

# 1 概述

## 1.1 研究背景及意义

AC/DC 电力变换装置是利用电力电子器件将交流电变换为直流电的装置，也称为整流装置。整流是电力电子技术中出现最早的一种，其形式多种多样，各具特色。整流技术经历了交流电机-直流电机系统、汞弧整流器、可控硅整流系统等发展过程。整流装置在这期间体积越来越小，效率越来越高。如今，AC/DC 电力变换技术广泛应用于各行各业，如冶金、化工、电源技术等。

AC/DC 变换是将交流变换为直流，AC/DC 转换器就是将交流电变为直流电的设备，其功率流向可以是双向的，功率流由电源流向负载的称为“整流”，功率流由负载返回电源的称为“有源逆变”。AC/DC 变换器输入为 50/60Hz 的交流电，因必须经整流、滤波，因此体积相对较大的滤波电容器是必不可少的。为了提高 AC/DC 电力变换装置的性能，以不断满足人们日益增长的各种需求，控制理论被广泛应用于整流技术中。AC/DC 电力变换装置应用广泛。例如在船舶电力系统中，AC/DC 电力变换装置将发电机产生的电能进行处理，将其产生的三相交流电变换为电压大小可控的直流电能，再继续分配到后续的负载中。为了使变换后的电能满足后续负载的需要，AC/DC 电力变换装置必须对输出的直流电压进行稳定、准确、快速的控制。所以，AC/DC 电力变换装置的控制技术对整个整流系统，甚至整个船舶电力系统的正常工作有重大的意义。而控制技术反过来也促进了 AC/DC 电力变换技术，乃至整个电力电子技术的发展。

由于人类生活水平及工业生产水平的提高，电网中的用电设备日益增加，而不同的用电设备需要不同性质的电能。电力电子技术就是将一种电力变换为另一种电力，以满足不同负载的要求。电力变换依靠控制电力电子器件来实现，所以研究其控制技术有重要的实际意义。

## 1.2 国内外发展与现状

### 1.2.1 电力电子技术的发展与现状

一般认为，电力电子技术的诞生是以 1957 年美国通用电气公司研制出第一个晶闸管为标志的。晶闸管出现前的时期可称为电力电子技术的史前期或黎明期。

1904 年出现了电子管，它能在真空中对电子流进行控制，并应用于通信和无线电，从而开启了电子技术用于电力领域的先河。20 世纪 30 年代到 50 年代，水银整流器广泛用于电化学工业、电气铁道直流变电所以及轧钢用直流电动机的传动，甚至用于直流输电。这一时期，水银整流器广泛用于电化学工业、电气铁道直流变电所以及轧钢用直流电动机的传动，甚至用于直流输电。这一时期，各种整流电路、逆变电路、周波变流电路的理论已经发展成熟并广为应用。在晶闸管出现以后的相当长一段时期内，所使用的电路形式仍为是这些形式。

1947 年，美国著名的贝尔实验室发明了晶闸管，引发了电子技术的一场革命。晶闸管由于其优越的电气性能和控制性能，使之很快就取代了水银整流器和旋转变流机组，并且其应用范围也迅速扩大。电力电子技术的概念和基础就是由于晶闸管及晶闸管变流技术的发展而确立的。晶闸管是通过对门极的控制能够使其导通而不能使其关断的器件，属于半控型器件。对晶闸管电路的控制方式主要是相位控制方式，简称相控方式。晶闸管的关断通常依靠电网电压等外部条件来实现。这就使得晶闸管的应用受到了很大的局限。

20 世纪 70 年代后期，以门极可关断晶闸管(GTO)、电力双极型晶体管(BJT)和电力场效应晶体管(Power-MOSFET)为代表的全控型器件迅速发展。全控型器件的特点是，通过对门极(基极、栅极)的控制既可使其开通又可使其关断。采用全控型器件的电路的主要控制方式为脉冲宽度调制(PWM)方式。相对于相位控制方式，可称之为斩波控制方式，简称斩控方式。在 80 年代后期，以绝缘栅极双极型晶体管(IGBT)为代表的复合型器件异军突起。它是 MOSFET 和 BJT 的复合，综合了两者的优点。与此相对，MOS 控制晶闸管(MCT)和集成门极换流晶闸管(IGCT)复合了 MOSFET 和 GTO。把驱动、控制、保护电路和电力电子器件集成在一起，构成电力电子集成电路(PIC)，这代表了电力电子技术发展的一个重要方向。电力电子集成技术包括以 PIC 为代表的单片集成技术、混合集成技术以及系统集成技术。

目前，电力电子集成技术的发展十分迅速，除以 PIC 为代表的单片集成技术外，电力电子集成发展的焦点是混合集成技术，即把不同的单个芯片集成封装在一起。除单片集成和混合集成外，系统集成也是电力电子集成的一个重要方面，特别是对于超大功率集成技术更是如此。随着全控型电力电子器件的不断进步，

电力电子电路的工作频率也不断提高。与此同时，软开关技术的应用在理论上可以使电力电子器件的开关损耗降为零，从而提高了电力电子装置的功率密度。

### 1.2.2 电力电子技术发展动向

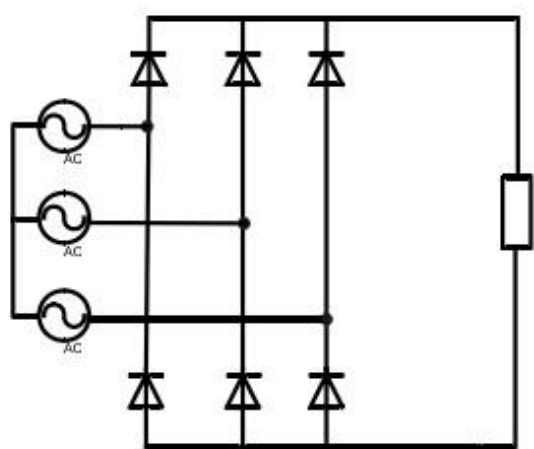
在人类文明和技术发展的整个历史进程中，能源和动力发挥着至关重要的作用。电能作为一种特殊形式的二次能源，具有清洁、便于传输和控制的特点，已经成为现代主要的能量载体。现代社会的各行各业都依赖于优质、稳定的电能供应。但是公用电网提供的仅是频率、电压为某一固定值的电源。由于用电设备的类型、功能千差万别，虽然它们都用电工作，但对电能的电压、频率数值的要求却大不相同。电力电子技术就是利用电力开关与相应的控制技术，将一种频率、电压、波形的电能变换为另一种频率、电压、波形的电能，使用电设备处于各自理想的最佳工况，以获得最大的技术经济效益，或满足用电负载的特殊工况要求。电力电子技术产生于 20 世纪后半叶，现在已广泛应用于一般工业、交通运输、电力系统、家用电器等领域。

以前电力电子技术的应用偏重于中、大功率。目前，在 1KW 以下，甚至几十万以下的功率范围内，电力电子技术的应用越来越广，其地位也越来越重要。这已经成为一个重要的发展驱使，值得引起人们的注意。电力电子装置特供给负载的是各种不同直流电源、恒频交流电源以及变频交流电源，因此也可以说，电力电子技术研究就是电源技术。此外，电力电子技术对节省电能也有重要的意义。特别在大型风机、水泵采用变频调速方面，在使用量十分庞大的照明电源等方面，电力电子技术的节能效果十分显著，因此电力电子技术也可以称为技能技术。

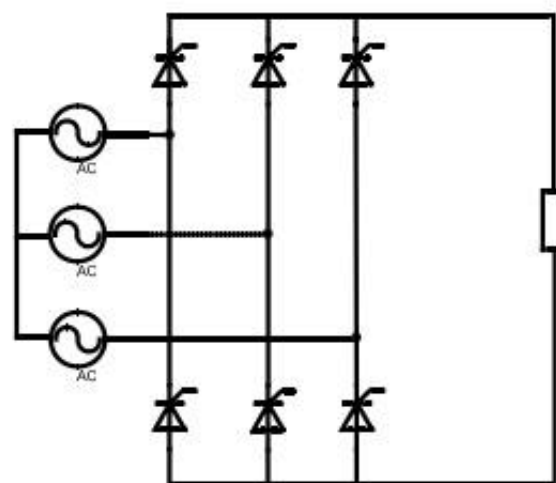
总之，电力电子技术的应用范围十分广泛。从人类对宇宙和大自然的探索，到国民经济的各个领域，再到我们的衣食住行，到处都能感受到电力电子技术的存在和巨大魅力。这也激发了一代又一代的学者和工程技术人员学习、研究电力电子技术并使其飞速发展。

