第 3 版)[M]. 机械工业出版社, 2014.
- [3] 曾正, 杨欢, 赵荣祥. 柔性并网逆变器控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [4] 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, 2021.

9 光伏发电最大功率跟踪案例教学指导手册

9.1 教学目的与用途

本教学案例涉及光伏最大功率跟踪设计，支撑《开关电源设计》、《功率变换器建模、分析与设计》、《新能源发电技术》、《三相功率变换器技术》等课程。

9.2 教学内容

面向光伏发电系统，通过本案例，了解光伏电池处理的特点，掌握基于扰动观测法的最大功率跟踪控制算法，掌握两级光伏发电系统的控制方法。

针对光伏发电单元，规格参数如下：直流电压 $V_d = 100V(CV)$ 、电流 $I_d < 3A(CC)$ ，交流电网 $V_{LL} = 50V_{rms}$ ，开关频率 $F_s = 18kHz$ ，直流电容 $C_d = 330\mu F$ ，LC 滤波器 $L = 1mH$ 、 $C = 10\mu F$ ，电流采样系数 $K_s = 1/3.375$ ，交流电压采样系数 $K_v = 1/100$ ，直流电压采样 $K_v = 1/50$ 。

电路设计，请以 MATLAB 撰写程序，求得逆变器电压及电流回路模型，接着根据模型设计电压及电流回路控制器，并附上 Bode 图结果加以验证。建立仿真电路加以验证上述设计之有效性。将控制电路数字化并转换成程序刻录控制芯片，进行实作，由量测数据验证设计之正确性

详细方案任务

光伏最大功率跟踪电路。对于 Boost DC/DC 变换器接口，采用扰动观测法实现最大功率跟踪控制。

基于 PSIM 仿真软件，得到仿真结果。验证了扰动观测法在最大功率跟踪方面的可行性。

在最大功率跟踪的基础上，采用三相逆变器实现并网，得到完整仿真模型。仿真过程中记录并网电流、光伏电压电流、光伏功率等。

为了实现 DSP 代码的自动生成,加速实验布置,降低失败风险,搭建基于 SimCoder 的 HIL 仿真文件。

实施效果

为了验证最大功率跟踪控制效果,以 RS232/USB 电缆连接 PSW 及计算机,在计算机端打开 PV 设定设定,设定 PV 曲线,并联机 PSW 开始 PV 特性输出。RS232/USB 电缆连接 PEK 及计算机。开启 PEK 开始 MPPT,在计算机端 PV 曲线上观察并纪录 MPPT 过程。打开软件 DSP Scope 画面,量测相对应仿真下纪录之各波形。

9.3 启发思考题

- 1、光伏最大功率控制方法有哪些?
- 2、阐述扰动观察法最大功率跟踪控制。
- 3、各种最大功率跟踪控制方法的优缺点有哪些?

9.4 建议课堂计划

建议课堂讲授 4 学时。

9.5 参考文献

- [1] Abraham I. Pressman, Keith Billings, Taylor Morey, 著;王志强,肖文勋,虞龙,译. 开关电源设计(第 3 版)[M]. 电子工业出版社,2010.
- [2] Simon Ang, Alejandro Oliva, 著;张懋,徐德鸿,张卫平,译. 开关功率变换器:开关电源的原理、仿真和设计(第 3 版)[M]. 机械工业出版社,2014.
- [3] 曾正,杨欢,赵荣祥. 柔性并网逆变器控制技术[M]. 北京:科学出版社,2020.
- [4] 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,2021.

10 光伏发电系统孤岛保护案例教学指导手册

10.1 教学目的与用途

本教学案例涉及光伏最大功率跟踪设计，支撑《开关电源设计》、《功率变换器建模、分析与设计》、《新能源发电技术》、《三相功率变换器技术》等课程。

10.2 教学内容

光伏发电系统多为分布式发电系统，容易出现计划停电的孤岛现象，通过本案例，学习孤岛现象的成因、影响因素、反孤岛检测方法，提高光伏发电系统的安全性。

当本地负荷与逆变器的输出功率相等时，并网联络线上的功率为零，电网由于计划停电导致开关 SW 断开，此时逆变器无法检测到停电事故，导致逆变器孤岛运行，容易导致人生安全，该现象称为孤岛现象。

因此，如何快速准确识别出电网的孤岛现象，是光伏发电系统的重要指标。基于典型逆变器，实现光伏发电系统的孤岛保护。逆变器的规格参数如下：直流电压 $V_d = 100V(CV)$ 、电流 $I_d < 3A(CC)$ ，交流电网 $V_{LL} = 50V_{rms}$ ，开关频率 $F_s = 18kHz$ ，直流电容 $C_d = 330\mu F$ ，LC 滤波器 $L = 1mH$ 、 $C = 10\mu F$ ，电流采样系数 $K_s = 1/3.375$ ，交流电压采样系数 $K_v = 1/100$ ，直流电压采样 $K_v = 1/50$ 。

详细方案

光伏发电系统的孤岛检测分为主动检测和被动检测两大类，被动式检测方法和主动式检测方法。

被动式方法利用电网断电时逆变器输出端电压、频率、相位或谐波的变化进行孤岛效应检测。但当光伏系统输出功率与局部负载功率平衡，则被动式检测方法将失去孤岛效应检测能力，存在较大的非检测区域(Non-Detection Zone，简称 NDZ)。并网逆变器的被动式反孤岛方案不需要增加硬件电路，也不需要单独的保护继电器。

