

东南大学自动化学院

《电机与电力电子》仿真作业

作业名称：PWM无源逆变仿真

作业次数：第13次

姓 名： 张韞译萱 学 号： 08023214

作业完成时间： 2025 年 11 月 28 日

## 一、 作业目的

针对 Simulink 程序 power\_ACDCAC\_Converter，分析无源逆变的工作原理和参数。主要内容包括：

1. PWM（脉宽调制）基本原理
2. PWM 频率对逆变输出结果的影响
3. 对逆变信号和滤波后信号进行 FFT 频谱分析

通过结合理论教学内容和仿真内容，可以更加实际，深刻的理解 PWM 无源逆变的原理和完整逆变电路系统的外围电路与系统设计方法。

## 二、 完成情况

我了解了 demo 中电路各部分的工作原理，改变 PWM 信号参数进行了两次仿真，并对输出信号作了 FFT 分析，结合理论课上学到的知识对仿真结果中的一些现象进行了分析。

## 三、 具体情况

### 1 仿真模型概述

demo 中的 AC-DC-AC 系统主要由以下几部分组成：

1. 三相交流电源
2. 整流桥（AC-DC）
3. 直流滤波环节（LC 滤波电路）
4. PWM 逆变器（DC-AC）
5. 输出滤波，负载

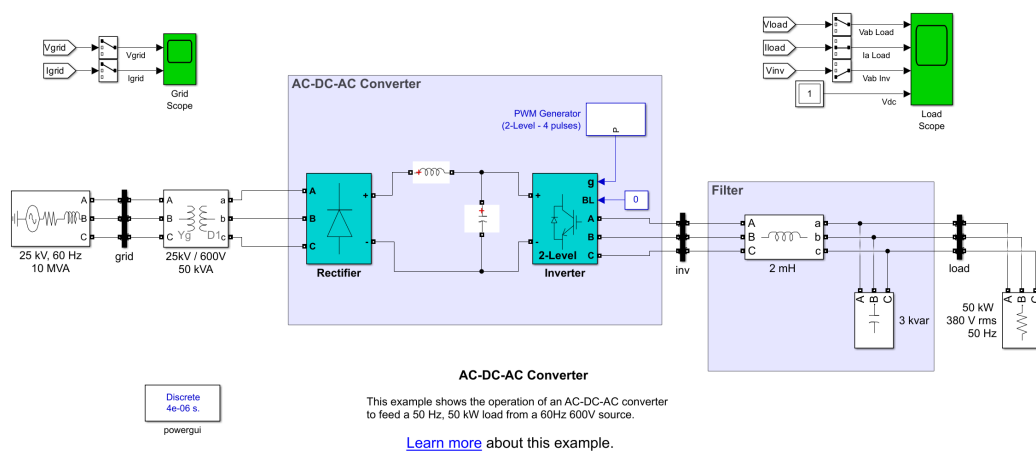


图 1: 仿真模型图片

## 2 PWM 基本原理

脉宽调制（Pulse Width Modulation, PWM）是一种通过改变脉冲宽度来等效获得所需波形的调制技术。在逆变器应用中，PWM 技术的核心思想是：用一系列等幅不等宽的脉冲来等效正弦波，使脉冲的占空比按正弦规律变化，从而使输出电压的基波分量为所需的正弦波。

### 2.1 SPWM 调制原理

有多种方式可以实现脉宽调制（例如在确定调制波频率下，预先计算出将调制波每半周期分成 N 等份后各份的积分数值，再除以 PWM 脉冲幅度得到各份脉宽）。仿真模型采用 SPWM。SPWM 的基本原理是将正弦调制波与高频三角载波进行比较，当调制波大于载波时，输出高电平，当调制波小于载波时，输出低电平。设调制波为：

