

Saturnlab 电力电子模型开发与实训系统 实验指导说明书



一、概述

1.1 系统开发背景

为了支持高校电力电子和半实物仿真的教学，优利德科技携手南京研旭特推出了功率级控制快速原型开发与实训系统，该系统可以满足电气工程、电力电子、自动化和控制科学等工科学科相关的教学与科研需求。

系统提供给学生从电路原理，电路构建，到 Simulink 模型设计以及仿真，直至最后实际功率电路验证等一整套学习过程。这样学生可以首先了解理论层，然后通过离线仿真对理论层加深理解，进而再对实际硬件进行控制，获得真实的控制数据。让学生更加清晰的了解理论、仿真与实际硬件控制的关系。

针对基础教学方面，本系统提供了基本的实验例程，可以完成《电力电子技术基础》、《电机与拖动基础》、《自动控制原理》等课程的相关基础实验。实验例程从基础的电路原理介绍、Simulink 搭建仿真模型、实际硬件控制等层次入手，由浅入深，循序渐进的指导学生。

针对进阶科研方面，本系统可以完成《电力电子系统建模与控制》、《新能源发电技术》、《电机拖动自控系统》等课程的相关实验。相比基础性实验，进阶性实验着点于综合性控制，优化性控制，创新性控制等。

1.2 系统组成与功能

系统硬件主要由直流电源、交流电源、直流负载、交直流功率计、高精度数字示波器、快速原型控制器（简称 RCP）、桌面型电力电子模组（PEBB）、主电路拓扑及接口及 PC 机。

系统软件主要使用 Matlab，组态监控软件。



图 1.2.1 系统组成图

图 1.2.1 为系统组成图，按图中所示说明逐一介绍：

➤ 高精度数字荧光示波器：

示波器主要用于测量硬件控制过程中各个节点数据，方便用户查看、分析控制结果。

➤ 电力电子功率模组：

多功能桌面型电力电子功率转换平台，采用积木式搭建形式，将功率转换电路中的电感，电容，功率开关等器件方便的组合在一起，形成电力电子积木 PEBB（Power

Electronics Building Block)。目前主推 Boost/BUCK+单相全桥两级拓扑,因为此类拓扑除了包含了常用的标准拓扑外,还具有工作条件易满足,操作更加安全等特点。

➤ 快速原型控制器:

快速原型控制器,是一种通用型控制器,其最大的优点就是可以直接下载 Simulink 模型,这也是其快速原型控制器名称的由来。

➤ 实验拓扑面板:

接线面板是方便上节介绍的 PEBB 独立电路研究时提供的组态式连线面板。图 1.2.2 为接线面板示意图。

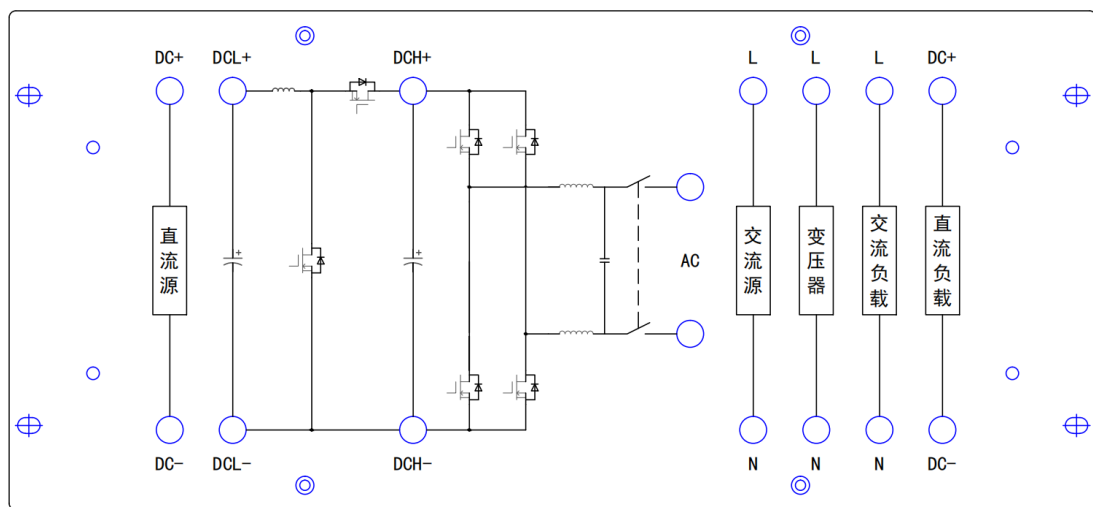


图 1.2.2 接线面板示意图

默认情况下,拓扑面板中的 DCL+、DCL-及 DCH+、DCH-的四个接口是与系统的可编程直流电源的输出连接。模块共引出 6 个接口,分别是低压侧 DCL 的正负极,直流母线 DCH 的正负极,AC 交流两极。默认情况下,负载接口连接的是电阻负载。

仪器参数如下：

产品名称	主要技术指标
数字示波器	1、4 通道 2、200MHz 带宽 3、2GS/s 实时采样率 4、70Mpts 存储带宽 5、500,000wfms/s 波形采样率
可编程直流稳压电源	1、0-120V 输出电压 2、0-3A 输出电流 3、300W 输出功率 4、10mV/1mA 分辨率
智能电参数测量仪	1、测量方式 AC 2、电压测试范围：3V-600V 3、电流测试范围：5mA-20A 4、功率测试范围：1W~12kW 5、测试精度：0.4% 6、测量对象：V, A, W, PF/Hz/THD/CF
可编程交流电源	1、功率最大输出 500VA 2、标准机箱体积（高度 3U）
可编程直流电子负载	1、测试电压：0-150V 2、测试电流：0-30A 3、测试功率：0-300W 4、0.1mV/0.1mA 分辨率

二、实验基础篇

2.1 电力电子技术概念

电子技术包括信息电子技术和电力电子技术两大分支。通常所说的模拟电子技术和数字电子技术都属于信息电子技术。电力电子技术就是应用于电力领域的电子技术，具体地说，电力电子技术就是使用电力电子器件对电能进行变换和控制的技术。

通常把电力电子技术分为电力电子器件制造技术和变流技术两个分支。

变流技术也称为电力电子器件的应用技术，包括用电力电子器件构成各种电力变换电路和对这些电路进行控制的技术。电力变换通常分为四大类，交流变交流，交流变直流，直流变直流以及直流变交流。交流变直流叫做整流，直流变交流叫做逆变，如下图 2.1.1 所示。

输出 \ 输入	交流（AC）	直流（DC）
	直流（DC）	整流 直流斩波
交流（AC）	交流电力控制 变频、变相	逆变

图 2.1.1 电力变换分类

电力电子器件的制造技术是电力电子技术的基础，变流技术是电力电子技术的核心，电力电子器件制造技术的理论基础是半导体物理，变流技术的理论基础是电路理论。

美国学者 W. Newell 认为电力电子学是由电力学、电子学和控制理论三个学科交叉而形成的，如下图 2.1.2 所示。



图 2.1.2 电力电子学分类

电力电子器件的制造技术和用于信息变换的电子器件制造技术的理论基础（都是基于半导体理论）是一样的，其大多数工艺也是相同的。电力电子电路和信息电子电路的许多分析方法也是一样的。

电力电子技术广泛用于电气工程中，这是电力电子学和电力学的主要关系。

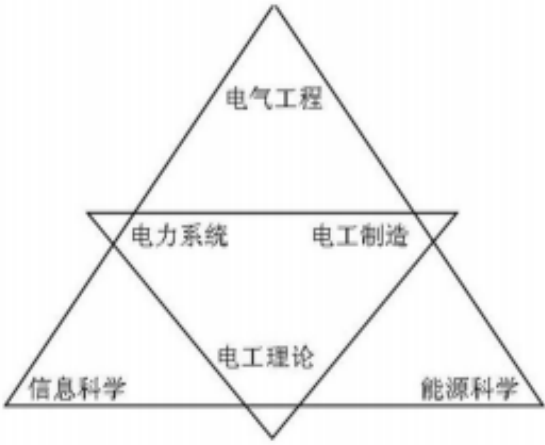


图 2.1.3 电气工程

各种电力电子装置广泛应用于高压直流输电、静止无功补偿、电力机车牵引、交直流电力传动、电解、励磁、电加热、高性能交直流电源等之中，因此，无论是国内国外，通常都把电力电子技术归属于电气工程学科。在我国，电力电子与电力传动是电气工程的一个二级学科。上图 2.1.3 用两个三角形对电气工程进行了描述。其中大三角形描述了电气工程一级学科和其他学科的关系，小三角形则描述了电气工程一级学科内各二级学科的关系。

2.2 电力电子器件概述

在电气设备或电力系统中，直接承担电能的变换或控制任务的电路被称为主电路。电力电子器件（Power Electronic Device）是指可直接用于处理电能的主电路中，实现电能的变换或控制的电子器件。广义上电力电子器件可分为电真空器件和半导体器件两类，目前往往专指电力半导体器件。

电力电子器件一般具有如下特征：

所能处理电功率的大小，也就是其承受电压和电流的能力，是其最重要的参数，一般都远大于处理信息的电子器件。

为了减小本身的损耗，提高效率，一般都工作在开关状态。导通时阻抗很小，接近于短路，管压降接近于零；阻断时阻抗很大，接近于断路，电流几乎为零。

由信息电子电路来控制，而且需要驱动（信息电子电路）电路。

自身的功率损耗通常仍远大于信息电子器件，为了保护器件不至于因温度过高而损坏，工作时一般都需要安装散热器。

电力电子器件在实际应用中，一般是由控制电路、驱动电路和以电力电子器件为核心的主电路组成一个系统，如下图 2.2.1 所示。由信息电子电路组成的控制电路按照系统的工作要求形成控制信号，通过驱动电路去控制主电路中电力电子器件的开关来完成整个系统的功能。广义上人们往往将检测电路和驱动电路这些主电路以外的电路都归为控制电路，从而可粗略的说电力电子系统是由主电路和控制电路组成的。

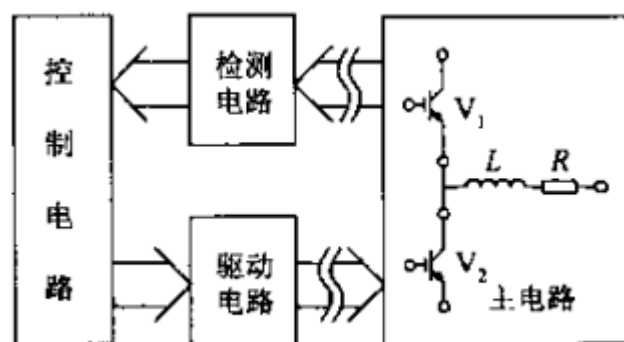


图 2.2.1 电力电子器件的实际应用

按照能够被控制电路信号所控制的程度可以将电力电子器件分为三大类：

- 通过控制信号可以控制其导通而不能控制其关断的电力电子器件被称为半控型器件，主要是指晶闸管（Thyristor）及其大部分派生器件。器件的关断完全是由其在主电

路中承受的电压和电流决定的。

- 通过控制信号可以控制其导通又可以控制其关断的电力电子器件被称为全控型器件。目前最常用的是 IGBT 和 Power MOSFET。
- 不能用控制信号控制其通断的电力电子器件就是电力二极管，不需要驱动电路，又被称为不可控器件。这种器件只有两个端子，基本特性和信息电子电路中的二极管一样。

按照驱动信号的性质可以分为两大类：

- 电流驱动型：通过从控制端注入或者抽出电流来实现导通或者关断的控制；
- 电压驱动型：仅通过在控制端和公共端之间施加一定的电压信号就可实现导通或者关断的控制。

按照驱动信号的波形（除去电力二极管）又可以分为：

- 脉冲触发型：通过在控制端施加一个电压或电流的脉冲信号来实现器件的开通或者关断的控制；
- 电平控制型：必须通过持续在控制端和公共端之间施加一定电平的电压或电流信号来使器件开通并维持在导通状态或者关断并维持在阻断状态。

2.3 Simulink 介绍

MATLAB 是矩阵实验室(Matrix Laboratory)的简称。除具备卓越的数值计算能力外，它还提供了专业水平的符号计算，文字处理，可视化建模仿真和实时控制等功能。MATLAB 的基本数据单位是矩阵，它的指令表达式与数学、工程中常用的形式十分相似，故用 MATLAB 来解算问题要比用 C,FORTRAN 等语言完相同的事情简捷得多。

当前流行的 MATLAB 5.3/Simulink 3.0 包括拥有数百个内部函数的包和三十几种工具包(Toolbox)。工具包又可以分为功能性工具包和学科工具包。功能工具包用来扩充 MATLAB 的符号计算，可视化建模仿真,文字处理及实时控制等功能。学科工具包是专业性比较强的工具包,控制工具包，信号处理工具包,通信工具包等都属于此类。

MATLAB 可以进行矩阵运算、绘制函数和数据、实现算法、创建用户界面、连接其他编程语言的程序等，主要应用于工程计算、控制设计、信号处理与通讯、图像处理、信号检测、金融建模设计与分析等领域，可以用来进行多种工作，具体如下：数值分析、数值和符号计算、工程和科学绘图、控制系统的设计与仿真、数字图像处理技术、数字

信号处理技术、通讯系统设计与仿真、财务金融工程等。

MATLAB 主要具有以下特点：

- 语言简洁紧凑，使用灵活方便，库函数极其丰富；
- 运算符丰富，**MATLAB** 几乎提供了和 C 语言一样多的运算符；
- **MATLAB** 既具有结构化的控制语句（如 **for** 循环、**while** 循环、**break** 语句和 **if** 语句），又有面向对象编程的特性；
- 源程序开放，语法限制不严格，程序设计自由度大；
- 程序的可移植性很好。

Simulink 是 **MATLAB** 最重要的组件之一，它提供一个动态系统建模、仿真和综合分析的集成环境。在该环境中，无需大量书写程序，而只需要通过简单直观的鼠标操作，就可构造出复杂的系统。**Simulink** 具有适应面广、结构和流程清晰及仿真精细、贴近实际、效率高、灵活等优点，并基于以上优点 **Simulink** 已被广泛应用于控制理论和数字信号处理的复杂仿真和设计。同时有大量的第三方软件和硬件可应用于或被要求应用于 **Simulink**。快速原型控制正是基于此，才能被广泛应用。