主动式孤岛检测方法是指通过控制逆变器，使其输出功率、频率或相位存在一定的扰动。电网正常工作时，由于电网的平衡作用，检测不到这些扰动。一旦电网出现故障，逆变器输出的扰动将快速累积并超出允许范围，从而触发孤岛效应检测电路。该方法检测精度高，非检测区小，但是控制较复杂，且降低了逆变器输出电能的质量。目前并网逆变器的反孤岛策略都采用被动式检测方案加上一种主动式检测方案相结合。

基于孤岛保护方法，在 PSIM 仿真软件，搭建仿真模型。当 0.15 时电网跳闸，分布式光伏进入孤岛运行模式。基于仿真模型，得到仿真结果。可见，滑模频漂孤岛检测方法能够有效检测到电网的故障，主动增加逆变器的输出频率，当逆变器的工作频率超过运行允许标准时，逆变器检测到孤岛现象而停机，整个过程的响应时间小于 0.1s。

为了在基于 DSP 的硬件平台上实现孤岛检测与孤岛保护，基于 SimCoder 技术，实现 DSP 代码的自动生成，所搭建的自动代码生成模型。

10.3 启发思考题

- 1、光伏孤岛检测的必要性有哪些？
- 2、光伏孤岛检测的方法有哪些？
- 3、各种光伏孤岛检测方法的优缺点有哪些？

10.4 建议课堂计划

建议课堂讲授 4 学时。

10.5 参考文献

[1] Abraham I. Pressman, Keith Billings, Taylor Morey, 著；王志强，肖文勋，虞龙，译。

开关电源设计(第 3 版)[M]. 电子工业出版社, 2010.

[2] Simon Ang, Alejandro Oliva, 著; 张懋, 徐德鸿, 张卫平, 译. 开关功率变换器: 开关电源的原理、仿真和设计(第 3 版)[M]. 机械工业出版社, 2014.

[3] 曾正, 杨欢, 赵荣祥. 柔性并网逆变器控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 2020.

[4] 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, 2021.

11 风力发电最大功率跟踪案例教学指导手册

11.1 教学目的与用途

本教学案例涉及风力发电最大功率跟踪设计，支撑《开关电源设计》、《功率变换器建模、分析与设计》、《新能源发电技术》、《三相功率变换器技术》等课程。

11.2 教学内容

风力发电具有功率大、度电成本低、年发电小时数高的特点，是最早实现平均上网的新能源，通过本案例，掌握风力机的模型，绘制风力机的最大功率曲线，并探索风力发电系统的最大功率跟踪控制。

风力发电机模型如图所示，规格参数为：功率 $P_m=200W@v=12m/s$ 、转速 $N=1800rpm$ 、风轮半径 $R=0.42m$ 、将聚角 $\theta=5.5^\circ$ 。绘出风机在各个不同风速下之功率曲线并求出其最搭功率点曲线，以上述设计的风机带动发电机，建立仿真电路加以验证上述设计的有效性，纪录在发电机转速在 $1000rpm$ 及在不同风速之波形：风速、发电机电流、发电机转速、发电机驱动器 dq 轴电流追踪，根据最大功率点曲线设计最大功率跟踪控制器。

根据风力发电机的数学模型和规格参数，在 PSIM 中搭建风力发电机的仿真模型。根据图所示模型，改变风机转速和桨距角，得到风力发电机的特征曲线，通过拟合，可以得到风力发电机的最大功率点曲线。

基于 PSIM 仿真软件，搭建风力发电系统的仿真模型。出于分析方便，变流器直流母线电压固定，测试风力发电机在不同风速下的出力情况。根据仿真模型，简单风力发电系统的仿真结果。可以发现，系统的输出功率随着风速的波动较大，且不一定是风力发电机所能捕获的最大功率。因此，还需要探索最大功率跟踪控制的应用。

引入最大功率跟踪控制后，发电机的转速应该根据最大风能曲线设置，从而获得

最大的风能输出。采用最大功率跟踪后的仿真结果。实验室中经常采用电动机来模拟风力发电，可以得到风力发电机对拖平台的仿真模型。基于图所示的仿真模型，可以得到仿真结果。

11.3 启发思考题

- 1、风力发电为什么需要最大功率跟踪？
- 2、风力发电最大功率跟踪的原理是什么？
- 3、风力发电最大功率跟踪的仿真方法有哪些？

11.4 建议课堂计划

建议课堂讲授 4 学时。

11.5 参考文献

- [1] Abraham I. Pressman, Keith Billings, Taylor Morey, 著；王志强, 肖文勋, 虞龙, 译. 开关电源设计(第 3 版)[M]. 电子工业出版社, 2010.
- [2] Simon Ang, Alejandro Oliva, 著；张懋, 徐德鸿, 张卫平, 译. 开关功率变换器：开关电源的原理、仿真和设计(第 3 版)[M]. 机械工业出版社, 2014.
- [3] 曾正, 杨欢, 赵荣祥. 柔性并网逆变器控制技术[M]. 北京：科学出版社, 2020.
- [4] 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, 2021.

