

三相逆变器并网控制仿真实验

202322280123 章洮与, 202322280105 何一鸣

1 实验原理与要求

1.1 实验原理

三相构网型逆变器是一种电力电子装置，用于将直流电转换为三相交流电，并将其并入电网。它在电力传输和分配系统中具有重要作用，特别是在可再生能源系统（如太阳能光伏和风能发电）中。以下是三相构网型逆变器的工作原理和关键技术的详细描述：

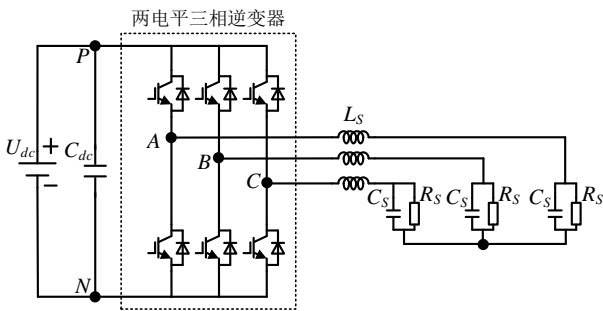


图 1 三相构网型变流器

三相构网型逆变器通过一系列开关操作将直流电压转换为交流电压。这些开关通常由功率半导体器件（如 IGBT 或 MOSFET）构成，通过 PWM（脉宽调制）技术进行控制。PWM 技术通过调节开关的开关时间比例，生成所需的交流波形。具体过程如下：

- 直流输入：** 直流电源通常来自太阳能电池板、风力发电机或蓄电池等直流电源设备。输入的直流电压通过逆变器的 DC-DC 转换部分，调节到适当的电压水平。
- 逆变过程：** 在逆变器的主电路中，直流电压被转换为交流电压。逆变器采用三相桥式拓扑结构，包括六个开关（IGBT 或 MOSFET），分别连接到三相负载。通过控制这些开关的导通和关断，产生正弦波形的交流电压。

- 滤波：** 逆变器输出的交流电压通过滤波器（LC 滤波器）去除高频开关谐波，生成平滑的正弦波。滤波器由电感和电容组成，设计用于特定的开关频率和负载条件。
- 构网：** 经滤波的三相交流电压通过构网点接入电网。为了确保构网操作的安全性和稳定性，逆变器需要实时监测和调整输出电压的幅值、频率和相位，以与电网电压同步。

1.2 控制策略与动态响应和稳定性

在三相构网型逆变器中，控制策略至关重要，直接影响其性能和稳定性。常见的控制策略包括电压和电流 PI 控制，具体如下：

- 电压 PI 控制：** 电压控制环用于调节逆变器输出电压的幅值和相位，以匹配电网电压。PI 控制器通过测量输出电压和参考电压之间的误差，并根据比例（P）和积分（I）调节开关信号，确保输出电压稳定且与电网电压同步。
- 电流 PI 控制：** 电流控制环用于控制逆变器输出电流的波形和幅值，以实现电流跟踪控制。PI 控制器通过测量输出电流和参考电流之间的误差，并根据比例（P）和积分（I）调节开关信号，确保输出电流的形状和相位与电网电流一致。

为了确保三相构网型逆变器在不同负载条件下的稳定性和快速动态响应，控制系统还需具备以下特性：

- 动态响应：** 在负载变化或电网波动时，逆变器需要快速响应，调整输出电压和电流。高效的控制算法和快速

的传感器反馈系统是实现这一目标的关键。

2. **稳定性：** 控制系统需具备良好的稳定性，避免由于负载突变或电网干扰引起的震荡或不稳定现象。通过设计合理的 PI 控制参数，优化控制环的增益和响应时间，可以提高系统的稳定性。

为了保护逆变器及其连接的电网和负载，三相构网型逆变器还配备了多种保护机制，包括：

1. **软启动：** 在启动过程中，逐步增加逆变器的输出电压和电流，避免对电网和负载造成冲击。
2. **过流保护：** 监测输出电流，当电流超过设定的安全阈值时，自动关闭逆变器或限制输出电流，防止损坏电力器件。
3. **过压保护：** 监测输出电压，当电压超过设定的安全阈值时，自动调整或关闭逆变器，防止损坏电路和负载。
4. **温度保护：** 监测逆变器内部温度，当温度超过安全范围时，自动调整工作模式或关闭逆变器，防止过热损坏。