Simulink 是 **MATLAB** 中的一种可视化仿真工具，是一种基于 **MATLAB** 的框图设计环境，是实现动态系统建模、仿真和分析的一个软件包，被广泛应用于线性系统、非线性系统、数字控制及数字信号处理的建模和仿真中。**Simulink** 可以用连续采样时间、离散采样时间或两种混合的采样时间进行建模，它也支持多速率系统，也就是系统中的不同部分具有不同的采样速率。为了创建动态系统模型，**Simulink** 提供了一个建立模型方块图的图形用户接口 (GUI)，这个创建过程只需单击和拖动鼠标操作就能完成，它提供了一种更快捷、直接明了的方式，而且用户可以立即看到系统的仿真结果。

Simulink 是用于动态系统和嵌入式系统的多领域仿真和基于模型的设计工具。对各种时变系统，包括通讯、控制、信号处理、视频处理和图像处理系统，**Simulink** 提供了交互式图形化环境和可定制模块库来对其进行设计、仿真、执行和测试。构架在 **Simulink** 基础之上的其他产品扩展了 **Simulink** 多领域建模功能，也提供了用于设计、执行、验证和确认任务的相应工具。**Simulink** 与 **MATLAB** 紧密集成，可以直接访问 **MATLAB** 大量的工具来进行算法研发、仿真的分析和可视化、批处理脚本的创建、建模环境的定制以及信号参数和测试数据的定义。

在实际的系统控制中，我们首先需要搭建 **Simulink** 离线模型，从理论上面得以实现

之后，才可以进行下一步的半实物仿真。针对快速原型控制，是将离线模型中的控制核心算法部分下载到实际控制器中，而主电路部分由实际的电路替代，从而达到理论与实际相结合的目的。**Simulink** 还提供了很多优化参数选项，来提高控制器的执行效率或者减少控制器内部存储单元等，尽量做到自动转换代码与人工编写代码一致性。

2.4 快速原型控制平台介绍

上节介绍的强大的 **Matlab** 中的 **Simulink** 组件为快速原型控制技术提供了基础。在介绍快速原型控制平台前，先讨论设计控制系统的一般流程。

第一步设计离线仿真模型，获得理论依据后，第二步设计硬件电路，同时再将模型转换为编程语言，如 C，C++，汇编，VHDL(Verlog)等，第三步经过调试，获得最终控制结果。如下图 2.4.1 所示。

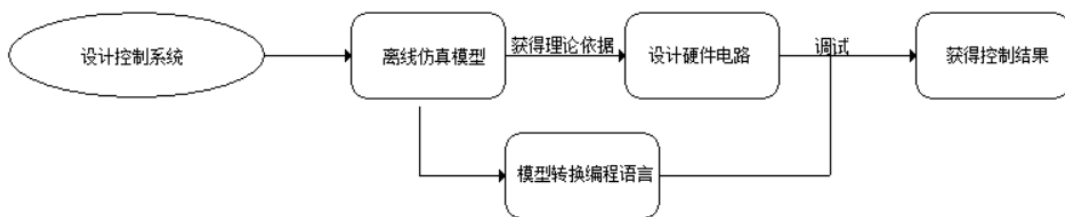


图 2.4.1 控制系统设计流程

可见此过程要求设计者要同时掌握多门技术才能进行，除此之外要花费太多的时间周期，而且在次过程中，成本的花费也很大。针对很多研究者来说，可能就是需要获得真实的实验结果即可，那么这个过程显然有些过于繁杂。

鉴于这些，快速原型控制平台应运而生，其正是解决以上担忧的。

快速原型控制平台，首先具备了控制器与主电路，而且都是成熟的，稳定的。设计者只需建立离线仿真模型，实验成功后，将算法部分分离出来下载到控制器中，再进行实际调试，最终获得控制结果。如下图 2.4.2 所示。

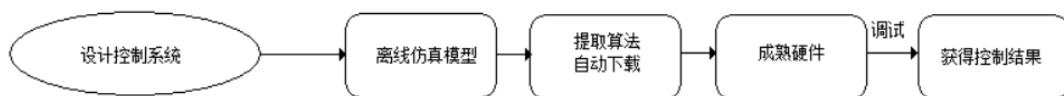


图 2.4.2 快速原型设计流程

2.5 信号调理硬件电路说明

底板信号调理板主要包括所有控制电路需要的电源电路、功率拓扑电路、传感器调理电路、电压采样调理电路、过压过流保护电路、信号测试接口电路、RCP 控制器外扩接口电路等。

2.5.1 电源电路

下图 2.5.1 为电源电路,此部分电源主要通过 DC/DC 隔离电源模块,将 24V 转为 5V、15V、+/-12V。其中 5V 为逻辑芯片及缓冲芯片供电, 15V 为开关管驱动电路供电, +/-12V 为传感器以及调理电路供电。之所以采用 DC/DC 隔离模块,主要考虑隔离,因为开关电源除了给底板供电,还为开关管驱动以及继电器供电。下图中 U14 为 24V 转 +/-12V 模块, U18 为 24V 转 5V 模块, U13 为 24V 转 15V 模块。

在强电路路设计中,隔离处理是常见的设计方法。目的 1 是将强电与弱电隔离开,即使强电发生故障,不会因此对弱电关键器件造成损坏。目的 2 是提高弱电电路的稳定度,提高抗干扰性。

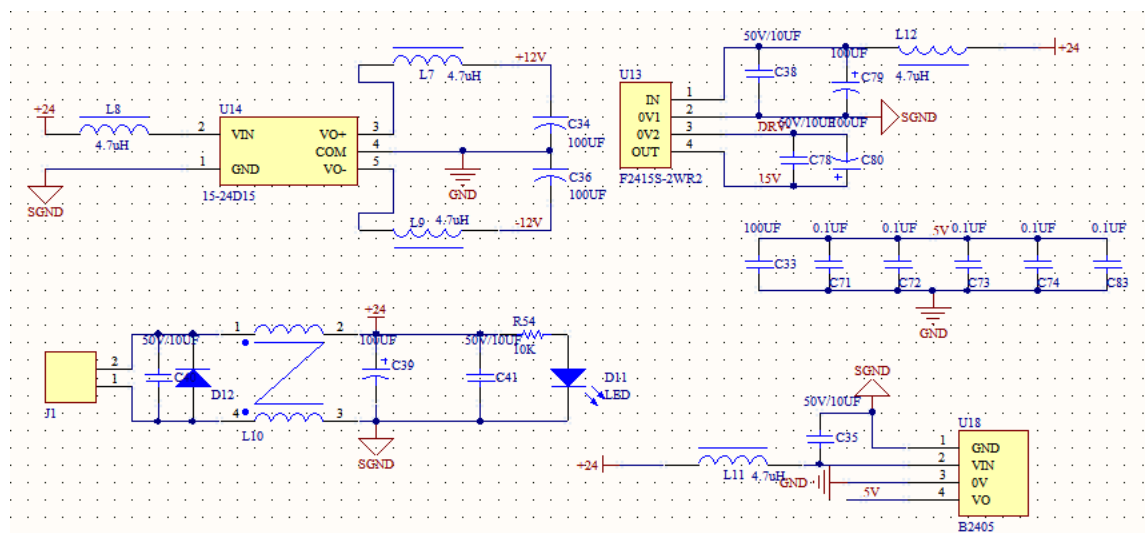


图 2.5.1 电源电路

2.5.2 采集调理电路

采集调理电路主要分成电流采集和电压采集两类。电流采集主要使用电流霍尔传感器,此传感器为电流输出型,因此电流传感器输出必须要接采样电阻,将电流变为电压送给 ADC。如下图 2.5.2 所示;

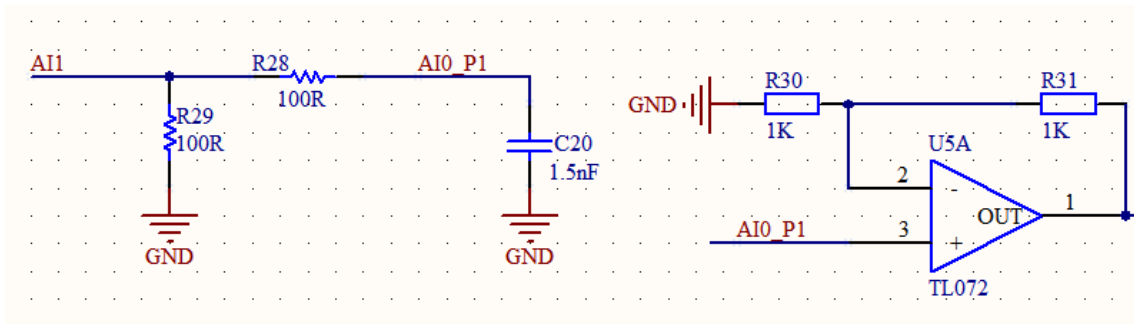


图 2.5.2 电流采集电路

AI1 为第一路电流输出，此信号为直流低压端电流，信号经过 R29 变为电压信号。因本设备工作电流较小，因此电流采样采用 3 圈穿线，使得霍尔传感器输出信号变为单圈穿线的 3 倍，从而提高其采样精度。R28 和 C20 组成 RC 滤波电路，滤掉高频干扰部分。后级 U5A 为运放芯片部分，做了比例放大，输出信号经过 RC 电路后，此部分信号送给 RCP 扩展口。下图 2.5.3 为跟随电路，此信号输出至测试点，此时在外部测信号波形时将不再影响采样电路工作，提高电路工作稳定性。

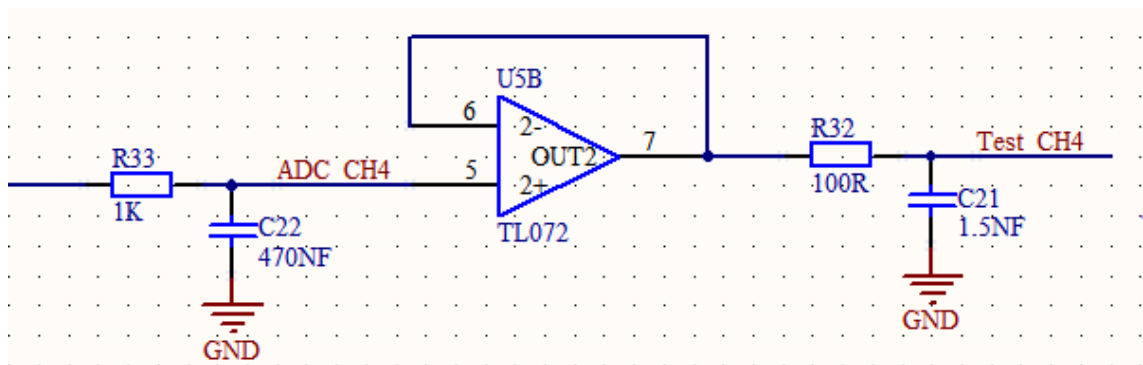


图 2.5.3 信号跟随电路

下图 2.5.4 为电压采集调理电路，电压采集采用差分模式，一来对被测电压缩小一定的倍数，二来用于消除共模干扰。其中缩小倍数由 R2、R3、R6、R7 的和除以 R1 的值决定。在实际应用中，会根据被测电压的大小决定这些电阻的阻值。

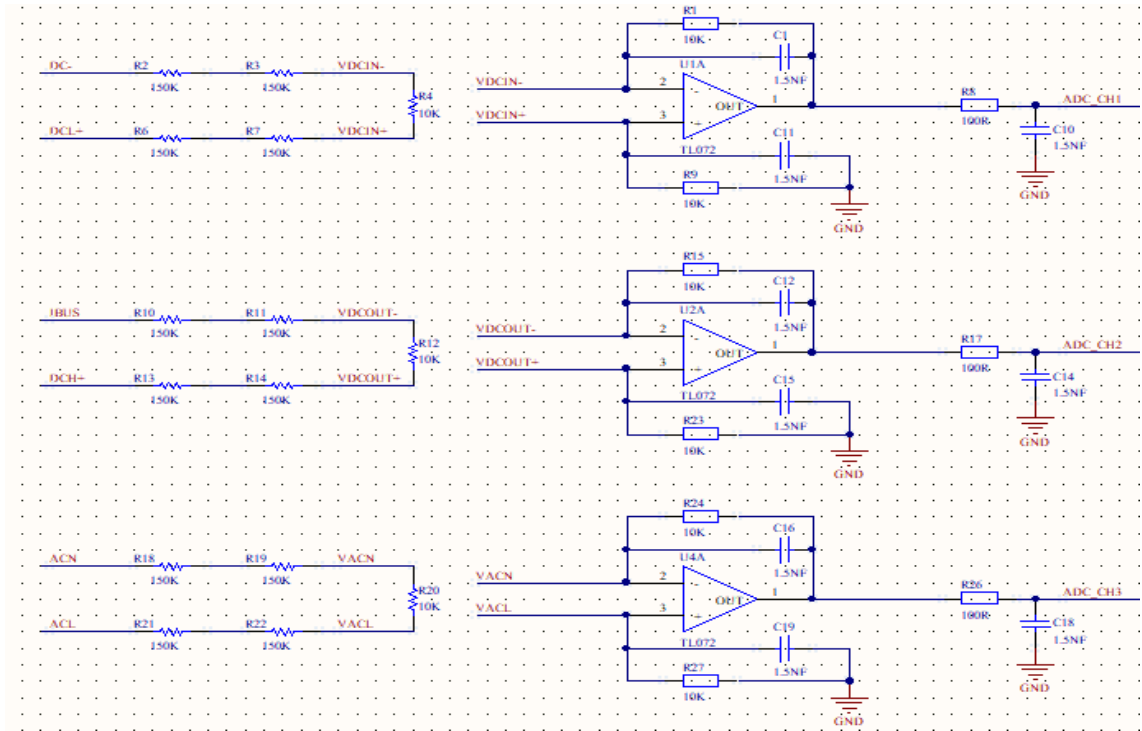


图 2.5.4 信号采集调理电路

2.5.3 保护电路

图 2.5.5 为过压、过流及直通保护电路。

以板卡的 GND 为基准， I_n 的值为 AICH4、AICH5、AICH6 中负值最小的， I_p 为 AICH4、AICH5、AICH6 中正值最大的。同样 U_p 为 VICH1、VICH2、VICH3 中正值最大的。因此根据保护电流和电压的等级，可以调整后级比较器的参考电压。负值电压参考值由 -12V 通过分压电阻产生，正值电压参考值由 12V 通过分压电阻产生。正常运行状态下比较器输出高电平，当出现过压、过流故障后，比较器输出低电平。故障解除后，比较器又恢复输出高电平。当功率电路出现直通时，在 IBUS 与 DC-之间的电阻电压将上升，当达到 1.3V 时，将引起 U15 光耦导通，触发直通过流保护。