12 风力发电系统案例教学指导手册

12.1 教学目的与用途

本教学案例涉及风力发电系统设计，支撑《开关电源设计》、《功率变换器建模、分析与设计》、《新能源发电技术》、《三相功率变换器技术》等课程。

12.2 教学内容

面向永磁同步电机风力发电系统，通过本案例，掌握全功率风力发电机的最大功率跟踪控制、并网控制和低电压穿越控制，提高对风力发电系统的仿真能力和实验能力。

针对全功率风力发电系统，整合 MPPT 发电机驱动器、并网逆变器与风力机模拟器等三部分的仿真电路，探索风力发电系统的低电压穿越控制。

详细方案

在 PSIM 仿真软件中，搭建全功率风力发电系统的仿真模型。基于仿真模型，当风速发生波动时，可以得到全功率风力发电系统的仿真结果。可见，风力发电机的输出功率与指令功率跟踪较好，验证了最大功率跟踪控制的有效性。同时，通过背靠背变流器，实现并网发电。

为了实现基于 DSP 的逆变器实验，采用 SimCoder 技术，生成逆变器的 DSP 控制代码，采用 ADC 和 PWM 接口文件，替代仿真文件，得到仿真效果。

随着风力发电系统占整个电网容量的不断提升，为了提升电网的稳定性，风力发电机必须具有低电压穿越能力，在电网故障后，向电网注入必要的无功，支撑电网故障后恢复。此时，带低电压穿越功能的全功率风力发电系统。

引入低电压穿越控制后，风力发电系统的仿真模型。基于仿真模型，可以得到仿真结果。可见，为了在电网电压故障跌落之后，保持不脱网，风电变流器必须限制输出电流幅值，同时向电网注入大量的无功电流，维持机端电压。

为了实现基于 DSP 的逆变器实验,采用 SimCoder 技术,生成逆变器的 DSP 控制代码,采用 ADC 和 PWM 接口文件,替代仿真文件,得到实验效果。

12.3 启发思考题

- 1、永磁风力发电系统的基本组成有哪些?
- 2、永磁风力发电系统的低电压穿越是什么?
- 3、如何实现永磁风力发电系统的仿真?

12.4 建议课堂计划

建议课堂讲授 4 学时。

12.5 参考文献

- [1] Abraham I. Pressman, Keith Billings, Taylor Morey, 著;王志强,肖文勋,虞龙,译. 开关电源设计(第 3 版)[M]. 电子工业出版社,2010.
- [2] Simon Ang, Alejandro Oliva, 著;张懋,徐德鸿,张卫平,译. 开关功率变换器:开关电源的原理、仿真和设计(第 3 版)[M]. 机械工业出版社,2014.
- [3] 曾正,杨欢,赵荣祥. 柔性并网逆变器控制技术[M]. 北京:科学出版社,2020.
- [4] 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,2021.

13 微电网案例教学指导手册

13.1 教学目的与用途

本教学案例涉及微电网设计，支撑《开关电源设计》、《电力电子学在电力系统中的应用》、《新能源发电技术》、《三相功率变换器技术》等课程。

13.2 教学内容

微电网中存在多种新能源发电单元，通过本案例，学习新能源并网逆变器的组网控制方法，包括电压源的下垂控制和虚拟阻抗控制，主动构建电网的电压和频率，并均分微电网的负荷。

实践任务

微电网是包含新能源、本地负荷、保护控制的局部电网。为了实现微电网的稳定控制，需要构建微电网的电压、频率稳定机制，通常采用下垂控制方法。为了实现微电网中多台新能源发电的功率分配，通常采用虚拟阻抗控制方法。在 PTS1000 实验平台上，实现微电网的关键控制方法。

逆变器规格参数如下：直流电压 $V_d = 100V(CV)$ 、电流 $I_d < 3A(CC)$ ，交流电网 $V_{LL} = 50V_{rms}$ ，开关频率 $F_s = 18kHz$ ，直流电容 $C_d = 330\mu F$ ，LC 滤波器 $L = 1mH$ 、 $C = 10\mu F$ ，电流采样系数 $K_s = 1/3.375$ ，交流电压采样系数 $K_v = 1/100$ ，直流电压采样 $K_v = 1/50$ 。

无功下垂系数 $m = 0.01V/VAR$ ，有功下垂系数 $n = 0.005(rad/s)/W$ ，虚拟阻抗 $10W+5mH$ 。

1、Vf 控制

逆变器离网运行时，采用的 Vf 控制策略， U_0 和 f_0 为额定的电网电压和频率， k_v 和 k_f 分别为电压和频率调节系数。该逆变器作为传统电力系统中的 Vf 节点，提供孤

岛电网的不平衡功率。这样，可以保证可再生能源逆变器做恒功率运行，作为传统电力系统中的 PQ 节点。

2、下垂控制模式

在离网运行模式下，为了让多个逆变器共同担当主电源，支撑电网的电压和频率，也可以采用下垂控制，来模拟传统同步发电机的输出外特性。下垂控制是在线路为纯感性时得到的，存在其局限性。当计及线路电阻、滤波电感的等效电阻时，逆变器输出电压的角频率不再仅仅和有功功率有关，还与无功功率有关。类似地，输出电压的幅值还和有功功率相关，无法仅依靠有功和无功的简单解耦来实现对逆变器的控制。逆变器输出滤波器和线路阻抗的不一致，会导致负荷功率在多台逆变器之间的分配出现不均衡。

3、虚拟阻抗控制

受到馈线阻抗不匹配等因素的影响，孤岛微电网在传统的下垂控制下难以按照下垂系数合理分配负载无功功率。为了提高孤岛微电网无功功率分配精度，可以采用如图所示的虚拟阻抗控制。

实践效果

- 1、下垂控制。基于 PSIM 仿真软件，搭建新能源逆变器的下垂控制方法。
- 2、虚拟阻抗控制。基于 PSIM 仿真软件，搭建新能源逆变器的虚拟阻抗控制方法。

13.3 启发思考题

- 1、什么是微电网？
- 2、微电网逆变器的控制方法有哪些？
- 3、如何实现微电网的协同控制？

13.4 建议课堂计划

建议课堂讲授 4 学时。

13.5 参考文献

- [1] Abraham I. Pressman, Keith Billings, Taylor Morey, 著; 王志强, 肖文勋, 虞龙, 译. 开关电源设计(第 3 版)[M]. 电子工业出版社, 2010.
- [2] Simon Ang, Alejandro Oliva, 著; 张懋, 徐德鸿, 张卫平, 译. 开关功率变换器: 开关电源的原理、仿真和设计(第 3 版)[M]. 机械工业出版社, 2014.
- [3] 曾正, 杨欢, 赵荣祥. 柔性并网逆变器控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [4] 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, 2021.

