

# 电 子 科 技 大 学

UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA

## 嵌入式实验报告

Embedded Experiment Report



报告题目	LLC 谐振变换器半实物仿真实验
------	------------------

学 号	202322280123、202322280105
-----	---------------------------

作者姓名	章洮与、何一鸣
------	---------

指导教师	周德洪、沈泽微 教授
------	------------

学 院	深圳高等研究院
-----	---------

# 第一章 实验原理与要求

## 1.1 LLC 谐振变换器组成部分

LLC 电路又称为串并联谐振电路(SPRC)，LLC 谐振变换器是一种广泛应用于电源转换领域的高效 DC-DC 变换器，它通过谐振网络实现高效能量传输和电压转换。LLC 谐振变换器的主要工作原理是利用谐振电感(L)和谐振电容(C)的共振特性，通过开关管的高频切换，实现输入电压到输出电压的高效转换。其主要组件包括全桥或半桥结构的功率开关、电感 L、电容 C 和变压器。

LLC 谐振变换器的核心是其谐振网络，由谐振电感  $L_r$ 、谐振电容  $C_r$  和励磁电感  $L_m$  组成。谐振电感和电容形成的谐振腔可以在一定频率下实现电感和电容的能量交换，从而达到最小化开关损耗的目的。在工作过程中，通过调节开关频率，使得变换器工作在谐振频率或者其附近，从而实现软开关。软开关技术可以显著减少开关损耗和电磁干扰，提升变换器的效率和可靠性。

谐振网络的设计是 LLC 谐振变换器的关键。谐振电感  $L_r$  和谐振电容  $C_r$  的选取直接影响谐振频率，而励磁电感  $L_m$  的大小则影响变换器的增益特性和软开关实现的难易程度。在设计过程中，通常需要根据具体的应用要求和负载特性进行参数优化，以确保变换器在各种工作条件下均能实现高效稳定的工作。

## 1.2 LLC 谐振变换器工作过程

LLC 谐振变换器的工作过程可分为几个阶段。在谐振变换器的工作频率低于谐振频率时，变换器工作在电感性区域，此时主开关管上的电压电流波形呈现出较大的相位差，容易实现零电压开通(ZVS)。当工作频率高于谐振频率时，变换器工作在容性区域，容易实现零电流关断(ZCS)。在实际应用中，通常通过调节开关频率使变换器在接近谐振频率的范围内工作，以兼顾效率和可靠性。

LLC 谐振变换器具有良好的负载调节特性和宽输入电压范围调节能力。通过改变开关频率，可以调节输出电压，从而适应不同的负载需求和输入电压波动。此外，LLC 谐振变换器在轻载和空载条件下，也能保持较高的效率，这是传统 PWM 变换器所不具备的优势。

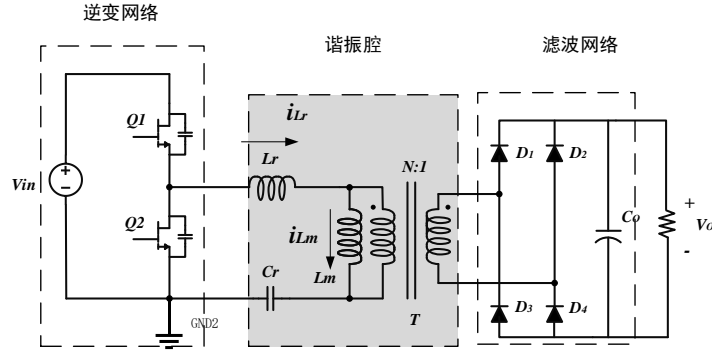


图 1 LLC 谐振变换器原理图

如图 1 所示， $V_{in}$  是由 AC 电压整流得到的直流电源，Q1 和 Q2 组成了一个半桥网络， $L_r$  和  $C_r$  分别为谐振电感和谐振电容， $L_m$  则为励磁电感。D1、D2、D3 和 D4 是整流二极管， $C_o$  为输出电容。LLC 谐振电路有两个谐振频率： $fr1$  和  $fr2$ 。计算公式如下：

$$fr1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$$

$$fr2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_r + L_m) C_r}}$$

为了提高效率，设计时通常将工作频率设定在  $fr1$  附近。对于 MOSFET 来说，在 ZVS 模式下开关损耗较小。假设电路的工作频率在  $fr1$  到  $fr2$  之间，一个开关周期可以分为以下几个模式：