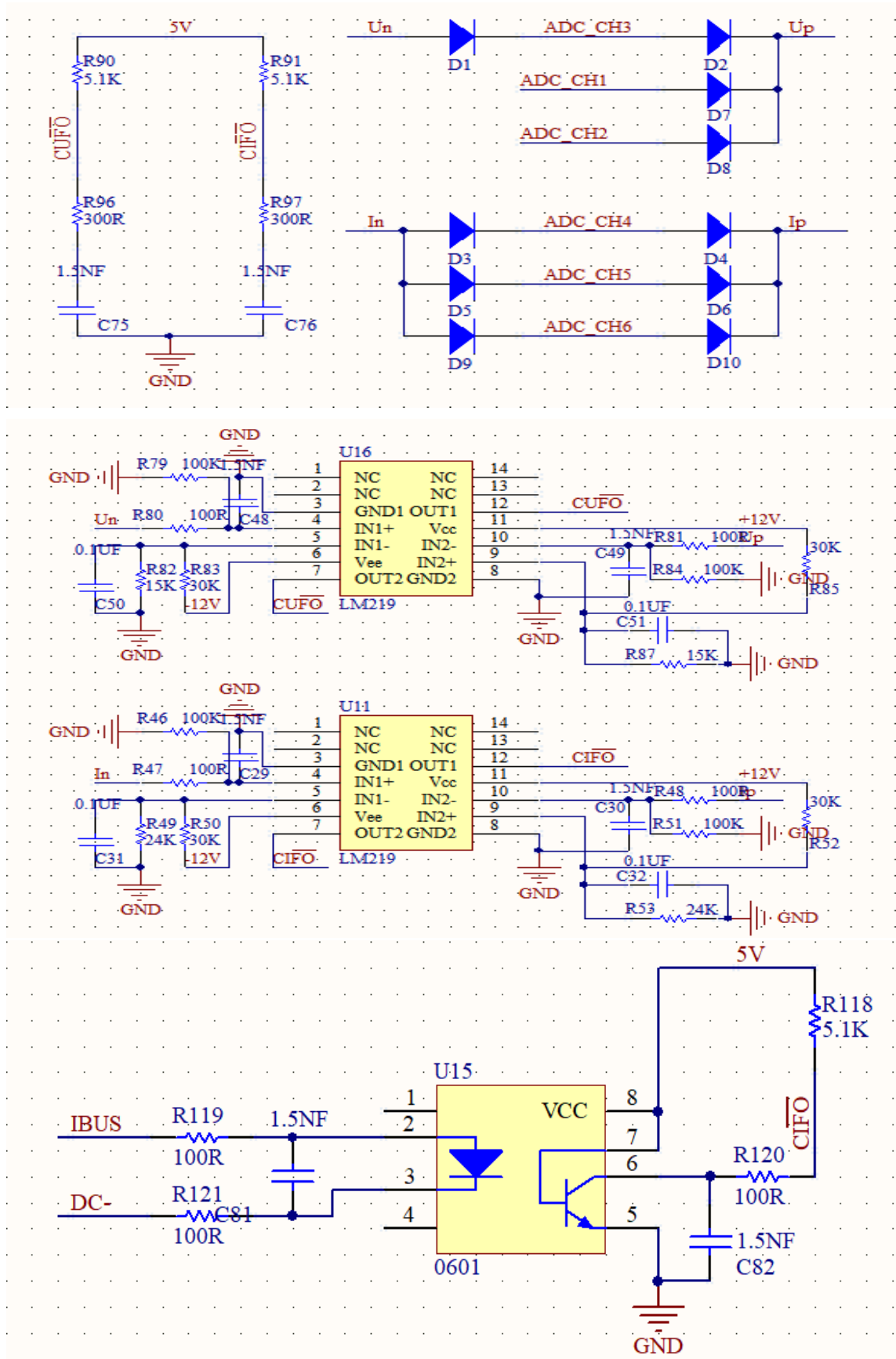


图 2.5.5 过压、过流保护电路

2.5.4 控制逻辑电路

板卡在工作时，逻辑电路可以实现对继电器的控制，可以控制 PWM 信号使能与失能，也可以在出现过压、过流、直通故障时进行自动硬件关闭 PWM 信号。

下图 2.5.6 为控制逻辑电路，触发器在有过压、过流及直通故障后对信号进行锁存，并点亮对应指示灯，信号通过与门芯片后实现板卡的逻辑控制，用来关闭继电器及 PWM 信号。当出现故障触发时，通过给锁存器时钟脚边沿信号可解除故障封锁。

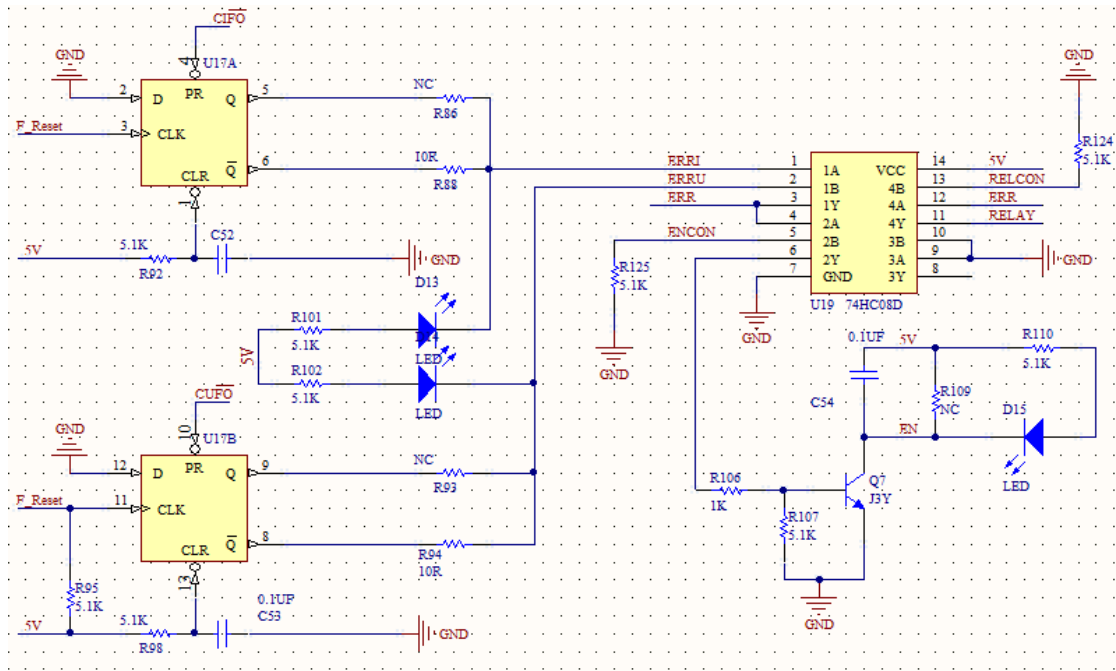


图 2.5.6 控制逻辑电路

2.5.5 驱动缓冲电路

在 EPWM 信号送达驱动芯片前，希望对 EPWM 信号通断进行控制，因此在 EPWM 信号后放置 74HC245 缓冲芯片，且能增强信号驱动能力，提高抗干扰性。其后端放置 74HC245 缓冲芯片使测试信号与驱动信号隔离，即使测量测试点信号时发生短路，也不会影响电路正常工作，提高板卡工作安全性。下图 2.5.7 为驱动缓冲电路。

2.5.6 功率变换电路

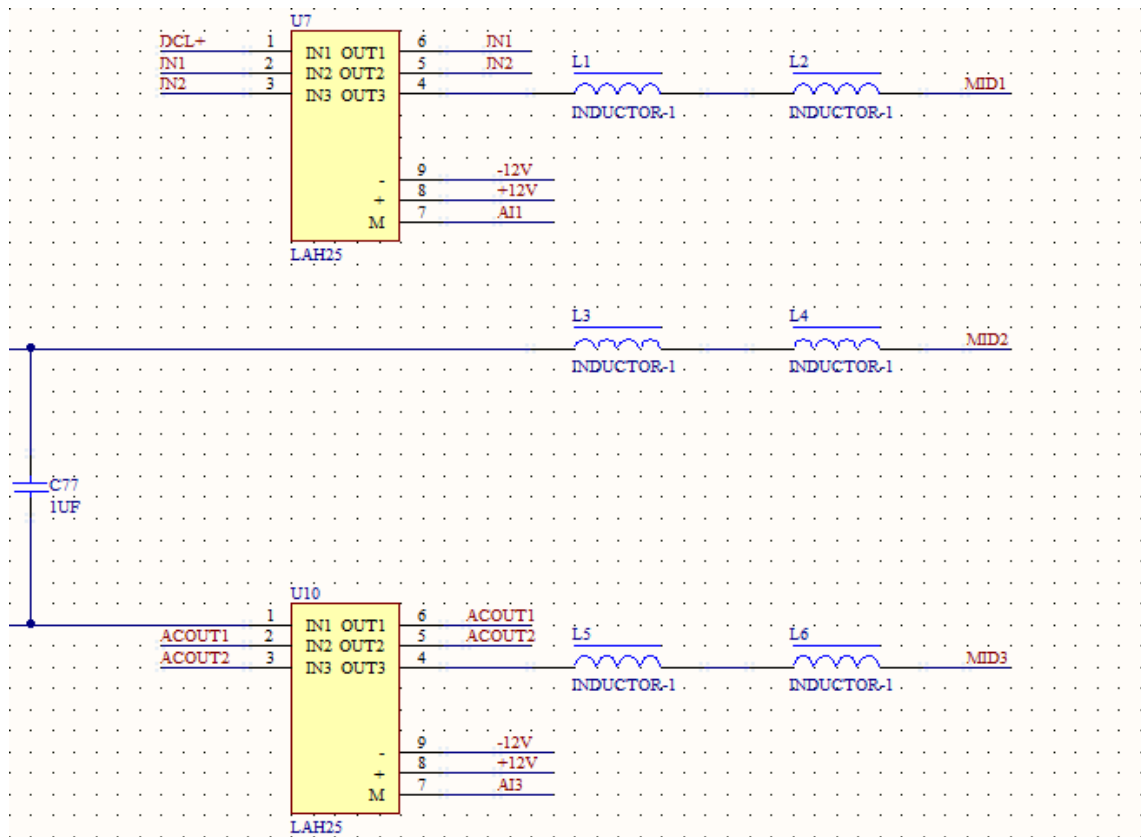


图 2.5.8 驱动电路

2.5.7 RCP 外接转换电路

图 2.5.9 为 RCP 接口电路，板卡信号通过 9001-1648 母座引出，EPWM1、EPWM2 为 DC/DC 驱动信号，EPWM3、EPWM4、EPW5、EPWM6 为 DC/AC 驱动信号，其余 EPWM 信号悬空不接。采集信号 ADC1 为直流低压电压采样，ADC2 为直流高压电压采样，ADC3 为交流电压采样，ADC4 为直流电感电流采样，ADC5 为直流高压电流采样，ADC6 为交流电感电流采样，其余采集接口悬空不接。F_Reset 为故障清除信号，RELCON 为继电器控制信号，ENCON 为 PWM 使能控制信号。

