



本科生毕业论文（设计）

题目： 基于 SPWM 的三相电压型
逆变器仿真研究

姓 名 常毅成

学 号 22354010

院 系 智能工程学院

专 业 智能科学与技术

指导教师

2026 年 1 月 3 日

基于 SPWM 的三相电压型 逆变器仿真研究

Simulation Research of Three-phase Voltage Source Inverter Based on SPWM

姓 名 常毅成

学 号 22354010

院 系 智能工程学院

专 业 智能科学与技术

指导教师

2026 年 1 月 3 日

学术诚信声明

本人郑重声明：所呈交的毕业论文（设计），是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文（设计）不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本论文（设计）的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文（设计）的知识产权归属于培养单位。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：

日 期： 年 月 日

摘要

本文针对控制电机技术中的核心功率变换环节，设计并仿真了基于正弦脉宽调制（SPWM）技术的三相电压型逆变电路。利用 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建了包含直流电源、IGBT 逆变桥及 RL 阻感负载的完整系统模型。通过对比三角载波与三相参考正弦波生成 PWM 控制信号，实现了将直流电转换为频率、幅值可调的三相交流电。仿真结果显示，输出线电压呈 PWM 脉冲形式，而负载电流在电感滤波作用下呈现良好的正弦度，验证了该拓扑结构及控制策略在电机驱动领域的有效性与实用性。

关键词： SPWM，三相逆变器，MATLAB/Simulink，谐波分析

ABSTRACT

Aiming at the core power conversion link in control motor technology, this paper designs and simulates a three-phase voltage source inverter circuit based on Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) technology. A complete system model including DC power supply, IGBT inverter bridge and RL load is built using MATLAB/Simulink simulation platform. By comparing the triangular carrier with the three-phase reference sine wave to generate PWM control signals, the conversion of DC power into three-phase AC power with adjustable frequency and amplitude is realized. The simulation results show that the output line voltage is in the form of PWM pulses, while the load current presents a good sinusoidal degree under the filtering effect of inductance, verifying the effectiveness and practicality of the topology and control strategy in the field of motor drive.

Keywords: SPWM, Three-phase Inverter, MATLAB/Simulink, Harmonic Analysis

目录

1	绪论	1
1.1	研究背景与意义	1
1.2	国内外研究现状	1
2	电路拓扑与控制策略研究	3
2.1	三相全桥逆变电路拓扑	3
2.2	SPWM 控制策略理论分析	3
2.2.1	调制原理与数学模型	3
2.2.2	基波电压与谐波特性	4
2.3	控制策略对比与选择	4
3	仿真模型设计与参数计算	5
3.1	仿真平台选择	5
3.2	系统参数设计	5
3.2.1	主电路参数	5
3.2.2	控制参数	5
3.3	Simulink 模型搭建	5
4	调试过程与仿真结果分析	9
4.1	调试过程与问题解决	9
4.1.1	电气端口与信号端口的混淆	9
4.1.2	负载连接方式与电流测量	9
4.1.3	示波器观测优化	9
4.2	仿真结果分析	9
4.2.1	波形观测	9
4.2.2	结果深度分析	10
5	结论	13

1 绪论

1.1 研究背景与意义

随着现代电力电子技术的飞速发展，电能变换技术在工业自动化、交通运输及新能源发电等领域发挥着至关重要的作用。在控制电机技术中，如何高效、精确地将恒定的直流电（DC）转换为频率和幅值可调的三相交流电（AC），是实现电机高性能驱动的核心问题。

三相电压型逆变器（Voltage Source Inverter, VSI）因其结构清晰、控制灵活、能量转换效率高而被广泛应用于感应电机和永磁同步电机的驱动系统中。传统的方波逆变会导致电机转矩脉动大、谐波损耗高，已逐渐被脉宽调制（PWM）技术取代。正弦脉宽调制（SPWM）技术作为一种经典的调制策略，利用冲量等效原理，通过调节脉冲宽度来合成所需的正弦基波电压。掌握三相 SPWM 逆变器的建模与仿真方法，对于深入理解电机控制系统的运行机制具有重要的工程实践意义。