- 模式 1：Q1 导通，Q2 关断，原边电流通过 Q1 和 LLC 形成回路，副边电流通过 D1 供电，副边电流逐渐增加， $L_m$  在此过程中储存能量。
- 模式 2：当副边电流逐渐增大并达到峰值时， $N_p$  上不再有电流流过，此时负载由  $N_s1$  和  $C_{out}$  供电。原边电路继续为  $L_m$  和  $C_r$  储能。
- 模式 3：Q1 和 Q2 均关断，励磁电流继续通过 MOSFET 管的寄生电容形成回路，对 C1 电容充电，同时 C2 电容放电，使 Q2 两端电压降为 0，为实现 ZVS 导通创造条件。此时，副边电路无变化。
- 模式 4：C1 和 C2 充放电完成后，励磁电流继续通过 Q2 的寄生二极管形成回路，直到 Q2 导通。
- 模式 5：Q2 导通，Q1 关断， $L_m$  上的能量（磁能转化为电能）形成两条回路，副边电流通过 D2 供电，电流逐渐增加。
- 模式 6：励磁电感  $L_m$  的电流逐渐减小，副边电流也随之减小至 0。当  $N_p$  电流大于  $L_m$  电流时，电流将反向对 C1 放电，对 C2 充电，为 Q1 的 ZVS 开关创造条件。
- 模式 7：C1 和 C2 充放电完成后，电流通过 Q1 的寄生二极管形成回路。

- 模态 8: 此时, 电路重新进入 Q1 导通、Q2 关断的状态, 完成半桥 LLC 谐振的一个工作周期。

### 1.3 实验要求

选择 LLC 谐振变换器作为控制对象, 要求:

- 输入电压: 390V;输出电压: 48V;
- 谐振点开关频率: 50kHz;额定功率: 1kw;
- 设计 LLC 谐振变换器谐振腔参数 ( $L_r$ ,  $L_m$ ,  $C_r$ , 变比  $N$ ), 实现额定功率下的闭环稳压控制, 并且可以做到投切负载下的快速动态响应。

### 1.4 实验设备

- 1.计算机
- 2.PLECS 开发软件
- 3.CCS DSP 开发软件
- 4.RT BOX
- 5.DSP28335

## 第二章 LLC 谐振变换器仿真实验

### 2.1 仿真电路搭建

根据实验要求在仿真平台 PLECS 中搭建实验电路以及调制、控制算法模块。本次 LLC 谐振变换器的仿真实验中，原边采用半桥 LLC 谐振电路，副边采用由四个二极管以及滤波电容组成的整流电路，仿真电路图如下图 2 所示。其中，参数设计利用一次谐波近似方法（FHA）求得  $L_r=51.057\mu\text{H}$ ,  $L_m=202.69\mu\text{H}$ ,  $C_r=19.845\mu\text{F}$ , 变压器的匝数比  $N$  设定为 4。