14 谐波和无功电流检测方法案例教学指导手册

14.1 教学目的与用途

本教学案例涉及微电网的谐波和无功电流检测，支撑《开关电源设计》、《电力电子学在电力系统中的应用》、《新能源发电技术》、《三相功率变换器技术》等课程。

14.2 教学内容

现代电网含有大量的电力电子负荷，电网电能质量面临谐波和无功的严峻挑战，通过本案例，掌握负荷谐波和无功电流的提取方法，为电能质量的精准治理提供参考指令信号。

实践任务

要治理电网的电能质量问题，谐波和无功电流检测十分关键，需要深入剖析各种检测方法的基本原理、实现方法、性能差异等。本案例在介绍各种检测方法原理的基础上，结合 TI TMS320F2812 定点 DSP，验证各方法的稳态和动态性能，对比评估各方法的 CPU 时间和内存消耗。

- 1、基于频域的检测方法
- 2、基于瞬时功率理论的检测方法
 - (1) 瞬时无功功率理论方法
 - (2) id-iq 方法
 - (3) ip-iq 方法
 - (4) 投影方法
 - (5) FBD 功率方法
- 3、基于智能算法的检测方法

(1) 自适应滤波方法

(2) Kalman 滤波方法

(3) 神经网络方法

对比分析

基于前述检测方法的实验结果，不同方法所需要的 DSP 时间和内存情况。神经网络方法消耗的 DSP 时间最多，为 35.64 μ s；然而，DFT 方法消耗的 DSP 内存最多，为 1759B。如果逆变器的开关频率为 20kHz，DSP 的中断周期为 50 μ s，那么对于神经网络方法，70%的中断周期消耗在谐波检测方法，留给其他控制技术的计算时间非常有限。因此，选择合适的检测方法对于逆变器的控制十分重要。

此外，综合考虑到对非理想电网电压的应对能力，以及无功和谐波电流的分离能力等因数，基于投影法、FBD 功率理论、瞬时无功功率理论的检测方法，对于柔性并网逆变器的适应性更强。

14.3 启发思考题

- 1、谐波和无功电流检测的用途有哪些？
- 2、常见的谐波和无功电流检测方法有哪些？
- 3、各种谐波和无功电流检测方法的优缺点是什么？

14.4 建议课堂计划

建议课堂讲授 4 学时。

14.5 参考文献

[1] Abraham I. Pressman, Keith Billings, Taylor Morey, 著；王志强, 肖文勋, 虞龙, 译.

开关电源设计(第 3 版)[M]. 电子工业出版社, 2010.

[2] Simon Ang, Alejandro Oliva, 著; 张懋, 徐德鸿, 张卫平, 译. 开关功率变换器: 开关电源的原理、仿真和设计(第 3 版)[M]. 机械工业出版社, 2014.

[3] 曾正, 杨欢, 赵荣祥. 柔性并网逆变器控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 2020.

[4] 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, 2021.

15 微电网的电能质量治理案例教学指导手册

15.1 教学目的与用途

本教学案例涉及微电网的电能质量设计，支撑《开关电源设计》、《电力电子学在电力系统中的应用》、《新能源发电技术》、《三相功率变换器技术》等课程。

15.2 教学内容

面向新能源分散接入的微电网模式，通过本案例，掌握新能源参与微电网电能质量治理的新方法，掌握如何通过新能源并网逆变器的灵活控制，实现一机多职，就地解决微电网的谐波和无功，提高供电品质。

微电网是一种集成了新能源、本地负荷、保护装置的局部电网，是新能源接入电网的有效组织方式。微电网中含有大量的电力电子装置，再加之局部负荷中也可能含有大量的非线性、不平衡和无功负荷，这都极大地恶化了电网公共耦合点（Point of Common Coupling, PCC）处的电能质量。电网的电能质量直接关系到新能源发电系统的安全稳定和经济运行。

PCC 的电能质量直接影响负荷和并网逆变器的稳定运行。除了会使敏感负荷、关键负荷不能正常工作之外，恶劣的电能质量环境还会危及到并网逆变器自身的稳定运行。并网逆变器一般连接在变压器的低压侧，若电网含有较多的非线性负荷，PCC 的电压可能会存在较大的谐波畸变。这将直接影响并网逆变器的电压控制环和电流控制环，使其输出电流含有较大的谐波分量。在严重情况下，甚至会导致并网逆变器失稳跳闸。近年来，并网逆变器在不平衡、谐波电网条件下的适应性控制方法得到了广泛的研究。

为了提升电网的电能质量，可以安装无源的或有源的电能质量治理装置。其中，无源的无功补偿电容、调谐滤波器等装置结构简单、可靠性高、成本低，但是可能会

引发电网的谐振。因此，静止无功发生器、有源滤波器、动态电压调节器等有源电能质量治理装置，以其控制方式灵活、功能多样而获得了越来越多的应用。但是，这些电能质量治理装置，会带来额外的投资成本和运行维护费用，增大了系统的体积，降低了系统的可靠性。