1.2 国内外研究现状

目前，逆变器控制技术经历了从模拟控制到数字控制的演变。在电机驱动领域，主流的控制策略主要包括：

- **SPWM（正弦脉宽调制）**：物理意义直观，硬件实现简单，是本科教学和基础工业应用的首选。
- **SVPWM（空间矢量脉宽调制）**：通过优化零矢量的作用时间，将直流母线电压利用率提高了约 15.4%，适合高性能矢量控制系统。
- **SHE-PWM（特定消谐技术）**：通过数学计算消除特定次数的低频谐波，常用于大功率多电平逆变器。

考虑到本项目旨在快速验证控制电机驱动主电路的可行性，采用 SPWM 策略进行仿真不仅能够满足设计要求，还能通过 MATLAB/Simulink 平台直观地展示电力电子系统的动态特性。

2 电路拓扑与控制策略研究

2.1 三相全桥逆变电路拓扑

本设计采用典型的三相电压型全桥逆变电路结构。主电路主要由直流电压源、功率开关器件及三相负载组成。

1. **直流侧**：由理想直流电压源 V_{dc} 供电，模拟整流后的直流母线。
2. **逆变桥**：由 6 个全控型功率开关器件（IGBT）组成 A、B、C 三个桥臂。每个 IGBT 反并联一个二极管（Freewheeling Diode），其作用在于提供感性负载电流的续流通路，防止开关关断时的过电压击穿器件。
3. **负载侧**：采用星形（Y）连接的电阻电感（RL）负载，用于模拟实际交流电机的定子绕组阻抗特性。

2.2 SPWM 控制策略理论分析

SPWM 控制技术基于“冲量等效原理”，即形状不同但冲量相等的窄脉冲加在惯性环节上时，其效果基本相同。

2.2.1 调制原理与数学模型

本仿真采用双极性 SPWM 调制方式。设载波为等腰三角波 u_c ，其幅值为 V_{tri} ，频率为 f_c ；调制波为三相正弦波 u_r ，其幅值为 V_{ref} ，频率为 f_r 。

定义**调制比**（Modulation Index） M 为：

$$M = \frac{V_{ref}}{V_{tri}} \quad (0 < M \leq 1) \quad (2.1)$$

定义**载波比** N 为：

$$N = \frac{f_c}{f_r} \quad (2.2)$$

开关管的控制逻辑如下：

- 当 $u_r > u_c$ 时，上桥臂导通（ $S_x = 1$ ），下桥臂关断，输出相电压为 $V_{dc}/2$ 。
- 当 $u_r < u_c$ 时，上桥臂关断（ $S_x = 0$ ），下桥臂导通，输出相电压为 $-V_{dc}/2$ 。

2.2.2 基波电压与谐波特性

在 SPWM 调制下，逆变器输出线电压的基波幅值 V_{AB1} 与直流电压的关系满足线性关系：

$$V_{AB1} = \frac{\sqrt{3}}{2} M V_{dc} \quad (2.3)$$

当 $M = 0.8$ 时，直流电压利用率约为 0.692。与方波逆变相比，SPWM 的主要优势在于它将谐波分量从低频区推移到了以载波频率 f_c 及其倍频为中心的高频区。由于电机绕组具有低通滤波特性，这些高频电压谐波很难产生电流，从而使得输出电流非常接近正弦波。

2.3 控制策略对比与选择

为了突显 SPWM 的特点，将其与方波逆变及 SVPWM 进行理论对比，如表 2.1 所示。

表 2.1 常见逆变器控制策略性能对比

性能指标	180 度导通方波	SPWM	SVPWM
控制复杂度	极低	低	中等
直流电压利用率	100%	86.6%	100%
低次谐波含量	很高 (含 5,7 次)	极低	极低
输出波形质量	差	好	最好
应用场景	低成本简单驱动	通用变频器	高性能伺服