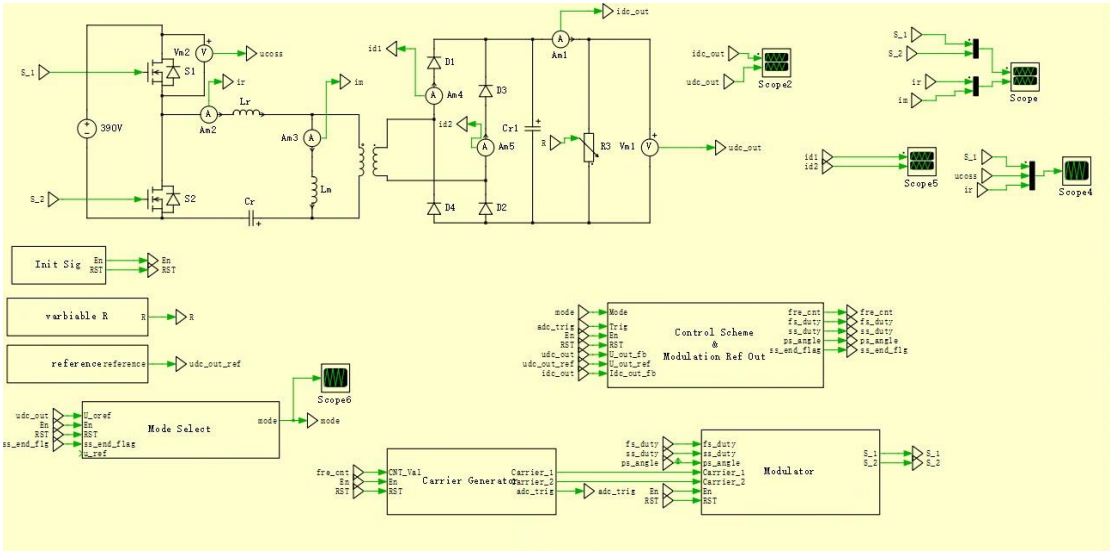


图 2 LLC 谐振变换器仿真电路图

调制以及控制算法的模块设计中，调制算法采用 LLC 谐振变换器中流行的变频控制，即 PFM 控制。在调制的算法的仿真设计中，由于采用频率调制，因此开关周期与载波信号不固定，在窄区间内波动，当计数器计数值满后，产生触发信号，此时触发控制器对所需信号进行采样与转化，并送至运算单元计算调制波信号，同时触发计数值装载，装载下一周期的计数值，以此实现调制算法。控制算法采用电压、电流双 PI 环进行闭环控制，以加快改变负载时的电路响应速度。控制模块的设计如图 3 所示。

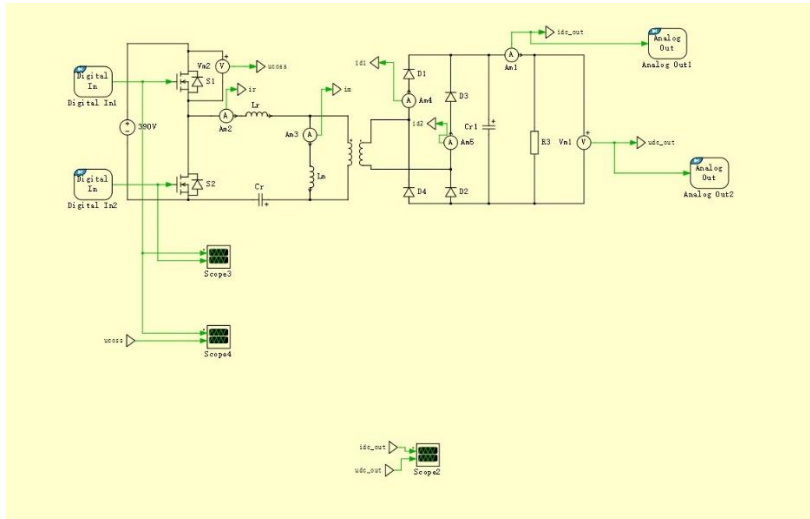


图 3 双闭环控制设计图

## 2.2 仿真结果

LLC 谐振变换器的实验目标是通过三种器件共同谐振作用，使原边的 MOSFET 功率管实现零电压开通(ZVS)，副边的二极管实现零电流关断(ZCS)，最终提高整体电路的效率。所以此部分主要观察电路是否实现了三个元器件共同谐振、是否达到了电压指标以及实现了 ZVS。仿真时间设置为 0.5s,仿真结果如下图所示。