并网逆变器拥有和电能质量治理装置一样的电路拓扑，在可再生能源并网发电的同时，具有治理电能质量问题的潜力。另一方面，为了适应可再生能源的波动性和不确定性，并网逆变器的容量都留有一定的裕量。此外，并网逆变器在大多数运行工况下，都具有一定的功率裕量。如果能利用这些功率裕量来治理电能质量问题，那么可以提高并网逆变器的性价比，避免安装额外的电能质量治理装置。

三相两电平逆变器在完成新能源并网的同时，还具有补偿本地谐波和无功电流的能力，该类并网逆变器也能适应电能质量治理的应用场景。

15.3 启发思考题

- 1、微电网的电能质量问题有哪些？
- 2、为什么新能源并网逆变器能够解决微电网的电能质量问题？
- 3、如何实现多功能并网逆变器的优化控制？

15.4 建议课堂计划

建议课堂讲授 4 学时。

15.5 参考文献

[1] Abraham I. Pressman, Keith Billings, Taylor Morey, 著；王志强，肖文勋，虞龙，译. 开关电源设计(第 3 版)[M]. 电子工业出版社, 2010.

- [2] Simon Ang, Alejandro Oliva, 著; 张懋, 徐德鸿, 张卫平, 译. 开关功率变换器: 开关电源的原理、仿真和设计(第 3 版)[M]. 机械工业出版社, 2014.
- [3] 曾正, 杨欢, 赵荣祥. 柔性并网逆变器控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [4] 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, 2021.

16 新能源并网逆变器的锁相同步案例教学指导手册

16.1 教学目的与用途

本教学案例涉及新能源并网逆变器的锁相同步设计，支撑《开关电源设计》、《电力电子学在电力系统中的应用》、《新能源发电技术》、《三相功率变换器技术》等课程。

16.2 教学内容

新能源必须与电网保持同步才能向电网输出指令功率，通过本案例，掌握新能源并网逆变器与电网同步的锁相环技术，建立锁相环的模型，分析电网异常情况下的锁相策略，掌握新能源并网逆变器的锁相同步策略。

实践任务

与其他并网装置一样，并网逆变器需要和电网保持同步，常用的同步方法包括过零检测方法和数字锁相方法两大类。

过零检测方法是最简单的同步方法，检测电网电压的正向过零点，并将其作为相位计算的初始位置。但是，该方法受测量噪声和电压谐波的影响较大。

目前，逆变器中常用数字锁相环作为电网同步方法。其中，以同步旋转坐标系锁相环（Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop, SRF-PLL）应用最为广泛。SRF-PLL 的框图模型，包括：鉴相器（Phase Detection, PD）、低通滤波器（Low Pass Filter, LPF）和数字电压振荡器（Digital Voltage Oscillation, DVO）三部分，分别为 Park 变换 $T_{abc/dq}$ 、PI 控制器和积分器。

详细方案

为了消除负序电压分量的影响，需要在 SRF-PLL 的回路中引入滤波器。常用的一阶 LPF 能够提高 SRF-PLL 的稳定性，但是会降低锁相环的响应速度。可以采用滑动

平均滤波器（Moving Average Filter, MAF），在稳定性和快速性之间获得折中。

在 SRF-PLL 的基础上，有学者提出了解耦双同步旋转坐标系 PLL（Decoupled Double Synchronous Rotating Frame PLL, DSRF-PLL）。在 DDSRF-PLL 的基础上，也可以采用二阶广义积分器（Second Order General Integrator, SOGI）来实现正负序解耦，从而得到 SOGI-PLL。

16.3 启发思考题

- 1、新能源并网逆变器为什么需要锁相同步？
- 2、常用的锁相同步方法有哪些？
- 3、各种常用的锁相同步方法各有什么优缺点？

16.4 建议课堂计划

建议课堂讲授 4 学时。

16.5 参考文献

- [1] Abraham I. Pressman, Keith Billings, Taylor Morey, 著；王志强，肖文勋，虞龙，译. 开关电源设计(第 3 版)[M]. 电子工业出版社, 2010.
- [2] Simon Ang, Alejandro Oliva, 著；张懋，徐德鸿，张卫平，译. 开关功率变换器：开关电源的原理、仿真和设计(第 3 版)[M]. 机械工业出版社, 2014.
- [3] 曾正，杨欢，赵荣祥. 柔性并网逆变器控制技术[M]. 北京：科学出版社, 2020.
- [4] 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, 2021.

17 新能源电网的惯量补偿案例教学指导手册

17.1 教学目的与用途

本教学案例涉及新能源并网逆变器的虚拟惯量控制，支撑《开关电源设计》、《电力电子学在电力系统中的应用》、《新能源发电技术》、《三相功率变换器技术》等课程。

17.2 教学内容

面向新能源电力系统，通过本案例，掌握新能源惯量缺失的成因，掌握新能源并网逆变器的虚拟惯量控制方法和设计方法，提升新能源电网的稳定性。

实践任务

相对于传统同步发电机，虽然并网逆变器的控制策略更加灵活，但是也给电网带来了不小的挑战，主要体现在：逆变器缺乏惯性和阻尼，且难以实现分散自治运行。如何实现并网逆变器与传统同步电网的兼容，具有重要的实际意义。传统同步发电机的机电暂态过程，由摇摆方程决定，动态时间长。并网逆变器的控制器带宽高，响应速度快，可以模拟同步发电机的机电特性。本案例将详细介绍虚拟同步发电机（Virtual Synchronous Generator, VSG）的运行控制规律和参数整定方法。