### 1.2.3 AC/DC 电力变换装置现状

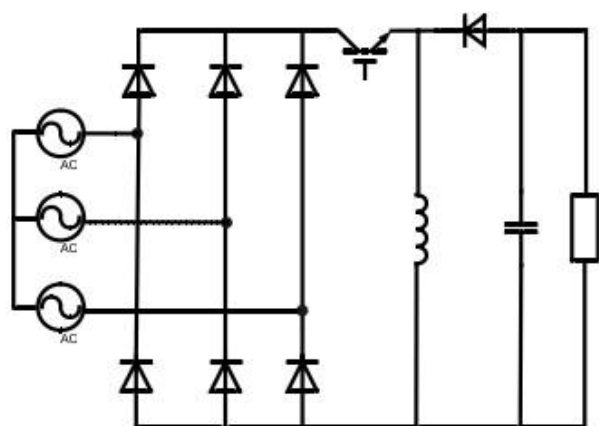
目前，AC/DC 电力变换技术根据电力电子器件和电路拓扑结构的不同，基本上可以分为二极管整流电路、晶闸管整流电路、斩控整流电路与 PWM 整流电路四种。这四种整流电路的基本拓扑结构如图 1.1 所示。



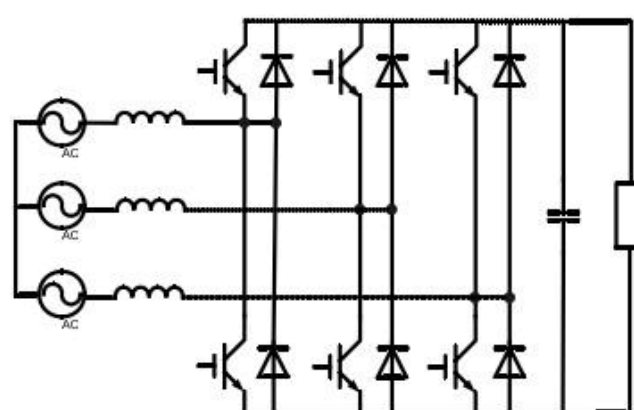
二极管整流



晶闸管整流



斩波整流



PWM 整流

图 1.1 AC/DC 电力变换技术的基本类型

二极管整流电路采用二极管作为开关器件，由于其不可控性，很少单独使用。斩控整流电路是二极管整流与直流斩波技术的结合，由于其可靠性差，成本高，目前只应用于小功率场合，大功率的应用十分有限。PWM 整流电路采用 IGBT 等全控型器件作为电路的开关器件，其优点是功率因数高，引入的电流谐波含量低，被被认为是最有前途的一种整流技术，其控制技术是当今各国学者研究的热点，在中小功率领域已显现出其优良的性能。但由于其复杂性与不成熟性，PWM 整流电路目前在大功率场合还很少应用。

晶闸管整流电路由于其可靠性高、效率高、控制方便、价格便宜，是目前使用最广泛的一种整流技术。特别是在大功率领域中，晶闸管整流技术已成为高性价比的最佳方案。晶闸管整流电路的缺点是其引入的电流谐波较大，在深控条件下，功率因数较低。为提高系统性能，往往需要在网侧安装滤波装置与无功补偿装置。在大功率场合，常应用带平衡电抗器的双反星形可控整流电路和多重化整

流电路。其中，多重化整流电路是指按一定的规律将两个或多个相同结构的整流电路（如三相桥）进行组合。例如目前广泛使用的十二脉波整流电路，二十四脉波整流电路等。根据具体的应用需求，可以灵活选择并联结构或串联结构来得到大电流或大电压。

在 AC/DC 电力变换装置的控制方面，大部分采用 PI 或 PID 的控制策略。随着负载对系统要求的提高，智能控制、变结构控制等许多先进的控制理论被引入到 AC/DC 电力变换装置中。例如采用模糊滑模变结构控制方法对三相整流器进行控制；采用单神经元自适应 PID 的控制方法来增强大功率整流电源的鲁棒性；将模糊控制引入到 PWM 整流系统中。在船舶电力系统中，负载种类繁多且工况变化复杂，导致系统参数经常随时间变化，这必然会影响 AC/DC 电力变换装置的控制性能。所以将先进控制理论引入 AC/DC 电力变换控制系统，制定合理的控制策略来克服参数变化引起的系统干扰，有一定的实际意义。电力变换控制触发电路作为控制策略实现的载体，是整个系统的核心。由于电子信息技术及微电子技术的不断发展，控制电路已经从分立元件电路发展为集成元件电路，从模拟电路发展为数字电路。目前，有许多专用集成芯片被广泛采用，例如晶闸管触发控制专用的 KJ004 与 TCA785。使用专用集成芯片不仅简化了电路设计，还增强了电路的可靠性。但是，专用集成芯片的缺点是控制精度低、触发脉冲不对称度高、灵活性较差。所以，以单片机、DSP 为代表的微控制器为基础的数字控制电路正在逐步取代分立元件电路与专用集成芯片电路。采用微控制器的控制电路控制精度高、灵活性强。由于现代生产对系统控制性能的要求日益提高，促使以微控制器为核心的控制电路的设计引起了许多学者的关注。

#### 1.2.4 本课题研究的主要内容

一、AC/DC 电力变换装置原理分析。对十二脉波整流电路的工作原理进行了分析，并对 AC/DC 电力变换控制系统的各个环节进行了数学建模分析。

二、AC/DC 电力变换装置控制策略设计。在 AC/DC 电力变换装置的滤波参数设计的基础上，结合开环分析设计合理的控制策略，并在 MATLAB/Simulink 环境下对所设计的控制算法进行仿真研究。

三、AC/DC 电力变换装置硬件设计。基于 TMS320F2812 进行 AC/DC 电力变换装置的控制电路设计。

## 2 电力变换装置以及工作原理

### 2.1 整流电路类型

电力网供给用户的是交流电，而各种无线电装置需要用直流电。整流，就是把交流电变为直流电的过程。利用具有单向导电特性的器件，可以把方向和大小交变的电流变换为直流电。

#### 2.1.1 半波整流电路

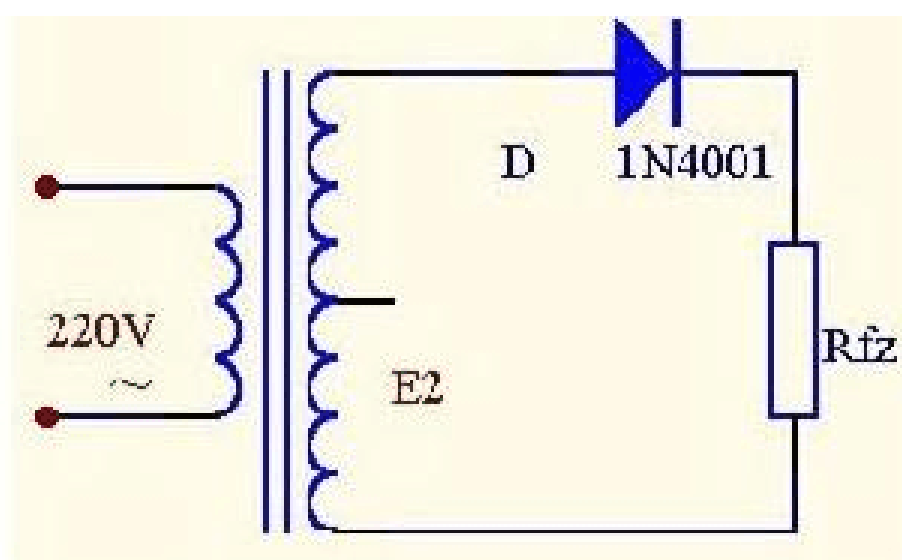


图 2.1 半波整流电路图

上图是一种最简单的整流电路。它由电源变压器 B 、整流二极管 D 和负载电阻  $R_{fz}$  组成。变压器把市电电压（多为 220 伏）变换为所需要的交变电压  $e_2$ ，D 再把交流电变换为脉动直流电。下面从波形图上看着二极管是怎样整流的。