综上所述，三相构网型逆变器通过先进的电力电子技术和精确的控制策略，实现高效的直流到交流转换，并稳定地将电力并入电网。其在现代电力系统中的应用，极大地提高了可再生能源的利用效率和电网的稳定性。

1.3 三相构网型逆变器工作过程

三相构网型逆变器通过复杂的电子电路和控制算法，将直流电转换为符合电网要求的三相交流电，并将其并入电网。以下是三相构网型逆变器的详细工作过程：

1. 直流电源输入

首先，三相构网型逆变器接收来自直流电源的输入电压。直流电源通常来自以下几种来源：

- **太阳能光伏电池板：** 将太阳能转换为直流电。
- **风力发电机：** 通过整流器将交流电转换为直流电。
- **蓄电池或储能系统：** 提供直流电源。

这些直流电源通过逆变器的 DC-DC 转换电路调节到所需的直流母线电压水平。

2. 逆变过程

逆变器核心部分将直流电转换为三相交流电。这一过程通过功率半导体器件（如 IGBT 或 MOSFET）进行高频开关操作来实现。逆变过程包括以下几个步骤：

- **PWM（脉宽调制）技术：** 逆变器使用 PWM 技术生成高频开关信号，通过调节开关的导通和关断时间来控制输出电压的幅值和相位。
- **三相桥式拓扑结构：** 逆变器通常采用三相桥式拓扑结构，包含六个功率开关。这些开关按照特定的序列导通和关断，生成三相正弦波形的交流电压。

3. 滤波器处理

由于高频开关操作会产生谐波，为了获得平滑的正弦波输出，逆变器输出端会配置 LC 滤波器。滤波器由电感（L）和电容（C）组成，主要功能如下：

- **滤除高频谐波：** LC 滤波器去除高频开关产生的谐波，输出纯净的正弦波。

- **平滑输出波形：**滤波器将 PWM 波形转换为连续的正弦波，适应电网要求。

4. 构网操作

滤波后的三相交流电通过构网点接入电网。构网操作的关键在于实现与电网电压的同步，具体步骤如下：

- **电压和相位同步：**逆变器的控制系统实时监测电网电压的幅值、频率和相位，通过调整输出电压使其与电网电压同步。
- **构网控制算法：**使用电压和电流 PI 控制算法，确保逆变器输出电压与电网电压一致，并控制输出电流的幅值和相位。

5. 动态响应与稳态控制

在实际运行过程中，逆变器需要具备快速动态响应和稳态控制能力：

- **动态响应：**在负载变化或电网波动时，逆变器需要迅速调整输出，以保持电压和电流的稳定。高效的 PI 控制算法和快速传感器反馈系统确保逆变器能够在几毫秒内做出响应。
- **稳态控制：**在稳态条件下，逆变器通过闭环控制维持输出电压和电流的稳定，防止因外部干扰导致输出波动。

6. 保护机制

为了保证系统的安全和稳定，逆变器配备了多种保护机制：

- **过流保护：**当输出电流超过安全阈值时，逆变器自动调整或关闭输出，防止损坏功率器件。

- **过压保护：**当输出电压超过安全范围时，逆变器自动调整输出电压或关闭输出，保护负载和电网。
- **温度保护：**监测逆变器内部温度，防止过热导致的损坏。当温度超过设定值时，逆变器降低输出功率或关闭运行。
- **软启动：**在启动过程中逐步增加输出功率，避免对电网和负载造成冲击。

7. 控制系统实现

逆变器的控制系统包括电压控制环和电流控制环，通过双闭环控制实现精确调节：

- **电压控制环：**实时监测和调整输出电压，确保与电网电压同步。PI 控制器通过计算输出电压与参考电压之间的误差，生成调节信号控制功率开关的导通和关断时间。
- **电流控制环：**调节输出电流的波形和幅值。PI 控制器通过测量输出电流与参考电流之间的误差，生成调节信号控制开关操作，确保输出电流与电网电流一致。