本设计选用 SPWM，是因为在 MATLAB 仿真中，它能以最简洁的逻辑验证逆变电路的“直流-交流”变换功能，且对于一般的感应电机调速已能提供足够优良的波形。

3 仿真模型设计与参数计算

3.1 仿真平台选择

本次设计使用 MATLAB R2023a 版本中的 Simulink 及其附属的 **Simscape Electrical** (原 SimPowerSystems) 工具箱。相比于纯数学模块, Simscape 提供了物理层面的电气元件模型, 能够更真实地反映电路的电气耦合关系。

3.2 系统参数设计

为了验证系统在电机驱动工况下的性能, 参数设定需符合工程实际。具体参数计算与设置如下:

3.2.1 主电路参数

- **直流电压 (V_{dc}):** 设定为 400V。
- **负载参数:** 为了模拟中小型感应电机, 选取每相电阻 $R = 10\Omega$, 电感 $L = 10mH$ 。
- **时间常数:** 负载时间常数 $\tau = L/R = 1ms$, 这决定了电流对电压响应的滞后特性。

3.2.2 控制参数

- **基波频率 (f):** 50Hz, 对应工频电机。
- **载波频率 (f_c):** 5000Hz。设计依据: 较高的开关频率有利于减少低次谐波, 使输出电流更平滑, 但会增加开关损耗。5kHz 是 IGBT 器件常用的折中频率。
- **调制比 (M):** 0.8。保证输出在很多线性调制区, 避免过调制导致的波形失真。

详细的仿真参数汇总如表3.1所示。

3.3 Simulink 模型搭建

模型主要由三部分构成, 如图3.1所示。

1. **控制信号生成:** 采用 PWM Generator (2-Level) 模块。该模块内部集成了三角波发生器和比较器, 只需输入三相正弦参考波, 即可自动生成互补的 6 路 PWM 脉冲信号, 直接驱动 IGBT。

表 3.1 仿真系统详细参数设置表

分类	参数名称	符号	设定值
2* 电源与负载	直流母线电压	V_{dc}	400 V
	负载阻抗	R/L	10 Ω /10mH
3* 控制参数	基波频率	f	50 Hz
	载波频率	f_c	5000 Hz
	调制比	M	0.8
2* 求解器设置	算法	Algorithm	Discrete (离散)
	采样步长	T_s	1×10^{-5} s

2. **逆变主回路：**核心模块为 Universal Bridge。设置桥臂数为 3，功率器件选择 “IGBT / Diodes”。

3. **数据观测：**

- 使用 Voltage Measurement 并联在负载 A、B 两端，测量线电压 U_{ab} 。
- 使用 Current Measurement 串联在 A 相负载支路中，测量相电流 I_a 。
- 示波器（Scope）开启双通道分屏显示，便于同时观察电压与电流的时序关系。