$$u_r(t) = U_r \sin(\omega_r t)$$

载波为三角波，频率为  $f_c$ 。调制比定义为：

$$m_a = \frac{U_r}{U_c}$$

其中  $U_r$  为调制波幅值， $U_c$  为载波幅值。频率比定义为：

$$m_f = \frac{f_c}{f_r}$$

其中  $f_c$  为载波频率（即 PWM 频率）， $f_r$  为调制波频率（即输出基波频率）。

这样，维持载波频率和幅度不变，只需改变调制波的幅值便可实现脉宽的变化，改变调制波的频率便可实现调频（通过改变逆变电路中的开关频率可实现调制波的变频）。

### 2.2 逆变器输出电压分析

对于单相全桥逆变器，采用双极性 SPWM 调制时，输出电压的傅里叶级数展开为：

$$u_o(t) = m_a U_d \sin(\omega_r t) + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_{nk} \sin[(n\omega_c + k\omega_r)t]$$

其中第一项为基波分量，后续项为以载波频率及其整数倍为中心的边频带分量。

使用逆变器输出的矩形波电压含有各次谐波分量，而采用 SPWM 调制技术之后，输出信号接近标准正弦波（只含有正弦基波分量，高频的载波频率和其倍频分量），滤去高频分量后，输出将只含有基波分量，避免了各次谐波分量产生无功功率，对电路产生不利影响。

## 3 PWM 频率对结果的影响

分别在 2000Hz 和 10000Hz 两种 PWM 频率下进行仿真分析。

### 3.1 PWM 频率为 2000Hz 时的波形

当 PWM 频率设置为 2000Hz 时，频率比  $m_f = 2000/50 = 40$ （调制波频率设置为了默认的 50Hz）。此时的输出波形如图 2 所示。

