



湖南工业大学  
HUNAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## 2018 届 本科毕业设计（论文）资料

题 目 名 称: 基于 SPWM 的超高频  
正弦波电源的设计  
学 院（部）: 交通工程学院  
专 业: 电子科学与技术  
学 生 姓 名: 刘艳博  
班 级: 1401 学号: 14401700507  
指导教师姓名: 李中启 职称: 讲师

湖南工业大学教务处

**2018 届**

**本科毕业设计（论文）资料**

**第一部分 毕业论文**



(2018 届)

本科毕业设计 (论文)

题 目 名 称: 基于 SPWM 的超高频  
正弦波电源的设计

学 院 (部): 交通工程学院

专 业: 电子科学与技术

学 生 姓 名: 刘艳博

班 级: 1401 学号: 14401700507

指导教师姓名: 李中启 职称: 讲师

最终评定成绩:

2018 年 5 月

# 湖南工业大学

## 本科毕业论文（设计）

### 诚信声明

本人郑重声明：所呈交的毕业论文（设计），题目《基于 SPWM 的超高频正弦波电源的设计》是本人在指导教师的指导下，进行研究工作所取得的成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文章以明确方式注明。除此之外，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。本人完全意识到本声明应承担的责任。

作者签名：

日期： 年 月 日

## 摘 要

在电力传输技术的高速发展过程中，无线电能传输技术的热度愈来愈高，在某些地方，它显示出传统电能传输模式所无法匹敌的巨大优势，大大提高了整个电力传输过程的安全性、可靠性和方便性。作为无线电能传输系统前端线圈的供电电源，其本质上是一个高频交流电源，因此基于 SPWM 的超高频正弦波电源有着不可替代的重要作用，而该超高频正弦波电源需要具备在可变直流输入的情况下稳定输出电压的功能。

基于此，本文拟设计一个以单相全桥逆变器电路结构为核心的电源系统。首先采用 SPWM 控制方法产生逆变器的开关信号来控制输出；其次采用 LC 滤波器对输出电压进行滤波，其中系统的滤波器参数是通过准确计算求得；然后采用 PI 控制方法反馈控制输出电压使其稳定不变，其中 PI 值是通过经典的配凑法经过多次调试求得。最后使用 MATLAB 对设计电路进行仿真测试分析。

通过对系统的单相全桥逆变器电路、SPWM 控制方法、LC 滤波器及 PI 控制方法的探究，该系统基本上达到了基于 SPWM 超高频正弦波电源的设计要求，输出电压在改变输入电压时，输出电压值不变，鲁棒性较好。

**关键词：**超高频；逆变器；SPWM；LC 滤波器；PI 调节器

## ABSTRACT

In the high-speed development of power transmission technology, the heat of wireless power transfer technology is getting higher and higher. In some places, it shows great advantages that cannot be matched by traditional power transmission modes, which greatly improves the security, reliability and convenience of the entire power transmission process. As the power supply circuit of the front-end coil of the wireless energy transmission system, it is essentially a high frequency AC power supply, so the UHF sine wave circuit based on the SPWM has an irreplaceable important role, which needs to have a function of stabilizing the output voltage under the condition of a variable DC input.

Based on this, this paper plans to design a circuit system with a single-phase full-bridge inverter circuit structure as the core. First, the SPWM control method is used to generate the switching signal of the inverter to control the output; secondly, an LC filter is used to filter the output voltage, and the filter parameters of the system are obtained through accurate calculation; then, the PI control method is used to feedback control the output voltage to make it stable and unchanged, in which the PI value is obtained through multiple debugging after the classical matching method. Finally, using the MATLAB to simulate the design circuit.

Through the investigation of single-phase full-bridge inverter circuit, SPWM control method, LC filter and PI control method of the system, the system basically meets the design requirements of the SPWM UHF sine wave circuit, that is, when the output voltage changes the input voltage, the output voltage value does not change, and the robustness is better.

**Keywords:** Ultra High Frequency; SPWM; Inverter; LC Filter; PI Regulator

## 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 现状与应用领域及发展趋势	1
1.2.1 研究现状	1
1.2.2 应用领域及发展趋势	2
1.3 本文主要的研究内容	3
第 2 章 系统方案设计	4
2.1 系统整体分析与设计	4
2.1.1 信号控制方法的选择	4
2.1.2 逆变器的选择	7
2.1.3 滤波器的选择	7
2.1.4 控制方法的选择	8
2.2 小结	8
第 3 章 硬件电路模块设计	9
3.1 整体硬件电路框架	9
3.2 硬件电路模块的设计	9
3.2.1 SPWM 信号控制电路设计	9
3.2.1 LC 全桥逆变电路电路设计	10
3.2.2 PI 控制模块电路设计	13
3.3 小结	13
第 4 章 控制原理	14
4.1 SPWM 控制原理	14
4.2 PI 控制原理	14
4.2.1 概述	14
4.2.2 PID 调节的作用	14
4.3 小结	16
第 5 章 仿真	17
5.1 闭环仿真原理图	17
5.2 闭环电路输入电压变化仿真测试	17
5.2.1 输入电压 320V 的仿真测试	17
5.2.2 输入电压 400V 的仿真测试	18
5.2.3 输入电压 480V 的仿真测试	19
5.3 闭环负载变化的仿真测试	20
5.3.1 10 $\Omega$ 负载时的仿真测试	20
5.3.2 30 $\Omega$ 负载时的仿真测试	21
5.3.3 50 $\Omega$ 负载时的仿真测试	21
5.4 开环仿真原理图	22
5.5 开环电路输入电压变化仿真测试	22
5.5.1 输入电压 320V 的仿真测试	22
5.5.2 输入电压 400V 的电压仿真测试	23

5.5.3 输入电压 480V 的电压仿真测试.....	24
5.6 小结.....	25
结 论.....	27
参考文献.....	28
致 谢.....	30



## 第 1 章 绪论

### 1.1 研究背景与意义

无线电能传输系统不需要以电缆为媒介就可以进行电能传输，最近几年已经得到了快速的发展。当今流行的无线电力传输方法有三种：电磁感应方式，微波方式和磁耦合谐振方式<sup>[1-5]</sup>。由于其传输距离远，效率高，功率大等的优点，磁耦合谐振式技术在最近几年的时间里，掀起了研究的狂潮。

目前世面上的磁耦合谐振式无线电能传输装置设计思路是：首先设计一款高频交流电源，可以采用设计桥式逆变电路的方式或者是对高频小信号进行功率放大得到高频交流电源，然后再设计电磁发射系统和电磁接收系统，控制高频交流电源的频率，电磁发射系统谐振频率和电磁接收系统的谐振频率三者相同，同时为保证系统的稳定性，还要设计频率闭环控制系统，时刻检测电磁谐振系统的谐振频率使高频电源的频率与电磁谐振系统的谐振频率，防止失谐。

由于国情的原因，我国的诸多技术相对落后于世界先进水平，无线电能传输技术就是其中一种。当前，也只是用于一些特殊的地方。期冀通过对本次设计的学习与研究，能够进一步升华自身，在未来能为祖国的无线电力传输技术有所帮助。

### 1.2 现状与应用领域及发展趋势

#### 1.2.1 研究现状

在进行电能传输的过程中，一般都是将电缆线作为整个传输的媒介。但是在传输过程中肯定会出现传输能量的损失、线路老化等一系列问题，从而对整个设备供电的安全性和可靠性造成极大的影响，并严重的缩短了设备的使用寿命。而且在矿底与海底等特殊的场合，这种传统电缆供电的方式所产生的缺点往往会带来非常严重的后果，同时很大可能会造成火灾和爆炸等灾难，进而造成巨大人员安全和经济损失等问题。而在人们的日常生活中，大量的电源线存在也会给人们的生活带来巨大的不便<sup>[6]</sup>。实现供电系统与电气设备之间没有导体接触，自然成为电能传输的重要研究方向之一，即无线电能传输技术<sup>[7]</sup>。

磁耦合谐振式无线电能传输技术是众多无线电能传输技术中的一种，在此特有的传输方式，能量转化强度等的优势下，磁耦合谐振式无线电能传输方式在最近几年的发展中，掀起了研究的狂潮。自特斯拉以来，无线电能传输是人类一直以来的梦想<sup>[8]</sup>，无线电能传输方式能够降低在电路设计中对线路的消耗，同时还可以避免线路过多造成线路缠绕等问题，同时又可以减少工程对线路的依赖。无

线电能传输可以应用空间很广，如果进行技术的推广，势必会在医疗、生活、工业、军事上造成革命性的影响，开创无线电力传输新时代。2007 年，麻省理工大学的 MarinSoljacic 教授等人利用电磁耦合谐振原理在 2m 范围内将一个 60W 灯泡点亮，传输效率达 40%，首次实现了传输距离 8 倍于线圈半径的中等距离无线电能传输，就预示着无线电能传输有望为人类带来新技术革命<sup>[9]</sup>。

相对于世界先进水平，我们的无线电能传输技术相对匮乏，其研究工作最早是由中国科学院电工研究所进行的。直到了 2002 年，重庆大学也开始进行无线电能传输理论的研究，并且东南大学也在 2006 年提出了电场耦合的光电机技术。2011 年 10 月在天津召开的国内首次“无线电能传输技术”的专题讨论会上面，相关专家们进行了其研究进展与存在问题的讨论与研究，并且达成了“天津共识”而这次会议对于无线电能传输技术在我国的应用与推广研究都有着非常重要的意义<sup>[10]</sup>。

### 1.2.2 应用领域及发展趋势

#### （1）电动汽车领域

把无线电能的传输技术利用到电动汽车充电方面，由于其传输距离适中，传输效率高<sup>[11]</sup>，不仅能有效的解决各类充电桩的建造的一系列问题，而且还能在不同程度上缓解由于电动汽车速度过快而造成的对国家电网的影响。现阶段各国对电动汽车无线充电技术的研究如日中天，并取得了一系列成果。利用无线电能传输技术在电动汽车中的应用，还可以规模化电能储存，并能够对智能电网给予有效的推动作用。

#### （2）智能家居领域

自从“智能”这一概念的提出，各种智能理念也被提出来了，智能家居便是其中一种，这一概念最近几年被人们所关注，而在智能家居中如果运用无线供电方式便能够极大的脱离传统充电线缆的约束，并能够为人们带来更加快捷与人性化的生活体验。并在整个电能的传输技术中彰显出了自身特有的优势。目前无线鼠标以及笔记本无线充电终端的出现，也都是无线电能传输技术在日常生活中的具体体现。

#### （3）医疗设备领域

无线电能传输技术应用在医疗中，由于传输天线可以做的很小，因此很适合医疗电子的无线充电<sup>[12]</sup>。主要是应用在对嵌入式医疗设备的供电，比如说心脏起搏器以及全人工心脏的电能供应。通常，嵌入式医疗设备的供电功率相对较小，这样就可以直接通过皮肤表层直接可以对身体内部的电源进行充电以及利用无线供电的方式来为医疗设备的正常运行提供足够的电能，从而减少了一些操作难

度。并且将无线电能传输技术运用在身体内嵌入的设备供能中，不仅能够有效的降低皮肤对导线的不适应，从而减少细菌的干扰，而且没有直接的电线连接还能够有效的提升整个设备对于人体的安全等级。

### 1.3 本文主要的研究内容

以 SPWM 硬件控制方法为核心，设计一个 SPWM 的超高频正弦波电源系统。主要研究内容分为五章：

第 1 章介绍了课题背景，及无线电能传输技术发展的前景和应用领域。着重介绍了的应用领域并对祖国无线电能传输技术发展的期待。

第 2 章介绍了系统的设计方案，主要从信号控制方法的选择、逆变器的选择、滤波器的选择和控制电路方法的选择的角度设计。确定以电压闭环控制的单极性 SPWM 的电压源型单相全桥逆变电源电路的设计思想。

第 3 章是在第二章的基础上对系统的各个硬件模块进行了详细的设计，同时进行了一系列分析。

第 4 章分别对两种控制方法的原理详细介绍。

第 5 章对本文所设计的硬件系统利用 MATLAB 搭建工程并利用 Simulink 进行仿真，最后对仿真得到的波形进行验证和分析。

## 第 2 章 系统方案设计

### 2.1 系统整体分析与设计

按照系统设计要求，将系统划分为 SPWM、H 桥、LC 滤波器、PI 控制四个主要部分，系统的整体框架如图 2.1 所示，围绕 SPWM 模块为控制核心，通过控制 H 桥开关的通断，进而将直流电源信号转化为交流正弦信号，通过 LC 滤波器模块将产生的交流信号中的高次谐波滤除，再通过 PI 控制模块将输出的信号进行稳定修正，最终得到自己需要的稳定信号。

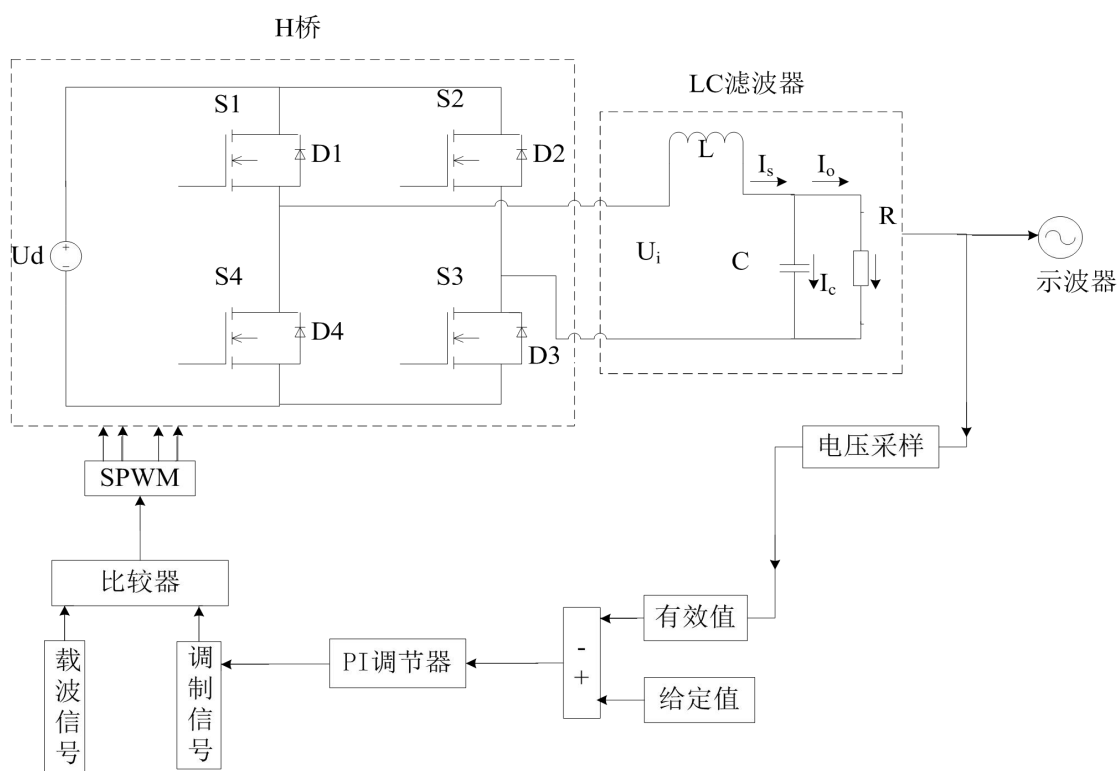


图 2.1 系统的整体框图

#### 2.1.1 信号控制方法的选择

对于逆变器控制方法的选择，主流的选择是 PWM（Pulse-Width Modulation）即脉冲宽度调制法，PWM 控制技术是以采样定理为基础，通过控制半导体开关器件的导通与关断，使得输出端获得一系列幅度相等但宽度不等的矩形脉冲，使用这些脉冲代替正弦波或其他所需的波形。根据一定的规则，对每个脉冲的宽度进行调制，不仅可以改变逆变器电路的输出电压的幅值，还可以改变输出频率的大小。正弦脉宽调制法(SPWM: Sine Pulse-Width Modulation)则是一种比较成熟的、目前使用较广泛的 PWM 法。根据设计需求本次设计选择 SPWM 调制法作