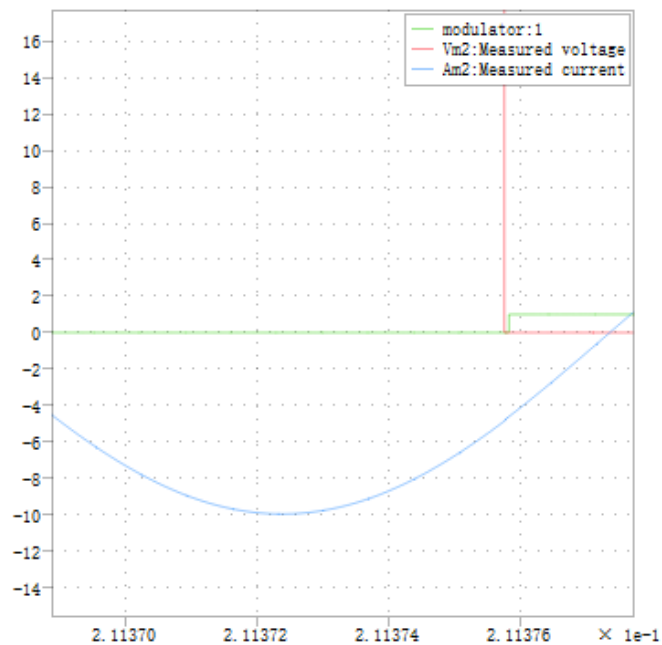


图 4 ZVS 实现

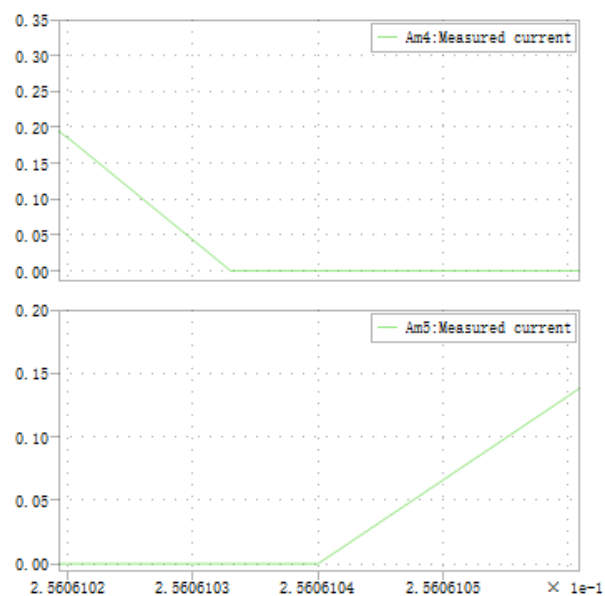


图 5ZCS 实现

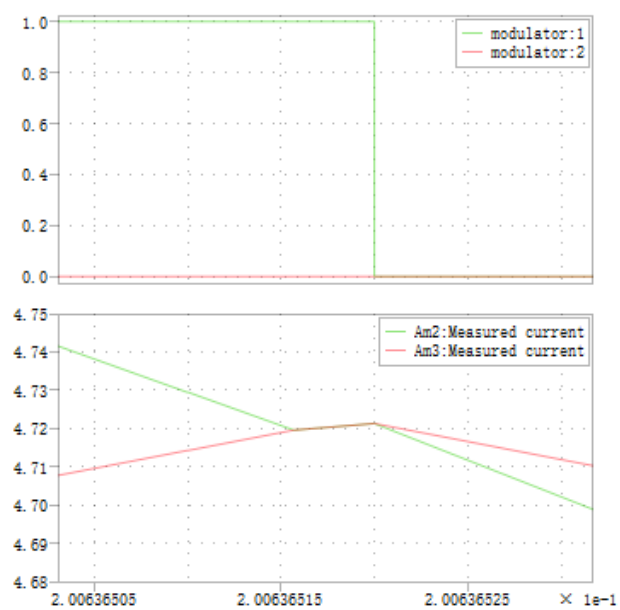


图 6 三元件谐振实现

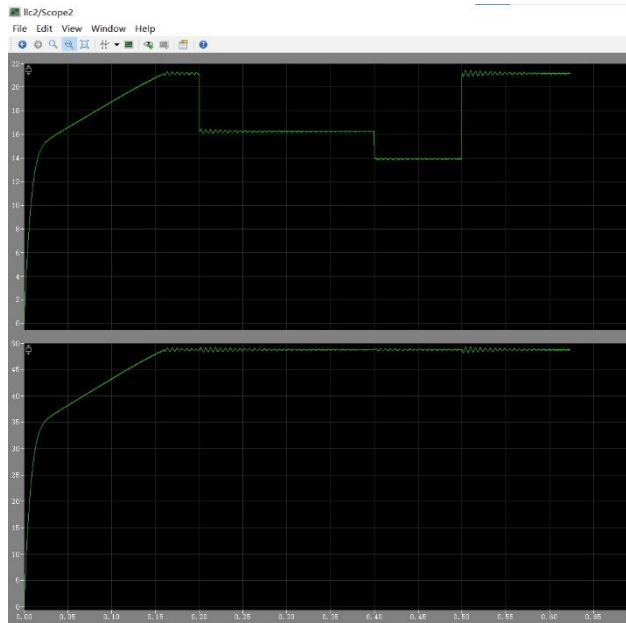


图 7 输出电压与电流

由图 7 可以看出当输入电压为 390V 时，输出电压稳定在了 48V，达到了实验要求，验证了理论的真实可靠性。

通过改变滑动变阻器的阻值来改变负载，观察输出电压的变化，发现电路的动态响应良好。如图 8 所示

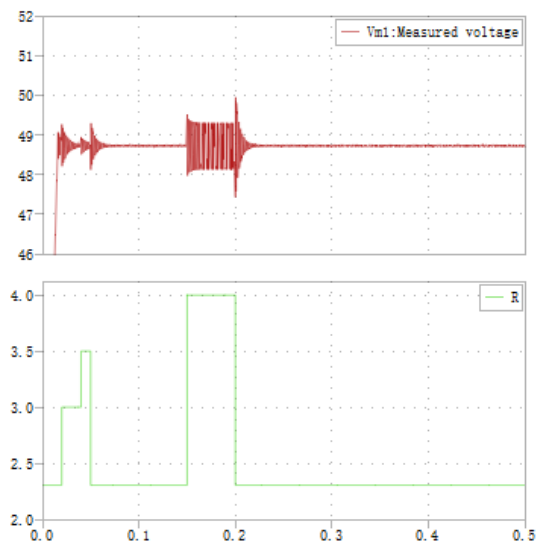


图 8 仿真结果：负载变化下的动态响应

根据仿真结果验证了电路和调制控制方法可行，接下来进行半实物实验。



## 第三章 半实物实验

### 3.1 半实物电路设计

本次半实物实验通过 PLECS RT BOX1 对电路进行烧录，并以其作为负载进行实验，PLECS RT BOX1 能够兼容 3.3V 的 COMS 电平信号，并且拥有模拟输出、输入，数字输出、输入四个端口进行信号传送。

图 9 是向 PLECS RT BOX1 中烧录的电路实验图。其中，输出端电压以及电流通过模拟输出口进行输出，产生的 PWM 波形通过数字输入端进行输入。

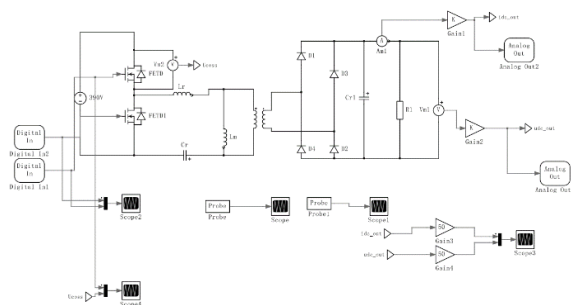


图 9 半实物实验电路图