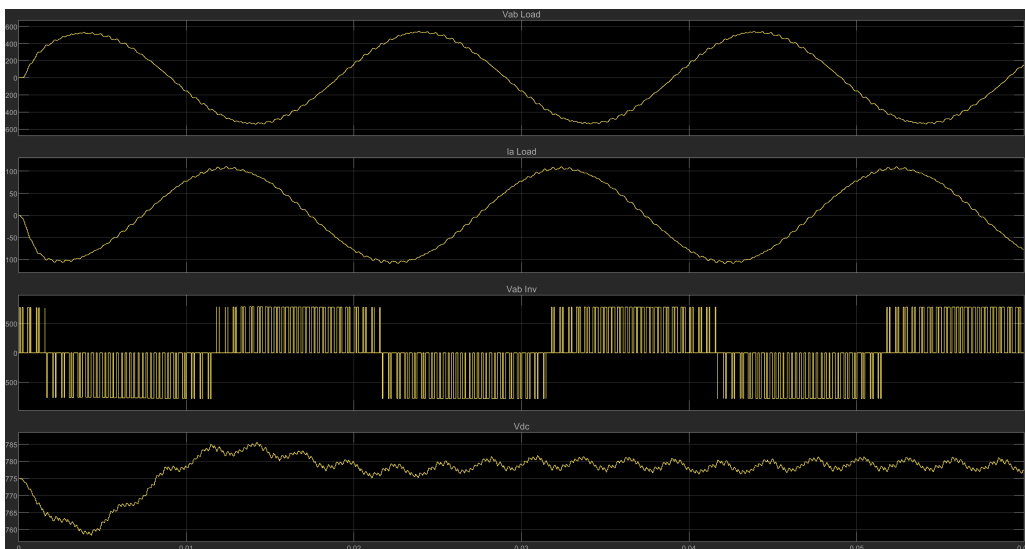


图 2: PWM 频率为 2000Hz 时的逆变输出波形

从波形可以观察到：PWM 脉冲的宽度按正弦规律变化。在正弦波过零点附近，脉冲宽度较窄；在正弦波峰值附近，脉冲宽度较宽

### 3.2 PWM 频率为 10000Hz 时的波形

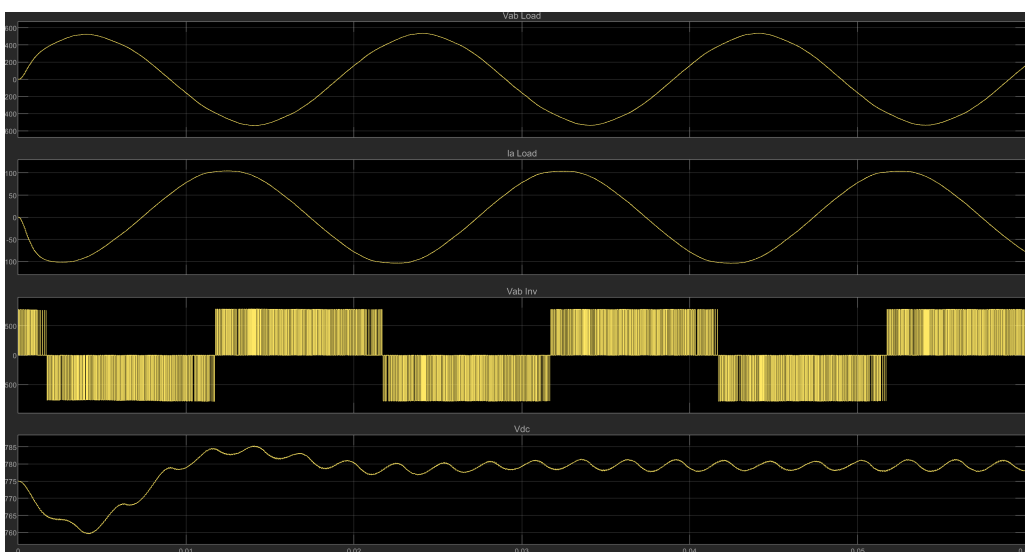


图 3: PWM 频率为 10000Hz 时的逆变输出波形

当 PWM 频率提高到 10000Hz 时，频率比  $m_f = 10000/50 = 200$ 。与 2000Hz 相比：

1. 单位时间内的脉冲数量增加 5 倍
2. 谐波分量向更高频率移动（此结论可以使用 FFT 分析验证）
3. 输出波形更接近正弦波

## 4 FFT 分析

快速傅里叶变换（FFT）用来分析输出信号的频率特性。通过 FFT 分析，可以直接观察信号的频率成分和谐波含量。