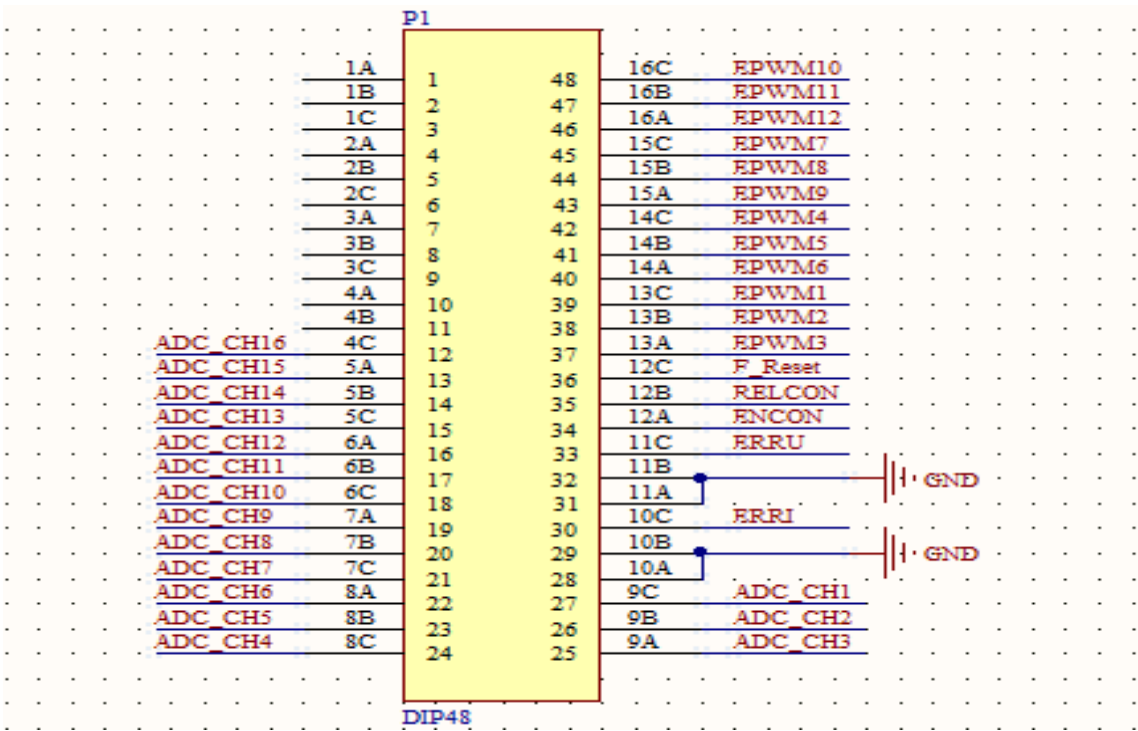


图 2.5.9 RCP 接口电路

2.5.8 接口分布

底板上面有多种接口电路，下图 2.5.10 为接口示意图：

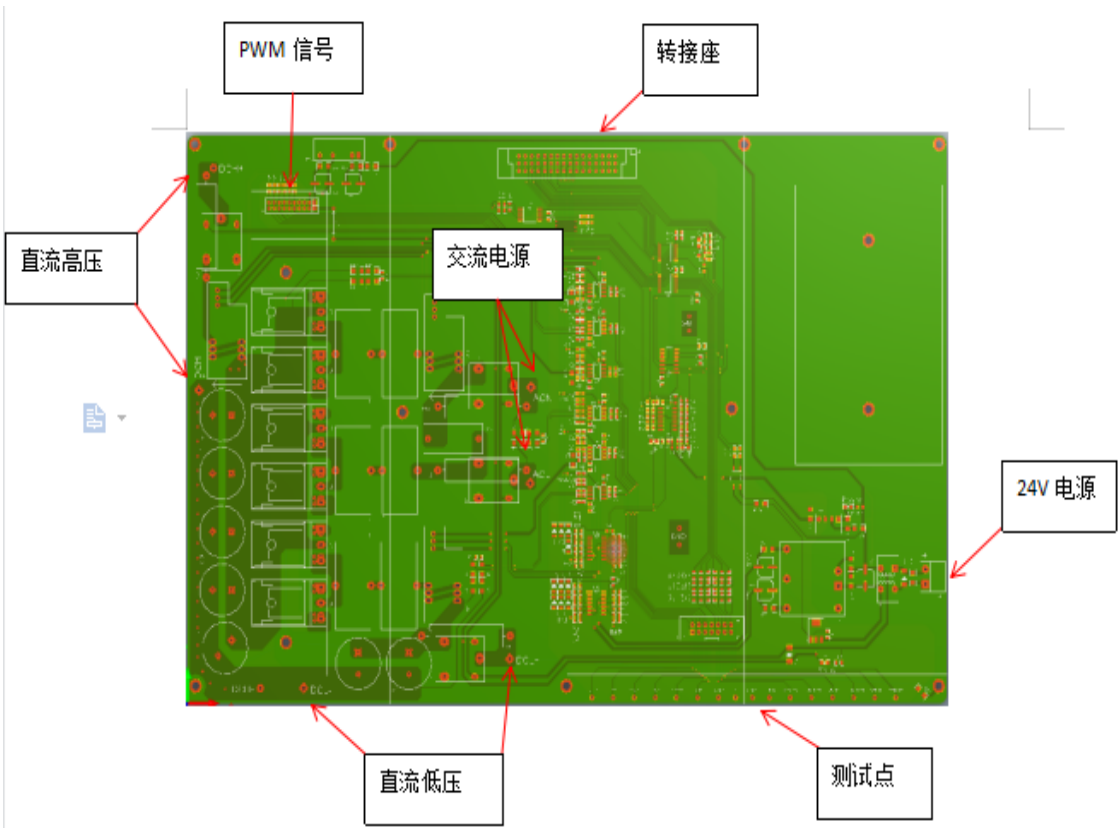


图 2.5.10 接口示意图

- 24V 电源：用于为采集板板卡供电，外部输入 24V；
- 测试点：用于示波器测试 PWM 波形与采集信号波形；
- PWM 信号：输出至驱动板的 PWM 信号；
- 转接座：用于连接 RCP 转接板；
- 直流低压：直流电源低压输入/出端；
- 直流高压：直流电源高压输入/出端；
- 交流电源：交流电源输入/出端。

2.6 信号转接板说明

信号转接板用于信号调理板与 RCP 控制器连接，P1、P2 为 DB25 座，与 RCP 控制器连接，P3 为 9001-1548 弯角公座，与信号调理板连接。EPWM1、EPWM2 为 DC/DC 驱动信号，EPWM3、EPWM4、EPW5、EPWM6 为 DC/AC 驱动信号，信号高电平有效。采集信号 VDCLAD 为直流低压电压采样，VDCHAD 为直流高压电压采样，VACAD 为交流电压采样，IDCLAD 为直流电感电流采样，IDCHAD 为直流高压电流采样，IACAD 为交流电感电流采样。F_Reast 为故障清除信号，RELCON 为继电器控制信号，ENCON 为 PWM 使能控制信号。下图 2.6.1 为信号转接板电路。

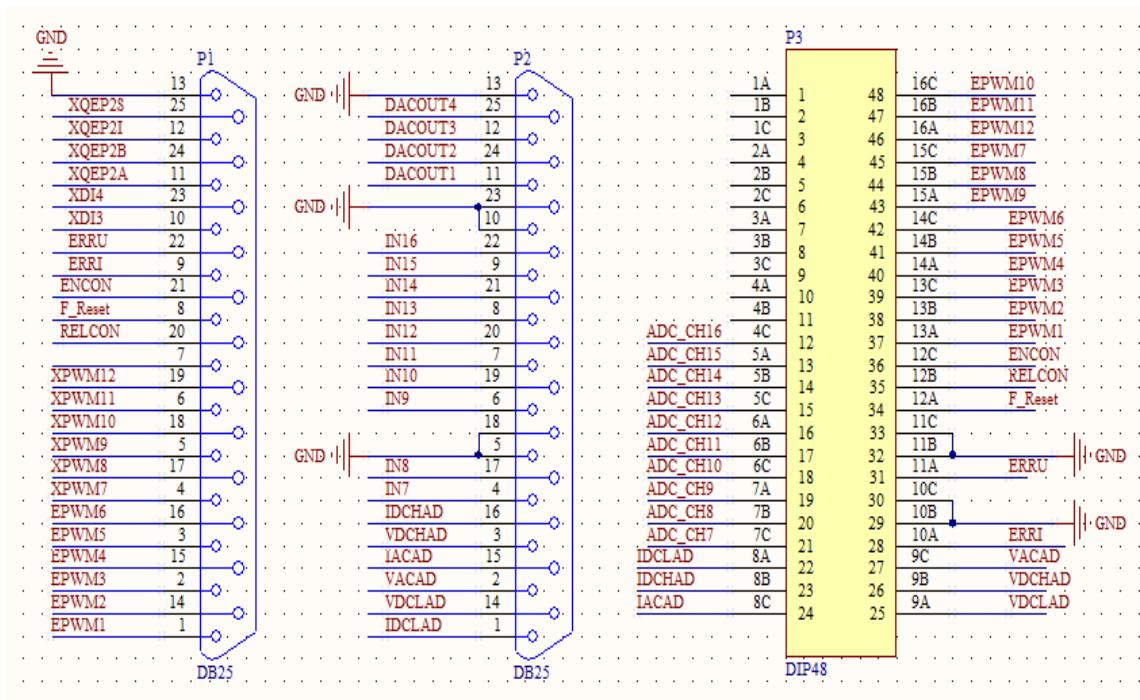


图 2.6.1 信号转接板电路

2.7 驱动板说明

板卡驱动电路共有 6 路，其中两路用于驱动双向 DC/DC，另外四路用于驱动整流、逆变部分开关管。驱动芯片使用 FD6288，可单芯片驱动 6 路 MOS 管。芯片供电通过二极管与供电电源隔开，可在驱动电路出现损坏时不波及到电源电路，电路上管供电由自举电路产生。MOS 开通信号由 FD6288 通过限流电阻后直接接入 MOS 管，关断信号通过外部三级管实现，已降低驱动芯片功耗。下图 2.7.1 为驱动部分电路。

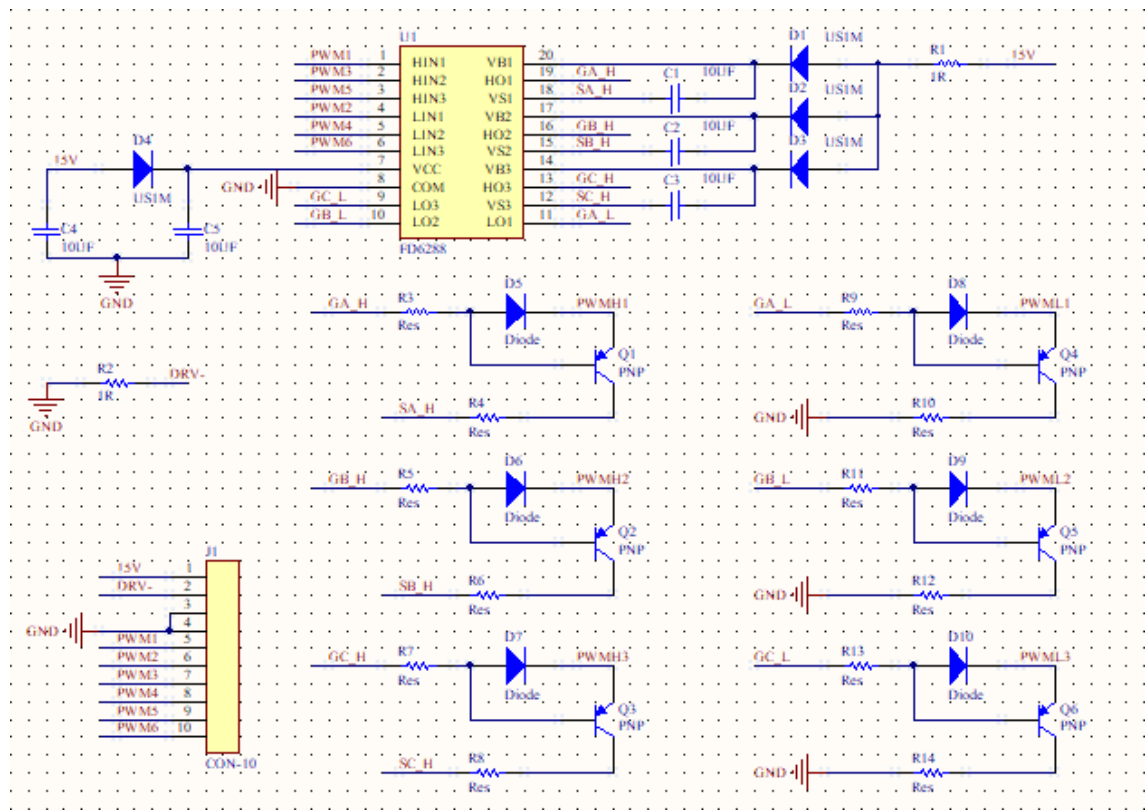


图 2.7.1 驱动电路

三、基础实验篇

实验一 PWM、SPWM 调制原理及 Simulink 实现

PWM（Pulse Width Modulation）控制就是对脉冲的宽度进行调制的技术，即通过对一系列脉冲的宽度进行调制，来等效地获得所需要波形（含形状和幅值）。脉冲宽度调制是一种模拟控制方式，其根据相应载荷的变化来调制晶体管基极或 MOS 管栅极的偏置，来实现晶体管或 MOS 管导通时间的改变，从而实现开关稳压电源输出的改变。这

种方式能使电源的输出电压在工作条件变化时保持恒定，是利用微处理器的数字信号对模拟电路进行控制的一种非常有效的技术。

PWM 控制技术以其控制简单，灵活和动态响应好的优点而成为电力电子技术最广泛应用的控制方式，也是人们研究的热点。由于当今科学技术的发展已经没有了学科之间的界限，结合现代控制理论思想或实现无谐振波开关技术将会成为 PWM 控制技术发展的主要方向之一。

在采样控制理论中有一个重要的结论：冲量相等而形状不同的窄脉宽加在具有惯性的环节上时，其效果基本相同。冲量即指窄脉冲的面积。这里所说的效果基本相同，是指环节的输出响应波形基本相同。如果把各输出波形用傅里叶变换分析，则其低频段非常接近，仅在高频段略有差异。如图 3.1.1 a、b、c、d 所示的脉冲作为输入，加在图 3.1.2 a 所示的 R-L 电路上，设其电流 $i(t)$ 为电路的输出，图 3.1.2 b 给出了不同窄脉冲时 $i(t)$ 的响应波形。

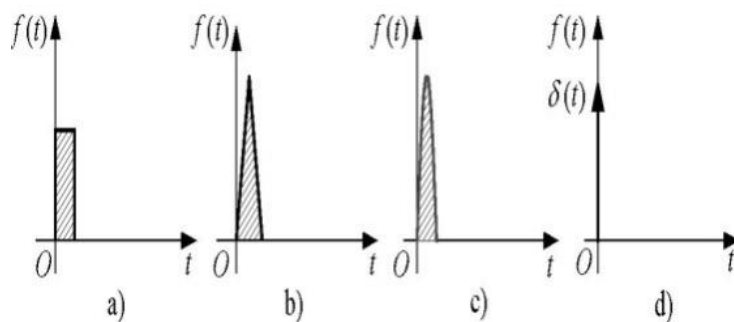


图 3.1.1 形状不同而面积相同的各类窄脉冲

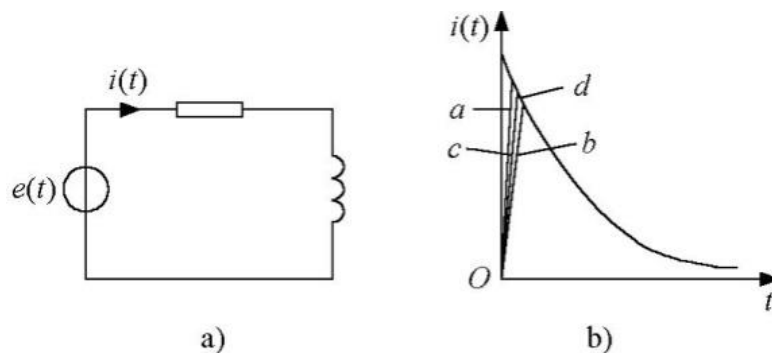


图 3.1.2 冲量相同的各种窄脉冲的响应波形

从波形可以看出，在 $i(t)$ 的上升段，脉冲形状不同时， $i(t)$ 的波形也略有不同，但其下降段几乎完全相同。脉冲越窄，各 $i(t)$ 形状的差异也越小。如果周期性的施加上述脉冲，则相应 $i(t)$ 也是周期性的。