### 3.2 DSP 程序设计

本次半实物实验采用 DSP28335 作为控制器对负载进行控制，在程序设计中主要使用 DSP28335 的 ADC 转换模块、EPWM 模块以及 ADC 中断模块。设计思路：通过 EPWM 模块生成 PWM 波形通过 PLECS RT BOX1 的数字输入口传入波形，每当 DSP 中计数器的值达到周期值时，产生 ADC 中断。在 ADC 中断模块中，将模拟输出口的电压电流信号通过 ADC 转换转为数字信号进行双闭环处理，最后电流环的输出值按比例放大作为下一阶段的周期值，由此达到变频控制。其中为了控制变频范围使电路保持高效率，对电流环输出进行了限幅处理，是频率在窄区间内进行变化，变频范围为 $[7.5\text{KHz}, 8.5\text{KHz}]$ ，通过 EPWM 的死区模块将死区设计为 300ns。程序设计过程的简单流程图如下图 10 所示。

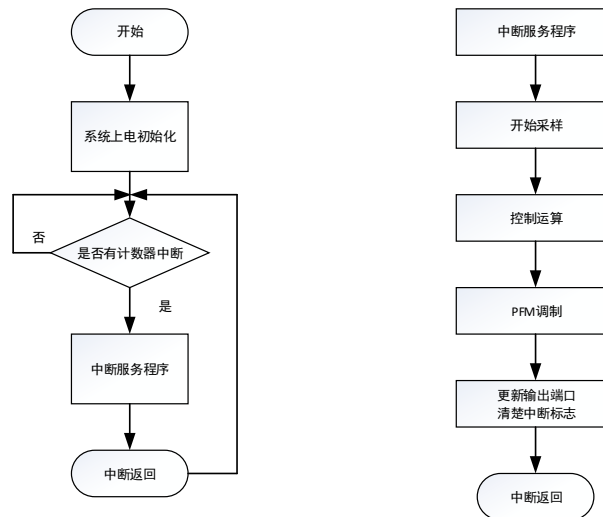


图 10 DSP 程序流程图

### 3.3 实验结果

本次半桥 LLC 谐振变换器的半实物实验参数如表 1 所示。

表 1 LLC 谐振变换器参数指标

特性	LLC 谐振变换器
谐振电感 $L_r$	51.057 $\mu$ H
谐振电容 $C_r$	19.845 $\mu$ F
励磁电感 $L_m$	202.69 $\mu$ H
LLC 谐振频率 $f_r$	8KHz
变压器变比 $n$	4:1
变频范围	7.5KHz~8.5KHz
调制方式	PFM
归一化增益范围	[0.93,1.06]