为控制核心。

正弦脉冲宽度调制法是将每一个正弦周期内的多个脉冲作自然或规则的宽度调制,使其依次调制出相当于正弦函数值的相位角和面积等效于正弦波的脉冲序列,形成等幅不等宽的正弦化电流输出,脉冲序列的宽度是由正弦波和三角波自然相交生成的。其中载波频率和调制信号频率之比即为载波比,调制信号幅度与载波幅度的比为调制比。设正弦调制信号波为  $y = m \sin \omega t$ , 式中  $m$  称为调制比,  $0 < m < 1$ ;  $\omega$  为正弦信号波角频率。通过改变调制度来调整输出电压,通过改变正弦调制波周期来调节输出频率,从而实现设计超高频电源目的<sup>[13]</sup>。

实现 SPWM 调制的方法一般有以下几种方案。

### （1）等面积法

SPWM 从根本上说基于等面积法实现的,使用数量相同的等幅度但宽度不同的矩形脉冲序列来代替正弦波,通过计算脉冲宽度和相邻的间距,存储与计算机设备中生成表格,通过查阅表格的方法生成脉冲宽度信号来控制器件的开关,以此,来达到预期的效果。虽然该方式是基于本质原理所提出的,能设计出精准的正弦波,但存在计算难度较大,数据冗杂,不能有效的控制等缺点。

### （2）硬件调制法

前面提到的等面积法由于存在诸多缺点,因此提出了硬件调制法,其基本思想是将期望波形作为调制波,调制的波形作为载波,对载波与调制波进行比较得到所期待的脉宽调制波形。一般情况下的脉冲宽度调制是利用等腰三角波作为载波。

### （3）软件生成法

随着计算机技术的不断发展,SPWM 信号产生的方法越来越多,软件生成法也就出现了。软件生成法其实就是用软件来实现调制的方法,其有两种基本算法:即自然采样法和规则采样法<sup>[14]</sup>。

#### ①自然采样法

利用正弦波和等腰三角波作为波形信号进行比较,在两个波形相交处作为控制开关通段的时间点,这就是所谓自然采样法,其优点是所得 SPWM 波形最接近正弦波,但由于三角波与正弦波交点有任意性,脉冲中心在一个周期内不等距,从而脉宽表达式是一个超越方程,计算繁琐,难以实时控制。

#### ②规则采样法

规则采样法其基本原理就是先利用三角波对正弦波信号进行采样从而得到阶梯波,然后再以阶梯波与三角波进行比较,利用两个波形的交点时刻来控制开关器件的通断<sup>[15]</sup>,从而实现 SPWM 调制法。

本次设计采用硬件调制法来生成 SPWM 控制信号。（详见第三章 3.2）

全桥逆变器的 SPWM 的脉冲控制方式,又有单极性和双极性调制两种,本

文就这两种调制方式进行详细介绍。

### (1) 双极性 SPWM 调制

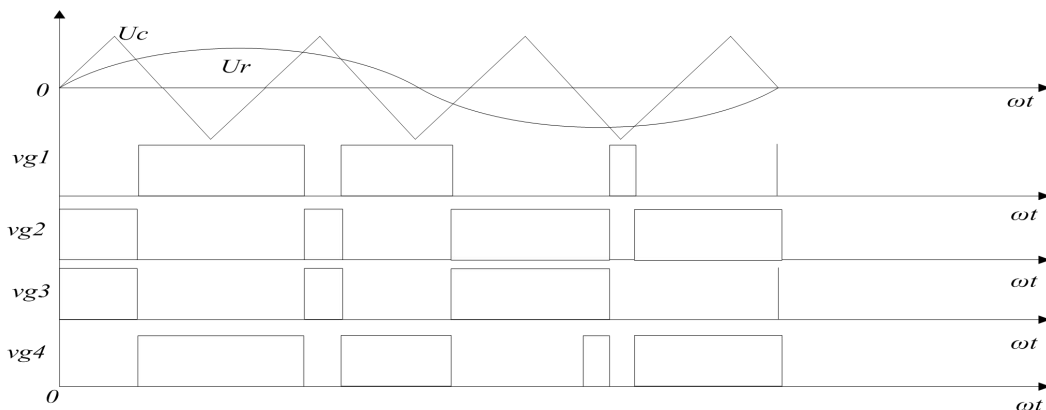


图 2.2 双极性调制

用参考正弦波  $U_r$  与频率为  $f_c$  的三角波  $U_c$  进行比较，得到 4 路控制信号，如图 2.2 所示。信号  $V_{g1}$  和信号  $V_{g2}$  用以驱动同一桥臂的开关，信号  $V_{g3}$  和信号  $V_{g4}$  驱动另一桥臂。当  $U_r \geq U_c$  时的区间内，输出为正脉冲；当  $U_r \leq U_c$  时的区间内，输出为负脉冲。在反复开关变化状态时，输出电压的极性正负交替出现，电流波动频繁，对外部干扰影响较严重。负载端电压脉冲序列是由不同宽度调制的正负直流电压组成。

### (2) 单极性 SPWM 调制

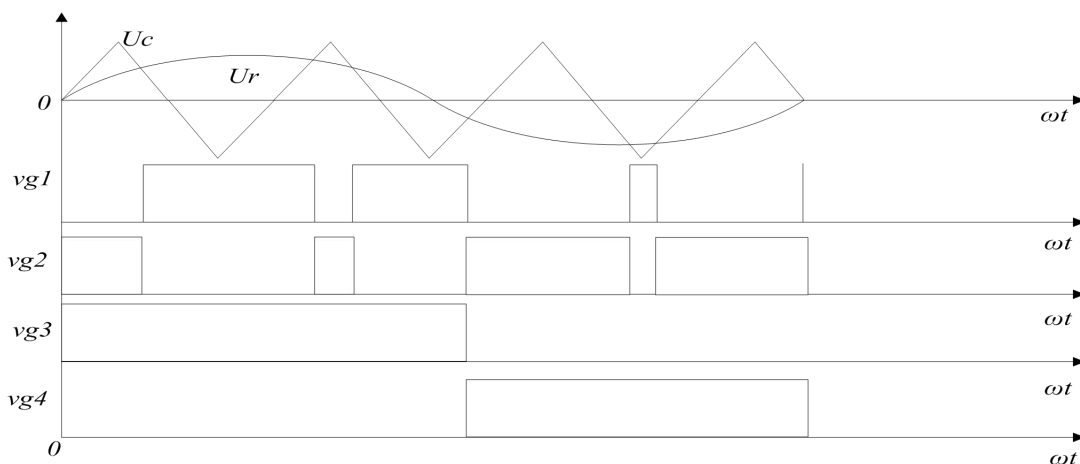


图 2.3 单极性调制

单极性正弦脉冲宽度调制原理波形如图 2.3 所示。这种调制方式又叫单极性同频控制方式。由图可知信号  $V_{g1}$  和信号  $V_{g2}$  的驱动类似双极性调制方式的控制信号，而信号  $V_{g3}$  和信号  $V_{g4}$  的驱动信号通断时间各占半个周期，呈互补关系。利用 SPWM 调制法进行控制，信号  $U_c$  在正弦波信号  $U_r$  的半个周期内，其电压输出幅值为单极性，在开关状态变化时，负载的端电压先降为零，负载电流

在电压为零的状态下自然续流衰减，在控制时间到的时候再恢复输出交直电压，其半个周期的脉冲序列状态由-1、0 和 1 的直流电压组成。单极性 SPWM 控制方式的优点是功率开关管承载的电压能力较小，电流的变化速率小，热损耗也要小。

综合比较两种调制方式，本系统采用以硬件调制法为基础的单极性 SPWM 脉宽调制。

### 2.1.2 逆变器的选择

逆变器是一种将直流信号转化为交流信号的设备<sup>[16]</sup>。逆变器的输入方式一般为直流输入，交流输出，输出的交流信号除了含有大部分基波成分外，还总是存在一些高次谐波。逆变器按不同划分方法大概有以下几种：<sup>[17]</sup>

按输入直流电源划分：电压源型逆变器和电流源型逆变器。

按逆变器电路结构划分：单相半桥逆变器、单相全桥逆变器、推挽式逆变器、三相桥式逆变器。

SPWM 逆变器中的开关通常选用全控型器件，IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）即绝缘场效应晶体管是一种复合器件，具有高输入阻抗，电压控制、驱动功率小，开关速度快，工作频率高等优点。

本文逆变器开关选择了 IGBT，IGBT 在逆变器中的正确选择与使用，有着举足轻重的作用。逆变技术对 IGBT 的参数要求并不是一成不变的，逆变技术已从硬开关技术，移相软开关技术发展到了双零软开关技术，各个技术之间存在相辅相成的纽带关系，同时具有各自的应用电路要求特点，因而，对开关器件的 IGBT 的要求各不相同。而 IGBT 正确选择与使用尤为重要。一般对于 IGBT 的选型我们通常会考虑以下几点：

- （1）额定电压的选择；
- （2）额定电流的选择；
- （3）开关参数的选择；
- （4）影响 IGBT 的可靠性因素。

在实际运用中，开关器件存在损耗：导通损耗和换相损耗和门极损耗。其中门极损耗极小可忽略不计，而导通损耗和换相损耗随着开关频率的增加而增加。

IGBT 作为开关器件两端通常并联反向二极管，目的是续流，防止 IGBT 被击穿。

综合设计要求及实际情况，本次设计采用接有反向二极管的 IGBT 为开关的电压源型单相全桥逆变器简称 H 桥。

### 2.1.3 滤波器的选择

滤波器是用来对一定频率或大于该频率以外的信号进行处理，以便得到一个需要的特定频率的信号，或滤除这个特定频率之后的信号。根据逆变器交流输出

电压含有一定频率和幅度的谐波这一特点来说，逆变器和滤波器密不可分。划分一个逆变器性能的好坏，滤波器的滤波性能是一个重要的指标。一般的逆变器选择 LC 滤波器，本次设计也是如此。由于，逆变器和滤波器密不可分，设计中将其视为一部分即 LC 逆变器滤波电路。

#### 2.1.4 控制方法的选择

常用的逆变器模拟控制方法有电压有效值单闭环反馈控制，电压电流有效值双闭环 SPWM 反馈控制，电压电流有效值双闭环滞环控制等等，控制技术比较成熟，应用广泛。通常设计中采用 PID 控制法，其基本原理都是将给定值与输出值做误差，然后将误差通过 PID 调节器控制，进而在信号偏离要求值时进行作用，直至误差基本为零，系统达到稳定。

根据设计需求本次设计采用以 PI 为基础的电压有效值单闭环控制。

### 2.2 小结

本章主要对该 SPWM 超高频正弦波电源系统的功能需求进行了系统的整体方案设计。该系统主要包括三大部分：SPWM 信号模块，其次是 LC 逆变器即电路核心模块，最后输出信号反馈控制模块即 PI 控制的电压有效值单闭环电路模块。作为系统的重中之重的 LC 逆变器模块是将系统输入直流电压转变为交流正弦波电压的经典器件，其性能和稳定性毋庸置疑，而且其结构简单，制作成本低。SPWM 控制方法简单、灵活、易实现且成本较低。PI 控制易实现，成本较低，并且其对于减小稳态误差有较好的能力。



## 第 3 章 硬件电路模块设计

### 3.1 整体硬件电路框架

结合课题要求以及设计思想优化和查阅相关课题资料，从而确定了硬件系统的各个模块，系统整体硬件电路架构框图如图 3.1 所示，系统硬件电路主要分为信号控制模块，LC 全桥逆变电路模块；PI 控制模块 3 个大部分。SPWM 信号模块作为整个系统的控制中心，通过比较调制波幅值与载波幅值的大小关系来作为逆变器所需要的开关信号；LC 全桥逆变电路模块是一种将直流信号转化为交流信号的关键，由于逆变器转化过后的交流信号中含有大量的谐波分量不能直接使用，这时候就需要 LC 滤波器将其中的谐波滤除；电压有效值单闭环控制模块，主要作用是将输出信号进行稳定，防止失谐。

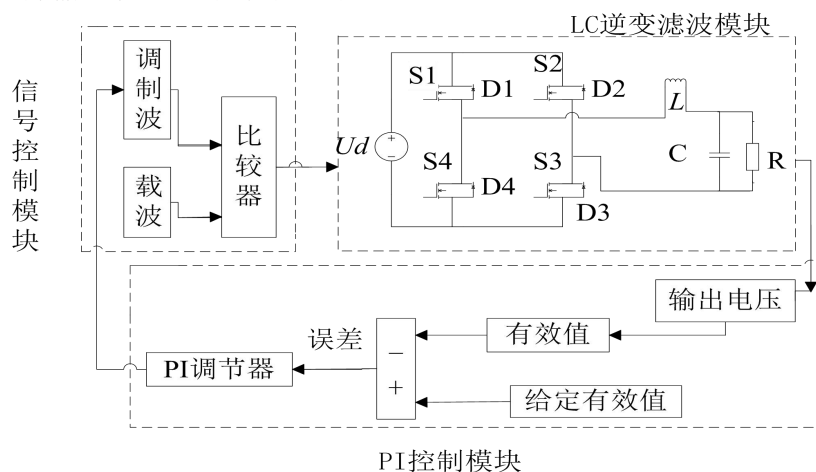


图 3.1 系统硬件架构框图

### 3.2 硬件电路模块的设计

#### 3.2.1 SPWM 信号控制电路设计

本次设计采用的是利用一个特定频率等腰三角波载波发生模块与特定频率的正弦波发生模块，经过比较器进行比较，波形相交的位置作为开关开通与关断的时间点，进而对开关器件进行通断控制，设置时间结束就可以生成 SPWM 波