综上所述，三相构网型逆变器通过精确的控制策略和先进的电力电子技术，实现直流到三相交流的高效转换，并稳定地将电力并入电网。在实现高效能量转换的同时，逆变器还具备良好的动态响应和保护机制，确保系统在各种运行条件下的安全和稳定。

1.3 实验要求

基于给定的逆变器参数，设计基于电压和电流 PI 控制双闭环控制，要求实现直流稳压条件下功率切换的闭环稳压控制，并且可以做到投切负载下的快速动态响应。

参数如下：

参数	幅值
交流电压	220V(rms)
交流频率	50Hz
直流母线电压	660V
滤波电容	15uF
滤波电感	3mH/0.4Ω
额定功率	7kW
直流电容	2000uF
负载电阻	21Ω

图 2 参数表格

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 1
- 5.DSP28335

2 仿真实验

2.1 仿真搭建

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。本次三相构网型逆变器的仿真实验中，仿真电路图如下图 3 所示。其中，参数设置为交流电压：220V，交流频率 50HZ，直流母线电压 660V，滤波电容 15uF，滤波电感 3mH/0.4Ω，额定功率 7kW，直流电容 2000uF，负载电阻 21 欧姆。

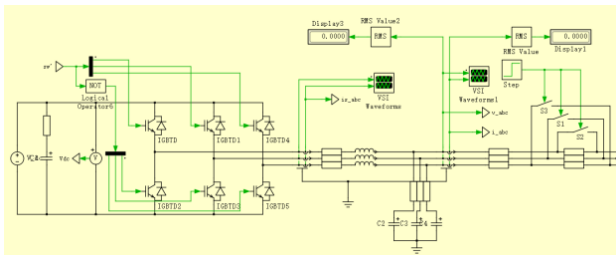


图 3 逆变器仿真模型图

为了满足课题要求中关于系统在投切负载条件下的稳态性能和动态性能的评估，我们在负载侧引入了一个单位阶跃信号。该阶跃信号设计为在 0.5 秒时跃变至高电平，从而模拟负载突然减少的情况，这可以通过使所接负载短路来实现。这种设置允许我们精确地测试和分析逆变器在负载变化时的响应能力和稳定性。

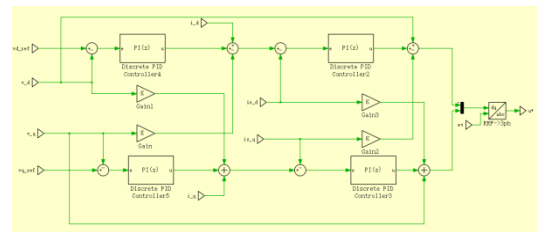


图 4 双闭环控制设计图

经双闭环控制系统输出参考电压的 dq 分量值后再经一系列反变换最终生成所需的控制电压 u^* ，将其输入到 SVPWM 模块中用以生成实时门控信号。

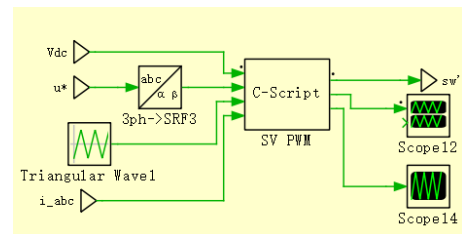


图 5 SVPWM 仿真模型图

2.2 仿真结果

本课题采用空间矢量脉宽调制（SVPWM）技术来生成三相逆变器的门控信号。该技术在 PLECS 平台上通过编写 C-Script 模块代码实施。首先，系统将由双闭环控制器生成的固定 ABC 坐标系下的控制电压转换至固定的 $\alpha\beta$ 坐标系电压。接着，系统进行扇区判断和占空比的计算。此外，为了提升门控信号的生成精度和可靠性，代码中还集成了过调制处理功能。这些步骤共同确保了调制算法能够稳定且高效地控制逆变器