详细方案

数学模型。逆变器和同步发电机之间，并网发电单元和单机无穷大系统之间，存在对偶关系。VSG 控制让逆变器模拟同步发电机的惯性、调频器和励磁控制器等特性。

模型参数摄动。VSG 控制器中的参数 L_f 和 R_f 往往与实际值不一致。在实际中， L_f 和 R_f 会随着运行工况和环境温度的变化而变化，导致控制器中的整定值偏离其实际值，会影响 VSG 输出功率与其指令值之间的偏差。

自动频率调节器。通过自动频率调节器，同步发电机可以对电网频率偏差做出响应。类似地，通过虚拟的自动频率调节器，VSG 可以参与电网的频率响应。

励磁调节器。通过励磁控制器，同步发电机可以调节机端电压及无功输出。类似地，通过虚拟的励磁调节器，VSG 可以调节虚拟电势和无功输出。

实施效果

在 PSCAD/EMTDC 中搭建了如图 3.316 所示的微电网仿真模型，包含两台 VSG 和一台 PQ 控制的逆变器。

17.3 启发思考题

- 1、新能源并网逆变器为什么需要虚拟惯量？
- 2、什么是虚拟同步发电机的惯量补偿控制方法？
- 3、虚拟同步发电机惯量补偿控制的各部分功能是什么？
- 4、为什么逆变器能够模拟同步发电机？

17.4 建议课堂计划

建议课堂讲授 4 学时。

17.5 参考文献

- [1] Abraham I. Pressman, Keith Billings, Taylor Morey, 著；王志强，肖文勋，虞龙，译. 开关电源设计(第 3 版)[M]. 电子工业出版社, 2010.
- [2] Simon Ang, Alejandro Oliva, 著；张懋，徐德鸿，张卫平，译. 开关功率变换器：开关电源的原理、仿真和设计(第 3 版)[M]. 机械工业出版社, 2014.
- [3] 曾正，杨欢，赵荣祥. 柔性并网逆变器控制技术[M]. 北京：科学出版社, 2020.

[4] 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, 2021.

18 新能源电网的谐波谐振抑制案例教学指导手册

18.1 教学目的与用途

本教学案例涉及新能源并网逆变器的谐波谐振抑制控制，支撑《开关电源设计》、《电力电子学在电力系统中的应用》、《新能源发电技术》、《三相功率变换器技术》等课程。

18.2 教学内容

新能源电网含有大量的电力电子装置，容易诱发谐波谐振，危机电网安全，通过本案例，掌握多逆变器谐波谐振的产生机理和分析控制方法，验证新能源逆变器对谐波谐振的抑制功能。

实践任务

工业现场的经验表明，虽然单台逆变器的性能满足电网标准的要求，但是多台逆变器与电网之间存在电气耦合，所形成的谐波谐振会影响系统稳定，在严重情况下，还会导致逆变器跳闸。

详细方案

- 1、单逆变器的谐波谐振分析
- 2、多逆变器谐波谐振的开环模型
- 3、多逆变器谐波谐振的闭环模型
- 4、逆变器的输出阻抗重塑控制

实施效果

针对分布式发电系统，在 PSCAD/EMTDC 中搭建仿真模型，包含两台 DG。线路 1、2 的长度分别为 0.1km 和 0.2km。

仿真开始时，DG 和负荷 1 均断开，由电网向阻值为 25Ω 的负荷 2 供电。0.05s

时，两台 DG 并网运行，且不投入输出阻抗重塑控制，DG1 和 DG2 的并网有功和无功指令分别为 6kW/0var、7kW/0var。0.1s 时，投入阻值为 40Ω 的负荷 1，0.15s 时切除负荷 1，验证负荷对谐波谐振的抑制能力。0.2s 时，DG1 投入输出阻抗控制，引入 20Ω 的并联虚拟电阻。0.25s 时，DG1 再引入 80Ω 的串联虚拟电阻。0.3s 时，DG2 投入输出阻抗控制，引入 100Ω 的串联虚拟电阻。

PCC 处的电压及其 THD。当 DG 并网运行后，谐波谐振被激发出来，PCC 处的电压出现高频振荡。阻性负荷 1 投入后，和负荷 2 一起，谐波谐振得到有效抑制。当负荷 1 切除后，仅依靠负荷 2，不足以抑制谐波谐振现象。当 DG1 投入虚拟并联电阻控制后，PCC 电压的谐振再次得到抑制，电压 THD 明显降低。当 DG1 投入虚拟串联电阻控制后，谐振得到进一步抑制，电压 THD 也进一步降低。当 DG2 投入虚拟串联电阻控制后，控制效果接近极限，THD 没有进一步下降。

18.3 启发思考题

- 1、新能源发电系统为什么会出现谐波谐振？
- 2、如何利用逆变器抑制新能源发电系统的谐波谐振？
- 3、逆变器为什么能够抑制谐波谐振？

18.4 建议课堂计划

建议课堂讲授 4 学时。

18.5 参考文献

[1] Abraham I. Pressman, Keith Billings, Taylor Morey, 著；王志强，肖文勋，虞龙，译. 开关电源设计(第 3 版)[M]. 电子工业出版社, 2010.

- [2] Simon Ang, Alejandro Oliva, 著; 张懋, 徐德鸿, 张卫平, 译. 开关功率变换器: 开关电源的原理、仿真和设计(第 3 版)[M]. 机械工业出版社, 2014.
- [3] 曾正, 杨欢, 赵荣祥. 柔性并网逆变器控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [4] 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, 2021.