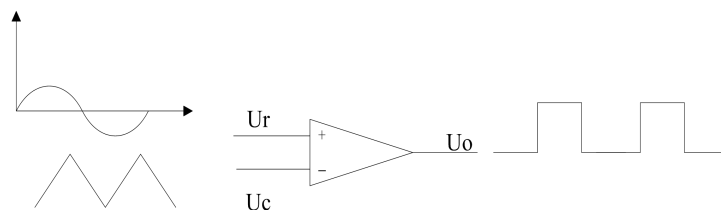


图 3.2 模拟电路产生 SPWM 脉冲电路原理图

这种利用模拟电路调制方法的优点是完成信号的比较和确定脉冲所用的时

间段，几乎是瞬间完成的。而且调制波和载波的交点精确。是两列比较波的自然交点，未作任何处理。这种方法也就是第 2 章所说的硬件调试法。

### 3.2.1 LC 全桥逆变电路电路设计

#### (1) 单相全桥逆变器的工作原理

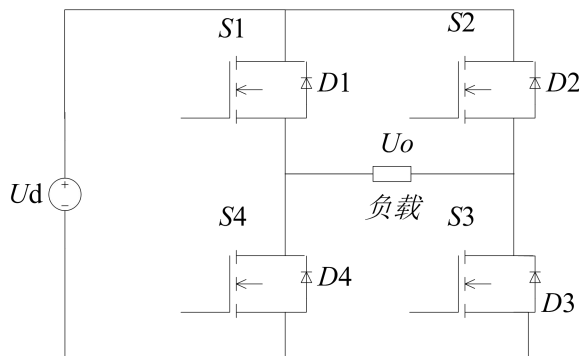


图 3.3 单相全桥拓扑结构

工作原理：如图 3.3 所示单相全桥逆变电路开关  $S_1$ 、 $S_3$  闭合， $S_2$ 、 $S_4$  断开： $U_o = U_d$ ；开关  $S_1$ 、 $S_3$  断开， $S_2$ 、 $S_4$  闭合： $U_o = -U_d$ ；当以频率  $f$  交替切换开关  $S_1$ 、 $S_3$  和  $S_2$ 、 $S_4$  时，则在负载电阻上获得交变电压波形(正负交替的方波)，其周期  $T = 1/f$ ，这样，就将直流电压  $U_d$  变成了交流电压。

#### (2) LC 滤波器的设计

目前的逆变技术主要采用脉宽调制方式，由于 SPWM 调制本身的特性决定着逆变器的输出电压中含有较多的高次谐波分量，因而必须在逆变器的输出侧加低通滤波器来减小谐波含量，以得到平滑的正弦波<sup>[18]</sup>。常见的 SPWM 逆变器通常使用 LC 低通滤波器。设计 LC 滤波器，我们首先要找到滤波器的截止频率，这样才可以消除逆变器输出电压中高于截止频率的正弦波的大多数低次谐波。但是仅依据截止频率不能确定滤波器的参数，除去截止频率的因素，还需综合考虑滤波器的功率容量、体积等要素对逆变器的功率密度、重量、性价比等指标的影响<sup>[19]</sup>。

本次设计从滤波器无功容量的的角度出发，来设计 LC 滤波器。

##### ①LC 滤波器的分析

单相电压型 PWM 逆变器拓扑，如图 3.4 所示。在本设计的分析中，假设：直流电压  $U_d$  为理想电压源；逆变器的开关为理想开关；忽略电感与电容的寄生参数；负载为线性负载。逆变器在高频 SPWM 方式工作下，输出 LC 滤波器的作用是滤除掉高次谐波分量，使得输出电压接近正弦波，同时也要考虑逆变器系统的功率密度等因素。

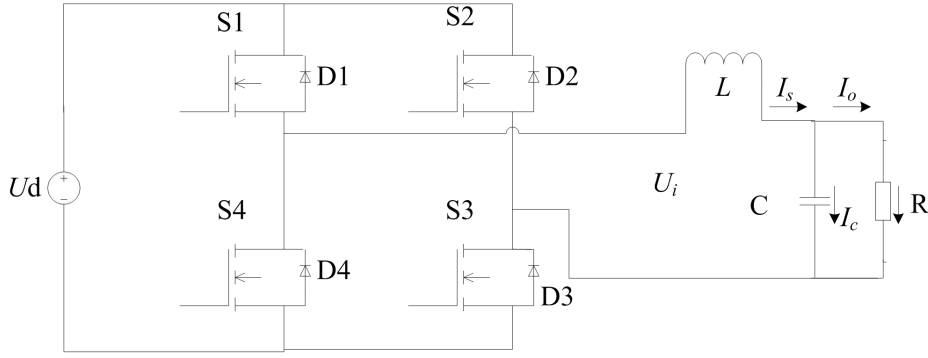


图 3.4 单相电压型 PWM 逆变器拓扑图

因此，滤波器设计目标包括：输出电压的谐波含量小；滤波参数和体积小；滤波器的阻频特性好；滤波系统消耗的功率小<sup>[20]</sup>。根据以上原则，即可对滤波器的特性进行分析。LC 滤波器的传递函数为：

$$\text{LC 滤波器的传递函数为} \quad \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{\frac{1}{\omega_L^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_L} s + 1} \quad (3-1)$$

式中  $\omega_L$  - LC 谐振角频率， $\omega_L = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ ； $\xi$ -阻尼系数， $\xi = \frac{1}{2R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ ；

$U_o(s)$ -滤波器输出电压； $U_i(s)$ -滤波器输入电压； $S$ -拉普拉斯变换算子。

## ② LC 滤波器参数设计

### 1) 滤波器截止频率的确定

要使输出电压近似正弦波并且又不会引起谐振，设计的 LC 滤波器的截止频率  $f_L = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  必须要远低于 SPWN 电压中所包含的最低次谐波的频率，同时又要远大于基波频率。故 LC 截止频率  $f_L$  选为：

$$10 f_1 < f_L < f_{har(\min)}$$

$f_1$ -基波频率； $f_{har(\min)}$ -最低次谐波频率。

面对高频的 SPWM 逆变器来说，我们通常将载波频率设为远大于 10 倍的基波频率，截止频率  $f_s$ ，通常设为载波频率  $f_c$  的 0.1 ~ 0.2 倍。

### 2) 滤波器无功容量

滤波器的截止频率由  $L$ 、 $C$  的乘积决定，在确定截止频率后， $L$  和  $C$  的参数还需要分别确定。本设计从滤波器无功容量的角度来选择  $L$ 、 $C$  参数。滤波器无功容量也间接反映了滤波器尺寸、成本等要素。LC 滤波器结构图，如图 3.5 所示。

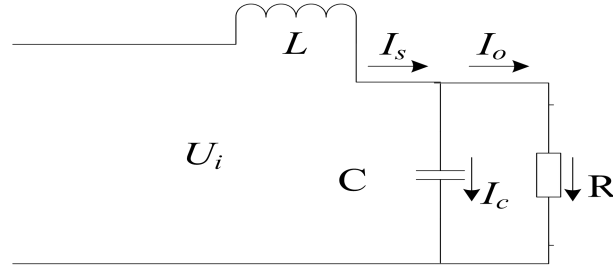


图 3.5 LC 滤波器结构图

SPWM 逆变器的输出滤波器的无功容量  $Q$  表达式如下所示

$$Q = \left[ \omega_1 L \bar{I}_s^2 + \sum_{m=2}^{\infty} \omega_m L \bar{I}_{ms}^2 \right] + \left[ \omega_1 \bar{U}_o^2 + \sum_{m=2}^{\infty} \omega_m C \bar{U}_{mo}^2 \right] \quad (3-2)$$

式中  $\omega_1$  - 基波角频率； $\omega_m$  -  $m$  次谐波角频率； $\bar{I}_s$  - 电感电流的基波有效值； $\bar{I}_{ms}$  -  $m$  次电感电流的谐波有效值； $\bar{U}_o$  - 电容电压的基波有效值； $\bar{U}_{mo}$  -  $m$  次电容电压的谐波有效值。

对于 SPWM 逆变器的输出电压来说，谐波分量相较于基波来说小的多，可以忽略不计，因而式（3-2）可以简化为：

$$Q \approx \omega_1 L \bar{I}_s^2 + \omega_1 C \bar{U}_o^2 \quad (3-3)$$

$$\text{LC 滤波器的截止角频率：} \quad \omega_L = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3-4)$$

一般来说电容器为定型产品，其容量和体积有严格的标准遵循，而电感器主要由缠绕线圈匝数和磁芯材料的变化，电感值可以随意确定。此外，滤波器体积和重量主要由电感决定。因而，主要应考虑电感取值对 LC 无功特性的影响。

$$\text{由式（3-4）可得：} \quad C = \frac{1}{\omega_L^2 L} \quad (3-5)$$

$$\text{把式（3-5）代入式（3-3），可得：} \quad Q = \omega_1 L \bar{I}_s^2 + \frac{\omega_1 \bar{U}_o^2}{\omega_L^2 L} \quad (3-6)$$

$$\text{对于阻性负载，有：} \quad \bar{I}_s = \sqrt{\bar{I}_o^2 + (\omega_1 C \bar{U}_o)^2} \quad (3-7)$$

$$\text{则} \quad Q = \omega_1 L \left[ \bar{I}_o^2 + (\omega_1 C \bar{U}_o)^2 \right] + \frac{\omega_1 \bar{U}_o^2}{\omega_L^2 L} \quad (3-8)$$

把式（3-5）代入式（3-8），得：

$$Q = \omega_1 \bar{I}_o^2 L + \left[ \frac{\omega_1 \bar{U}_o^2}{\omega_L^2} + \frac{\omega_1^3 \bar{U}_o^2}{\omega_L^4} \right] \frac{1}{L} \quad (3-9)$$

式（3-9）中， $\bar{U}_o, \bar{I}_o$  为给定值，故  $Q$  是关于  $L$  设为函数，要使  $Q$  值最小，则  $\frac{\partial Q}{\partial L} = 0$ ，

$$\frac{\partial Q}{\partial L} = \omega_1 \bar{I}_o^2 - \left[ \frac{\omega_1 \bar{U}_o^2}{\omega L^2} + \frac{\omega_1^3 \bar{U}_o^2}{\omega L^4} \right] \frac{1}{L^2} \quad (3-10)$$

$$\text{故 } L = \sqrt{\frac{\left[ \frac{\omega_1 \bar{U}_o^2}{\omega L^2} + \frac{\omega_1^3 \bar{U}_o^2}{\omega L^4} \right]}{\omega_1 \bar{I}_o^2}} \quad (3-11)$$

$L$  值确定后, 根据式 (3-5), 得到  $C$  值。

根据技术指标得: 电路输出交流电压  $U_o=320V$ ; 输出额定功率  $3600W$ ; 输出基波频率  $f_l=5KHz$ ; 为了使输出正弦电压电流波形较好, 载波频率设为  $1MHz$ 。通过考虑滤波器输出电压总谐波系数、系统响应、尺寸和质量等关键因素。选取截止频率  $f_L=25KHz$ , 结合式 (3-11), 选取  $L=15mH$ ;  $C=0.4\mu F$ 。

### 3.2.2 PI 控制模块电路设计

为了电源系统的稳定, 采样负载端电压有效值构成的单闭环反馈对系统实时控制<sup>[21]</sup>, 其控制系统的方框图如图 3.5

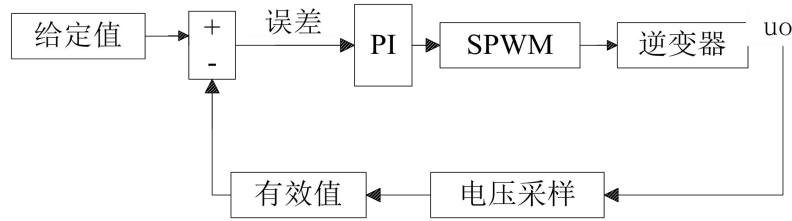


图 3.5 电压单闭环控制原理图

在逆变控制中, 采用输出电压有效值反馈的方法进行控制, 这种方法通过将实际所要求的电压的有效值与输出电压有效值进行比较, 将经过 PI 调试的输出值作为调制比。这种方法的输出波形稳压精度较高, 稳定性好。

### 3.3 小结

本章从硬件电路模块设计出发, 主要包括三大部分: SPWM 信号产生模块, 采用硬件调制法产生 SPWM 信号; LC 全桥滤波电路, 首先介绍了单相全桥逆变器的工作原理, 其次就 LC 滤波器从无功容量角度出发进行设计; PI 控制模块, 对其工作过程进行了介绍, 提出了电压有效值单闭环控制的反馈方式。

## 第 4 章 控制原理

### 4.1 SPWM 控制原理

SPWM 法是一种比较成熟的，目前使用较广泛的 PWM 法。是采样理论中的一个非常重要结论：冲量相等而形状不同的窄脉冲对惯性环节的输出响应波形基本相同即冲量等效原理。SPWM 法就是以该结论为理论基础，如图 4.1 用一系列等幅度不等宽度的脉冲来代替一个正弦半波正弦半波被分成  $N$  等份，可以看成  $N$  个彼此相连的脉冲序列宽度相等，但幅值不等，用矩形脉冲代替，等幅度，不等宽度，中点重合，面积相等，宽度按正弦规律变化。使用具有脉宽正弦变化的波形，来控制逆变电路中的开关器件的开关，使输出脉冲电压面积与所需的输出正弦波在相对应区间内面积等效，调节逆变器电路的输出电压的频率和幅度可以通过改变调制波的频率和幅度来是实现。

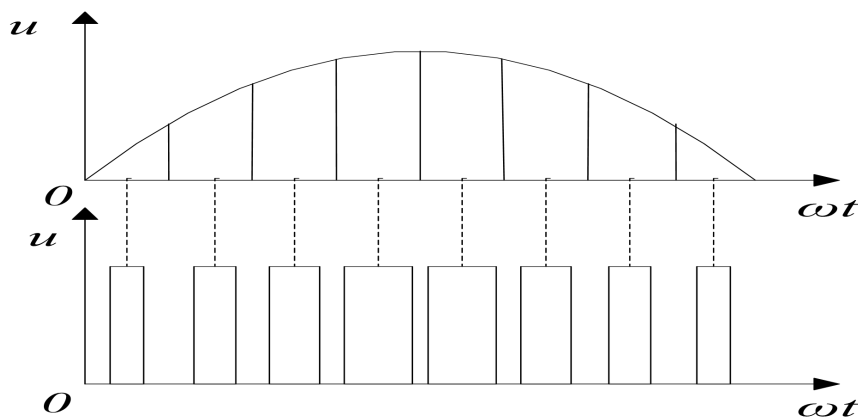


图 4.1 SPWM 信号产生原理图

### 4.2 PI 控制原理

#### 4.2.1 概述

通过对误差的进行比例、积分和微分控制(简称 PID 控制)是连续系统控制理论中技术最成熟<sup>[22]</sup>，应用最为普遍的一种控制技术。它结构简单，参数调整便捷，是前人在工程实践中摸索总结出的一门伟大理论。在工业过程控制中，由于难以建立精确的数学模型，系统的参数经常发生变化，所以人们往往采用 PID 控制技术，根据经验进行在线调整，从而得到满意的控制效果。