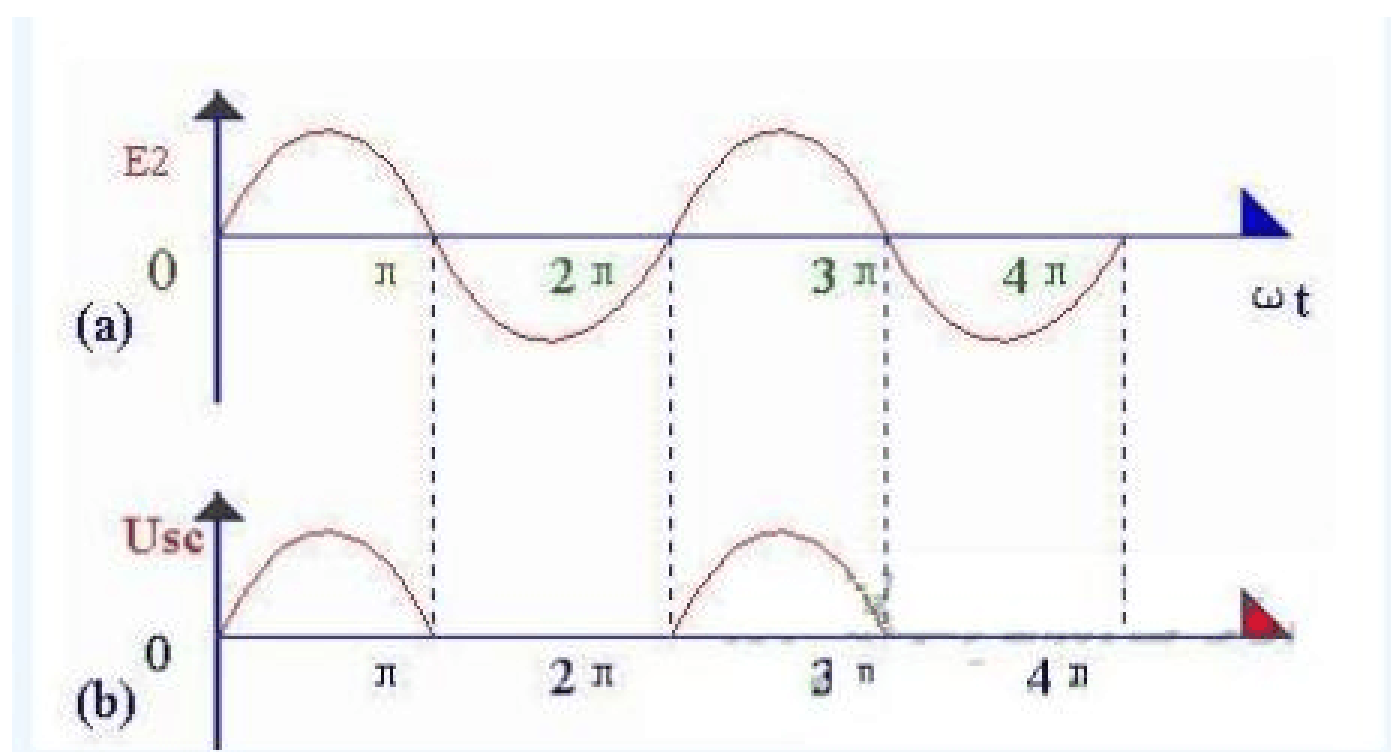


图 2.2 半波整流电路波形图

变压器初级电压  $e_2$ ，是一个方向和大小都随时间变化的正弦波电压，它的波形如图 5-2 (a) 所示。在  $0 \sim \pi$  时间内， $e_2$  为正半周即变压器上端为正下端为负。此时二极管承受正向电压而导通， $e_2$  通过它加在负载电阻  $R_{fz}$  上，在  $\pi \sim 2\pi$



时间内,  $e_2$  为负半周, 变压器次级下端为正, 上端为负。这时  $D_1$  承受反向电压, 不导通,  $R_{fz}$  上无电压。在  $\pi \sim 2\pi$  时间内, 重复  $0 \sim \pi$  时间的过程, 而在  $3\pi \sim 4\pi$  时间内, 又重复  $\pi \sim 2\pi$  时间的过程。这样反复下去, 交流电的负半周就被“削”掉了, 只有正半周通过  $R_{fz}$ , 在  $R_{fz}$  上获得了一个单一右向（上正下负）的电压, 如图 5-2 (b) 所示, 达到了整流的目的。但是, 负载电压  $U_{sc}$  以及负载电流的大小还随时间而变化, 因此, 通常称它为脉动直流。

## 2.22 全波整流电路

如果把整流电路的结构作一些调整, 可得到一种能充分利用电能的全波整流电路。下图是全波整流电路的电原理图。

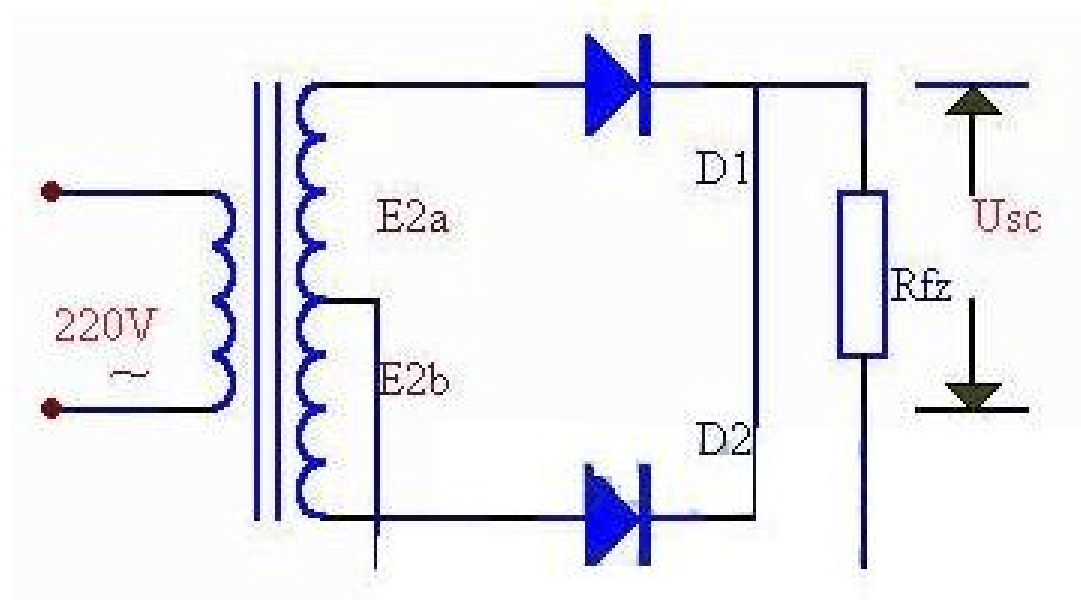


图 2.3 全波整流电路图

全波整流电路, 可以看作是由两个半波整流电路组合成的。变压器次级线圈中间需要引出一个抽头, 把次级线圈分成两个对称的绕组, 从而引出大小相等但极性相反的两个电压  $e_{2a}$ 、 $e_{2b}$ , 构成  $e_{2a}$ 、 $D_1$ 、 $R_{fz}$  与  $e_{2b}$ 、 $D_2$ 、 $R_{fz}$ , 两个通电回路。