本次实验中主要观察谐振电流、ZVS 的实现、负载改变时的响应速度以及稳压波形。图 11 为 PLECS RT BOX1 数字输入端口所接收的 PWM 波形，从图中可以观察到 S1 开关管与 S2 开关互补开通并且存在死区时间  $T_d$ ，这也是实现软开关的一个重要条件。图 12 中可以观察到三个元器件共同谐振，这是软开关实现的另一重要条件。



图 11 PLECS RT BOX1 接收的 PWM 波形

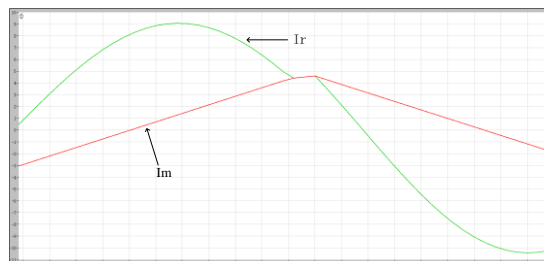


图 12 三元件谐振波形

从图 13 中可以看出，以开关管 S1 为例，当开关管 S1 的导通信号  $U_{gs1}$  到达之前，由于谐振电流的滞后作用，谐振电流尚未反向，S1 漏源极两端的极间电容  $C_{oss}$  可以通过谐振电流  $I_r$  完成放电，即  $U_{ds1}$  从  $U_{DC}$  (390V) 降低至 0V，当 S1 开通信号来临时， $U_{ds1}$  与  $U_{gs1}$  无重叠的空间，因此实现了开关管的 ZVS。同样地，在变换器二次侧，次级线圈串联输出电流的波形如下图 14 所示，可以看到次级测四个功率二极管均可以实现 ZCS。