### 4.1 逆变输出信号的 FFT 分析

在 PWM 信号频率为 2000Hz 时，对 PWM 逆变器的直接输出信号进行 FFT 分析，结果如图 3 所示。

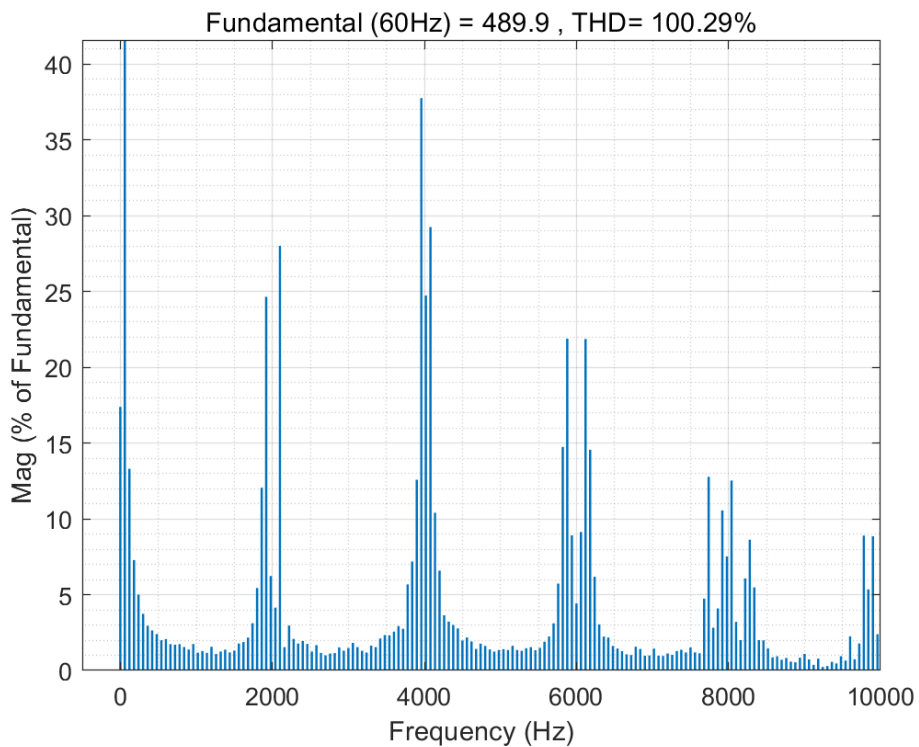


图 4: 逆变输出信号的 FFT 频谱分析（2000Hz）

在 PWM 信号为 10000Hz 时再次进行 FFT 分析，结果如下图：

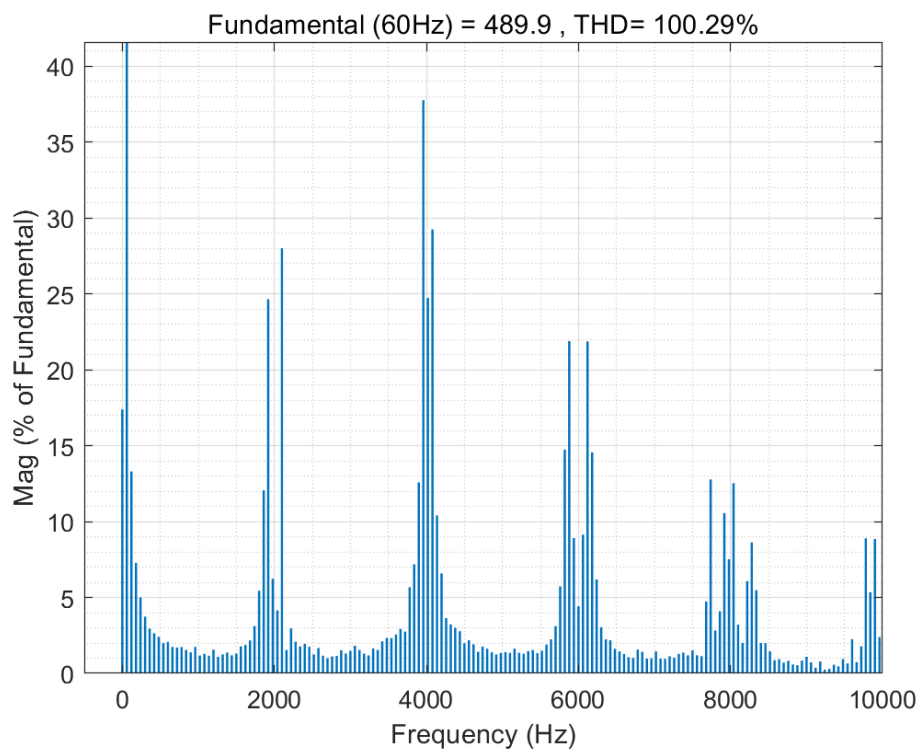


图 5: 逆变输出信号的 FFT 频谱分析 (10000Hz)

从 FFT 分析结果可以观察到:

1. 逆变输出信号中基波分量 (50Hz) 幅值最大
2. 在载波频率及其整数倍附近存在明显的谐波分量
3. PWM 信号频率提高后, 谐波分量向高频区移动 (验证了前文的观点)