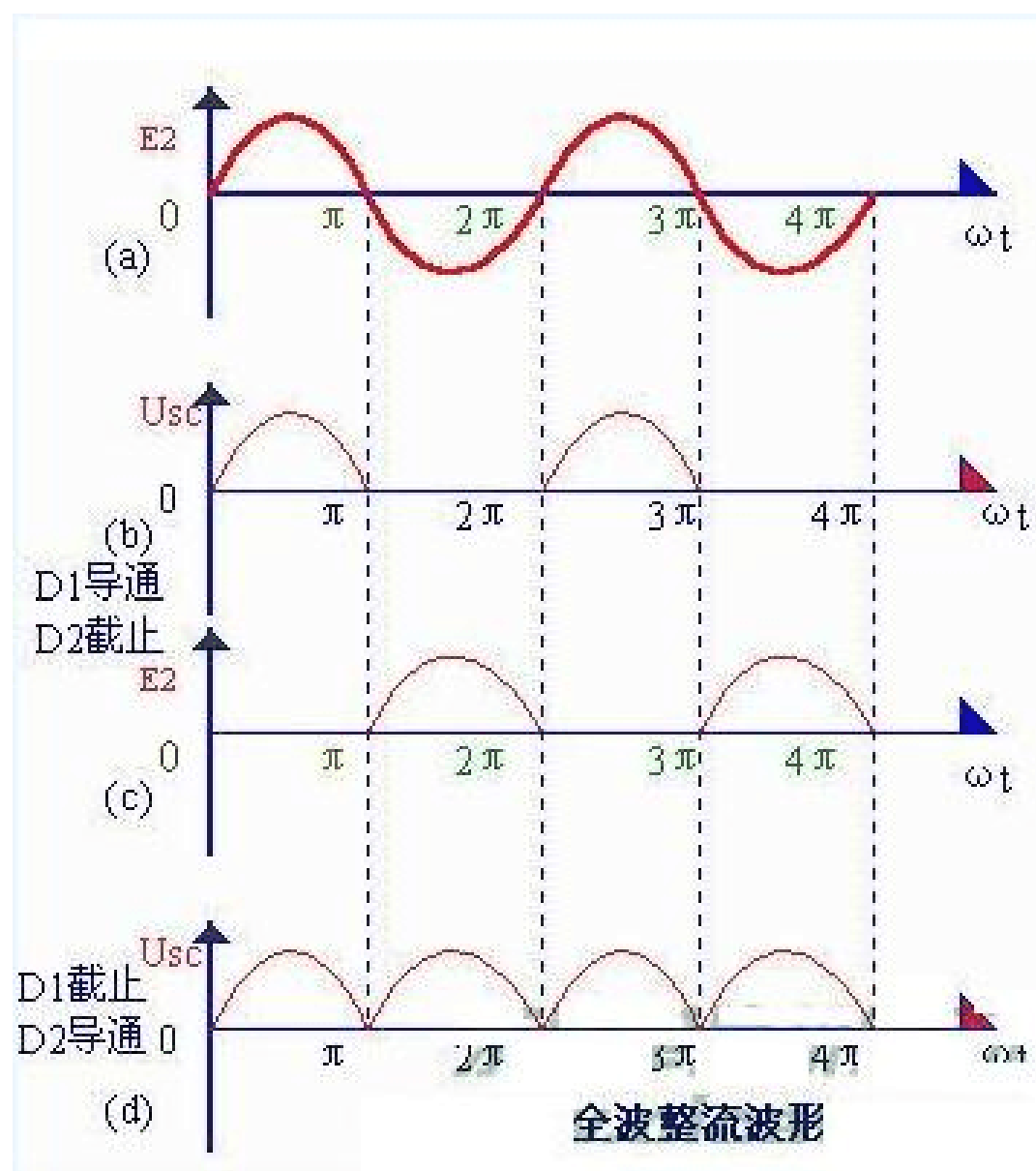


图 2.4 全波整流电路波形图

全波整流电路的工作原理，可用图 2.4 所示的波形图说明。在  $0 \sim \pi$  间内，在 e2a 对 D1 为正向电压，D1 导通，在 Rfz 上得到上正下负的电压；e2b 对 D2 为反向电压，D2 不导通（见图在  $\pi \sim 2\pi$  时间内，e2b 对 D2 为正向电压，D2 导通，在 Rfz 上得到的仍然是上正下负的电压；e2a 对 D1 为反向电压，D1 不导通（见下图如此反复，由于两个整流元件 D1、D2 轮流导电，结果负载电阻 Rfz 上在正、负两个半周作用期间，都有同一方向的电流通过，如图所示的那样，因此称为全波整流，全波整流不仅利用了正半周，而且还巧妙地利用了负半周，从而大大地提高了整流效率（ $U_{sc} = 0.9e_2$  比半波整流时大一倍）。

### 2.23 桥式整流电路

桥式整流电路是使用最多的一种整流电路。这种电路，只要增加两只二极管口连接成“桥”式结构，便具有全波整流电路的优点，而同时在一定程度上克服了它的缺点。



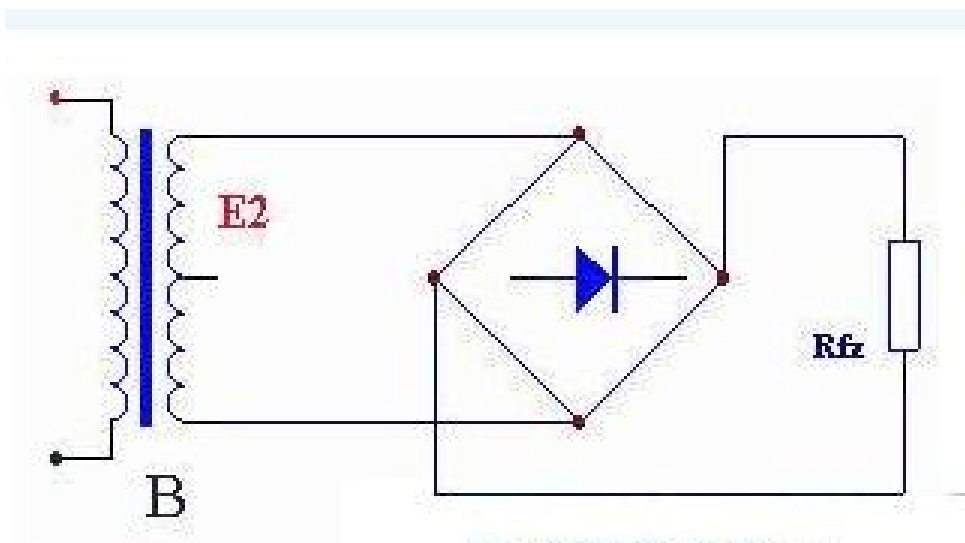


图 2.5 桥式整流电路图

桥式整流电路的工作原理如下： $e_2$  为正半周时，对  $D_1$ 、 $D_3$  加正向电压， $D_1$ 、 $D_3$  导通；对  $D_2$ 、 $D_4$  加反向电压， $D_2$ 、 $D_4$  截止。电路中构成  $e_2$ 、 $D_1$ 、 $R_{fz}$ 、 $D_3$  通电回路。在  $R_{fz}$  上形成上正下负的半波整流电压， $e_2$  为负半周时，对  $D_2$ 、 $D_4$  加正向电压， $D_2$ 、 $D_4$  导通；对  $D_1$ 、 $D_3$  加反向电压， $D_1$ 、 $D_3$  截止。电路中构成  $e_2$ 、 $D_2$ 、 $R_{fz}$ 、 $D_4$  通电回路，同样在  $R_{fz}$  上形成上正下负的另外半波的整流电压。上述工作状态分别如图 2.5 所示。

如此重复下去，结果在  $R_{fz}$  上便得到全波整流电压。其波形图和全波整流波形图是一样的。从图 2.5 中还不难看出，桥式电路中每只二极管承受的反向电压等于变压器次级电压的最大值，比全波整流电路小一半。

## 2.2 整流电路的原理

整流电路的作用是将交流降压电路输出的电压较低的交流电转换成单向脉动性直流电，这就是交流电的整流过程，整流电路主要由整流二极管组成。经过整流电路之后的电压已经不是交流电压，而是一种含有直流电压和交流电压的混合电压。习惯上称单向脉动性直流电压。大多数整流电路由变压器、整流主电路和滤波器等组成。它在直流电动机的调速、发电机的励磁调节、电解、电镀等领域得到广泛应用。整流电路通常由主电路、滤波器和变压器组成。20 世纪 70 年代以后，主电路多用硅整流二极管和晶闸管组成。滤波器接在主电路与负载之间，用于滤除脉动直流电压中的交流成分。变压器设置与否视具体情况而定。变压器的作用是实现交流输入电压与直流输出电压间的匹配以及交流电网与整流电路之间的电隔离。

电源电路中的整流电路主要有半波整流电路、全波整流电路和桥式整流三种，倍压整流电路用于其它交流信号的整流，例如用于发光二极管电平指示器电

路中，对音频信号进行整流。前三种整流电路输出的单向脉动性直流电特性有所不同，半波整流电路输出的电压只有半周，所以这种单向脉动性直流电主要成分仍然是 50Hz 的；因为输入交流市电的频率是 50Hz，半波整流电路去掉了交流电的半周，没有改变单向脉动性直流电中交流成分的频率；全波和桥式整流电路相同，用到了输入交流电压的正、负半周，使频率扩大一倍为 100Hz，所以这种单向脉动性直流电的交流成分主要成分是 100Hz 的，这是因为整流电路将输入交流电压的一个半周转换了极性，使输出的直流脉动性电压的频率比输入交流电压提高了一倍，这一频率的提高有利于滤波电路的滤波。

在电源电路的三种整流电路中，只有全波整流电路要求电源变压器的次级线圈设有中心抽头，其他两种电路对电源变压器没有抽头要求。另外，半波整流电路中只用一只二极管，全波整流电路中要用两只二极管，而桥式整流电路中则要用四只二极管。根据上述两个特点，可以方便地分辨出三种整流电路的类型，但要注意以电源变压器有无抽头来分辨三种整流电路比较准确。在半波整流电路中，当整流二极管截止时，交流电压峰值全部加到二极管两端。对于全波整流电路而言也是这样，当一只二极管导通时，另一只二极管截止，承受全部交流峰值电压。所以对这两种整流电路，要求电路的整流二极管其承受反向峰值电压的能力较高；对于桥式整流电路而言，两只二极管导通，另两只二极管截止，它们串联起来承受反向峰值电压，在每只二极管两端只有反向峰值电压的一半，所以对这一电路中整流二极管承受反向峰值电压的能力要求较低。在全波和桥式整流电路中，都将输入交流电压的负半周转到正半周或将正半周转到负半周，这一点与半波整流电路不同，在半波整流电路中，将输入交流电压一个半周切除。

分析上述整流电路时，主要用二极管的单向导电特性，整流二极管的导通电压由输入交流电压提供。

### 2.3 十二脉波整流电路

整流电路的移相多重联结分为并联多重联结和串联多重联结。这两种联结方式带来的效果是相同的，下面只讨论串联多重联结的整流电路，其构成方式见表 1。

表 2.1 串联多重联结的构成

直流侧脉波数	交流侧移相角	联结重数
12	$30^{\circ}$	二重
18	$20^{\circ}$	三重
24	$15^{\circ}$	四重
30	$12^{\circ}$	五重
36	$10^{\circ}$	六重

十二脉波整流电路如图 2.1所示，该电路由 2 个三相整流桥串联组成，用晶闸管作为电力开关器件。变压器一次侧的输入为三相交流电源，分别通过 Y-Y 连接方式与 Y- $\Delta$ 连接方式，使二次侧输出六相交流电源。

其主电路的开关器件为晶闸管，变压器二次侧由两个绕组构成，绕组 I 采用 Y 形接法，绕组 II 采用 $\Delta$ 形接法，从而使绕组 II 的相电压滞后于绕组 I 的相电压  $30^{\circ}$ ，使得直流侧输出电压  $U_d$  在每个电源周期内脉动 12 次，故称为 12 脉波整流电路。