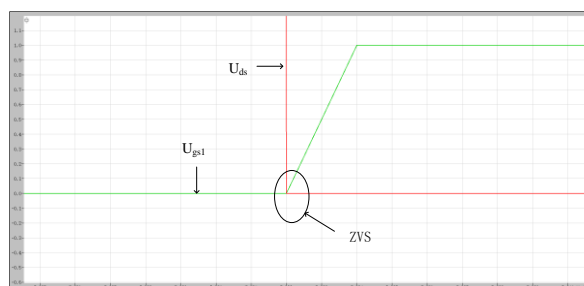


图 13 ZVS 实现

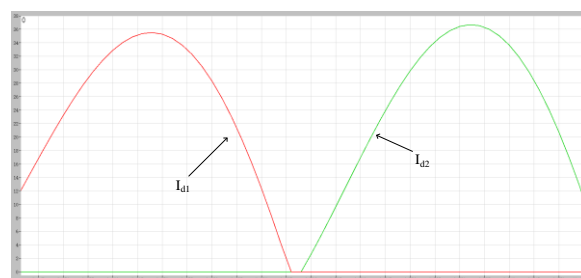


图 14 ZCS 实现

通过改变负载大小，观察满载、80%负载、50%负载的稳压波形。

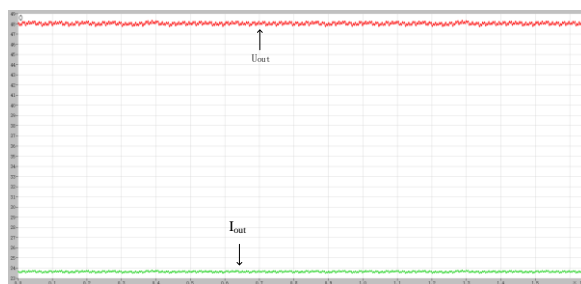


图 15 满载输出电压电流

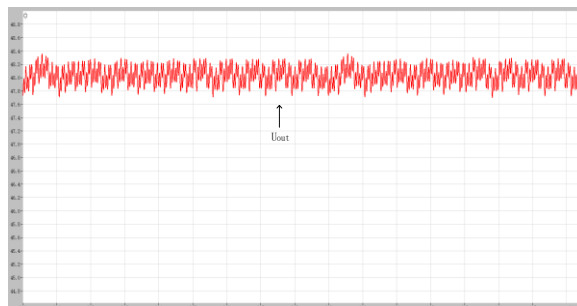


图 16 满载输出电压

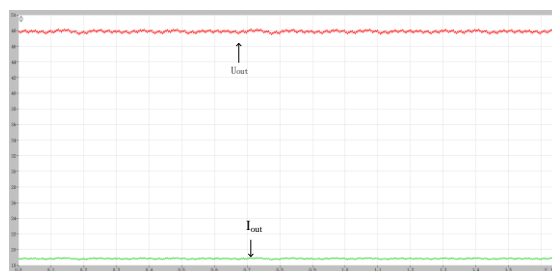


图 17 80%负载输出电压电流

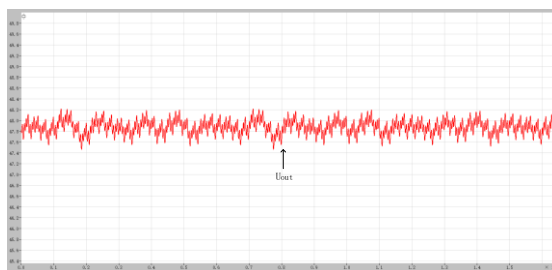


图 18 80%负载输出电压

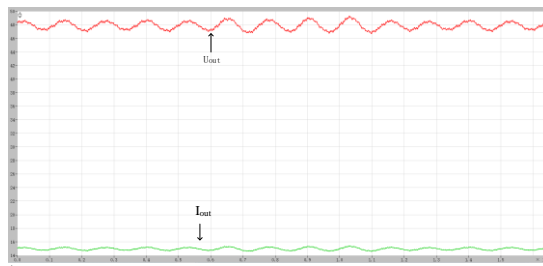


图 19 50%负载输出电压电流

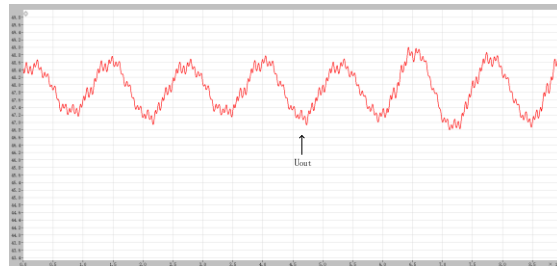


图 20 50%负载输出电压

综上，负载变化会引起输出电压和电流的变化。随着负载的减小，输出电压的波动会增大。尽管如此，输出电压的幅度基本保持不变，并且在不同负载条件下，输出电压的大小均符合实验要求。

## 第四章 实验总结

在本次实验中，我们对 LLC 谐振变换器在不同负载条件下的性能进行了详细的研究和测试。实验的主要目标是验证负载变化对输出电压和电流的影响，并评估 LLC 谐振变换器在不同工作频率下的效率和稳定性。通过精确的测量和数据分析，我们获得了丰富的实验结果，并对其进行了深入的总结和讨论。

LLC 谐振变换器因其高效率和良好的电磁兼容性，广泛应用于电力电子领域。其通过谐振网络实现高效的能量传输，并在一定频率范围内工作以实现软开关，从而减少开关损耗和电磁干扰。此次实验的设计和测试主要围绕以下几个方面进行：负载变化对输出电压和电流的影响、不同工作频率下变换器的性能以及软开关技术的实现和效果。

在实验过程中，我们首先搭建了 LLC 谐振变换器的实验平台，包括输入电源、功率开关、谐振电感和电容、励磁电感、整流二极管以及输出电容等关键组件。通过调整变换器的工作频率，我们观察了其在不同负载条件下的运行状态，并使用高精度的示波器和电流探头对输出电压和电流波形进行了测量。

### 4.1 实验步骤与结果分析

实验分为几个关键步骤：

1. 初始设置与校准：确保所有仪器设备的准确性，并对谐振变换器的初始状态进行校准。
2. 负载变化测试：通过调节负载电阻，观察并记录不同负载条件下输出电压和电流的变化。
3. 频率调整：在不同的谐振频率范围内运行变换器，分析其在各种频率下的性能表现。
4. 数据采集与分析：使用示波器记录电压和电流波形，并对数据进行详细分析，评估变换器的效率和稳定性。

实验结果清晰地表明，负载的变化显著影响了输出电压和电流。当负载减小时，输出电压的波动幅度增加，这可能是由于谐振条件下能量传输效率的变化所致。尽管如此，输出电压的平均值基本保持不变，这表明 LLC 谐振变换器在宽负载范围内具有较好的电压稳定性。