#### 4.2.2 PID 调节的作用

PID 调节器是逆变器中不能缺少的部分，PID 调节器的性能优劣将直接影响逆变器输出电压的质量和带负载性能。PID 中的 P、I、D 分别代表比例、积分和微，故 PID 调节可分为比例调节、比例积分调节和比例积分微分调节等。根据设计需求只对比比例调节和比例积分调节进行说明，下面分别说明它们的作用。

##### (1) 比例调节

比例调节的控制规律为

$$u(t) = K_p e(t) \quad (4-1)$$

式（4-1）中， $u(t)$  是调节器输出值； $K_p$  是比例系数； $e(t)$  是调节器的输入值，通常是误差，即  $e(t) = R - y(t)$ ， $y(t)$  是被控变量， $R$  是  $y(t)$  的设定值。

比例调节是一种最为基础的调节规律，调节其的输出  $u(t)$  与输入误差  $e(t)$  成正比，只要出现误差  $e(t)$ ，就能产生比例调节作用。比例调节的特性曲线如图 4.2 所示。

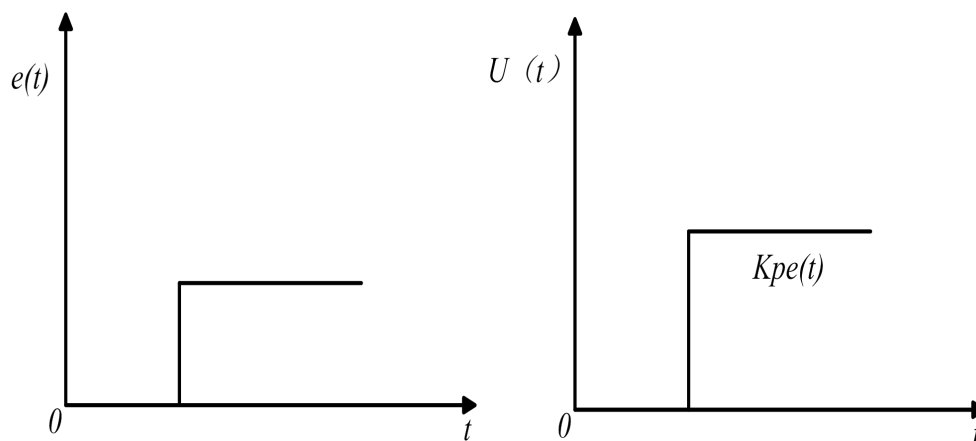


图 4.2 比例调节器的阶跃响应

比例调节作用的大小，不但与误差  $e(t)$  有关外，还与比例系数  $K_p$  有重大关系， $K_p$  的值愈高，调节的作用愈大，动态效果也越好。反之， $K_p$  值越小，调节作用就越。通常情况下， $K_p$  值如果太大，则会引起自激振荡。

比例调节主要的缺点是存在静态误差，遇到很不稳定的系统，并且惯性也特别大的系统，如果采用单纯的比例调节，则很难兼顾动态和静态特性。因此，需要采用比较复杂的调节规律。

## （2）比例积分调节

比例调节的缺点是存在静态误差，影响调节精度。因此一般比例调节和积分调节同时作用系统，构成比例积分(PI)调节，能够有效的消除静态误差。PI 调节的控制规律为

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right] \quad (4-2)$$

从式（4-2）可知 PI 调节由两部分组成，即比例调节和积分调节。

比例调节为  $u(t) = K_p e(t)$

积分调节为  $u(t) = \frac{K_p}{T_i} \int e(t) dt$

调节器的输出为  $u(t) = u_p(t) + u_i(t)$

其输出特性如图 4.3 所示

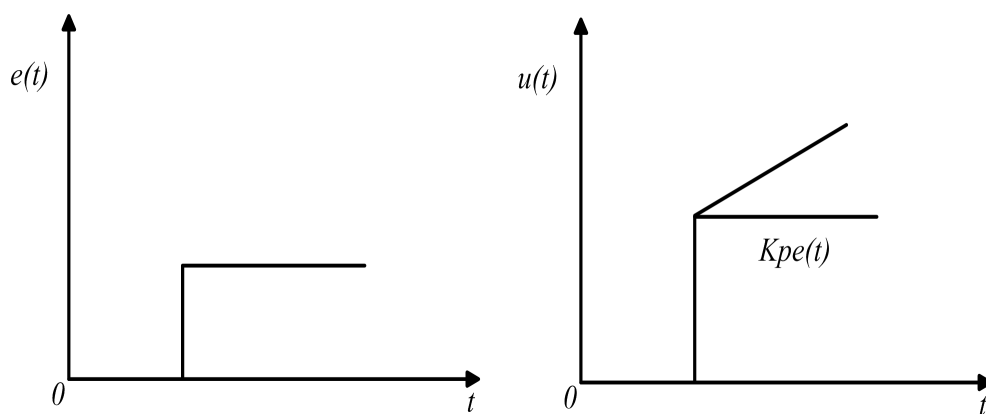


图 4.3 PI 调节器的输出特性曲线

由图 4.3 可以看出，在误差  $e(t)$  作变化时，比例调节立刻产生作用输出  $u_p(t)$ ，但积分调节的作用起初几乎为零，但随着时间推移积分的作用逐步显现出来。分析可得，PI 调节不但能有效解决单纯的比例调节存在静差的缺点，同时又避免了积分调节响应过程慢的缺点，即静态和动态特性均得到了改善，所以，应用比较广泛。

### (3) PI 作用总结

总的来说，PI 控制各校正环节作用为：

**比例环节：**成比例的反映控制系统接收的误差信号。一旦产生误差，控制器立即产生控制作用，以减少误差。通常，随着比例系数的加大，闭环系统的超调量加大，系统响应速度加快。但是，当比例系数增加到一定程度，系统会变得不稳定，产生系统震荡。

**积分环节：**主要用于消除余差，提高系统的无差度。积分常数是制约积分作用的关键因素之一，通常积分常数数值愈大，积分作用愈小，系统的作用越慢。反之亦然。

PI 控制设计中 P 和 I 的设置采取试凑法获得。遵循口诀：参数整定找最佳，从小到大顺序查。先是比例后积分，最后再把微分加。曲线振荡很频繁，比例度盘要放大。曲线漂浮绕大湾，比例度盘往小扳。曲线偏离回复慢，积分时间往下降。曲线波动周期长，积分时间再加长。曲线振荡频率快，先把微分降下来。动差大来波动慢。微分时间应加长。理想曲线两个波，前高后低 4 比 1。一看二调多分析，调节质量不会低。

## 4.3 小结

本章首先利用采样理论的冲量等效原理对 SPWM 的原理进行了详细介绍。其次是对 PI 控制原理进行了详细介绍，主要从 PI 概念、作用方面介绍，同时也给出了一种经典的 PI 设置的方法。



## 第5章 仿真

### 5.1 闭环仿真原理图

本系统的闭环仿真原理图如图 5.1 所示，系统仿真所用的工具是基于 MATLAB 中的 Simulink。

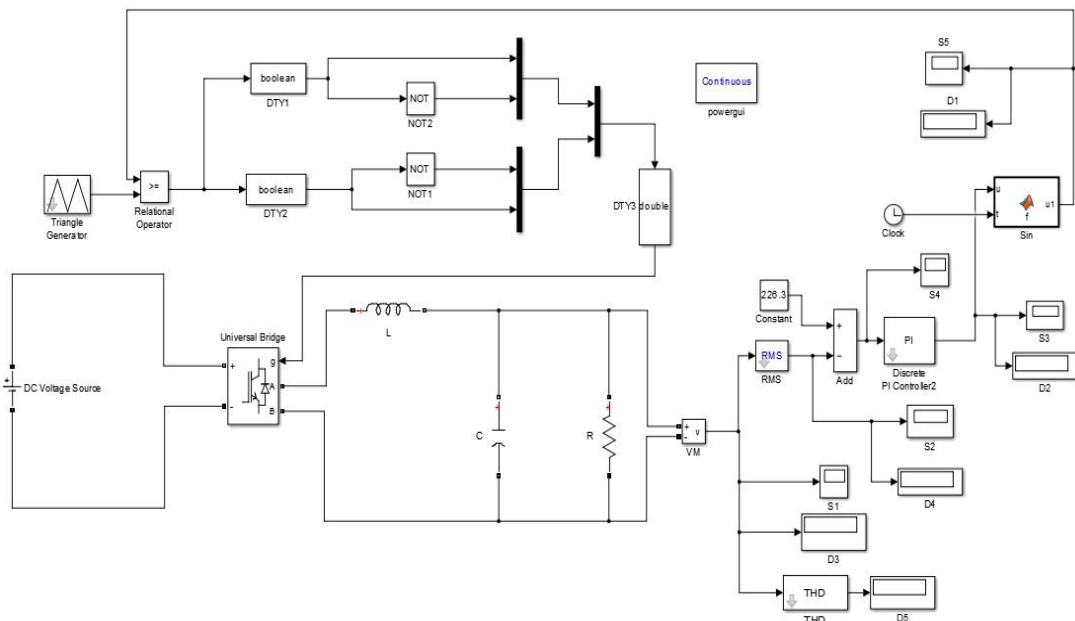


图 5.1 系统闭环仿真原理图

## 5.2 闭环电路输入电压变化仿真测试

为了对输出电压的变化进一步了解,此次设计针对闭环电路对逆变器做了两种不同的设计方法:逆变器加滤波器和不加滤波器。同时,对不同电压下的 SPWM 驱动进行了探究。此次仿真中,输入电源电压作为唯一变量,输入电压范围设计要求  $400\pm 20\%V$ , 故我们利用采样法分别取三组值 320V、400V 和 480V, 保持其他参数不变。

### 5.2.1 输入电压 320V 的仿真测试

### (1) SPWM 驱动波形仿真测试

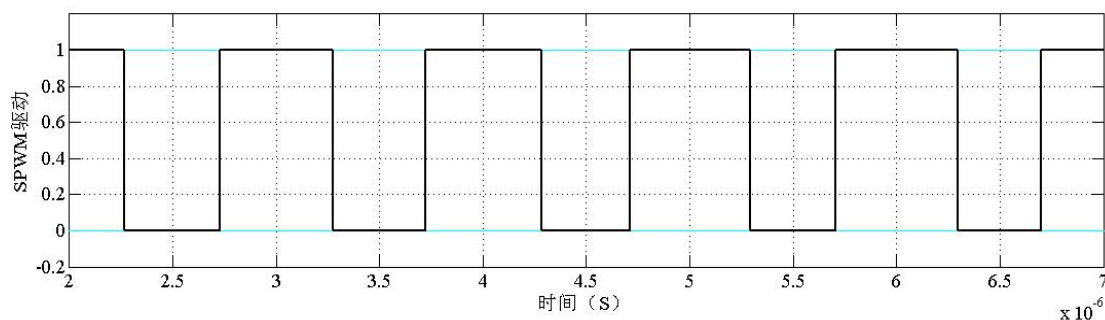


图 5.2 输出电压 320V 的 SPWM 驱动仿真结果图

## (2) 不加 LC 滤波器的仿真测试

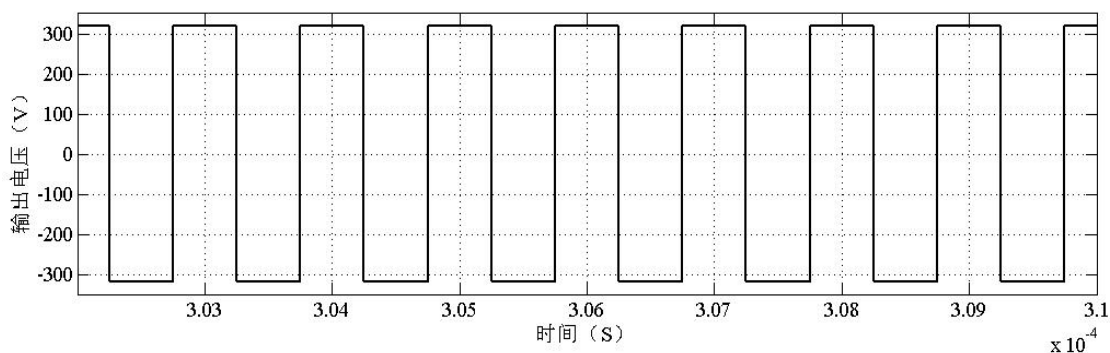


图 5.3 输出电压 320V 的无滤波器仿真结果图

此次仿真中，输入电源电压作为唯一变量，仿真时将输入电压设为 320V，仿真结果图如图 5.3 所示。从仿真结果图上可以看到输出电压在不经 LC 滤波器后是一系列规则变化的脉冲序列，脉冲幅值为 320V，与输入电压一致。

## (3) 加 LC 滤波器的仿真测试

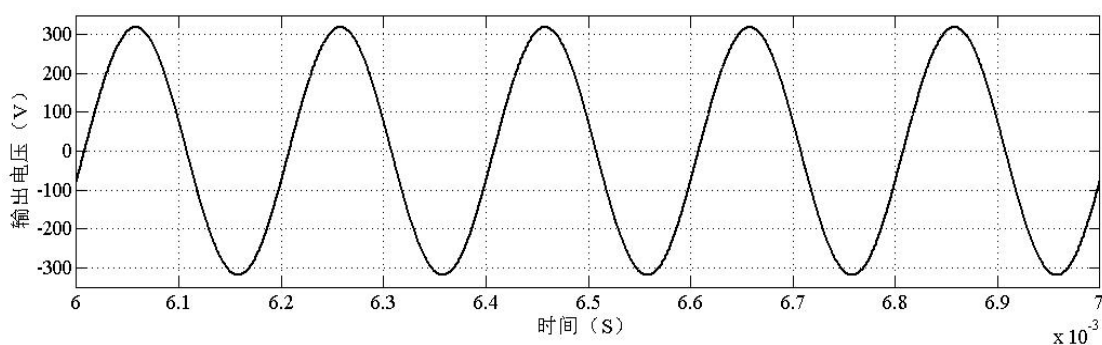


图 5.4 输出电压 320V 有滤波器的仿真结果图

此次仿真中，输入电源电压作为唯一变量，仿真时将输入电压设为 320V，仿真结果图如图 5.4 所示。在经过 LC 滤波器后输出电压变为了正弦波，且从仿真结果图上可以看到输出电压保持在 320V。