基于以上理论基础，接下来分析如何用一系列等幅不等宽的脉冲来代替一个正弦半

波。

如图 3.1.3，将正弦半波看成是由 N 个彼此相连的脉冲序列所组成的波形，波形宽度为 π/N ，但幅值不等，且脉冲顶部不是水平直线，而是曲线，各脉冲的幅值按照正弦规律变化。如果把上述脉冲序列利用相同数量的等幅而不等宽的矩形脉冲代替，使矩形脉冲的中点和相应正弦波部分的中点重合，且使矩形脉冲和相应的正弦波部分面积（冲量）相等，这就是 PWM 波形。可以看出，各脉冲的幅值相等，而宽度是按照正弦规律变化的。根据面积等效原理，PWM 波形和正弦半波是等效的。对于正弦波的负半周，也可以用同样的方法得到 PWM 波形。像这种脉冲的宽度按正弦规律变化而和正弦波等效的 PWM 波形，也称 SPWM（Sinusoidal PWM）波形。

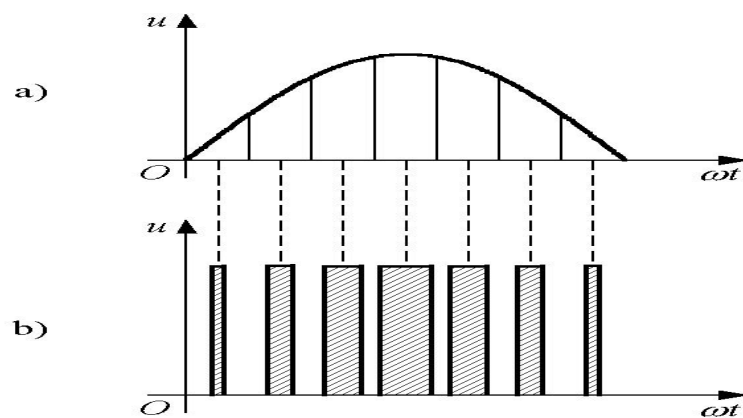


图 3.1.3 用 PWM 波代替正弦半波

PWM 控制的基本原理很早就已经提出，但是受电力电子器件发展水平的制约，在上世纪 80 年代以前一直未能实现。直到进入上世纪 80 年代，随着全控型电力电子器件的出现和迅速发展，PWM 控制技术才真正得到应用。随着电力电子技术，微电子技术和自动控制技术的发展以及各种新的理论方法，如现代控制理论，非线性系统控制思想的应用，PWM 控制技术获得了空前的发展。到目前为止，已出现了多种 PWM 控制技术。

为了提高控制设计的效率，通常首先采用 Matlab/simulink 软件对所要控制的对象进行仿真分析。采用 PWM 信号控制的系统，也需要在控制软件中生成相应的 PWM 仿真波形。但是在 Simulink 中仅仅有 PWM 信号发生器，其只能生成固定占空比的 PWM 信号。而在实际控制中，PWM 信号一般是变占空比的，因此在系统仿真过程中会遇到变占空比 PWM 信号生成问题。

PWM 控制技术可以通过多种方式实现，其中硬件调制法适合在 Simulink 中建立可调占空比的 PWM 模块。硬件调制法原理是把希望的波形作为调制信号，把接受调制的信号作为载波。为了实现周期性的 PWM 信号，载波通常选用锯齿波或者等腰三角形。

在生成 PWM 信号时，将调制信号与载波的大小进行比较，当载波信号值小于调制信号值时，其结果为 1，否则为 0，其原理如图 3.1.4 所示。

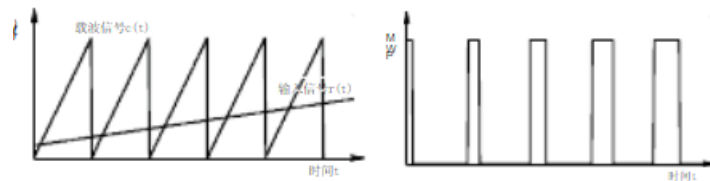


图 3.1.4 PWM 产生原理

了解这个方法后，在 Simulink 中就很容易实现了，下面就是在 Simulink 中搭建的 PWM 生成模型。

离线模型操作

实验操作步骤(例程名称为 PWM.mdl):

第一步：双击打开 VIEW1000 软件，如下图 3.1.5 所示图标：



图 3.1.5 VIEW1000 软件

第二步：在软件中切换至“工作区”界面，然后在工具栏中单击“实验”，并选择实验一，如下图 3.1.6 所示：



图 3.1.6 实验选择

首先软件界面会切换到实验一中已搭建好的操作界面，由于实验一没有在线模型，所以界面呈现的是初始状态下的界面，图 3.1.7 所示上位机初始界面；

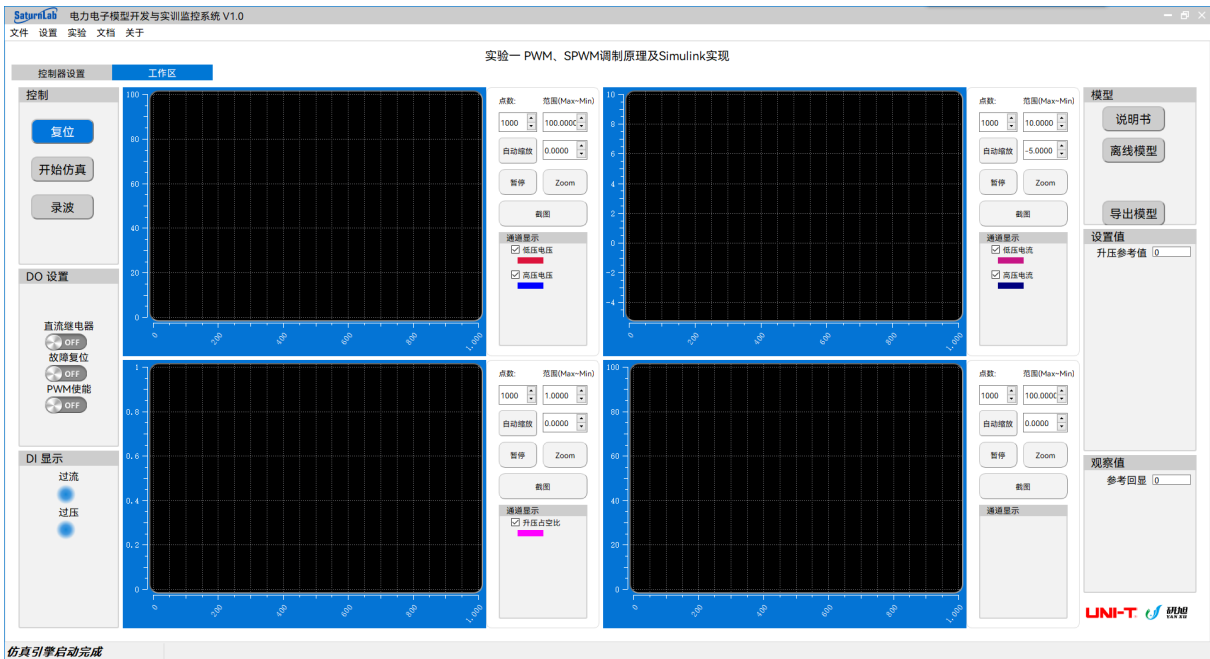


图 3.1.7 实验一软件界面

第三步：在“工作区”界面的右上角“模型”框中点击“离线模型”，如图 3.1.8 所示；

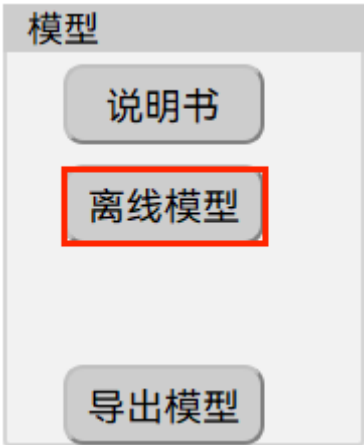


图 3.1.8 打开离线模型

选择“PWM.mdl”，如下图 3.1.9 所示：



图 3.1.9 选择离线模型

然后等待 Matlab 软件打开，并打开已搭建好模型 “PWM.mdl”，模型打开后如图 3.1.10 所示：

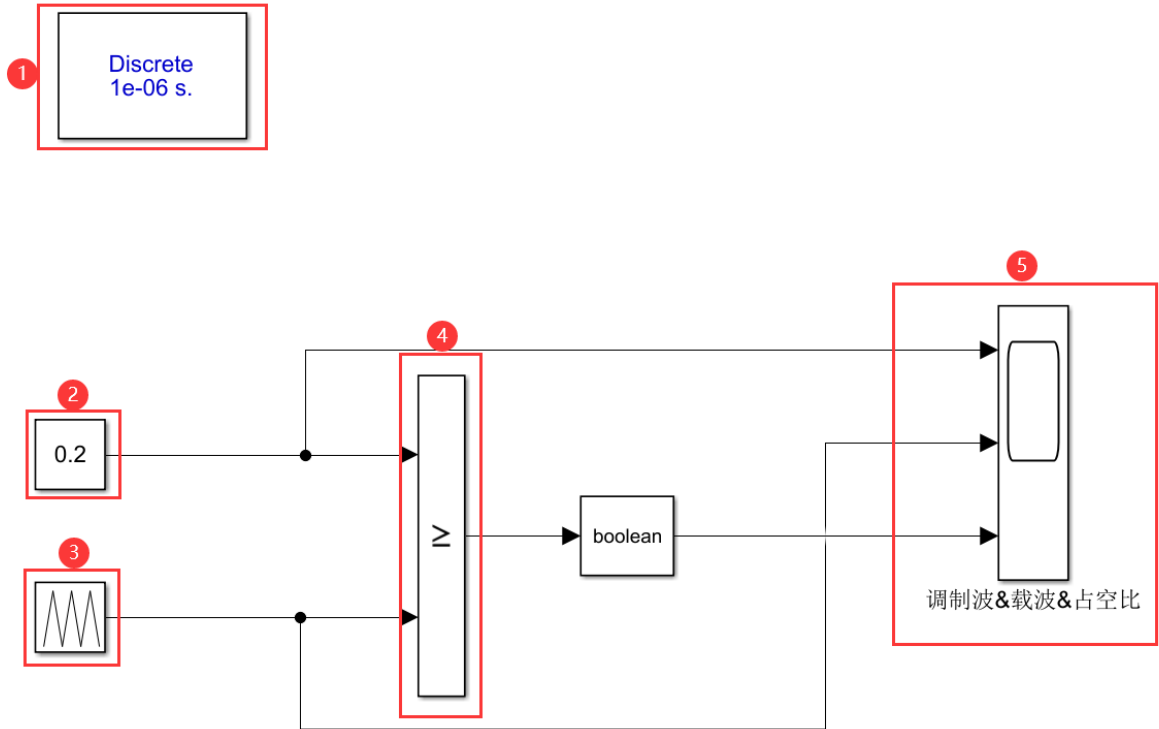


图 3.1.10 PWM 产生实例

图中红色标注：

标注 1：Simscape 电力系统专用技术模型的环境块，设置界面如图 3.1.11 所示：

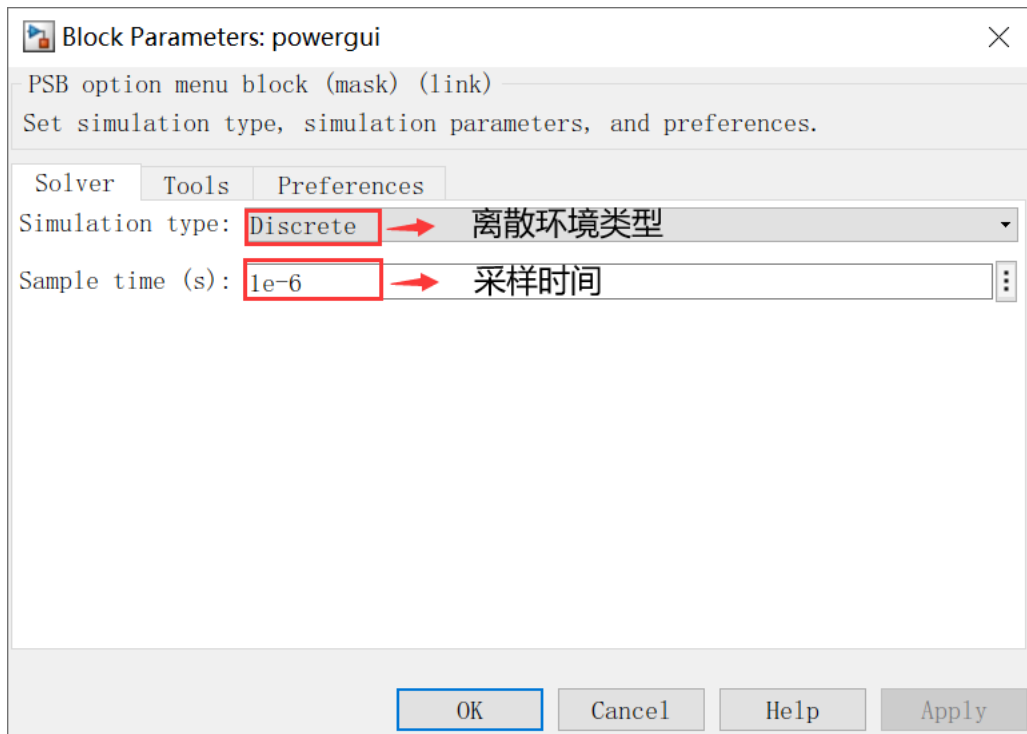


图 3.1.11 环境块设置界面

标注 2: 调制波设置如图 3.1.12 所示: 幅值需要设置为 0.2, 即 PWM 波的占空比为 0.2;