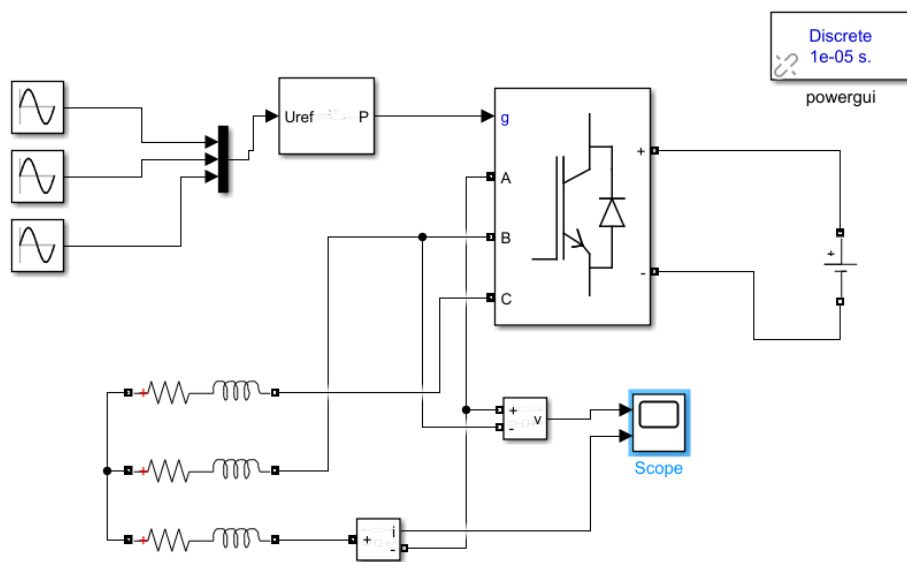


图 3.1 三相 SPWM 逆变器 Simulink 仿真模型全图

4 调试过程与仿真结果分析

4.1 调试过程与问题解决

在仿真模型的搭建与调试过程中，遇到了若干实际问题，通过排查与修正，最终获得了理想波形。这也是理解仿真机制的重要环节。

4.1.1 电气端口与信号端口的混淆

问题描述：初期连接直流电源与逆变桥时，连线提示错误，无法连接。**原因分析：**MATLAB Simulink 中存在两套端口体系。Simulink 基础库中的信号源（三角形端口）代表纯数学信号，而 Simscape 库中的元件（方形端口）代表物理电气连接。**解决方案：**将“DC Voltage Source”更换为专门的 Simscape Electrical 黑色图标模块，确保了正负极与逆变桥的物理电气连接。

4.1.2 负载连接方式与电流测量

问题描述：仿真初期发现电流波形异常，仅为一直线。**原因分析：**电流表连接方式错误，误将电流表并联或未构成回路；且三相负载未正确连接成星形中性点。**解决方案：**将三相 RL 支路的末端短接形成中性点（悬空不接地），并将电流表正确串联在 A 相输出端与负载之间。

4.1.3 示波器观测优化

问题描述：电压幅值（400V）与电流幅值（约 15A）差异过大，在同一坐标轴下电流波形被压缩成一条直线，无法观测细节。**解决方案：**调整 Scope 的 Layout 设置，将其改为两栏垂直分布（2 rows, 1 column）。上栏显示 PWM 电压，下栏独立显示负载电流，从而清晰地观测到了电流的正弦特性。

4.2 仿真结果分析

4.2.1 波形观测

设置仿真时间为 0.1s（即 5 个工频周期），运行仿真得到的结果如图4.1所示。图中上部分为逆变器输出的线电压 U_{ab} ，下部分为 A 相负载电流 I_a 。