## 5.2.2 输入电压 400V 的仿真测试

### (1) SPWM 驱动波形仿真测试

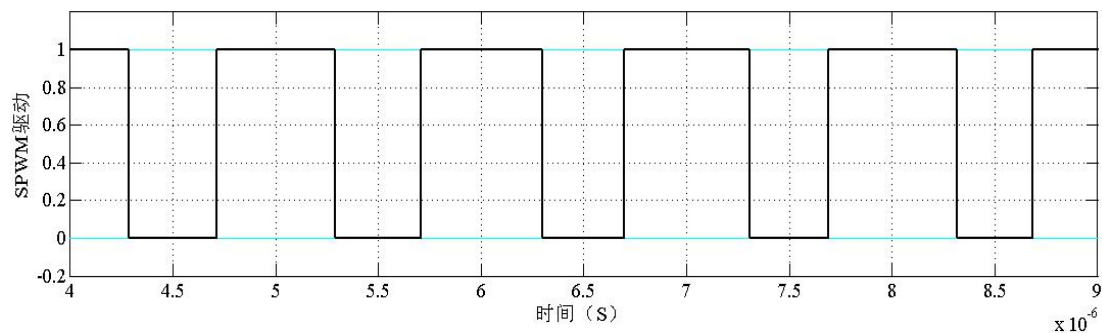


图 5.5 输出电压 400V 的 SPWM 驱动仿真结果图

## (2) 不加 LC 滤波器的仿真测试

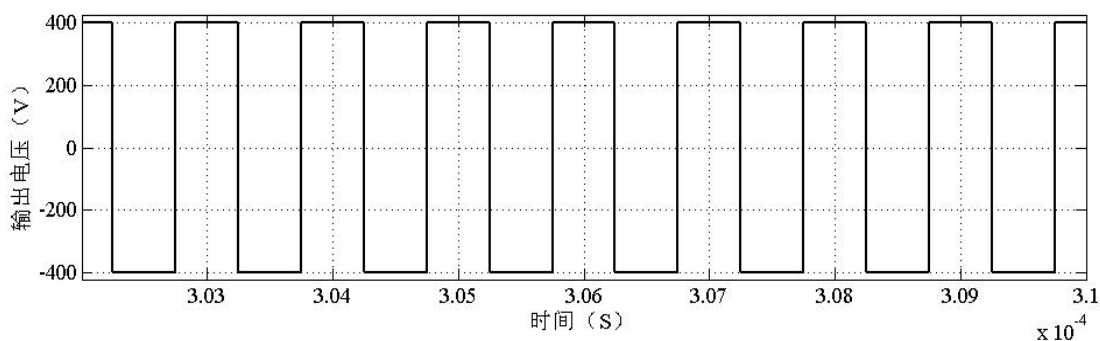


图 5.6 输出电压 400V 无滤波器的仿真结果图

此次仿真中，输入电源电压作为唯一变量，仿真时将输入电压设为 400V，仿真结果图如图 5.6 所示。从仿真结果图上可以看到输出电压在不经 LC 滤波器后也是一系列规则变化的脉冲序列，脉冲幅值为 400V，与输入电压一致。

## (3) 加 LC 滤波器的仿真测试

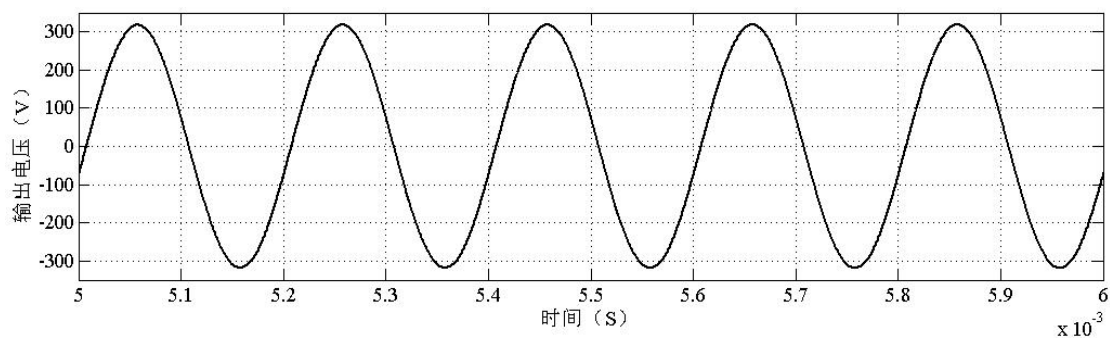


图 5.7 输出电压 400V 有滤波器的仿真结果图

此次仿真中，输入电源电压作为唯一变量，仿真时将输入电压设为 400V，仿真结果图如图 5.7 所示。在经过 LC 滤波器后输出电压变为了正弦波，且从仿真结果图上可以看到输出电压保持在 320V。

## 5.2.3 输入电压 480V 的仿真测试

### (1) SPWM 驱动波形仿真测试

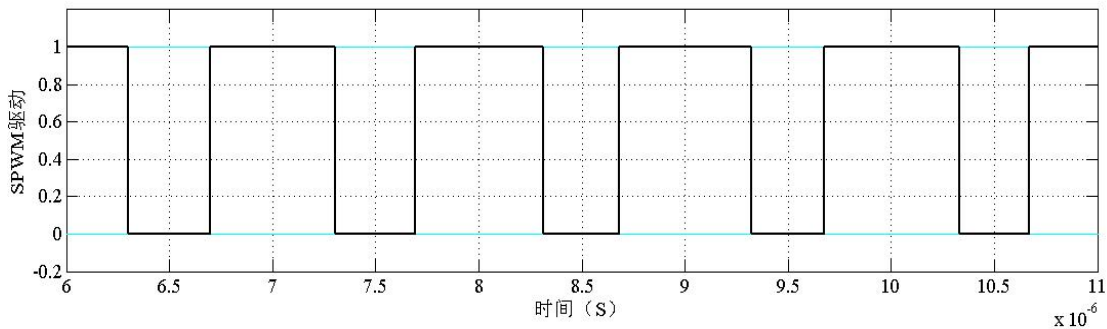


图 5.8 输出电压 480V 的 SPWM 驱动仿真结果图

## (2) 不加 LC 滤波器的仿真测试

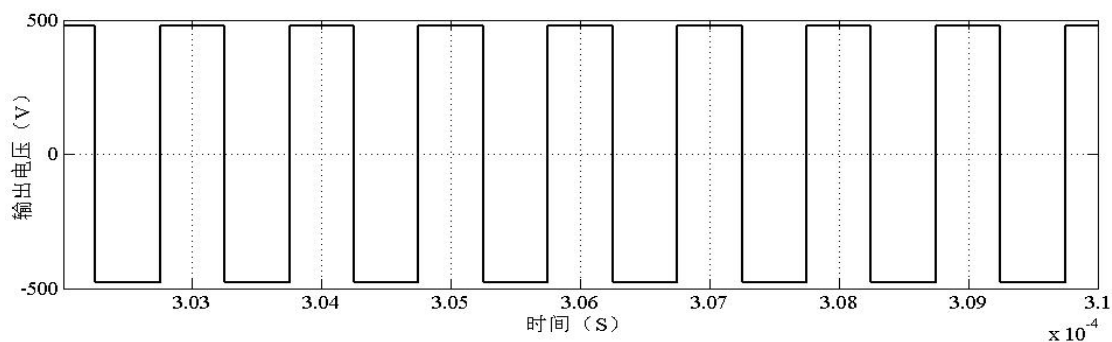


图 5.9 输出电压 480V 无滤波器的仿真结果图

此次仿真中，输入电源电压作为唯一变量，仿真时将输入电压设为 480V，仿真结果图如图 5.9 所示。从仿真结果图上可以看到输出电压在不经 LC 滤波器后也是一系列规则变化的脉冲序列，脉冲幅值为 480V，与输入电压一致。

## (3) 加 LC 滤波器的仿真测试

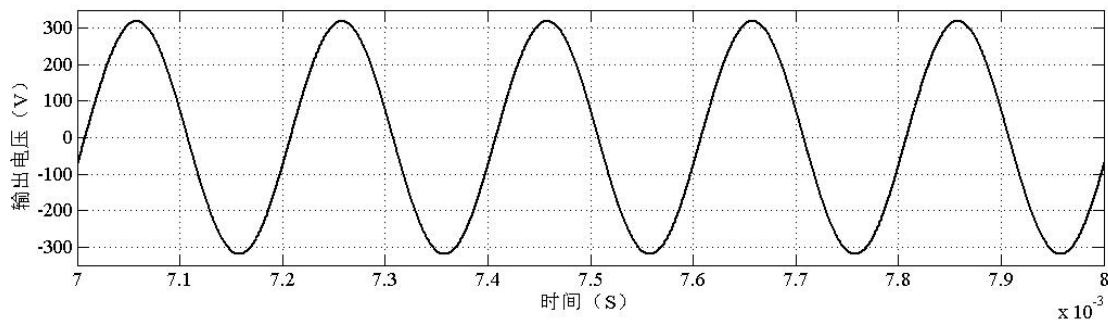


图 5.10 输出电压 480V 有滤波器的仿真结果图

此次仿真中，输入电源电压作为唯一变量，仿真时将输入电压设为 400V，仿真结果图如图 5.10 所示。在经过 LC 滤波器后输出电压变为了正弦波，且从仿真结果图上可以看到输出电压依旧保持在 320V。

综合以上几种不同的电压变量的两种不同的逆变器状态，可以发现在加 LC 滤波器后逆变器输出电压由脉冲序列变为了正弦波，但两种不同状态下输出电压的大小不一致，在加了滤波器后输出电压在经过 PI 控制后依然能够稳定在 320V，但是在没加滤波器的情况下，输出电压与输入电压一致。SPWM 驱动信号波形一致。

## 5.3 闭环负载变化的仿真测试

由于我们设计的目的是输出稳定的 320V 交流电，在改变其他外界条件下都能稳定不变，因此我们试着取三种不同的负载值 10Ω、30Ω 和 50Ω，将负载变化作为唯一变量，输入电压设为 400V，观察输出电压是否能够稳定在 320V。

### 5.3.1 10Ω 负载时的仿真测试

此次仿真中，将负载作为唯一变量，仿真时将负载设为  $10\Omega$ ，仿真结果图如图 5.11 所示。从仿真结果图上可以看到输出电压保持在 320V，结果符合设计要求。

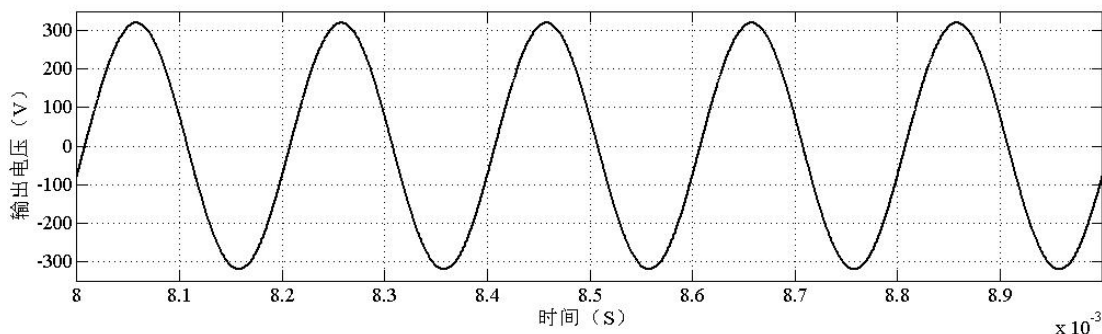


图 5.11  $10\Omega$ 负载的仿真结果图

### 5.3.2 $30\Omega$ 负载时的仿真测试

此次仿真中，将负载作为唯一变量，仿真时将负载设为  $30\Omega$ ，仿真结果图如图 5.12 所示。从仿真结果图上可以看到输出电压保持在 320V，结果符合设计要求。

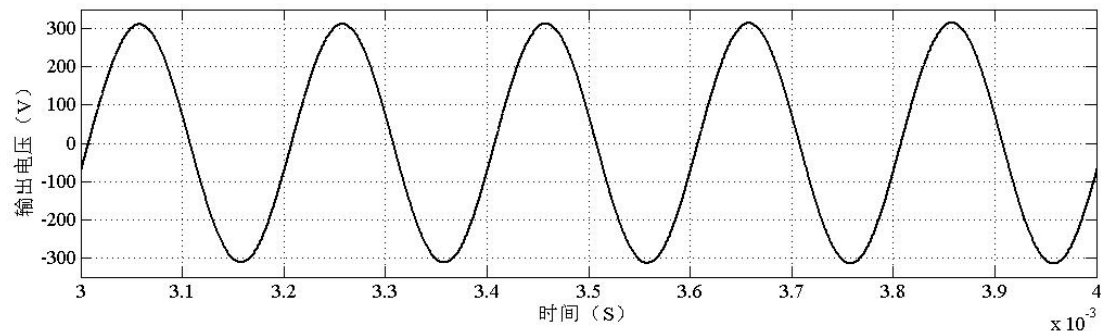


图 5.12  $30\Omega$ 负载的仿真结果图

### 5.3.3 $50\Omega$ 负载时的仿真测试

此次仿真中，将负载作为唯一变量，仿真时将负载设为  $50\Omega$ ，仿真结果图如图 5.13 所示。从仿真结果图上可以看到输出电压保持在 320V，结果符合设计要求。