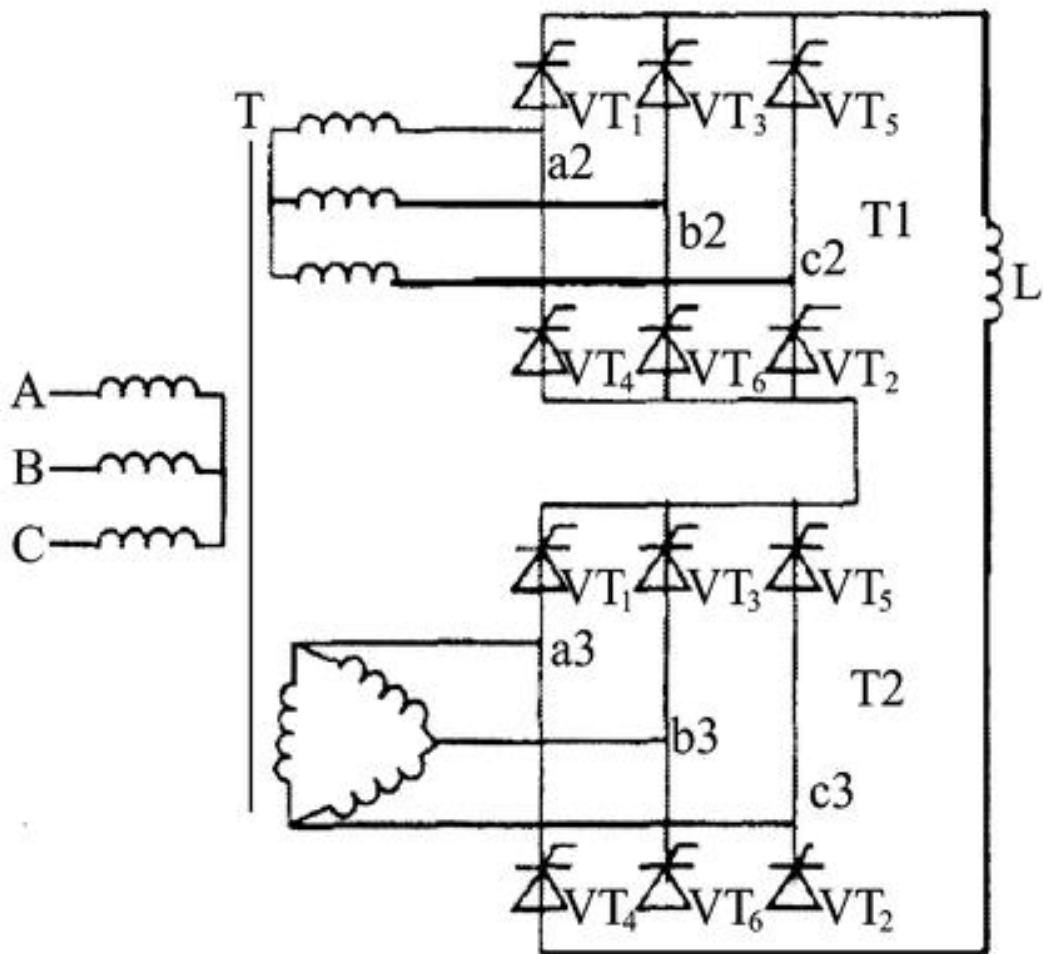


图 2.6 12 脉波串联整流电路原理图

12 脉波整流电路的主要组成部分有：三相交流电源、三相三绕组变压器、

主电路（两个三相全控晶闸管整流桥、负载）、控制电路（同步脉冲发生器）。

十二脉波整流电路的特点如下：

（1）Y-Y 连接方式的一、二次侧的匝数比为 1:1，而 Y- $\Delta$ 连接方式的一、二次侧的匝数比为 1: 3；使得变压器输出的六相交流电源线电压有效值大小相等。

即线电压  $a_1c_1$ 、 $c_1b_1$ 、 $b_1a_1$ 、 $a_2c_2$ 、 $c_2b_2$  和  $b_2a_2$  有效值大小相等。

（2）Y-Y 连接方式的三相输出线电压比 Y- $\Delta$ 连接方式的超前  $30^\circ$ 。即  $a_1c_1$ 、 $c_1b_1$  和  $b_1a_1$  分别比  $a_2c_2$ 、 $c_2b_2$  和  $b_2a_2$  在相位上超前  $30^\circ$ 。

（3）上桥的共阴极与下桥的共阳极相连接，形成串联结构。两组三相整流桥工作时互不干扰，且工作原理相同。

#### 2.4 AC/DC 电力变换装置的工作原理

十二脉波整流电路通过控制晶闸管的导通来实现 AC/DC 电力变换，所以晶闸管导通时刻的不同会直接影响输出给负载的直流电压值。十二脉波整流电路的晶闸管控制遵循以下的规律：

（1）在任意时刻，上桥共阳极组的晶闸管、上桥共阴极组的晶闸管、下桥共阳极组的晶闸管与下桥共阴极组的晶闸管，各有一个处于导通状态，其余的晶闸管处于关断状态，以形成向负载供电的电流回路。变压器二次侧输出的六相交流相电压，有四相向负载供电。在十二脉波整流电路正常工作的任意时刻，不同时刻导通的晶闸管不同，参与供电的交流电源不同。并且输出给负载的直流电压等于上下两桥输入的交流线电压之和。

（2）12 个晶闸管的导通顺序为：

$VT_1-VT_2-VT_3-VT_4-VT_5-VT_6-VT_7-VT_8-VT_9-VT_{10}-VT_{11}-VT_{12}$ 。

通过在门极与阴极间施加触发脉冲信号，使晶闸管由关断状态进入导通状态。电路在稳态工作时，触发脉冲必须满足以下的相位关系：共阳极组或共阴极组的晶闸管，在一个交流电源周期中，每一个晶闸管导通状态持续的时间为  $120^\circ$ 。

（3）任意一个晶闸管从自然换相点开始到施加触发脉冲的这段时间，被称为控制角，一般用角度表示。晶闸管的导通情况如表 2.2 所示。

表 2.2 控制角为 0 度时晶闸管的导通情况

时段	I	II	III	IV	V	VI
上桥导通的晶闸管	VT1,VT3	VT1,VT3	VT5,VT3	VT5,VT3	VT5,VT7	VT5,VT7
下桥导通的晶闸管	VT2,VT12	VT2,VT4	VT2,VT4	VT6,VT4	VT6,VT4	VT6,VT8
输出电压	$U_{a1c1}+U_{a2b2}$	$U_{a1c1}+U_{a2c2}$	$U_{b1c1}+U_{a2c2}$	$U_{b1c1}+U_{b2c2}$	$U_{b1a1}+U_{b2c2}$	$U_{b1a1}+U_{b2a2}$
时段	VII	VIII	IX	X	XI	XII
上桥导通的晶闸管	VT9,VT7	VT9,VT7	VT9,VT11	VT9,VT11	VT1,VT11	VT1,VT11
下桥导通的晶闸管	VT6,VT8	VT10,VT8	VT10,VT8	VT10,VT12	VT10,VT12	VT2,VT12
输出电压	$U_{c1a1}+U_{b2a2}$	$U_{c1a1}+U_{c2a2}$	$U_{c1b1}+U_{c2a2}$	$U_{c1b1}+U_{c2b2}$	$U_{a1b1}+U_{c2b2}$	$U_{a1b1}+U_{a2b2}$

（4）输出直流电压在一个电源周期有 12 个时段，每一个时段持续的时间为 30 度。负载电压波形每进入一个新的时段，就要有触发脉冲产生，使电路产生一次换相。每个晶闸管在导通状态期间会经历 3 次换相，在整流合闸启动过程或电流断续时，为确保电路的正常工作，需保证同时导通的 4 个晶闸管均有触发脉冲，即在某一晶闸管第一次被触发的同时，还需对其序号前面的 3 个晶闸管分别施加触发脉冲。为此，可采用两种方法：一种是采用四窄脉冲触发，相邻脉冲的前沿相差 30°；另一种方法是采用大于 120°的宽脉冲触发。

（5）改变晶闸管的触发时刻，即改变控制角，输出直流电压的大小与脉动幅度也随着变化。控制角越大，输出的直流电压平均值越小，直流脉动系数越大。可见，调节控制角就可以控制输出直流电压的大小。

在设计十二脉波整流电路的控制系统时，控制器的任务就是根据系统给定与输出反馈信息，自动调节控制角的大小，使系统输出给负载的直流电压符合给定要求，并按照负载要求随时调节。

2.5 十二脉波整流电路的控制系统建模

在十二脉波整流电路控制系统中，被控对象为十二脉波整流电路。由于十二

脉波整流电路的输出是直流电压，并且通过控制角来调节输出，所以负载的电压就是系统的控制量，控制角的大小就是控制器的输出，用  $\alpha$  表示。因此，十二脉波整流控制系统可以设计为如图 2.7 所示的形式。