19 单闭环直流调速系统案例教学指导手册

19.1 教学目的与用途

本教学案例涉及直流调速系统的控制，支撑《直流调速系统设计与实现》、《电力传动系统设计与实现》、《电力传动系统建模与仿真》等课程。

19.2 教学内容

面向电气领域，通过本案例，掌握直流电动机的常用调速方法、控制电路、参数整定、仿真方法、实验方法，为直流电动机的双闭环控制、异步电动机的矢量控制奠定基础。

实践任务

对标天煌公司的实验方案，设计完成一套单闭环直流调速系统，性能指标满足：输入 220Vac（单相）；输出 0~300Vdc（可调）；他励直流电机，单象限运行即可（可拓展），220V/1.2A，调速范围 0~1600rpm；模拟控制即可（数字控制，可选）；成果形式为 PCB 电路板；性能指标：动态响应速度 $\leq 2s$ ，转速超调量 $\leq 50\%$ ；不同工况下的稳态转速偏差率 $(n_0 - n)/n_0 \leq 5\%$ ；过流保护（200%，停机），失步保护（150%~200%，停机）。

方案选型

基于 Buck 电路的实验方案，整流桥和滤波电容一起提供稳定的直流电压源，Buck 电路的输出电压可调，从而调节直流电动机的转速，通过测速发电获取电机的转速，通过与给定指令转速的比较，以及闭环控制，调节 Buck 电路工作的占空比，实现电机静态和动态转速的精确跟踪。

基于 H 桥电路的实验方案，相对于 Buck 电路的方案，除了将 DC/DC 变换电路换为 H 桥电路外，其他环节基本一致。采用 H 桥电路，可以控制输出电压的极性，从

而控制直流电机正转或反转。

参数设计

基于单闭环直流调速系统的原理，15V 电压和可调电阻产生指令电压，指令电压大小与测速发电机的输出相关，采用运算放大器构成 PI 控制器，闭环输出为 Buck 或 H 桥电路的占空比。

变换器建模

PWM 控制器与变换器框图。直流电动机有两个输入量。一个是施加在电枢上的理想空载电压 U_{d0} ，是控制输入量。另一个是负载电流 I_{dL} ，扰动输入量。如果不需要在结构图中显现出电流，可将扰动量的综合点移前，再进行等效变换，可化简框图。额定励磁下的直流电动机是一个二阶线性环节， T_m 表示机电惯性时间常数， T_l 表示电磁惯性时间常数。

实施效果

1、仿真分析。利用 Matlab 可绘制出调速系统在引入 PI 环节前后的开环传递函数的伯德图。

2、实验结果。为尽量减小整个平台的体积，所完成的调速系统为两层平台结构，布局也相对紧凑。其中，下层板为强电板，市电从下层接入并通过各个电源模块进行相应转换以供给系统各个部分。上层板为弱电板，主要用于实现调速控制和交互、显示、扩展及报警功能。

19.3 启发思考题

- 1、直流电机的数学模型包括哪些环节？
- 2、单闭环直流调速系统的组成包括哪些部分？
- 3、如何设计单闭环直流调速系统？

19.4 建议课堂计划

建议课堂讲授 4 学时。

19.5 参考文献

- [1] Bimal K. Bose, 著; 王聪, 赵金, 于庆广, 程红, 译. 现代电力电子学与交流传动[M]. 机械工业出版社, 2013.
- [2] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统(运动控制系统) (第 3 版)[M]. 机械工业出版社, 2003.
- [3] 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, 2021.

20 双闭环直流调速系统案例教学指导手册

20.1 教学目的与用途

本教学案例涉及直流调速系统的控制，支撑《直流调速系统设计与实现》、《电力传动系统设计与实现》、《电力传动系统建模与仿真》等课程。

20.2 教学内容

案例目标

面向直流电动机的双闭环调速系统，通过本案例，掌握双闭环控制的概念、内环和外环的控制方法、参数整定、仿真方法和实验方法，实现双闭环实验系统。

实践任务

对标天煌公司的实验系统，完成双闭环直流调速系统，变换器额定输入单相交流 220V，输出直流电压 0~300V 可调；他励直流电动机，单象限即可，220V/1.2A，调速范围 0~1600rpm；模拟控制实现（数字控制实现，可选）；用面包板完成（基本要求）；PCB 电路板（拓展部分）；动态响应速度： $\leq 2s$ ；转速超调量： $\leq 50\%$ ；不同工况下的稳态转速偏差率： $(n_0 - n)/n_0 \leq 5\%$ ；过流保护：200%，停机；失步保护：150%~200%，停机。

详细方案

1、电路拓扑。为了实现直流电动机的正反转控制，采用 H 桥电路拓扑。

2、参数设计。双闭环直流调速系统的框图，ASR 的限幅输出决定 U_i^* ，ACR 的限幅输出决定变换器占空比 U_c ；调节器饱和时，输出达到限幅值，仅反向输入使调节器退出饱和，否则输出不变；调节器不饱和时，调节器工作在线性区，使输入偏差电压在稳态时为零。

实施效果

1、仿真分析。完成系统 ASR 和 ACR 的设计后，需要对设计的参数进行仿真验证，从而说明设计参数的合理性。本次设计采用 Matlab 中的 Simulink 工具进行仿真，分别从系统的等效模型以及实际电路两方面来说明。

2、实验结果。最后得到的硬件实物，硬件实物图主要由两部分组成，一部分是电源电路部分，另一部分为主电路及控制电路部分。

20.3 启发思考题

- 1、双闭环直流调速系统的组成包括哪些部分？
- 2、如何设计双闭环直流调速系统？

20.4 建议课堂计划

建议课堂讲授 4 学时。

20.5 参考文献

- [1] Bimal K. Bose, 著；王聪，赵金，于庆广，程红，译. 现代电力电子学与交流传动[M]. 机械工业出版社, 2013.
- [2] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统(运动控制系统) (第 3 版)[M]. 机械工业出版社, 2003.
- [3] 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, 2021.