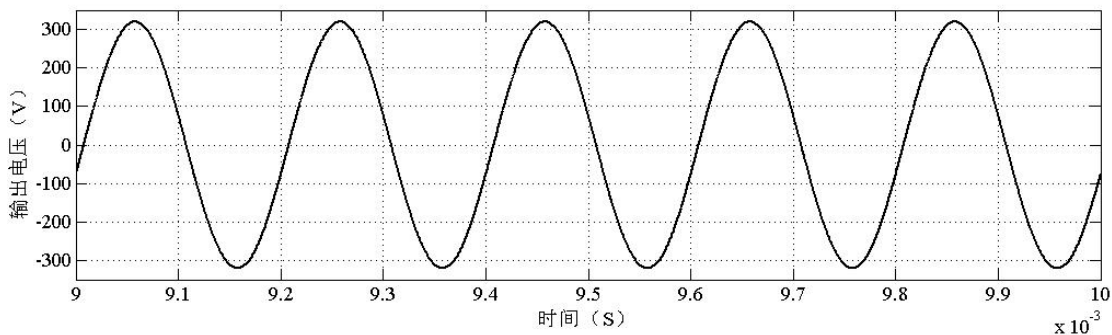


图 5.13  $50\Omega$ 负载的仿真结果图

## 5.4 开环仿真原理图

本系统的闭环仿真原理图如图 5.14 所示，系统仿真所用的工具是基于 MATLAB 中的 Simulink。

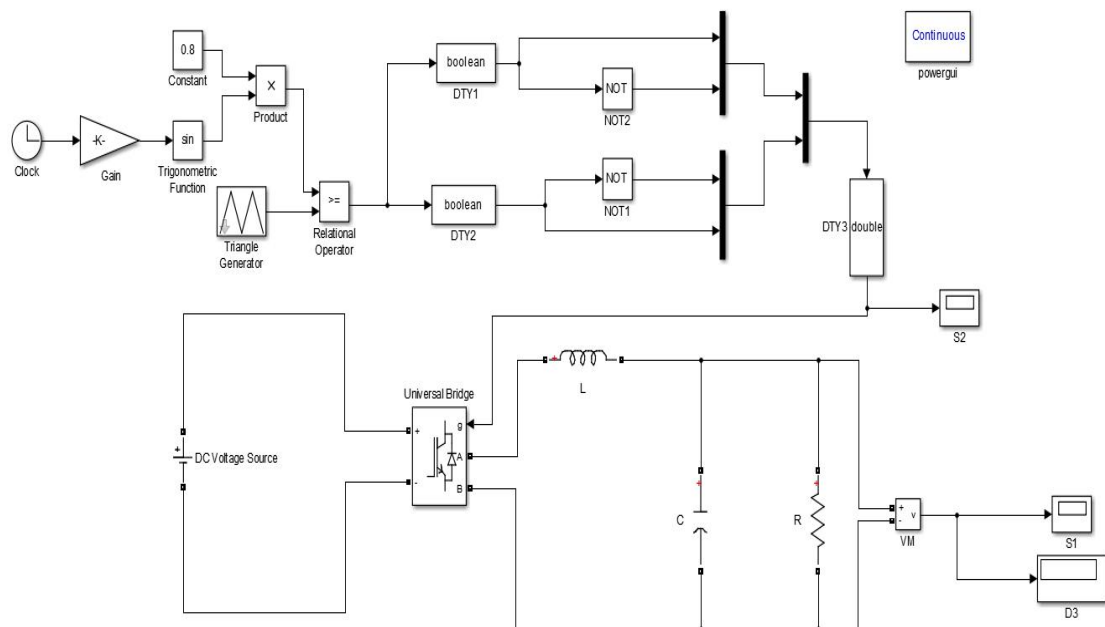


图 5.14 系统开环仿真原理图

## 5.5 开环电路输入电压变化仿真测试

为了对输出电压的变化进一步了解，此次设计同时也针对开环电路对逆变器做了两种不同的设计方法：逆变器加滤波器和不加滤波器。同时，也对不同电压下的 SPWM 驱动进行了探究。此次仿真中，输入电源电压作为唯一变量，输入电压范围设计要求  $400 \pm 20\%V$ ，故我们采用与闭环设计一样的电压取值方法，保持其它参数不变。设计中调制比为定值 0.8。