输出。

在 0.5s 时断开负载,可以看出在切换负载后三相逆变器的输出电压依旧能够稳定保持 220v 的有效值不变。

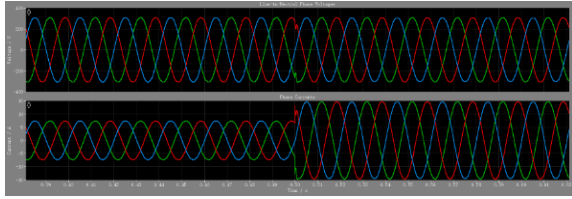


图 6 逆变器侧相电压、相电流波形图 (t=0.5s 时断开负载)

当 0.5s 断开负载后功率值在 6.88kW 上下波动,基本满足课题额定功率达到 7kW 的要求。

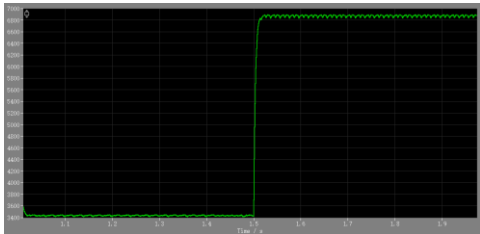


图 7 输出功率变化图 (t=0.5s 时断开负载)

控制电压在经历 Park 逆变换和 Clarke 变换处理后,转换成静止的 $\alpha\beta$ 坐标系中的电压 U_α 和 U_β , 如下图所示。这些电压 U_α 和 U_β 也被用作输入到 SVPWM 模块的电压矢量。从仿真的波形图中可以观察到,其峰值电压达到 311V,频率保持在 50Hz,这符合我们对生成的三相交流电压和频率的预期要求。

3 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 RTBOX1 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、输入的四个端口进行信号传送。

图 6 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。

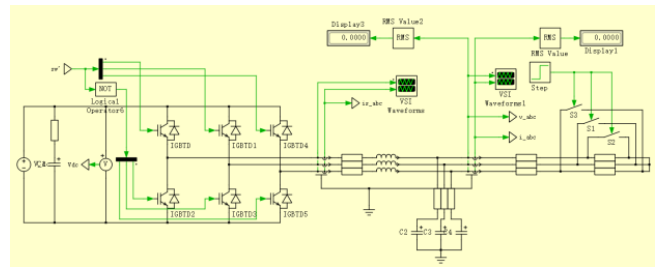


图 8 PLECS 半实物仿真图

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。

选用的 TMS320F28335 芯片作为主控制芯片。F28335DSP 集成了 DSP 和微控制器的长处,拥有完成 64 位的数据处理能力,从而使该处理器能够实现更高精度的处理任务,并且其高速运行时不需要大量的快速存储器,能在保证系统数据处理速度和控制精度的同时又具有足够的存储空间,满足课题所要求的三相两电平逆变器的设计需求。

F28335 的中断采用的是 3 级中断机制,分别是外设级中断、PIE 级中断和 CPU 级中断,最内核部分为 CPU 级中断,但 F28335 中断源很多,在有限中断线的情况下,只能安排中断线进行复用,其复用管理就有了中间层的 PIE 级中断,外设要能够成功产生中断响应,就要首先经外设级中断允许,然后经 PIE 允许,最终 CPU 做出响应,考虑到离网三相逆变器的实际采样需求,本课题采用 ADC 外设中断的方式。

软件在 CCS (Code Composer Studio) 环境下编程,CCS 是一种针对 TMS320 系列 DSP 的集成开发环境,在 Windows 操作系统

下采用图形接口界面，提供有环境配置、源文件编辑、程序调试、跟踪和分析等工具。主程序流程图如图 6 所示。

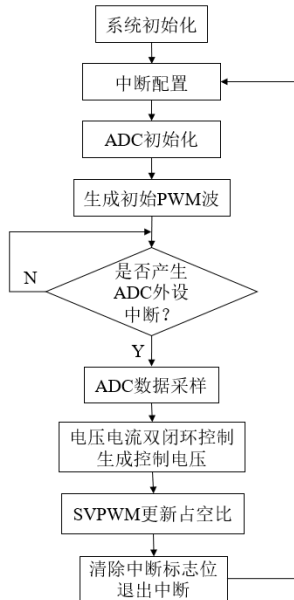


图 7 DSP 程序流程图

首先，主程序启动时会初始化系统中的所有硬件组件。随后，配置 ADC 并开始对系统中的所有信号进行采集。程序接着生成一个预设占空比的初始 PWM 波形，处于等待状态，直到 ADC 外设发生中断。一旦检测到中断，程序便会进入中断处理流程，依序执行数据采样、控制电压生成以及占空比更新的操作。