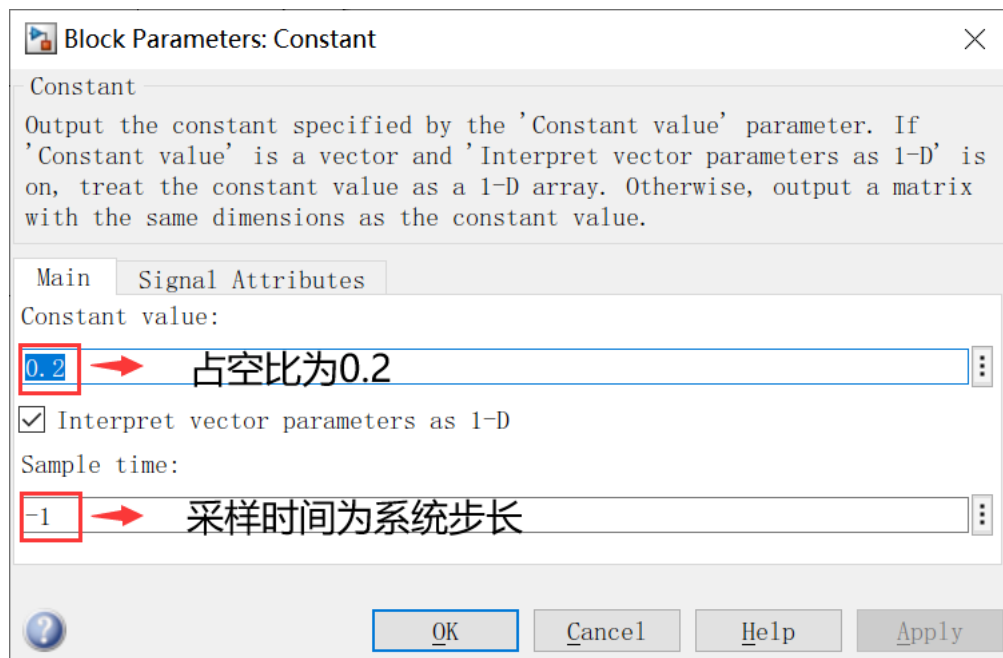


图 3.1.12 正弦波信号发生器模块设置图

标注 3: 10KHz 的载波如图 3.1.13 所示: 周期值设置 0 0.0001/2 0.0001, 表示锯齿波的周期时间为 0.0001, 频率值也就是 10KHz。幅值设置 0-1 表示从 0 渐变至 1。

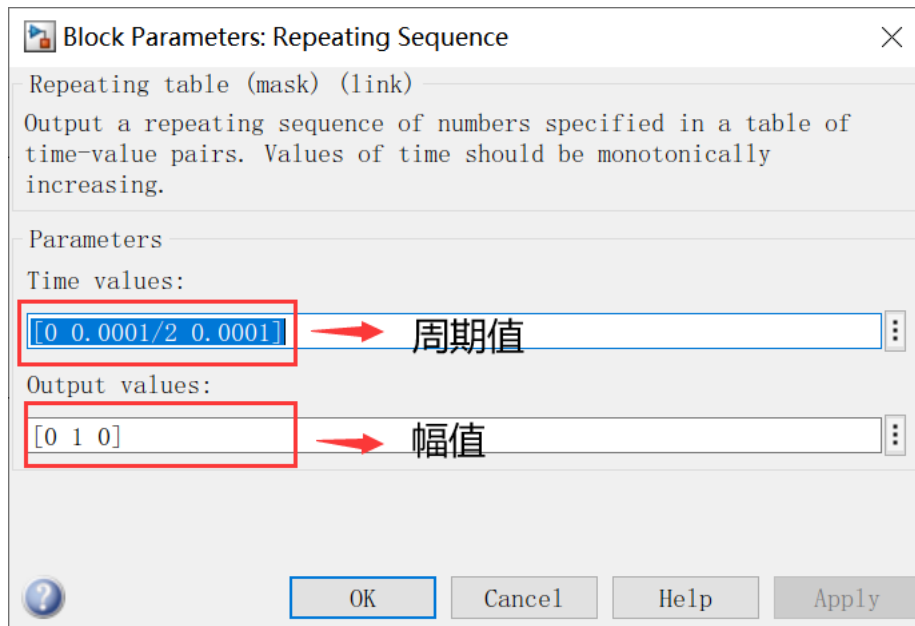


图 3.1.13 锯齿波信号发生器模块设置图

标注 4: 将两个信号进行比较后输出 Boolean 量, 即为 PWM 波。

标注 5: 示波器模块, 将调制波、载波及 PWM 信号放到同一个示波器控件上面查看, 模型运行之后如图 3.1.14 所示。图中调制波为定值 0.2, 即 PWM 占空比为定值 0.2, 10KHz 的载波决定 PWM 的频率, PWM 频率和载波频率相同, 然后调制波和载波进行比较, 当载波幅值大于调制波时, PWM 输出低, 反之则为高。

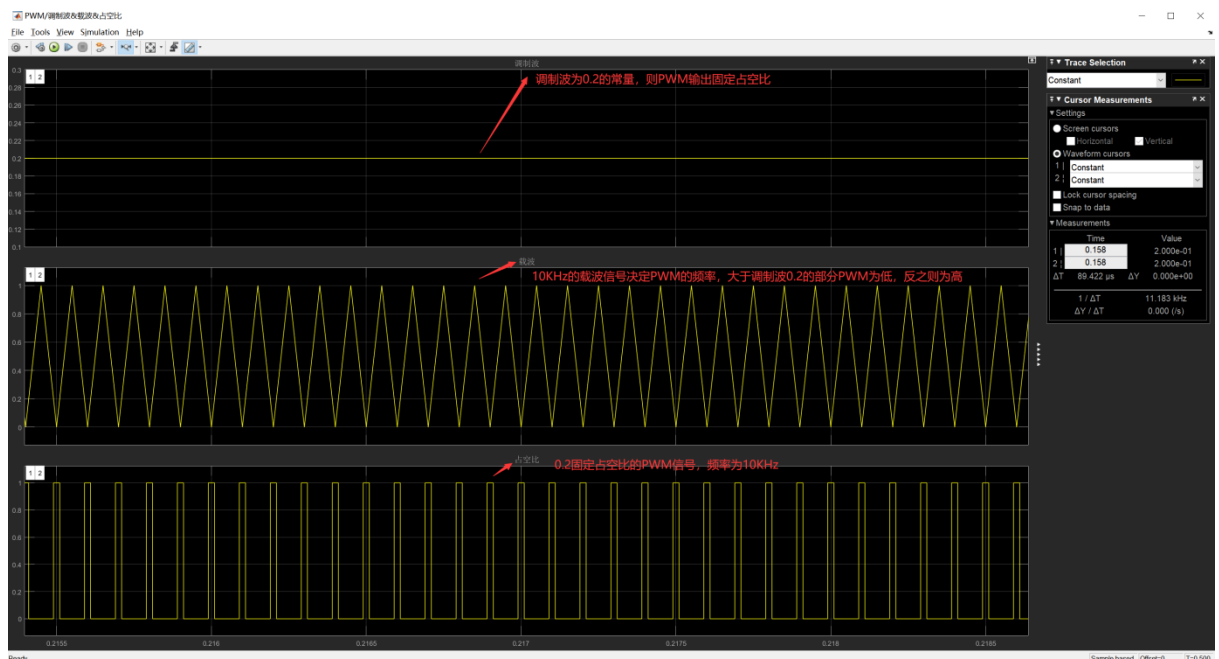


图 3.1.14 PWM 产生图

下面介绍下 SPWM 调制技术。

所谓 SPWM 就是在 PWM 的基础上改变了调制脉冲方式, 脉冲宽度时间占空比按正

弦规律排列，这样输出波形经过适当的滤波可以做到正弦波输出。

SPWM 的基本原理为将一个正弦信号作为基准调制波，与一个载波进行比较，得到一个等距、等幅但宽度不同的脉冲序列。脉冲系列的占空比按正弦规律来安排。当正弦值为最大值时，脉冲的宽度也最大，而脉冲间的间隔则最小；反之当正弦值较小时，脉冲的宽度也小，而脉冲间的间隔则较大，这就是 SPWM 脉冲。

SPWM(Sinusoidal PWM)法是一种比较成熟的，目前使用较广泛的 PWM 法。

目前应用广泛的调制方法分成单极性调制和双极性调制，接下来分析这两种方法的实现。图 3.1.15 为采用 IGBT 作为开关器件的单相桥式电压型逆变电路，设负载为阻感性负载。

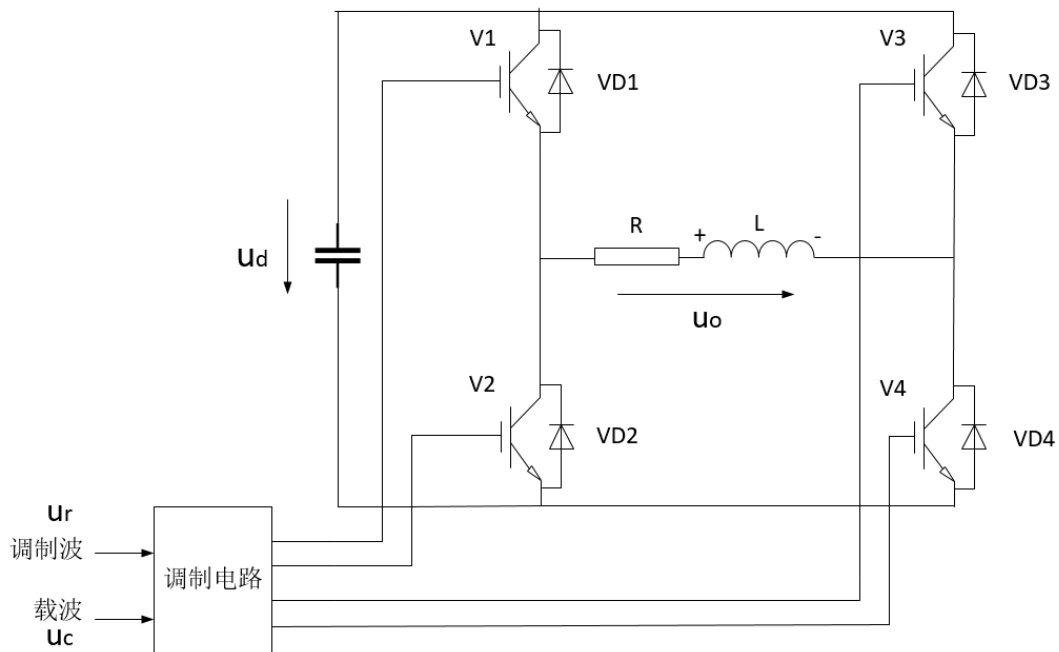


图 3.1.15 单相全桥逆变电路

工作时 $V1$ 和 $V2$ 的通断控制为互补对称， $V3$ 和 $V4$ 的通断控制为互补对称。具体的控制规律如下：在输出电压 u_o 的正半周，让 $V1$ 保持通态， $V2$ 保持关断， $V3$ 和 $V4$ 交替通断。由于电路中存在感性负载，多以负载电流比电压滞后，因此在电压正半周，电流有一段区间为正，一段区间为负。在负载电流为正的区间， $V1$ 和 $V4$ 导通时，负载电压 u_o 等于直流电压 u_d ； $V4$ 关断时，负载电流经过 $V1$ 和 $VD3$ 续流， u_o 为 0。在负载电流为负的区间，仍为 $V1$ 和 $V4$ 导通时，电流实际上从 $VD1$ 和 $VD4$ 流过，仍有 $u_o = u_d$ ； $V4$ 关断， $V3$ 开通后，电流从 $V3$ 和 $VD1$ 续流， u_o 为 0。这样，负载电压 u_o 可以得到 u_d 和 0 两

种电平。同样，在 u_o 的负半周，让 V2 保持通态，V1 保持断态，V3 和 V4 交替通断，负载电压 u_o 可以得到 $-u_d$ 和 0 两种电平。

控制 V3 和 V4 通断的方法如图 3.1.16 所示，调制信号 u_r 为正弦波，载波 u_c 在 u_r 的正半周为正极性三角波，在 u_r 的负半周为负极性的三角波。在 u_r 和 u_c 的交点时刻控制 IGBT 的通断。在 u_r 的正半周，V1 保持通态，V2 保持断态，当 u_r 大于 u_c 时使 V4 导通，V3 关断， $u_o=u_d$ ；当 u_r 小于 u_c 时使 V4 关断，V3 导通， $u_o=0$ 。在 u_r 的负半周，V1 保持断态，V2 保持通态，当 u_r 小于 u_c 时使 V3 导通，V4 关断， $u_o=-u_d$ ；当 u_r 大于 u_c 时使 V3 关断，V4 导通， $u_o=0$ 。这样就得到了 SPWM 波形 u_o 。图中虚线 u_{of} 表示 u_o 中的基波分量。像这种在 u_r 的半个周期内三角波载波只有正极性或者负极性一种极性范围内变化，所得到的 PWM 波形也只在单个极性范围变化的控制方式称作单极性 PWM 调制。