### 5.5.1 输入电压 320V 的仿真测试

#### (1) SPWM 驱动波形仿真测试

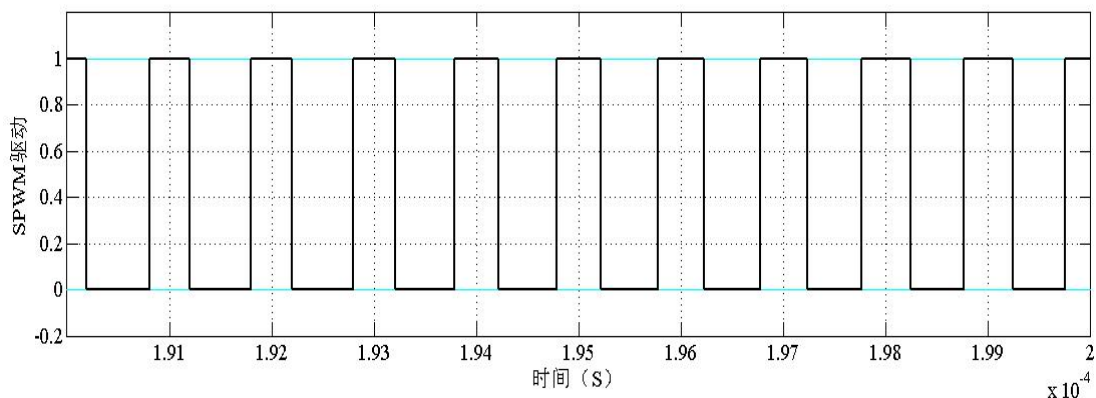


图 5.15 输出电压 320V 的 SPWM 驱动仿真结果图

## (2) 不加 LC 滤波器的仿真测试

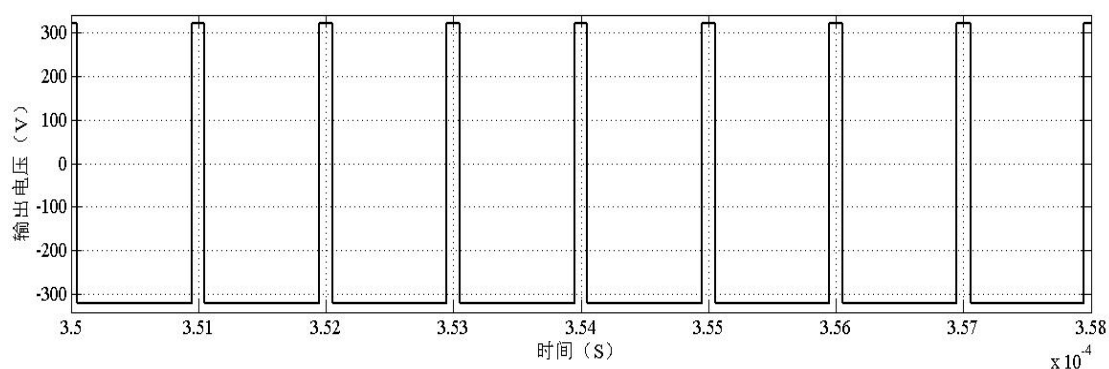


图 5.16 输出电压 320V 无滤波器的仿真结果图

从仿真结果可以看出输入电压为 320V 时，不加滤波器时，输出电压与输入电压大小一致。

## (3) 加 LC 滤波器的仿真测试

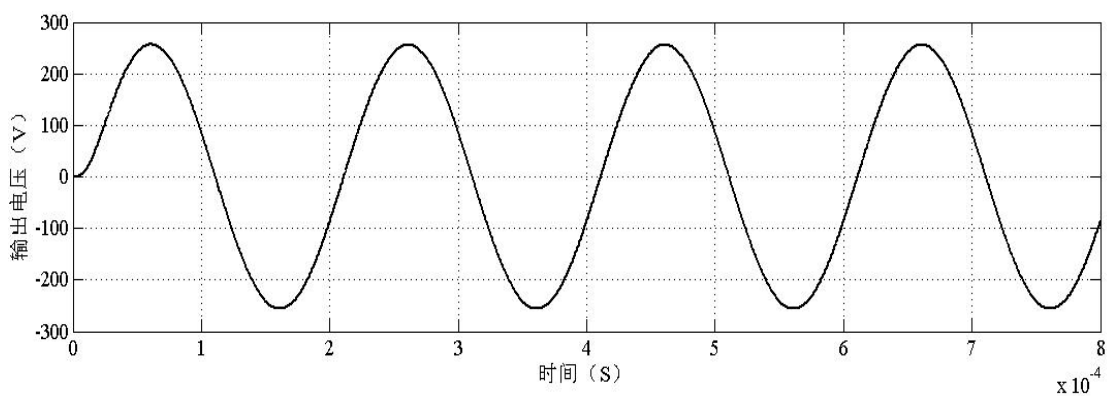


图 5.17 输出电压 320V 有滤波器的仿真结果图

从仿真结果可以看出输入电压为 320V 时，加滤波器时，输出电压是输入电压大小的 0.8 倍即 256V,与要求的开环状态下的额定电压大小一致。

## 5.5.2 输入电压 400V 的电压仿真测试

### (1) SPWM 驱动波形仿真测试

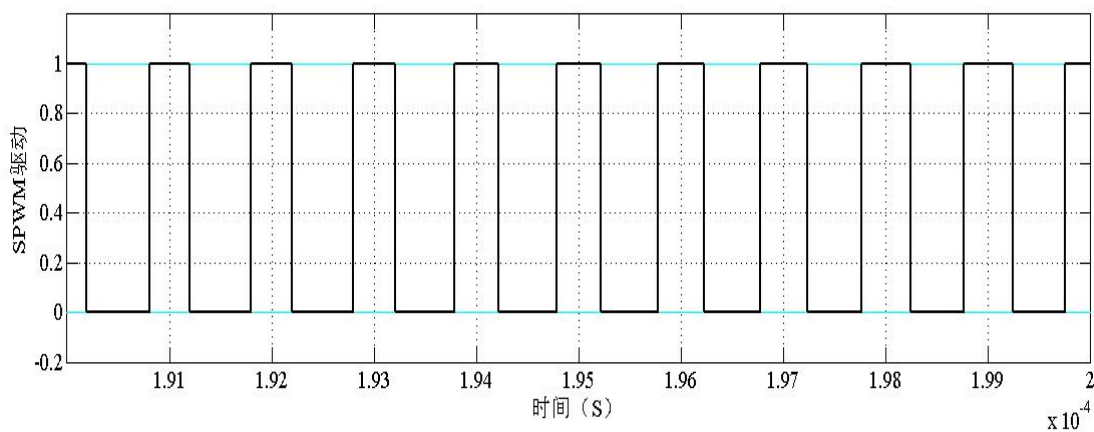


图 5.18 输出电压 400V 的 SPWM 驱动仿真结果图



## (2) 不加 LC 滤波器的仿真测试

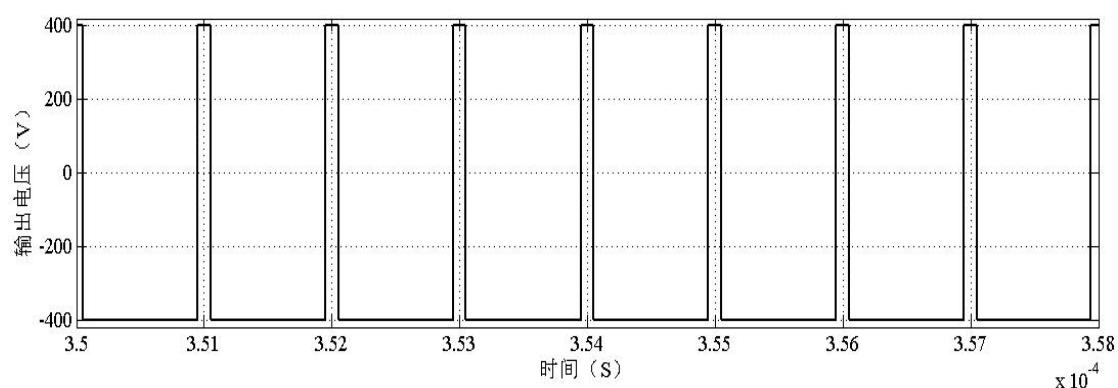


图 5.19 输出电压 400V 无滤波器的仿真结果图

从仿真结果可以看出输入电压为 400V 时，不加滤波器时，输出电压与输入电压大小一致。

## (3) 加 LC 滤波器的仿真测试

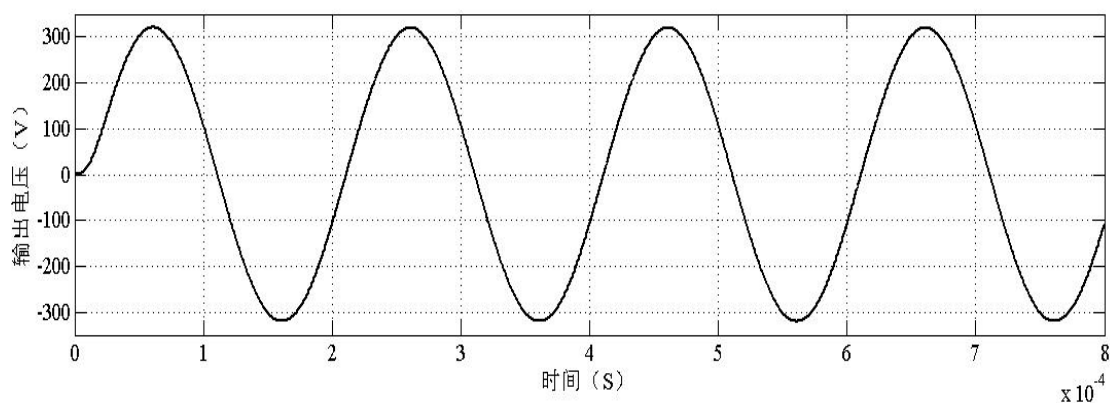


图 5.20 输出电压 400V 有滤波器的仿真结果图

从仿真结果可以看出输入电压为 400V 时，加滤波器时，输出电压是输入电压大小的 0.8 倍即 320V,与要求的开环状态下的额定电压大小一致。

## 5.5.3 输入电压 480V 的电压仿真测试

### (1) SPWM 驱动波形仿真测试

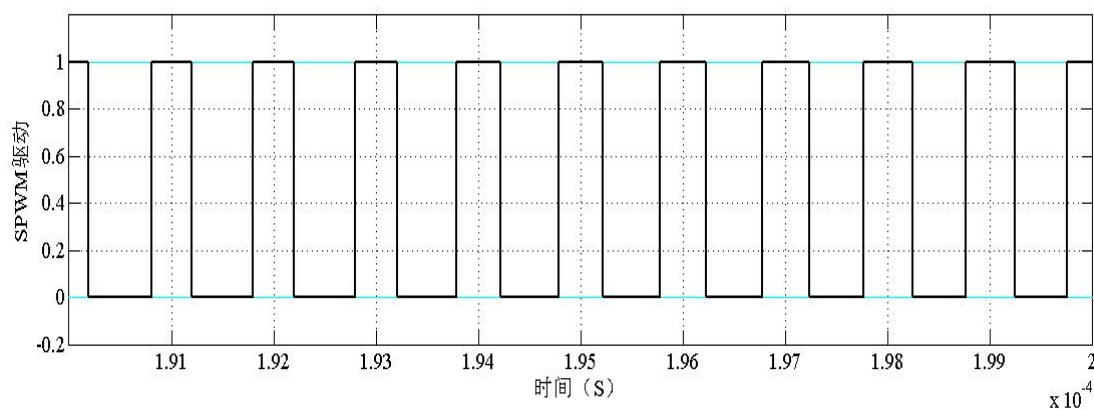


图 5.21 输出电压 480V 的 SPWM 驱动仿真结果图



## (2) 不加 LC 滤波器的仿真测试

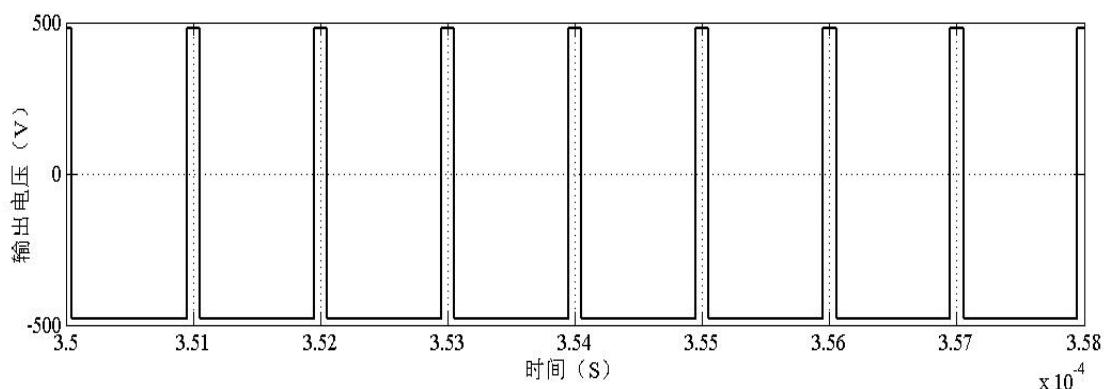


图 5.22 输出电压 480V 无滤波器的仿真结果图

从仿真结果可以看出输入电压为 480V 时，不加滤波器时，输出电压与输入电压大小一致。

## (3) 加 LC 滤波器的仿真测试

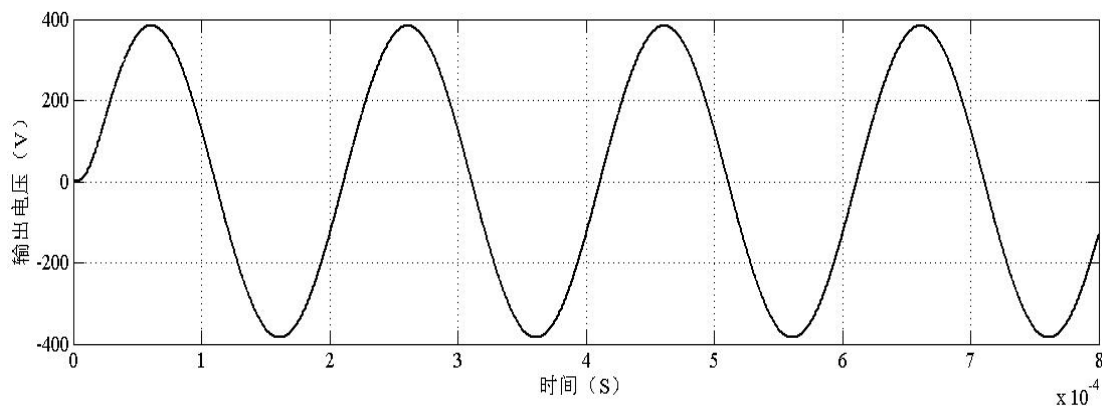


图 5.23 输出电压 480V 有滤波器的仿真结果图

从仿真结果可以看出输入电压为 480V 时，加滤波器时，输出电压是输入电压大小的 0.8 倍即 384V,与要求的开环状态下的额定电压大小一致。

综合以上几种不同的电压变量的两种不同的逆变器状态，可以发现在加 LC 滤波器后逆变器输出电压由脉冲序列变为了正弦波，但两种不同状态下输出电压的大小不一致，在加了滤波器后输出电压的大小总是随输入电压线性变化，即为输出电压为输入电压大小的 0.8 倍，满足 SPWM 调制规律；没有加滤波器的电路输出电压总与输入电压大小一致。

## 5.4 小结

本章首先展示了系统的仿真原理图，其次对仿真原理图进行了仿真测试，提出了两种不同的电路控制方案。第一种方案即设计要求闭环方案，这种方案又分为两种：一种是只改变电源输入电压，电路设计有滤波器,其他条件保持不变，观察输出电压的变化情况；另一种方案是在闭环的基础上改成开环设计，通过仿

真结果观察电压的变化。然后又在闭环的基础上做了变电阻的仿真测试，观察电压的变化情况。通过测试可以看出在逆变器加 LC 滤波器后经过闭环控制后，电压总能稳定在 320V，测试结果满足设计要求。逆变器在开环情况下，设计滤波器后，输出电压总与输入电压满足调制比关系。最后，无论是开环控制还是闭环控制，输出电压总与输入电压大小一致。

## 结 论

本文针对基于超高频正弦波电源的设计进行了相关论证,最终确定了以单极性 SPWM 为控制核心的超高频正弦波电源电路的设计,通过对 LC 滤波器电路的设计,再到之后 PI 控制电路的设计,最终完成了系统整体设计,整个设计包括以下几个方面:

(1) 本文的逆变器的控制策略是选择单极性 SPWM 控制方法,基本原理是用一个特定的正弦波发生模块与一个特定的等腰三角波模块通过硬件设计的方法将二者通过比较器比较,以此来产生需要的 SPWM 正弦波信号。

(2) LC 滤波逆变器全桥电路模块是运用 Simulink 库中的 Universal Bridge 模块通过设置,将模块改为带有反向并联二极管的 IGBT 的单相全桥电路模块,LC 滤波器的设计是从滤波器无功容量的的角度出发进行设计。通过电路相关关系,通过分析计算,最终计算出  $L$ 、 $C$  的值。

(3) PI 控制模块采用电压有效值单闭环控制,通过输出电压有效值与额定输出电压有效值进行比较,产生的误差经过 PI 控制与逆变器 SPWM 信号进行相关作用,来作为调制信号。

(4) 整合各个模块,完成整个系统设计,通过 MATLAB 进行仿真,最终通过进行一系列分析调试,使结果满足设计要求。

(5) 本设计的优势:设计原理简单易懂,单极性 SPWM 控制法产生的信号效果好,通过 PI 控制产生的正弦电压波形鲁棒性好。

(6) 虽然本文论证设计的最终方案达到了设计要求,但是还存在一些缺点和需要改进的地方,如下:

(1) 由于逆变器负载为纯负载,非纯负载时,效果会降低。同时 PI 控制模块遇到非纯负载时,单闭环控制的效果也会降低。

(2) 由于自身能力和设计条件的问题,对于控制方法的掌握,未能采用简单的数字控制方法进行系统优化。

最后,通过系统各个模块的联调和论文的整理,使得整个设计不断改进和完善;同时也希望有更多专业人士投入到电力电子高频电源设计这个领域中,以研究出更好的设计方案来。

## 参考文献

- [1] Brown W C, Thermionic diode rectifier[J]. Microwave Power Engineering, 1968, 1: 295-298.
- [2] Brown W C, The combination receiving antenna and rectifier[J]. Microwave Power Engineering, 1968, 2: 273-275.
- [3] Matsumoto H, Numerical estimation of SPS microwave impact on ionospheric environment[J]. Acta Astronaut, 1982, 9(8): 493-497.
- [4] Brown W C, The history of power transmission by radio waves[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1984, 32(9): 1230-1242.
- [5] Brown W C, Eves E E. Beamed microwave power transmission and its application to space[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1992, 40(6): 1239-1250.
- [6] 张茂春, 王进华, 石亚伟. 无线电能传输技术综述[J]. 重庆工商大学学报: 自然科学版 2009.(5). 485-488.
- [7] 卫星. 无线能量传输系统高频同步整流电路设计[D]. 长沙理工大学, 2012. 8(171): 46-51.
- [8] Tesla N, Apparatus for transmitting electrical energy: US 1119732[P]. 1914-10.
- [9] 骆彦廷, 杨拥民, 陈仲生. 磁耦合谐振式无线电能传输系统建模与分析[J]. 中国集成电路, 2013. 8(171): 46-51.
- [10] 范兴明, 莫小勇, 张鑫. 无线电能传输技术的研究现状与应用[A]. 中国电机工程学报 2015(5): 2585-2586.
- [11] Lee S H, Lorenz R D Development and validation of model for 95%-efficiency 220W wireless power transfer over a 30cm air gap 2011(06).
- [12] Xue R F, Cheng K W, Je m High-efficiency wireless power transfer for biomedical implants by optimal resonant load transformation 2012(99).
- [13] 丁卫东, 郭前岗, 周西峰. 一种基于 FPGA 的 SPWM 波的实时生成方法 [A]. 南京邮电大学, 2011.(21): 212.
- [14] 赵勇. 基于 IGBT 的大功率变频的研制[D]. 山东大学, 2006: 11-12.
- [15] Holtz J, Pulse width modulation for power electronic power conversion [J]. Proceedings of the IEEE, 1994, 82(8): 1194-1214.
- [16] 程夕明. 功率电子学原理及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011. 142.
- [17] 陈坚. 电力电子学-电力电子变换和控制技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004. 100-101.

- [18] 伍家驹, 章义国, 任吉林等. 单相 PWM 逆变器的滤波器的一种设计方法[J]. 电气传动, 2003,33(3):12-15.
- [19] 俞杨威, 金天均, 谢文涛, 吕征宇. 基于 PWM 逆变器的 LC 滤波器[A]. 浙江大学电力电子研究所, 2007.5(5):50-51.
- [20] 谢运祥, 蒋麟征. 消除控制逆变器的输出滤波器参数分析及设计[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2004,32(5):1-4.
- [21] 鲁继业, 周伟, 赵小明等. 基于 DSP 控制的单相逆变电源设计[J]. 电气技术, 23007.12 (5)35-36.
- [22] 李正军. 计算机控制及系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.1:138-139.

## 致 谢

本研究和论文是在指导老师李中启的悉心指导下完成的，李老师渊博的专业知识，诲人不倦的高尚师德，严谨的治学态度，精益求精的工作作风，平易近人的人格魅力深深地感染和激励着我。本论文从选题开题，到中期检查，再到最后的设计和论文完成的整个过程中，李老师给予了我许多帮助，在此表示衷心地感谢！

光阴似箭，转眼间大学四年就要结束了，这四年收获很多，同时也成长了许多。大学期间，在公共课、专业课上得到过老师们的指导和帮助，在此想特别感谢几位老师，一个是大学英语老师陈鹏老师，陈鹏老师教了我两年英语，在一大二两年英语的学习上得到不少帮助，包括英语学习的方法和标准的发音，从而让我在这两年的每次非英语专业统考中获得优异成绩，这些在之后对语言的学习上奠定了坚实的基础，同时英语也对专业课上的学习发挥了很大作用；然后就是本论文的指导老师李中启老师，李老师也是我大四时的功率电子学老师，大学的一大遗憾就是没有早点接触李老师，那样就可以早点开启我对电力电子方面的大门，李老师每次在课程难点和重点部分都会在下节课提问，确认我们是否理解消化，这种细致认真的教学态度让我每次遇到的问题都能够得到很好的解决，这些也激起了我对电力电子学方面的兴趣，让我的人生目标更加明确；再就是谭会生老师，大学四年有不少实验课，其中收获最大就是谭老师的 EDA 实验，每次实验都会用到他平时在课程上所讲授的知识，有好几次谭老师陪同学们呆到晚上十一二点钟，在谭老师的课程和实验课中，收获了很多专业方面的知识和实践方面的技能。与此同时，感谢湖南工业大学所有老师，谢谢老师们四年来的教导，要感谢我的父母和家人，感谢这二十多年来的对我的养育之恩，是他们让我在漫长的人生旅途中心灵有了依辛勤栽培，谢谢你们在教学的同时传授我们做人的道理，谢谢四年里面你们孜孜不倦的教诲！在未来我一定会再接再厉，用更大的成绩回馈父母对我的爱！

大学四年即将结束，迎来的会是新的开始，希望未来在电力电子领域中厚积薄发，不断取得优异的成绩！

学生签名：

日 期：

**2018 届**

**本科毕业设计（论文）资料**

**第二部分 过程管理资料**

## 过程管理资料目录

一、毕业设计（论文）课题任务书·····	1
二、本科毕业设计（论文）开题报告·····	3
三、本科毕业设计（论文）中期报告·····	8
四、毕业设计（论文）指导教师评阅表·····	9
五、毕业设计（论文）评阅教师评阅表·····	10
六、毕业设计（论文）答辩及最终成绩评定表·····	11



## 2018 届毕业设计（论文）课题任务书

学院(部)：交通工程学院

专业（方向）：电子科学与技术

指导教师	李中启	学生姓名	刘艳博
课题名称	基于 SPWM 的超高频正弦波电源的设计		
内容及任务	<p>内容：</p> <p>以 H 桥和 SPWM 单元为核心，设计一个超高频正弦波电源。电路输入直流电压 <math>400 \pm 20\%V</math>，输出交流电压 320V，输出额定功率 3600W，输出频率 5KHz，谐波失真 THD&lt;5%。</p> <p>任务：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>（1）SPWM 超高频正弦波电源电路设计；</li> <li>（2）按时完成开题报告、中期检查报告等过程材料；</li> <li>（3）完成与课题相关的仿真；</li> <li>（4）完成毕业设计论文（报告）。</li> </ul>		
拟达到的要求或技术指标	<p>技术要求：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>（1）输入电压：DC400<math>\pm</math>20%V；</li> <li>（2）输出电压范围：AC320V；</li> <li>（3）额定输出功率：3600W；</li> <li>（4）谐波失真：不高于 5%；</li> <li>（5）输出频率：5KHz。</li> </ul> <p>其他要求：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>（1）实验（仿真）方案合理，实验数据、实验结果真实可靠；</li> <li>（2）具有一定的文献资料检索与应用能力并应用到毕业设计中；</li> <li>（3）论文正文字数不少于 10000 字，整体满足规范性和诚信要求。</li> </ul>		