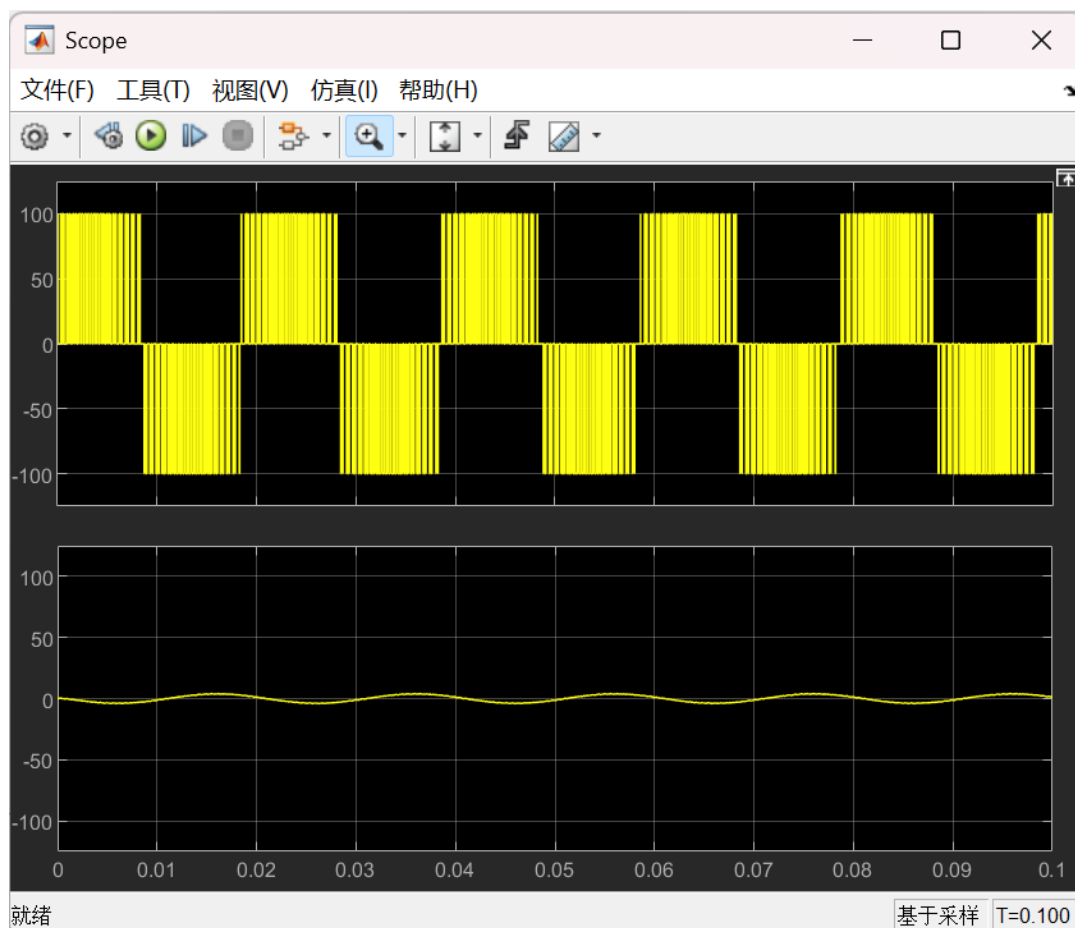


图 4.1 仿真波形结果（上：输出线电压 PWM 波；下：输出相电流正弦波）

4.2.2 结果深度分析

电压 PWM 特性分析

观察图4.1上半部分，输出线电压并不是平滑的正弦波，而是由一系列幅值为 $\pm V_{dc}$ (400V) 的矩形脉冲组成。

- **脉宽变化规律：**在正弦波的正半周期，正向脉冲宽度逐渐变宽，在峰值处最宽；在过零点附近脉冲最窄。
- **等效原理：**根据面积等效原理，这些脉冲序列的基波分量即为所需的 50Hz 正弦电压。

电流滤波与谐波分析

观察图4.1下半部分，尽管电压包含丰富的高频谐波，但负载电流却呈现出非常平滑的正弦波形。**机理解释：**

1. **感性负载的滤波作用：**电机绕组（RL 负载）相当于一个低通滤波器。电感 L 的阻抗 $X_L = 2\pi f L$ 随频率升高而增大。
2. **谐波抑制：**对于 50Hz 基波，阻抗较小，电流易通过；对于 5000Hz 的开关频率及其倍频谐波，电感呈现极大的阻抗，有效“阻挡”了高频电流的流通。
3. **相位滞后：**由于电感的存在，电流波形在相位上滞后于电压基波，符合感性负载的特性。

5 结论

本文基于 MATLAB/Simulink 平台，完整设计并实现了三相电压型 SPWM 逆变器的仿真系统。通过对电路拓扑的理论分析、模型参数的精确计算以及调试过程的问题排查，得出以下结论：

1. **控制策略有效性：**SPWM 控制策略能够有效地将恒定直流电压调制为交流脉冲电压。相比于方波逆变，SPWM 显著改善了输出波形质量，减少了低次谐波。
2. **负载特性验证：**仿真证实了感性负载对 PWM 波具有良好的自然滤波效果，输出电流的正弦度高，能够满足控制电机平稳运行的需求。
3. **工程实践价值：**本仿真模型结构清晰、运行稳定，所记录的调试经验（如端口匹配、观测设置）对于实际硬件电路的搭建具有重要的参考价值。

该设计达到了电力电子变换电路设计与控制策略仿真中关于“三相 PWM 逆变器”的要求，验证了理论分析的正确性。

致谢

时光荏苒，本次《控制电机技术》课程的学习与期末作业已接近尾声。在此，我要向我的任课老师表达最诚挚的感谢。官老师在课堂上深入浅出的讲解，使我对控制电机及电力电子变换技术有了深刻的理解，为本次仿真的顺利完成打下了坚实的理论基础。通过本次作业，我不仅熟练掌握了 MATLAB/Simulink 仿真工具的使用技巧，更锻炼了独立分析电路故障、解决工程问题的能力，这将是我未来学习和工作中的宝贵财富。