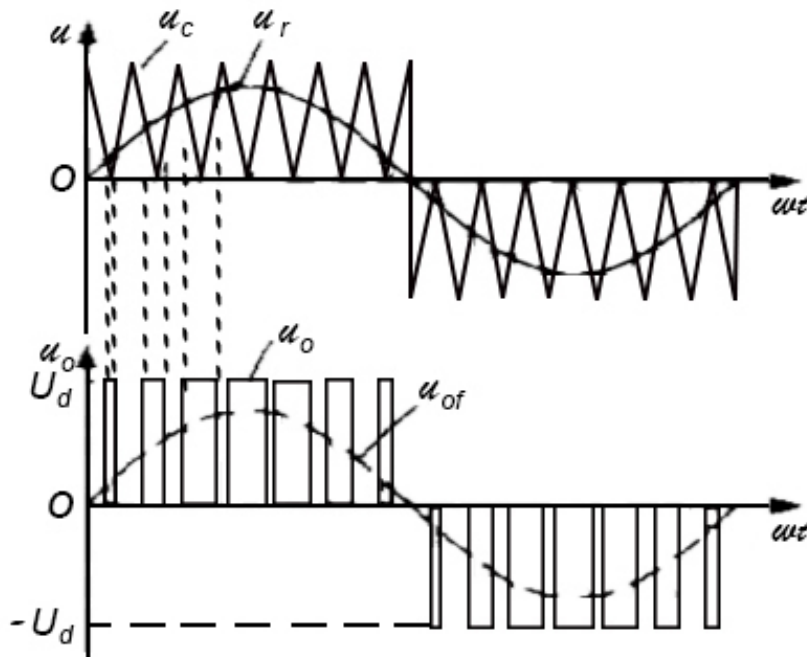


图 3.1.16 单极性 PWM 调制

和单极性 PWM 调制方式对应的是双极性 PWM 调制方式。图 3.1.17 为单相桥式逆变电路在采用双极性控制方式时的波形。采用双极性方式时，在 u_r 的半个周期内三角波载波不再时单极性的，而实有正有负，所得到的 PWM 波也是有正有负。在 u_r 的一个周期内，输出的 PWM 波只 $\pm u_d$ 两种电平，而不像单极性控制时还有零电平。

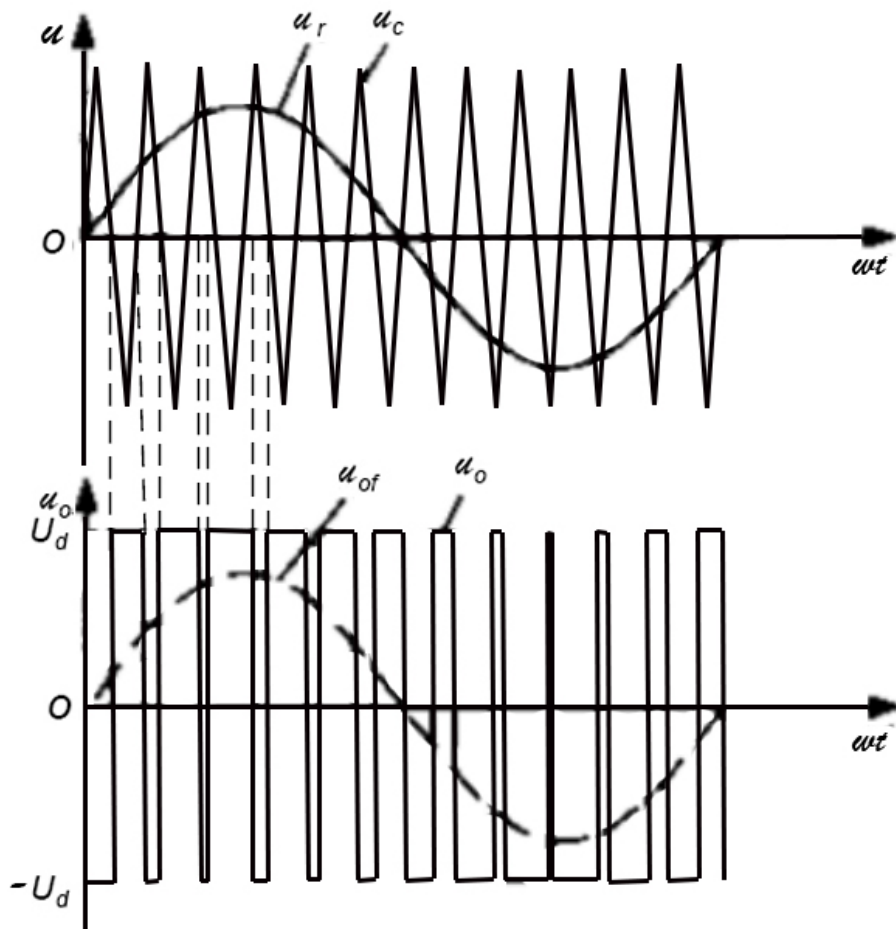


图 3.1.17 双极性 PWM 调制

由此可见，单相桥式电路既可以采取单极性调制，也可以采用双极性调制，由于对开关器件通断控制的规律不同，他们输出的波形也有较大的区别。

前面已经介绍了 SPWM 调制原理，那么接下来将会介绍 SPWM 在 Simulink 中如何实现。下面以双极性调制方式为例。

离线模型操作

实验操作步骤(例程名称为 DoubleLimitSPWM.mdl):

第一步：双击打开 VIEW1000 软件，如下图 3.1.18 所示图标；



图 3.1.18 VIEW1000 软件

第二步：在软件中切换至“工作区”界面，然后在工具栏中单击“实验”，并选择

实验一，如下图 3.1.19 所示；

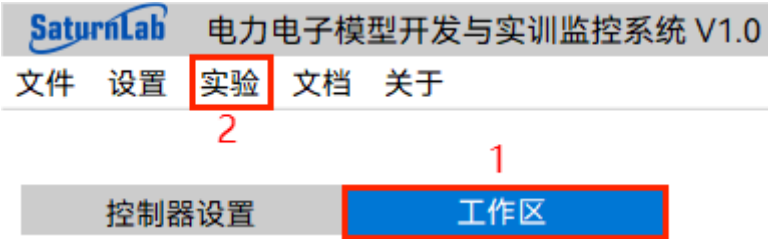


图 3.1.19 实验选择

首先软件界面会切换到实验一中已搭建好的操作界面，由于实验一没有在线模型，所以界面呈现的是初始状态下的界面，图 3.1.20 所示上位机初始界面；

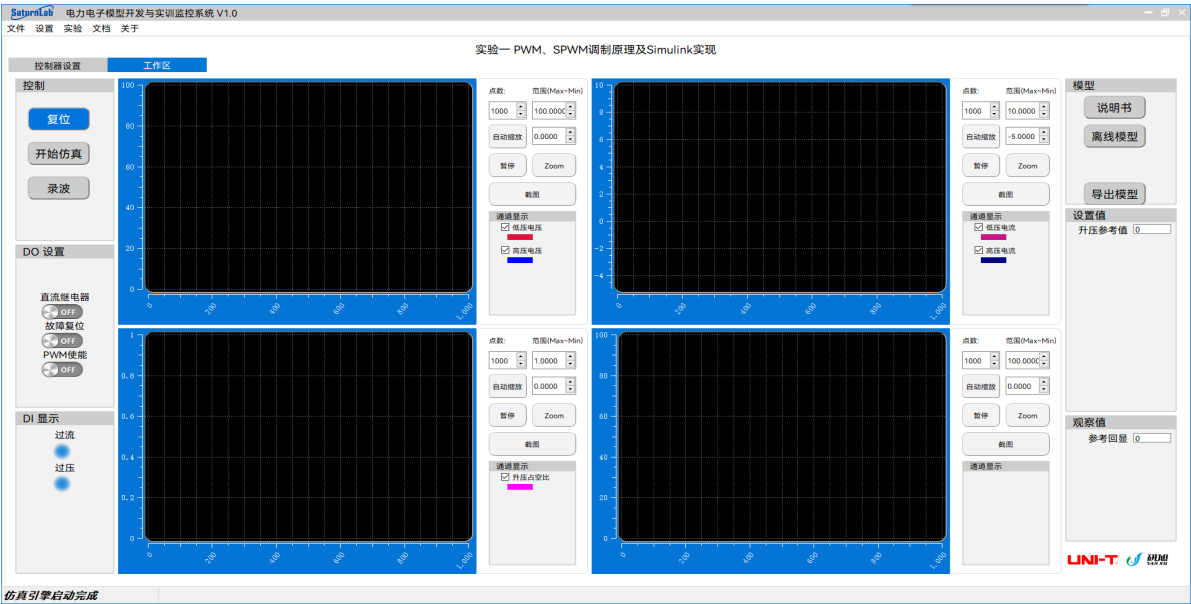


图 3.1.20 上位机软件初始界面

第三步：在“工作区”界面的右上角“模型”框中点击“离线模型”，如图 3.1.21 所示；



图 3.1.21 打开离线模型

选择“DoubelLimitSPWM.mdl”，如下图 3.1.22 所示：

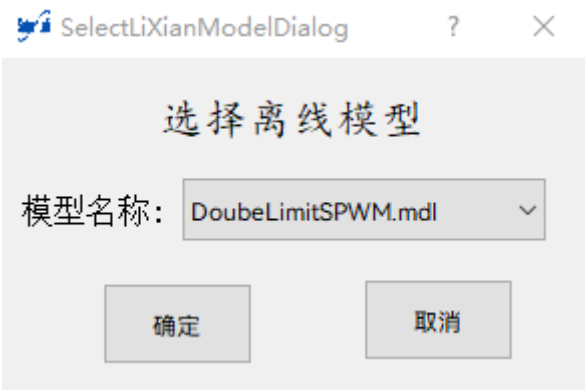


图 3.1.22 选择离线模型

然后等待 Matlab 软件打开，并打开已搭建好模型“DoubelLimitSPWM.mdl”，模型打开后如图 3.1.23 所示：

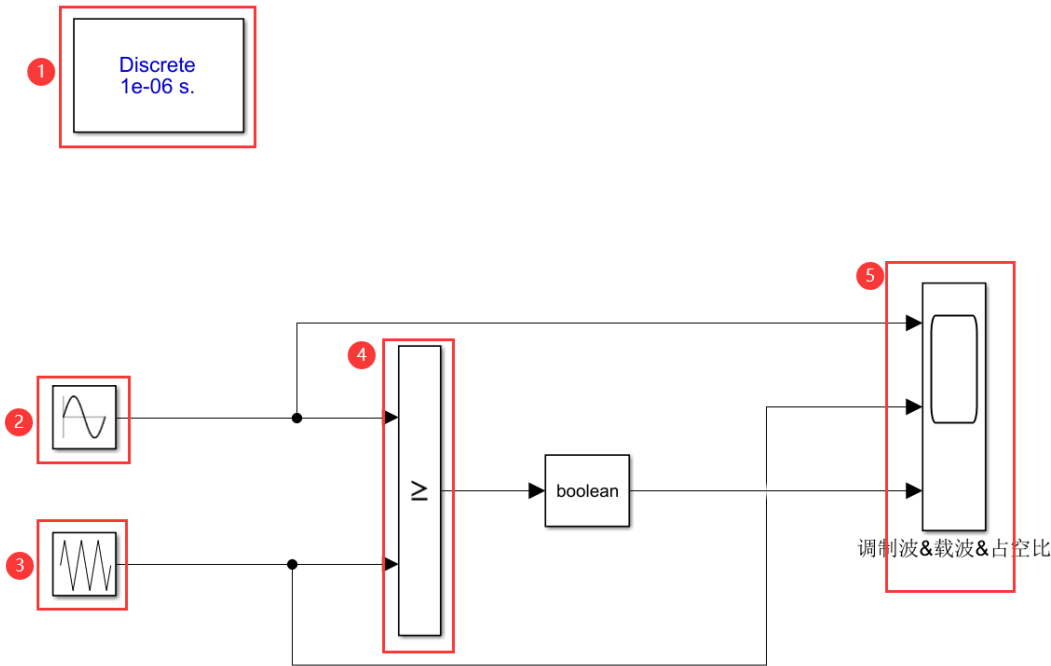


图 3.1.23 双极性 SPWM 生成

图中红色序号标注：

标注 1：Simscape 电力系统专用技术模型的环境块，设置界面如图 3.1.24 所示；

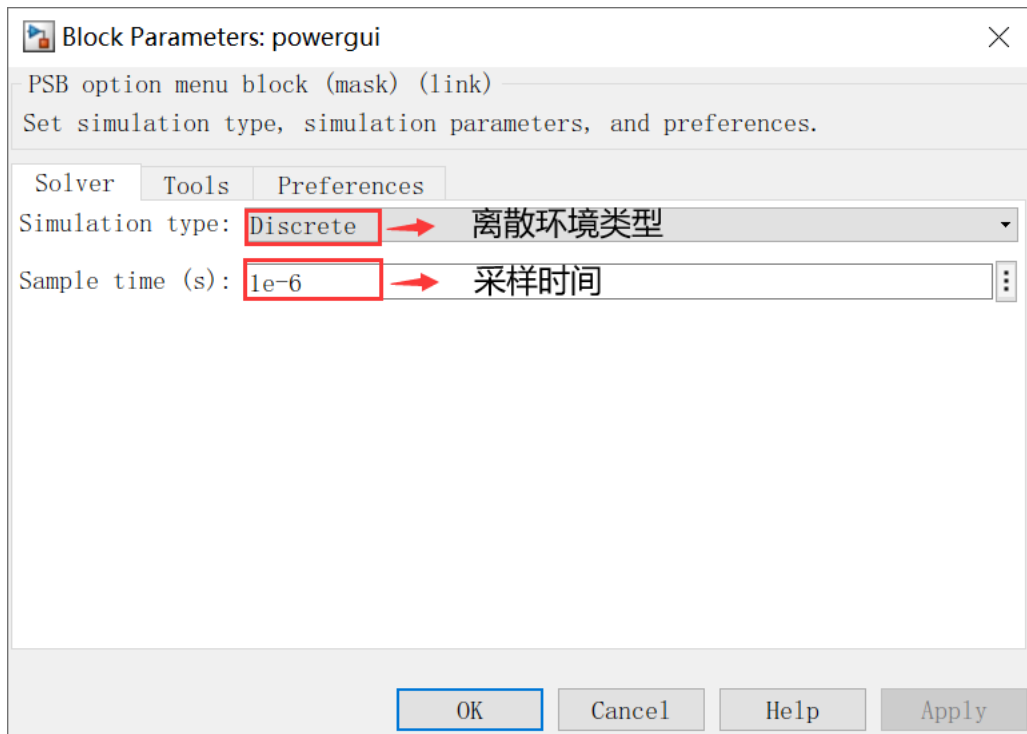


图 3.1.24 环境块设置界面

标注 2: 调制波模块, 采用正弦波生成器, 其设置参数如图 3.1.25 所示;