进 度 安 排	起止日期	工作内容	
	2017.12.01~2018.1.04	熟悉设计任务书，撰写开题报告	
	2018.01.05~2018.03.05	系统超高频逆变电源电路的总体方案设计， 包括H桥电路和SPWM基本原理及PI控制原理	
	2018.03.06~2018.03.20	基于H桥电路的硬件系统设计	
	2018.03.21~2018.04.10	基于MATLAB系统仿真电路设计	
	2018.04.11~2018.04.20	系统调试、完善设计	
	2018.04.21~2018.05.15	撰写论文	
	2018.05.15~2018.06.03	论文修改，毕业答辩	
主要参考资料	<p>[1] 卫星. 无线能量传输系统高频同步整流电路设计[D]. 长沙理工大学, 2012. 8 (171) :46-51.</p> <p>[2] 骆彦廷, 杨拥民, 陈仲生. 磁耦合谐振式无线电能传输系统建模与分析[J]. 中国集成电路, 2013. 8 (171) :46-51.</p> <p>[3] 陈诗涵. 无线电力传输系统的高频功率放大器的研制[D]. 电子科技大学: 陈诗涵, 2015.</p> <p>[4] 白莎, 吕维, 李财. 无线电能传输系统的设计与研究[A]. 电脑知识与技术, 2015. 4 (11) :204-205.</p> <p>[5] 陈坚. 电力电子学-电力电子变换和控制技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004. 100-119 .</p> <p>[6] 程夕明. 功率电子学原理及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011. 142-147.</p> <p>[7] 胡兴柳, 彭小兵, 穆新华. SPWM 逆变电源的单极性控制方式实现 [A]. 南京航空航天大学, 2004, 1 (21) :1.</p> <p>[8] 林飞. 电力电子应用技术的 MATLAB 仿真[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008. 138-158.</p>		
	签名:  年 月 日	学院(部)主管领导意见	签名:  年 月 日

# 湖南工业大学

## 本科毕业设计（论文）开题报告

（2018 届）

学 院（部）： 交通工程学院  
专 业： 电子科学与技术  
学 生 姓 名： 刘艳博  
班 级： 1401 学号 14401700507  
指导教师姓名： 李中启 职称 讲 师

2018 年 01 月 4 日

## 题目：基于 SPWM 的超高频正弦波电源设计

### 1. 结合课题任务情况，查阅文献资料，撰写 1500~2000 字左右的文献综述

传统接触式能量传输系统主要通过导线进行能量传输。在传输过程中，由于插头和插座的接触摩擦而产生火花，在有些场所（如石油、化工企业）很容易产生危险，而且在很多用电场合，各种各样的电线连接到一起，既不美观，也非常不方便。实现供电系统与电气设备之间没有导体接触，自然成为电能传输的重要研究方向之一，即无线电能传输技术。<sup>[1]</sup>

磁耦合谐振式无线电能传输是众多无线电能传输技术中的一种，因其传输距离远、效率高、功率大，潜在的实用价值高，近年来收到各国学者和爱好者的关注。自特斯拉以来，无线电能传输是人类长久以来的梦想，无线电能传输不仅能够减少对线路的依赖，而且可以节约电线等材料，同时又避免了电路故障。无线电能传输应用范围很广，若进行技术推广，将在医疗、生活、工业、军事上都有很大影响，开创无线新时代。2007 年，麻省理工大学的 MarinSoljacic 教授等人利用电磁耦合谐振原理在 2m 范围内将一个 60W 灯泡点亮，传输效率达 40%，首次实现了传输距离 8 倍于线圈半径的中等距离无线电能传输，就预示着无线电能传输有望为人类带来新技术革命。<sup>[2]</sup>

无线电能传输电路分为发射和接收两部分，电源提供直流电，通过 DC-AC 转换单元，转换为高频交流电提供给原边电感。再由副边电感接受能量经整流滤波后变为直流电。

基于 SPWM 超高频正弦波电源的设计的主要目的是设计高频交流电源为发射电路原边电感线圈提供稳定的高频交流电。高频交流电源是无线电力传输系统的关键部分。无线供电的基础是谐振线圈发生谐振，产生空间磁场从而传递能量，而谐振线圈产生谐振的前提是谐振线圈的输入必须是谐振频率下的高线性度、大功率的交流电。功率放大器的作用就是把电信号当作输入，若直接提供交流电源，如 220V-50Hz 的公频交流电电源，50Hz 对于线圈产生的磁场来说，频率太低，甚至可能认为短路；如果直接通过函数信号发生器产生，有因为电压太低，使得发射端的能量太低，使得接收端无法感应到。故采用直流电源为电路供电，对直流电源电力进行逆变，最后获得高频率，高线性度，大功率的交流电输入到谐振线圈。对于磁耦合谐振式无线供电系统，高频功率放大器是整个系统的前端，而高频功率放大器输出的高频大功率交流电是使谐振线圈生成磁场的唯一方法，所以高频功率放大器在无线电力传输系统中极其重要。<sup>[3][4]</sup>

常用的逆变电路有单桥逆变和全桥逆变电路。此次设计采用全桥逆变电路。全桥逆变电路最主要的控制方法为正弦脉冲宽度调制控制方法。<sup>[5]</sup>

正弦脉宽调制法(SPWM: Sine Pulse-Width Modulation)是将每一正弦周期内的多个脉冲作自然或规则的宽度调制,使其依次调制出相当于正弦函数值的相位角和面积等效于正弦波的脉冲序列,形成等幅不等宽的正弦化电流输出,脉冲序列的宽度是由正弦波和三角波自然相交生成的。其中载波频率和调制信号频率之比即为载波比。在 SPWM 中常用等腰三角形作为载波,因为等腰三角形上任一点的水平宽度和高度成线性关系且左右对称,当它与任何一个平缓变化的调制信号波相交时,在交点时刻控制电路中开关器件的通断,即可得到一组等幅而脉冲宽度正比于该信号波的矩形脉冲。设正弦调制信号波为  $y = a \sin \omega t$ , 式中  $a$  称为调制度,  $0 < a < 1$ ;  $\omega$  为正弦信号波角频率。通过改变调制度来调整输出电压,通过改变正弦调制

波周期来调节输出频率,从而实现设计超高频电源目的。<sup>[6][7]</sup>

SPWM 调制法产生的脉冲信号可以使负载电流中的高次谐波成分大为减小。但由于开关频率大,开关损耗大等因素,开关频率在逆变器的设计和运行中还会受到多种因素的影响。因此,解决开关频率和开关损耗的矛盾尤为重要。<sup>[8]</sup>

参考文献:

- [1] 卫星. 无线能量传输系统高频同步整流电路设计[D]. 长沙理工大学, 2012. 8 (171) :46-51.
- [2] 骆彦廷, 杨拥民, 陈仲生. 磁耦合谐振式无线电能传输系统建模与分析[J]. 中国集成电路, 2013. 8 (171) :46-51.
- [3] 陈诗涵. 无线电力传输系统的高频功率放大器的研制[D]. 电子科技大学: 陈诗涵, 2015.
- [4] 白莎, 吕维, 李财. 无线电能传输系统的设计与研究[A]. 电脑知识与技术, 2015. 4 (11) :204-205.
- [5] 陈坚. 电力电子学-电力电子变换和控制技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2004. 100-119.
- [6] 程夕明. 功率电子学原理及其应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2011. 142-147
- [7] 胡兴柳, 彭小兵, 穆新华. SPWM 逆变电源的单极性控制方式实现[A]. 南京航空航天大学 . 2004, 1 (21):1.
- [8] 林飞. 电力电子应用技术的 MATLAB 仿真[M]. 北京:中国电力出版社, 2008. 138-158.

## 2. 选题依据、主要研究内容、研究思路及方案

### 2.1 选题依据

未来汽车发展趋势,必定会向着环保节能这个方向,也就是所谓的电动汽车。电动汽车传统的电动汽车充电设施可分为交流充电桩、直流充电站、快速充电站、电池更换站。且上述的充电模式都是通过电缆、插头等,电动汽车直接从充电设施获取电能的供电模式,这种技术也是目前电动汽车的充电设施普遍采用的一种方式。然而这种充电方式同样暴露了一些问题,由于电火花的产生及裸露导体的存在会使其存在很大的安全隐患。另外受限于服务的半径和自身的特点,传统充电模式无法满足用户移动中充电的需求。另一方面,电能传输发展相对于信号传输的滞后性。这两方面的因素都迫切要求开发一种新的电能传输技术,使其能安全、可靠、方便地应用于各种场合。汽车无线充电技术迎合时代而生,必有极大市场前景。充电线圈的输出频率直接影响了无线充电的效率,输出频率越高效率越高。因此我选择基于 SPWM 的超高频正弦波电源的设计。

### 2.2 主要研究内容

以 SPWM 控制方法为核心,以单相全桥逆变器为核心拓扑结构,以电压闭环控制为反馈控制核心设计并制作一个 SPWM 的超高频正弦波电源系统。主要研究内容有以下几点:

- (1) 研究 H 桥电路和 SPWM 基本原理,确定系统设计方案;
- (2) 研究单极性 SPWM 的基本原理,运用 MATLAB 搭建仿真平台;
- (3) 设计基于 H 桥电路的硬件系统;
- (4) 设计电压有效值单闭环控制电路系统;
- (5) 整合系统。实现基于 SPWM 的超高频正弦波电源电路的仿真测试。

### 2.3 研究思路及方案

本设计以 SPWM 为信号控制核心,以电压闭环控制为反馈控制核心,以 H 桥硬件系统为实现核心,以实现超高频正弦波电源的设计。

- (1) 查阅文献资料,理解 H 桥电路拓扑结构、SPWM 调制方式、PI 原理及闭环控制方法等基本原理;
- (2) 基于 MATLAB 设计符合技术要求的 SPWM 控制的 H 桥综合电路并仿真;
- (3) 研究不同电压下的闭环控制策略;
- (4) 研究不同负载下的闭环控制策略;
- (5) 研究不同电压下的开环控制策略;
- (6) 对仿真结果进行分析总结。

流程图如图 1:

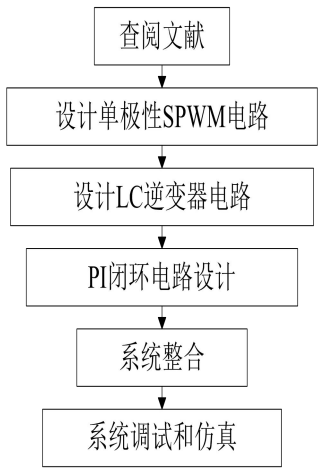


图 1 流程图

3. 工作进度及具体安排

2017.12.01~2018.1.04	熟悉设计任务书，撰写开题报告
2018.01.05~2018.03.05	系统超高频逆变电路的总体方案设计，包括 H 桥电路、SPWM 基本原理和 PI 闭环控制方法
2018.03.06~2018.03.20	基于 H 桥电路的硬件系统设计
2018.03.21~2018.04.10	基于 MATLAB 系统仿真
2018.04.11~2018.04.20	系统调试、完善设计
2018.04.21~2018.05.15	撰写论文
2018.05.15~2018.06.03	论文修改，毕业答辩

4. 指导教师意见

指导教师：  
年 月 日

说明：开题报告作为毕业设计（论文）答辩委员会对学生答辩资格审查的依据材料之一，此报告应在导师指导下，由学生填写，将作为毕业设计（论文）成绩考查的重要依据，经导师审查后签署意见生效。

## 本科毕业设计（论文）中期报告

填表日期：2018 年 4 月 16 日

学院 (部)	交通工程学院	班级	1401	学生 姓名	刘艳博
<p>课题名称：基于 SPWM 的超高频正弦波电源的设计</p>					
<p>课题主要任务：</p> <p>以 SPWM 控制方法为核心，以单相全桥逆变器为核心拓扑结构，以电压闭环控制为反馈控制核心设计并制作一个 SPWM 的超高频正弦波电源系统。主要研究内容有以下几点：</p> <p>(1) 研究 H 桥电路和 SPWM 基本原理,确定系统设计方案；</p> <p>(2) 研究单极性 SPWM 的基本原理，运用 MATLAB 搭建仿真平台；</p> <p>(3) 设计基于 H 桥电路的硬件系统；</p> <p>(4) 设计电压有效值单闭环控制电路系统；</p> <p>(5) 整合系统。实现基于 SPWM 的超高频正弦波电源电路的仿真测试。</p>					
<p>1、简述开题以来所做的具体工作和取得的进展或成果</p> <p>独立设计了 SPWM 超高频正弦波电源电路，并完成了电路的仿真。</p> <p>(1) 单极性 SPWM 信号的电路设计；</p> <p>(2) 电压单闭环有效值反馈控制电路设计；</p> <p>(3) H 桥 LC 滤波电路的设计。</p>					
<p>2、存在的具体问题</p> <p>(1) 电路输出电压值与要求值存在一定偏差；</p> <p>(2) 电路总谐波系数（THD）未达到要求；</p>					
<p>3、下一步的主要研究任务，具体设想与安排</p> <p>(1) 进一步优化电路设计图，达到指标；</p> <p>(2) 将电路设计图进行多重方案测试；</p> <p>(3) 完成毕业论文的撰写。</p>					
<p>指导教师签名：</p> <p>日 期：</p>					



## 毕业设计（论文）指导教师评阅表

学院（部）：交通工程学院

学生姓名	刘艳博	学 号	14401700507	班 级	1401
指导教师姓名	李中启	专 业	电子科学与技术		
课题名称	基于 SPWM 的超高频正弦波电源的设计				
<p>评语：（包括以下方面，①学习态度、工作量完成情况；②检索和利用文献能力、计算机应用能力；③学术水平或设计水平、综合运用知识能力和创新能力；）</p>					
是否同意参加答辩：		是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/>			
指导教师 评定成绩	分值：				
指导教师签字： <div style="float: right; text-align: right;">           年    月    日         </div>					

## 毕业设计（论文）评阅教师评阅表

学院（部）：交通工程学院

学生姓名	刘艳博	学号	14401700507	班 级	1401
专 业	电子科学与技术				
课题名称	基于 SPWM 的超高频正弦波电源的设计				
<p>评语：（对论文学术评语，包括选题意义；文献利用能力；所用资料可靠性；创新成果及写作规范化和逻辑性）</p>					
<p>针对课题内容给设计者（作者）提出 3 个问题，作为答辩时参考。</p>					
评 分：					
是否同意参加答辩			是 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/>		
评阅人签名：			年 月 日		

## 毕业设计（论文）答辩及最终成绩评定表

学院（部）：交通工程学院

学生姓名	刘艳博	学号	14401700507		答辩日期	2018.6.3	
专业	电子科学与技术	班级	1401		指导教师	李中启	
课题名称	基于 SPWM 的超高频正弦波电源的设计						
成绩评定		分值	评 定				
			教师 1	教师 2	教师 3	教师 4	教师 5
课题介绍	思路清晰，语言表达准确，概念清楚，论点正确，实验方法科学，分析归纳合理，结论严谨，设计（论文）有应用价值。	30					
答辩表现	思维敏捷，回答问题有理论根据，基本概念清楚，主要问题回答准确、深入，知识面宽。	70					
合 计		100					
答 辩 评 分		分值： 答辩小组长签名：		答辩成绩 a： × % =			
指导教师评分		分值：		指导教师评定成绩 b： × % =			
评阅教师评分		分值：		评阅教师评定成绩 c： × % =			
最终评定成绩：  <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <span>分数：</span> <span>等级：中等</span> </div> <div style="text-align: right;">             答辩委员会主任签名：              年    月    日           </div>							

说明：最终评定成绩=a+b+c，三个成绩的百分比由各学院（部）自己确定。