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 实验参数表

参数	幅值
交流电压	220V(rms)
交流频率	50Hz
直流母线电压	660V
滤波电容	15 μ F
滤波电感	3mH/0.4 Ω
额定功率	7kW
直流电容	2000 μ F
负载电阻	21 Ω

将 PLECS 仿真模型及 DSP 控制代码烧录进 PLECS RT BOX1 中。图 10 为 PLECS RT BOX1 数字输入端口所接收的 PWM 波形，如下：

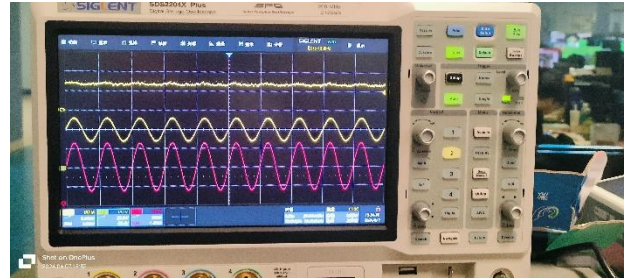


图 10 实验结果图（从上到下依次为功率，电压，电流波形图）

波形幅度、频率等参数与仿真结果保持一致且波形产生稳定可以复现，实验任务完成。

4 实验总结与展望

4.1 实验总结

本次实验旨在通过仿真和半实物实验验证三相构网型逆变器的性能。该装置的主要功能是将直流电转换为三相交流电，并将其并入电网。此类逆变器在现代电力系统，尤其是可再生能源系统中扮演着关键角色。

实验首先在 PLECS 仿真平台上搭建了三相构网型逆变器的电路模型，并配置了相应的控制策略。这包括双闭环控制系统的设计，使用电压和电流的 PI 控制来实现精确的输出调节。为了模拟实际电网操作条件下的负载变化，我们设计了一个单位阶跃信号于 0.5 秒时触发，模拟负载突然减少的情况，以评估逆变器在动态负载变化下的响应能力和系统稳定性。

4.2 实验步骤与结果分析

实验分为几个关键步骤：

1. 系统初始化

- 硬件初始化: 首先, 对系统内所有硬件组件进行初始化, 包括计算机、PLECS 开发软件、CCS DSP 开发软件、RT BOX 1 和 DSP28335。
 - ADC 配置: 初始化 ADC 配置, 确保能够准确采集系统内所有信号。
2. 仿真模型搭建
 - 电路搭建: 在 PLECS 中搭建三相构网型逆变器的仿真模型, 参数设置为交流电压 220V, 交流频率 50Hz, 直流母线电压 660V, 滤波电容 15 μ F, 滤波电感 3mH/0.4 Ω , 额定功率 7kW, 直流电容 2000 μ F, 负载电阻 21 Ω 。
 - 控制算法实现: 编写 C-Script 模块代码, 实现双闭环控制和 SVPWM 调制算法。
 3. 仿真运行与数据采集
 - 仿真运行: 在 PLECS 中运行仿真模型, 观察并记录系统的输出电压、电流和功率波形。
 - 数据采集: 使用仿真平台的工具, 采集仿真过程中的各项数据, 特别是 0.5 秒负载切换前后的数据。
 4. 半实物实验
 - 硬件连接: 将仿真模型及 DSP 控制代码烧录进 PLECS RT BOX1 中, 连接各个实验设备, 确保信号传输的准确性。
 - 程序运行: 在 CCS 环境中编写并运行主程序, 配置 ADC 并生成初始 PWM 波形, 等待中断信号。
 - 中断处理: 检测到 ADC 中断后, 进入中断处理流程, 依次完成数据采集、控制电压生成、占空比更新。
 5. 实验数据记录
 - 信号采集: 通过 PLECS RT BOX1 采集输出电压、电流和功率波形, 记录负载切换前后的数据变化。
 - 数据分析: 将采集到的数据与仿真结果进行对比, 分析系统的稳态性能和动态响应能力。
- 具体分析如下:
1. **系统初始化与 ADC 配置:** 硬件初始化和 ADC 配置成功, 确保了系统的稳定运行和信号采集的准确性。
 2. **仿真模型与控制算法:** 仿真模型中的双闭环控制和 SVPWM 调制算法在 PLECS 中运行良好, 生成的三相交流电压和电流波形符合预期。仿真结果显示, 在 0.5 秒负载切换时, 系统能够迅速调整输出, 输出电压稳定在 220V, 频率保持在 50Hz, 满足设计要求。
 3. **负载切换的动态响应:** 在 0.5 秒时引入单位阶跃信号模拟负载突然减少的情况。仿真和半实物实验结果表明, 系统在负载切换后, 输出电压和电流能够迅速恢复到稳态, 显示了良好的动态响应能力。输出功率在负载切换后, 稳定在 6.88kW, 接近额定功率 7kW, 表明系统具备较高的功率稳定性。
 4. **半实物实验结果:** 半实物实验中, PLECS RT BOX1 接收并处理 PWM 信号, 生成的电压和电流波形与仿真结果高度一致。实验数据表明, 系统在负载切换前后的电压、电流波形稳定, 波形幅度、频率等参数均满足设计要求。
 5. **系统稳定性与保护机制:** 实验过程中, 系统的过流、过压和温度保护机制均正常工作, 确保了系统在不同运行条件下的安全性和稳定性。软启动功能有效地避