#### 4.2 滤波后信号的 FFT 分析

经过 LC 低通滤波器滤波后, 输出信号的 FFT 频谱如图 4 所示。

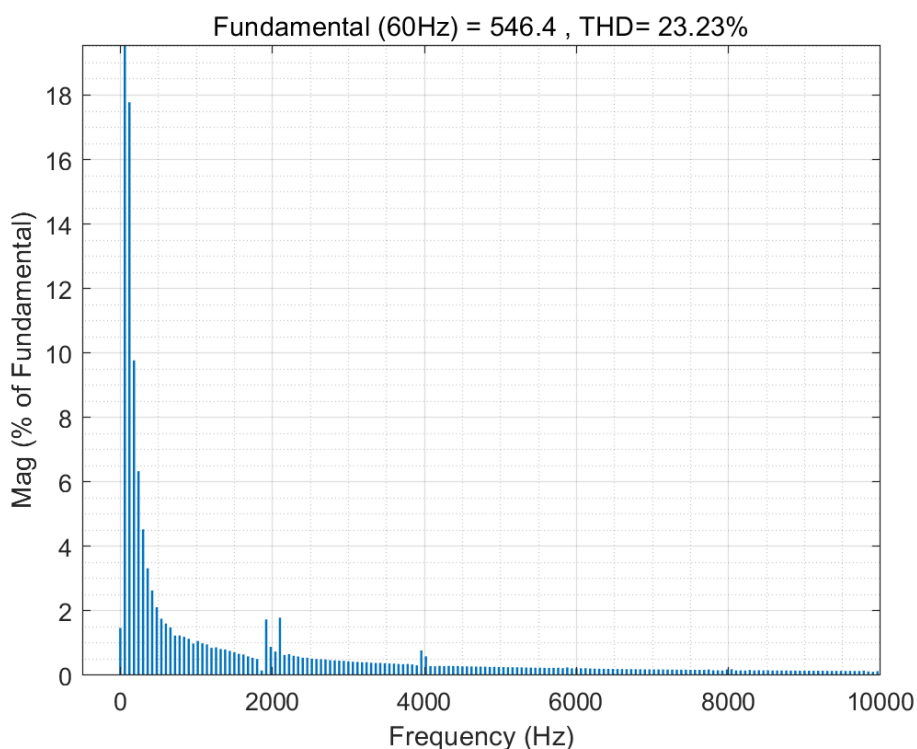


图 6: 滤波后信号的 FFT 频谱分析 (2000Hz)

#### 4.3 总谐波畸变率 (THD) 计算

总谐波畸变率定义为:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \times 100\%$$

其中  $U_1$  为基波有效值,  $U_n$  为第  $n$  次谐波有效值。

滤波器的设计目标是使 THD 满足相关标准要求 (小于 5%)。

可以看出, 滤波后的频谱特征:

1. 基波分量保持不变
2. 高频谐波分量被显著衰减
3. 总谐波畸变率大幅降低
4. 输出波形更接近理想正弦波

## 5 结论与收获

通过本次仿真实验, 我得到了以下的结论与收获:

1. PWM 技术是实现 DC-AC 逆变的核心技术, 通过调节脉冲宽度可以等效输出正弦波。
2. 提高 PWM 频率可以将谐波推向高频段, 有利于滤波器的设计。
3. LC 滤波器可以有效抑制高频谐波, 使输出波形满足要求。

4. 我了解并熟悉了 Simulink 仿真中 FFT Analyse 的分析方法。

## 四、 问题与思考

### 1 PWM 频率能否无限提高？

从仿真结果来看，提高 PWM 频率确实能改善输出波形质量。但在实际电路中，PWM 频率的选择受到多方面限制：

首先是开关器件的限制。IGBT、MOSFET 等器件存在开通和关断时间，频率过高会导致器件来不及完全导通或关断，产生较大的开关损耗甚至损坏器件。查阅资料发现，普通 IGBT 的开关频率一般不超过 20kHz，而 MOSFET 虽然可以更高，但在大功率场合还是会受到限制。

### 2 滤波器参数的确定

仿真模型中 LC 滤波器的参数是预设的，我思考了一下这些参数的设计依据。LC 低通滤波器的截止频率为：

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

截止频率应该设置在基波频率（50Hz）和 PWM 载波频率之间。如果 PWM 频率为 2000Hz，那么截止频率可以设在 200-500Hz 左右，这样既能保留基波，又能有效衰减载波及其谐波。

但这里存在一个矛盾：截止频率设得太低，虽然滤波效果好，但电感电容值会很大，体积和成本都会增加；设得太高，则滤波效果变差。这是工程设计中需要权衡的地方。

### 3 死区时间

实际的 PWM 逆变器需要设置死区时间，防止同一桥臂上下管直通短路。但死区时间会导致输出电压波形畸变，产生低次谐波。仿真模型中并未体现这一点。