21 异步电动机矢量控制案例教学指导手册

21.1 教学目的与用途

本教学案例涉及直流调速系统的控制，支撑《直流调速系统设计与实现》、《电力传动系统设计与实现》、《电力传动系统建模与仿真》等课程。

21.2 教学内容

面向异步电动机高性能的调速需求，通过本案例，剖析按转子磁链定向的矢量控制系统的设计方法，掌握异步电动机按转子磁链定向的矢量控制系统的基本工作原理、设计方法和测试验证方法。

实践任务

笼型异步电动机铭牌数据为：额定功率 $P_N = 3\text{kW}$ ，额定电压 $U_N = 380\text{V}$ ，额定电流 $I_N = 6.9\text{A}$ ，额定转速 $n_N = 1400\text{r/min}$ ，额定频率 $f_N = 50\text{Hz}$ ，定子绕组 Y 联结。



由实验测得定子电阻 $R_s = 1.85\Omega$ ，转子电阻 $R_r = 2.658\Omega$ ，定子自感 $L_s = 0.294\text{H}$ ，转子自感 $L_r = 0.2898\text{H}$ ，定子、转子互感 $L_m = 0.2838\text{H}$ ，转子参数已折合到定子侧，系统的转动惯量 $J = 0.1284\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ，极对数 $n_p = 2$ ，设定起动电流为 1.5~2 倍的 I_N 。

根据上述系统参数对笼型异步电动机按转子磁链定向的矢量控制系统进行建模仿真设计，要求超调量 $\sigma < 10\%$ ，并进行实验验证。

详细方案

1、系统仿真设计。按转子磁链定向的矢量控制系统的结构，该系统采用磁链开环的电流闭环控制方式，将定子电流两个分量的给定值 i_{sm}^* 和 i_{st}^* 施行变换，得到三相电流给定值 i_A^* 、 i_B^* 和 i_C^* ，采用电流滞环控制型 PWM 变频器，在三相定子坐标系中完成电流闭环控制，外加转速环对转速进行控制。转子磁链幅值和位置信号可由磁链模型计算获得，选用 mt 坐标系上计算转子磁链的电流模型进行计算，需要用到实测的电流和

转速信号。

2、控制模型转换成 DSP 程序。将系统仿真设计的模型只保留控制部分，并添加与 DSP 的接口，生成控制模型文件，并保存。在模型工具栏中点击进行仿真，确认仿真无误。再点击工具栏中的进行编译。MATLAB 将根据设置自动连接 CCS3.3 开发环境，生成 DSP 工程文件，并且对工程代码进行编译、链接，下载到目标板。通过 CCS3.3 可以看到在代码的生成过程中建立了 Foc.pjt 工程文件，其中包括：源文件、库文件、链接文件等。如**错误!未找到引用源。**所示，程序下载中。

21.3 启发思考题

- 1、异步电动机的常用控制方法有哪些？
- 2、异步电动机的矢量控制包括哪些部分？
- 3、如何设计异步电动机的矢量控制系统？

21.4 建议课堂计划

建议课堂讲授 4 学时。

21.5 参考文献

- [1] Bimal K. Bose, 著；王聪，赵金，于庆广，程红，译. 现代电力电子学与交流传动[M]. 机械工业出版社, 2013.
- [2] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统(运动控制系统) (第 3 版)[M]. 机械工业出版社, 2003.
- [3] 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, 2021.

22 永磁同步电机的矢量控制案例教学指导手册

22.1 教学目的与用途

本教学案例涉及直流调速系统的控制，支撑《直流调速系统设计与实现》、《电力传动系统设计与实现》、《电力传动系统建模与仿真》等课程。

22.2 教学内容

永磁同步电机在电动汽车等领域具有广泛应用，通过本案例，了解永磁同步发电机的数学模型、矢量控制策略和仿真建模方法，掌握永磁同步机的变频调速控制方法和实验方法。

实践任务

针对永磁同步发电机，完成其矢量控制。

详细方案

永磁同步发电机的矢量控制策略，外环为速度环，内环为电流环，控制器选择为PI控制，采用SVPWM调制算法，提高直流电压利用率。采用编码器计算电机的角速度和转子位置，采用对拖发电机作为负荷给电机加载。

实施效果

仿真结果。可以发现，无论是启动过程，还是负载扰动过程，永磁同步发电机的转速均能保持了给定值附近，在扰动后，能快速回复到预设值，并体现出较好的动态性能。

22.3 启发思考题

- 1、永磁同步电动机的常用控制方法有哪些？
- 2、永磁同步电动机的矢量控制包括哪些部分？
- 3、如何设计永磁同步电动机的矢量控制系统？

22.4 建议课堂计划

建议课堂讲授 4 学时。

22.5 参考文献

- [1] Bimal K. Bose, 著; 王聪, 赵金, 于庆广, 程红, 译. 现代电力电子学与交流传动[M]. 机械工业出版社, 2013.
- [2] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统(运动控制系统) (第 3 版)[M]. 机械工业出版社, 2003.
- [3] 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, 2021.