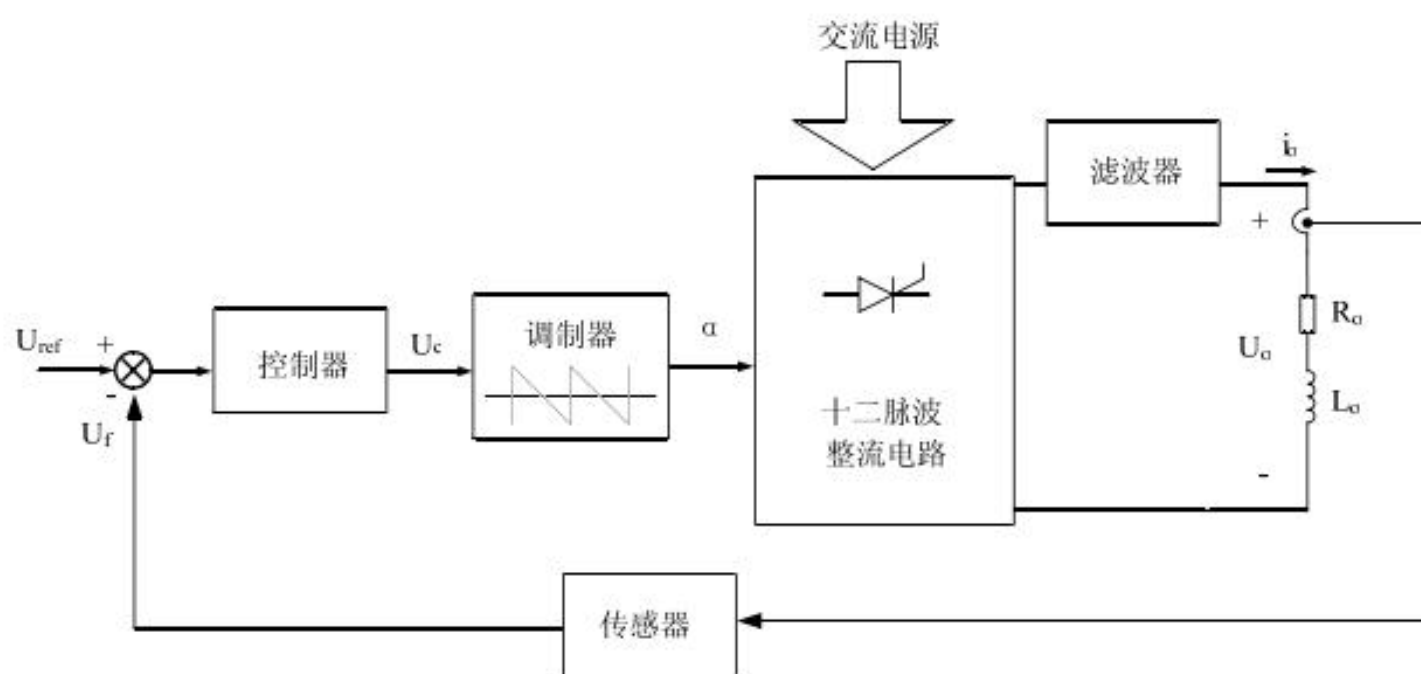


图 2.7 十二脉波整流电路控制系统框图

在该控制系统中，将输出给负载的直流电压作为反馈量与给定电压作比较，其差值作为控制器的输入，控制器根据给定电压与反馈电压的偏差，调节控制角的大小，使偏差逐渐减小，从而实现对系统的控制。

由图 2.7 的控制系统图可知，整个系统由多个环节组成，分别是电力变换环节、控制调制环节与滤波器环节等。下面就分别对各个环节进行分析。

### 2.51 电力变换环节

十二脉波整流电路可以实现 AC/DC 电力变换。电路输出的直流电压大小与控制角和输入的交流电压大小有关。根据图 2.7，输出给负载的电压就是四个交流相电压相加后的结果，控制角决定了由交流电压的哪个部分进行相加。并且工作在连续方式下的十二脉波整流电路在交流电源周期  $T$  内有 12 段相同部分的输出电压波形。因此在时间  $T/12$  内简单求取输出电压的平均值就可以得到平均输出电压。

### 2.52 控制调制环节

控制调制环节由控制器与调制器组成。控制器根据给定信号与反馈信号的差值，利用相应的控制策略计算出输出的控制电压。由于控制角与输出直流电压呈反比例的关系，为了使控制电压与输出直流电压呈正比例关系，以便于控制，还需要调制环节将控制电压转换为控制角，并输入到十二脉波整流电路中。调制环节的原理图如图 2.8 所示。



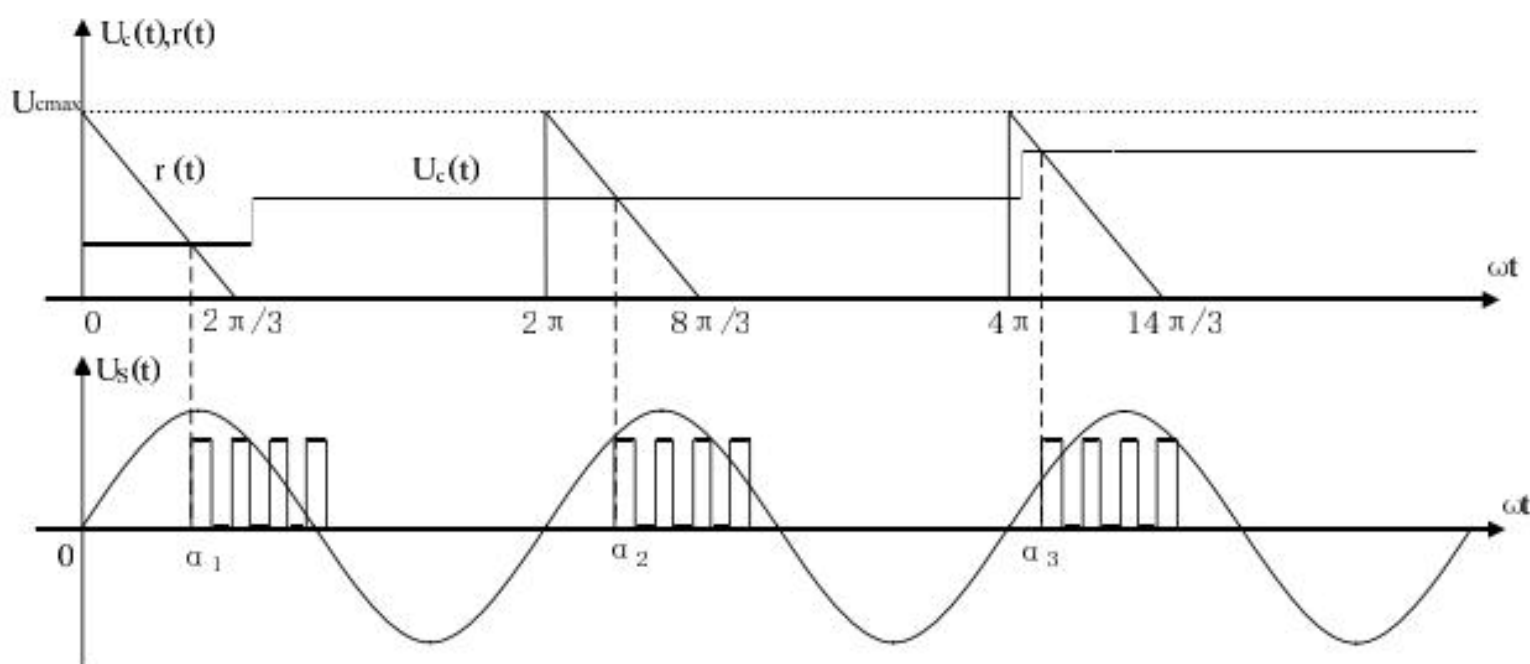


图 2.8 调制环节原理图

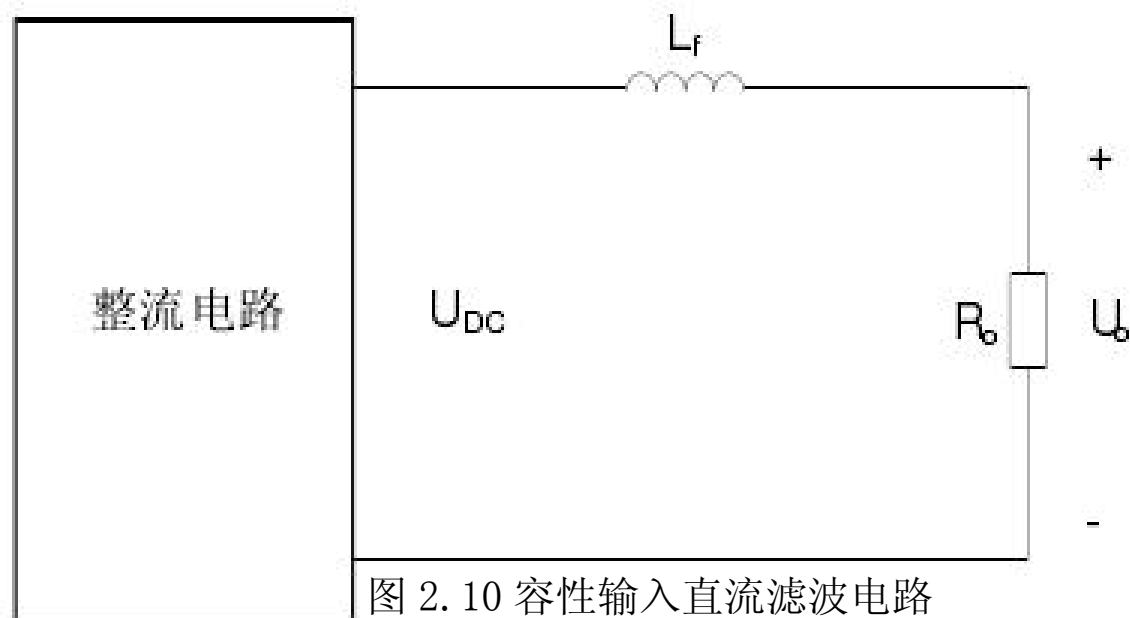
在图 2.8 中,  $r(t)$  为调制信号。该信号为周期性的直角三角波信号。三角波的周期与交流电源的周期相同; 三角波的宽度一般设置为控制角的移相范围大小; 而三角波的高度与控制电压的最大值相同。控制电压与三角调制波的交点就是触发脉冲的起始点。这样, 每一个控制电压值就有一个控制角与之对应。