免了启动时对电网和负载的冲击，确保系统平稳启动。

综上所述，本实验通过仿真实验和半实物实验验证了三相构网型逆变器在不同负载条件下的动态响应和稳态性能。实验结果显示，逆变器能够在负载切换时迅速调整输出，保持电压和频率的稳定，满足设计要求。系统的保护机制进一步提高了其运行的安全性和可靠性。未来的工作可以在更复杂的应用场景中进一步验证系统性能，并探索优化控制算法以提高能效。

4.3 实验中的挑战与解决方案

在三相构网型逆变器的实验过程中，我们遇到了多个挑战，这些挑战对实验的准确性和可靠性提出了较高的要求。以下是我们在实验中遇到的主要挑战及其解决方案：

挑战一：高频开关噪声对测量精度的影响

高频开关噪声是三相构网型逆变器实验中常见的问题。由于逆变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：

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。

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。

控制算法实现的复杂性

在 PLECS 中实现复杂的双闭环控制和

SVPWM 调制算法需要精确的代码编写和调试。这对研究人员的编程能力和对控制算法的理解提出了较高要求。

解决方案：

模块化编程：将控制算法拆分成多个模块，逐步实现和测试每个模块。这样可以降低代码的复杂性，便于调试和错误定位。

详细测试和验证：在实现每个模块后，进行详细的测试和验证，确保其功能正确。特别是在关键算法（如 SVPWM 调制）的实现上，通过仿真和实际测试验证其准确性。

借助文献和案例：参考相关文献和成功案例，借鉴其中的算法实现方法和调试经验，提高控制算法实现的效率和可靠性。

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，三相构网型逆变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。

4.4 结论与展望

本次实验验证了三相构网型逆变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，通过合理的控制策略和负载管理，三相构网型逆变器可以在广泛的应用领域中实现高效能量转换，并且在负载突变时能够迅速响应，保持输出电压和电流的稳定。

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逆变器性能的影响，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，评估逆变器的动态响应性能。
3. 集成化与小型化设计：探索三相构网型逆变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。
4. 提升控制算法：研究和开发更加先进的控制算法，如自适应控制、模糊控制和人工智能算法，以提高系统的动态响应速度和控制精度，增强系统的鲁棒性。
5. 智能监控与维护：开发智能监控系统，对逆变器运行状态进行实时监测和数据分析，通过大数据和机器学习技术预测潜在故障，实现智能化的预防性维护和管理，提高系统的可靠性和使用寿命。

总之，本次实验为三相构网型逆变器的应用和设计提供了重要的实验数据和理论支持，掌握了很多关于三相构网型逆变器的基础知识，为未来的研究和开发奠定了坚实的基础。随着技术的不断进步，三相构网型逆变器将在可再生能源和电力电子领域发挥越来越重要的作用。