具体分析如下：

1. **负载减小时输出电压波动增大**：随着负载减少，输出电流降低，谐振网络的能量传输效率变化，导致输出电压波动加剧。这与理论预测一致，表明谐振变换器在轻载条件下更容易受到干扰。

2. **输出电压稳定性：**尽管负载变化引起了输出电压波动，但其平均值基本保持在设定范围内，符合实验要求。这表明变换器在设计上具有较好的电压调节能力，能够在不同负载条件下维持稳定输出。
3. **频率对性能的影响：**通过调整工作频率，我们发现变换器在接近谐振频率  $f_{r1}$  的范围内工作时，效率最高，开关损耗最小。这验证了软开关技术在提高变换器效率方面的重要作用。

## 4.2 实验中的挑战与解决方案

在实验过程中，我们遇到了一些挑战，需要采取多种措施加以克服，以确保实验数据的准确性和可靠性。以下是对这些挑战及其解决方案的详细描述：

### ● 高频开关噪声对测量精度的影响

高频开关噪声是 LLC 谐振变换器实验中常见的问题。由于变换器工作在高频开关模式下，MOSFET 的频繁开关会产生电磁干扰（EMI），这不仅影响测量仪器的精度，还可能对周围的电子设备造成干扰。具体表现为测量数据中出现尖峰噪声和波动，影响电压和电流波形的准确性。

#### 解决方案：

1. **屏蔽措施：**我们使用了屏蔽箱和屏蔽电缆来隔离高频噪声源。屏蔽箱可以有效减少外界电磁干扰的影响，而屏蔽电缆则用于减少测量线路上的噪声耦合。
2. **增加滤波器：**在电路的关键节点处添加低通滤波器，滤除高频噪声成分。滤波器可以平滑电压和电流波形，减少噪声的干扰。
3. **优化接地：**确保所有实验设备和电路的接地良好，减少地环路噪声。我们采用了单点接地的方法，将所有接地点集中在一个公共接地点，从而避免了接地回路引入的噪声。

### ● 负载变化引起的瞬态响应不稳定

负载变化是另一个需要应对的挑战。当负载发生变化时，谐振变换器的瞬态响应可能出现不稳定现象，表现为输出电压和电流的剧烈波动。这种不稳定性不仅影响测量数据的可靠性，还可能对变换器的正常运行造成影响。

#### 解决方案：

1. **逐步调整负载：**我们采用逐步调整负载的方法，避免一次性大幅度改变负载。通过细微调整负载电阻，逐步增加或减少负载，观察并记录输出电压和电流的变化，确保变换器逐步适应负载变化。

2. **引入缓冲电路：**在负载端添加缓冲电路，如电容或电感，用于平滑瞬态响应。缓冲电路可以减缓负载变化对输出电压和电流的冲击，减少瞬态波动。
3. **实时监控和反馈控制：**使用实时监控系統监测输出电压和电流，并采用反馈控制方法进行调节。当检测到负载变化引起的波动时，控制系统可以迅速调整开关频率或占空比，稳定输出。

通过上述解决方案，我们成功克服了实验过程中遇到的各种挑战，确保了测量数据的准确性和可靠性。这不仅为本次实验提供了可靠的数据支持，也为今后类似实验的开展积累了宝贵的经验。实验结果表明，通过合理的屏蔽、滤波和测量优化，LLC 谐振变换器在高频开关噪声和负载变化条件下，依然能够保持良好的性能表现。

### 4.3 结论与展望

本次实验验证了 LLC 谐振变换器在不同负载条件下的性能表现，展示了其良好的电压稳定性和高效率特点。实验结果表明，通过合理的频率调节和负载管理，LLC 谐振变换器可以在广泛的应用领域中实现高效能量转换。

未来的研究可以进一步探讨以下几个方面：

1. **优化谐振网络设计：**研究不同谐振电感和电容的组合对变换器性能的影响，以提高其效率和稳定性。
2. **多种负载条件测试：**在更广泛的负载范围和动态负载条件下进行测试，评估变换器的动态响应性能。
3. **集成化与小型化设计：**探索 LLC 谐振变换器在集成电路和小型化电源模块中的应用，提升其在便携式设备中的使用价值。

总之，本次实验为 LLC 谐振变换器的应用和设计提供了重要的实验数据和理论支持，为未来的研究和开发奠定了坚实的基础。