### 2.53 滤波环节

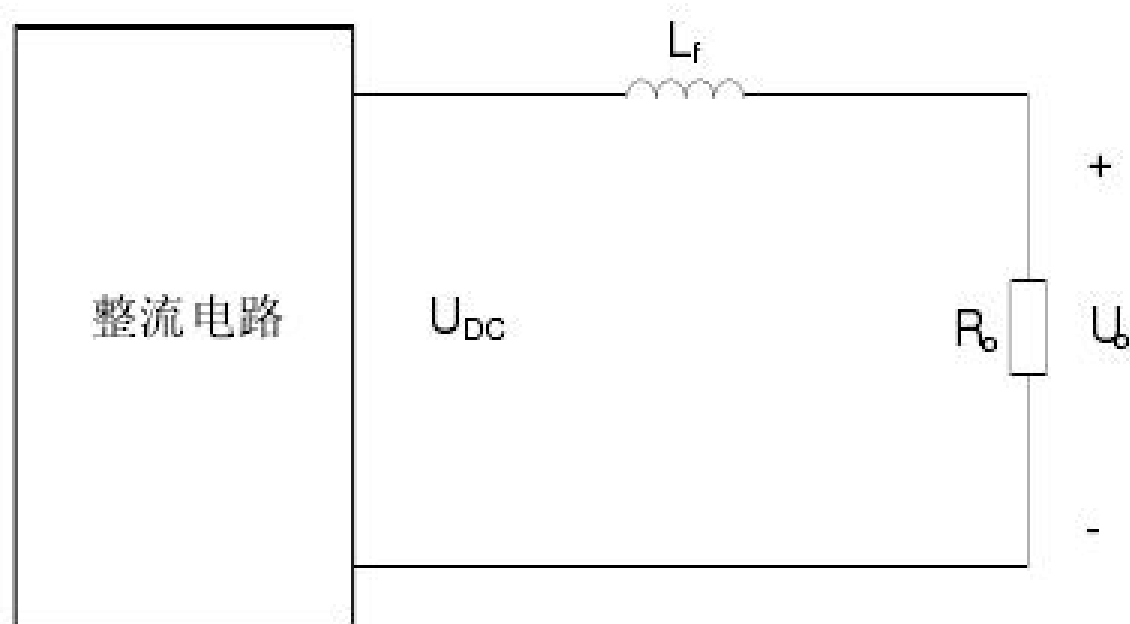
在信息电子电路中, 通常都需要电压稳定的直流电源供电。同样的, 在电力电子电路中, 为了使负载正常工作, 有时对直流电源的要求也比较高。常用的直流电源的特性指标包括: 最大输出电压、最大输出电流、输出电压范围。而质量指标包括: 稳压系数、温度系数、纹波系数等。其中纹波系数是指直流电压波峰波谷的差值与平均电压之比, 是最主要的质量指标。纹波系数越小, 输出电压越稳定。

而在十二脉波整流电路中, 输出的直流电压在每个电源周期有十二次波动, 并且控制角越大, 纹波系数越大, 直流电源的质量也就越差。为了提高系统输出的直流电能质量, 有必要对系统的输出进行滤波处理。

根据滤波要求及应用场合的不同, 可将滤波电路分为感性输入直流滤波电路和容性输入直流滤波电路。容性输入直流滤波电路如图 2.10 所示, 该电路等效于与负载并联的一个电容。



容性直流滤波电路能够滤除电压纹波，提供非常有效的工作性能，但它们需要额外的开通和重复峰值电流。因此，容性直流滤波电路只能应用在功率小的场合。感性直流滤波电路能够滤除直流电流的纹波。在大功率应用场合，更多的使用感性。直流滤波电路。因为直流电流脉动系数的减小，能获得更有效的变压器运行性能。图 2.11 所示结构为最简单的感性输入直流滤波电路，其等效于与负载串联的电感。当电感足够大时，整流电路的输出电流就可以维持一个稳定的数值。在重载的情况下，感性滤波电路的作用要比在轻载情况下更加有效。



在十二脉波整流电路系统中，由于其大功率、高电压，宜采用容性滤波电路与感性滤波电路的结合，即 L 型滤波电路，也称为 LC 滤波电路。

#### 2.54 稳压电路

经整流和滤波后的输出电压往往会随交流电源电压的波动和负载的变化而变化，而输出电压的不稳定可能会引起电子线路系统工作不稳定，甚至根本无法正常工作。精密电子测量仪器、自动控制、计算装置及晶闸管的触发电路等都是要求直流电源具有很高的稳定性。因此，在滤波电路之后，往往需要增加稳压电

路。

采用稳压管稳压电路是最简单的直流稳压电路，如同 2.13 中，稳压电路由限流电阻  $R$  和稳压管  $DZ$  构成。当电源电压出现波动或负载（电流）变化时，该稳压电路能自动维持负载电压  $U_o$  的基本稳定。

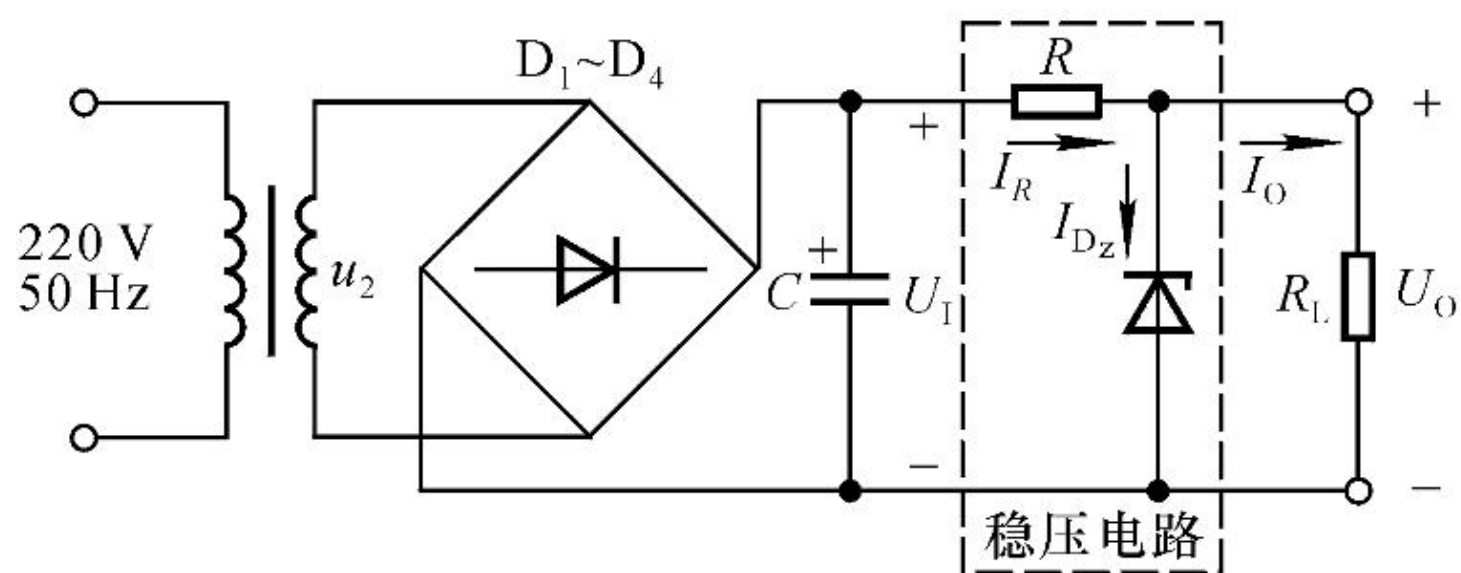


图 2.13 稳压管稳压电路

### 3 AC/DC 电力变换装置控制策略研究

#### 3.1 控制系统性能指标

控制策略的参数设计要根据系统的性能指标来进行,下面列出 AC/DC 电力变换系统直流侧的部分性能指标:

输出电压范围: 800V~1000V 可调。

电压调节 (空载-满载):  $\pm 1\%$ 。

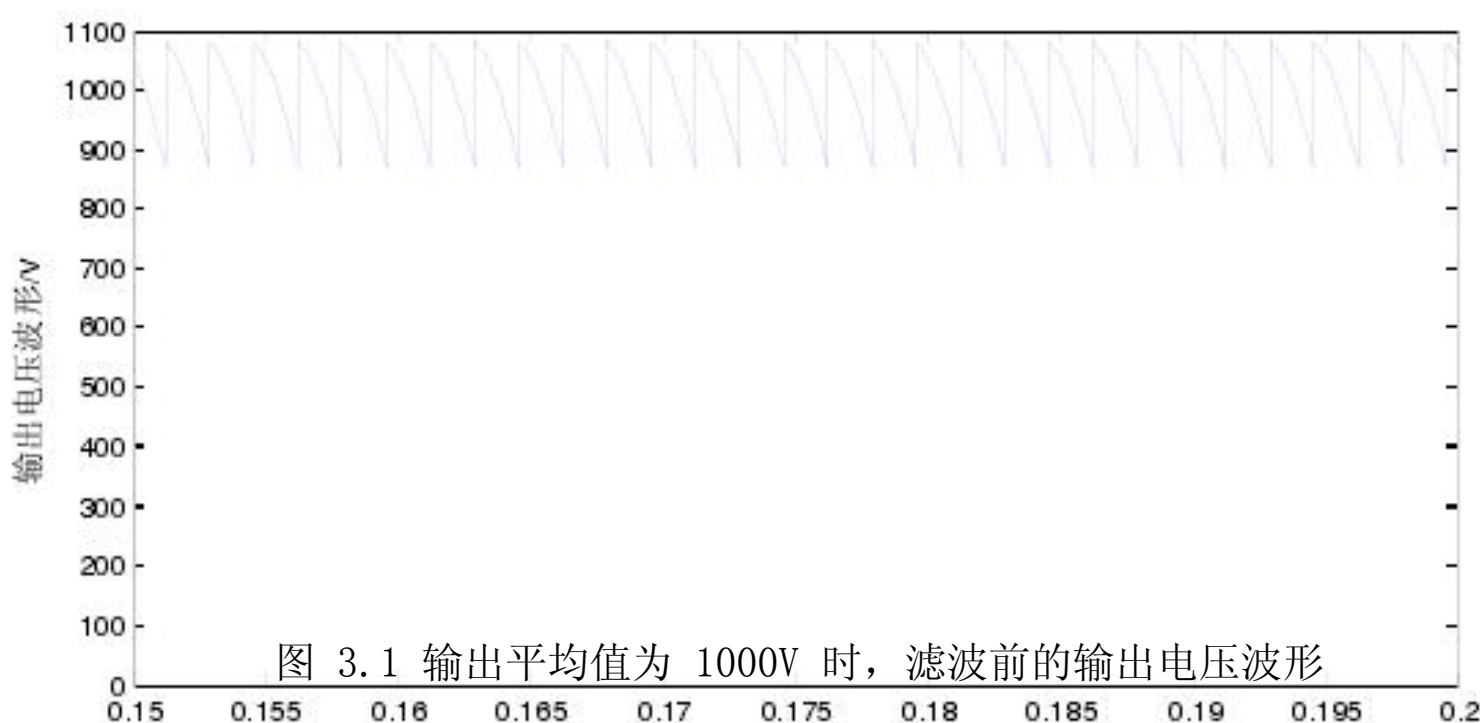
电压暂态波动范围:  $\pm 15\%$ 。

暂态电压恢复时间:  $\leq 0.1s$

#### 3.2 滤波电路参数设计

由于控制系统输出直流电压的范围是 800V~1000V,对滤波器的要求就是在这段电压输出范围内,滤波后的输出电压均能满足负载要求。所以滤波电路参数的选取是实现这一性能指标的关键。

在十二脉波整流电路控制系统中,如果要求输出电压范围在 800~1000V 时,输出给负载的电压纹波系数为 2%,可按以下步骤计算来得到合适的电容值和电感值。设置输出电压为 1000V 时,系统性能指标规定滤波后输出电压脉动幅值  $V=1000 \times 2\% = 20V$ 。图 3.1 表示滤波前的 1000V 电压波形。



根据以上仿真结果,当电感选取为  $L_f = 3mH$  时,所需要的电容值较小,而且电压脉动幅值也符合指标。电感选定为该值后,在此基础上,选取较大的电容值。综合以上因素,选取  $L_f = 3mH$ ,  $C_f = 600\mu F$  作为滤波电感和电容,组成 LC 滤波器。通过 MATLAB 仿真,得到以该参数为基础的滤波电路的滤波效果由图 3.2 所示。

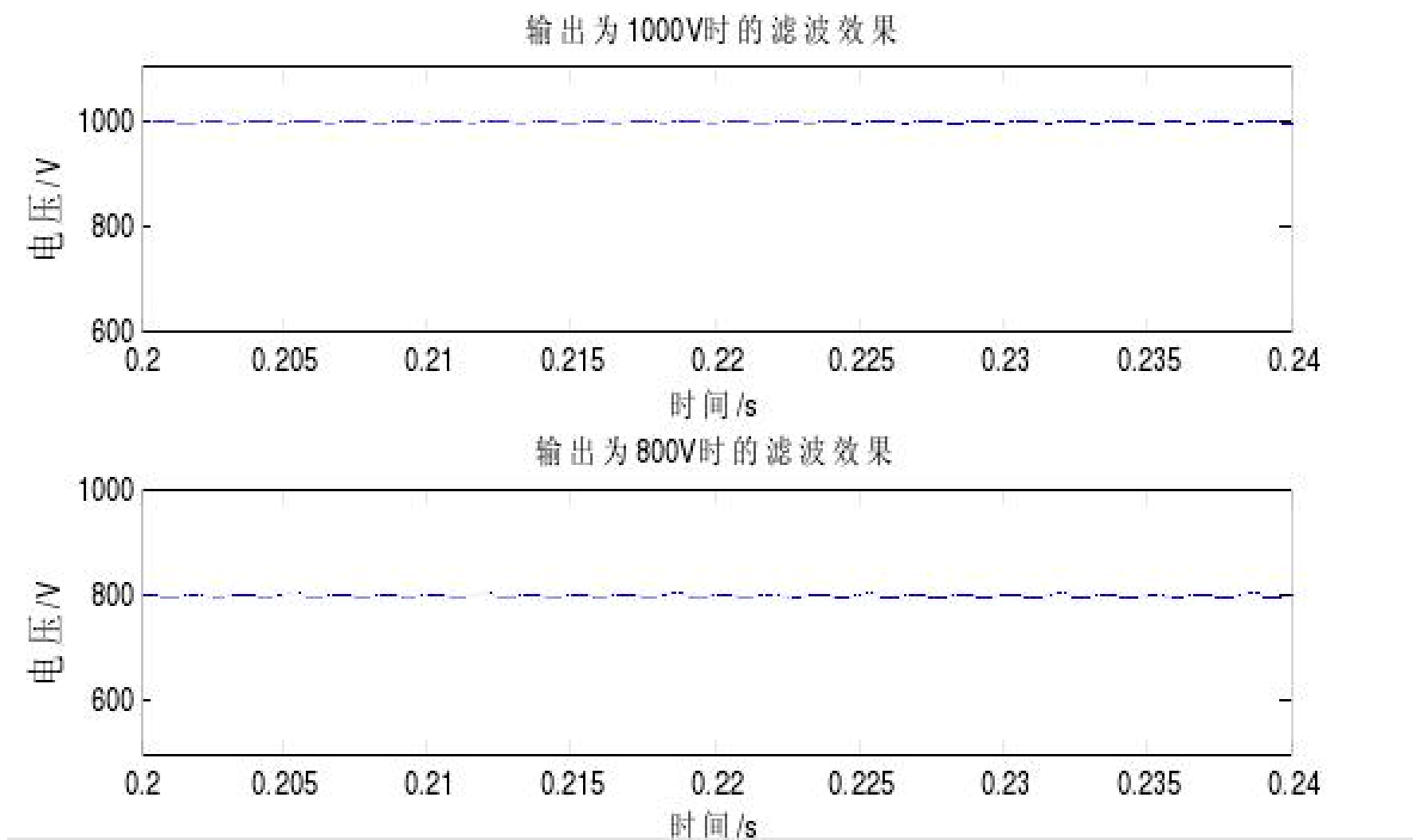


图 3.2 不同输出时的滤波效果

### 3.3 控制系统 PID 控制研究

PID 控制由于易于实现、调试方便、性能良好，是目前使用最广泛的一种控制策略。PID 控制通过误差、误差的变化率与误差积累的线性组合，输出控制量给控制对象。如果三者的权重调整适当，即 PID 参数合理，可以使控制系统既有较好的动态性能，也有较小的稳态误差。

将 PID 控制器应用于十二脉波整流电路控制系统中，来研究控制系统的控制性能。

#### 3.3.1 PID控制系统 Simulink 模型

在 MATLAB/Simulink 环境下，搭建十二脉波整流电路控制系统如图 3.3所示。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/036153033110011004>