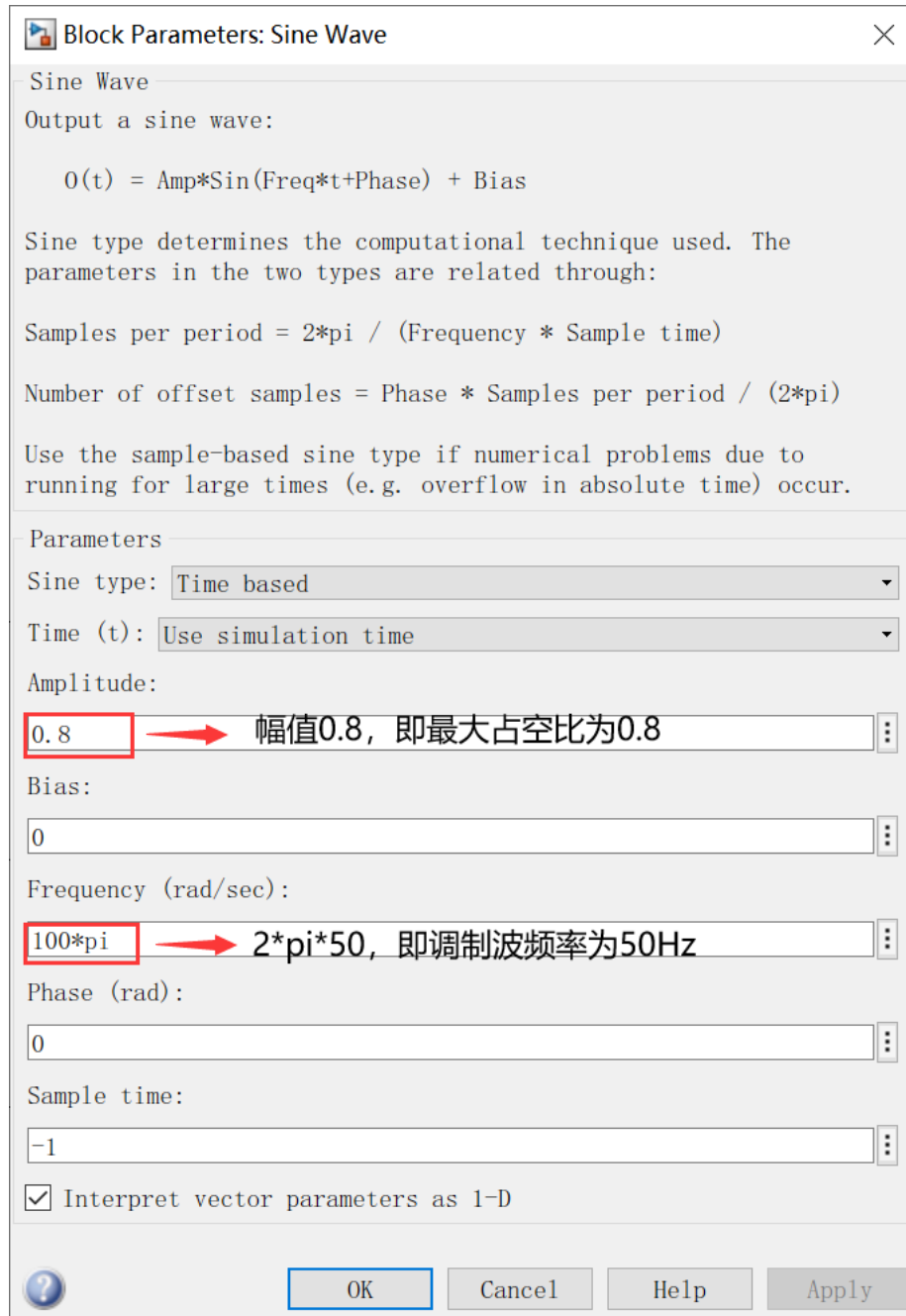


图 3.1.25 调制波设置参数界面

Amplitude 表示幅值，此处设置 0.8。由于载波幅值为 1，所以此值决定了 PWM 输出的最大占空比值，即为 0.8。Bias 表示偏置，此处设置 0 即可。Frequency 表示频率，设置 100π ，即 $2\pi \times 50$ ，表示频率为 50Hz。其他默认设置即可。

标注 3：双极性三角波载波，其设置参数如图 3.1.26 所示：

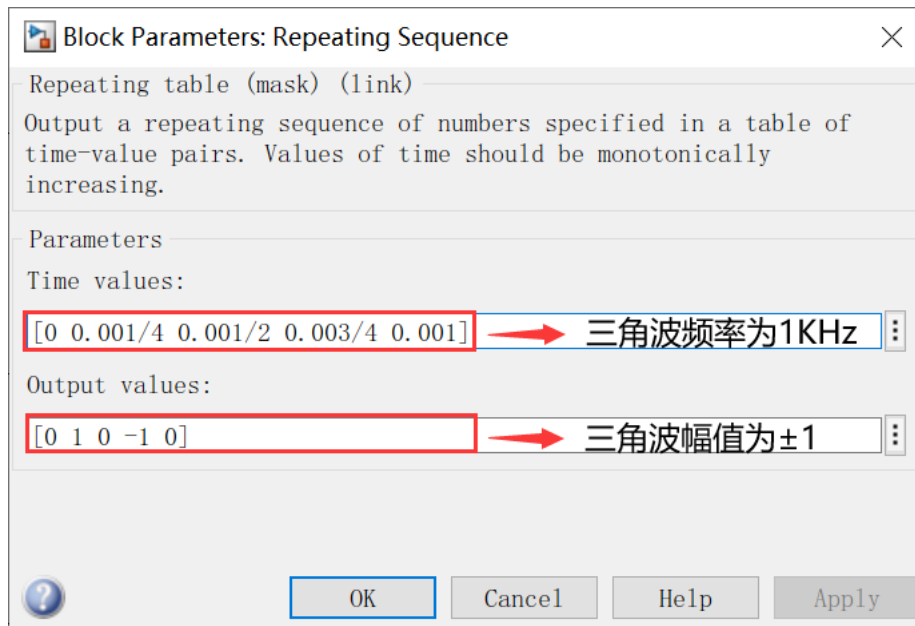


图 3.1.26 载波设置参数界面

Time values 设置[0 0.001/4 0.001/2 0.003/4 0.001]表示三角波对应的 5 个值的时刻，0 表示 0 时刻，0.001/4 表示 0.001 的 1/4 时刻，0.001/2 表示 0.001 的 1/2 时刻，0.003/4 表示 0.001 的 3/4 时刻，最后就是 0.001 时刻。其中 0.001 就是 1KHz 的倒数；Output values 为 5 个时刻的对应幅值；

标注 4：比较器，当正弦波值大于等于三角波值时，输出为 1，否则输出为 0；

标注 5：示波器模块，运行后显示调制波，三角波和 PWM 信号。

图 3.1.27 为仿真结果波形图。

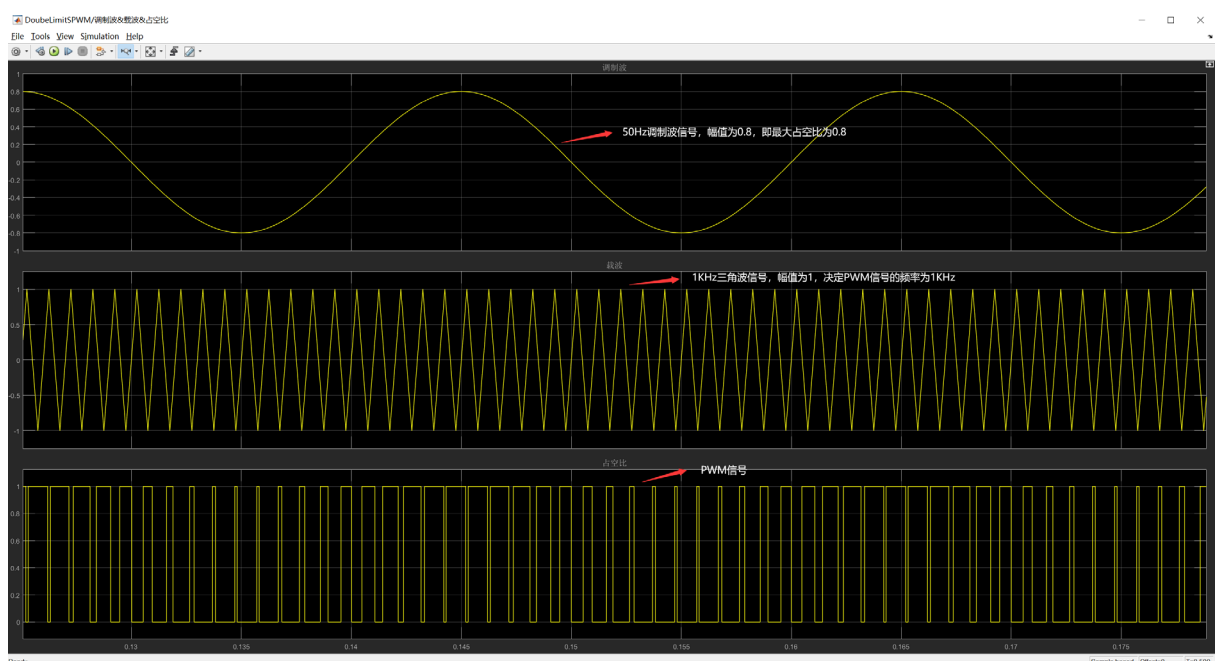


图 3.1.27 调制波、载波及 PWM 信号

可以尝试修改调制波的幅值，以及载波的频率查看仿真结果，继进行对比，从而更加深刻理解其原理。

实验二 Boost 升压 DC-DC 直流-直流变换实验

直流斩波电路（DC Chopper）的功能是将直流电变为另一固定电压或者可调电压的直流电，也称作直流-直流变换器（DC/DC Converter）。直流斩波电路的种类很多，包括 6 种基本斩波电路：降压斩波电路、升压斩波电路、升降压斩波电路、Cuk 斩波电路、Sepic 斩波电路和 Zeta 斩波电路，其中前两种是最基本的电路。利用不同的基本斩波电路进行组合，可以构成复杂斩波电路。

升压斩波电路（Boost Chopper）的原理图如图 3.2.1 所示：

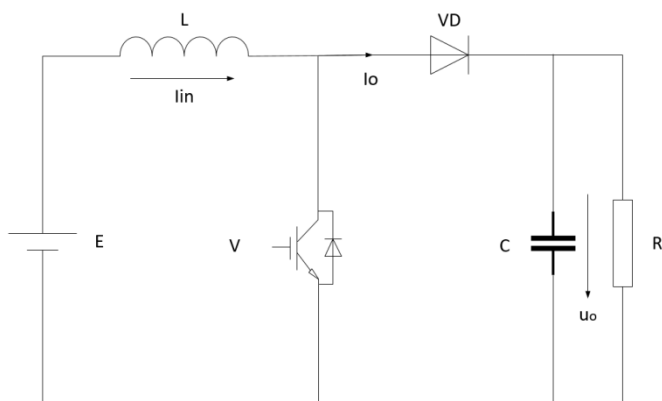


图 3.2.1 Boost 拓扑图

分析升压斩波电路的工作原理时，首先假设电路中电感 L 值很大，电容 C 值也很大。

当 V 处于通态时：电路可以等效图 3.2.2 所示：

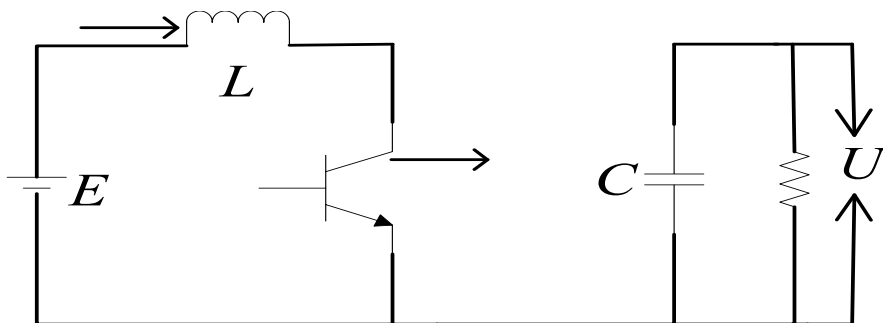


图 3.2.2 Boost 开关通态等效图

电源 E 向电感 L 充电，充电电流基本恒定为 I ，同时电容 C 上的电压向负载 R 供电，

因为 C 值足够大，基本保持输出电压 U 为恒定。设 V 处于通态的时间为 t_{on} ，此阶段电感 L 上积蓄的能量为：

$$E * I * t_{on}$$

当 V 处于断态时：电路可以等效图 3.2.3 所示：

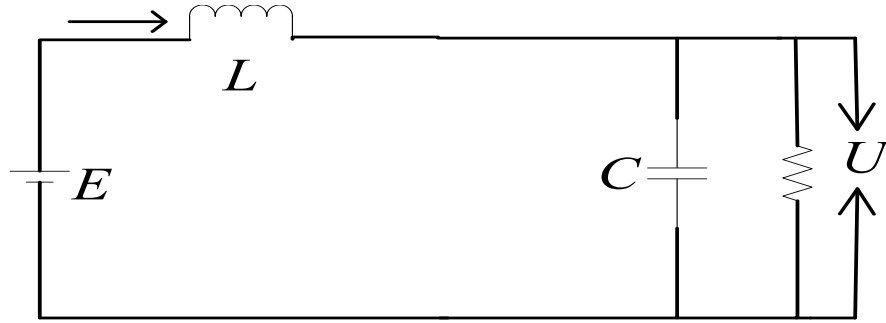


图 3.2.3 Boost 开关断态等效图

电源 E 和电感 L 共同向电容充电，并向负载 R 提供能量。设 V 处于断态的时间为 t_{off} ，则在此阶段电感释放的能量为：

$$(U - E) * I * t_{off}$$

当电路工作稳态时，一个周期 T 中电感 L 积蓄的能量和释放的能量相等，即：

$$E * I * t_{on} = (U_0 - E) * I * t_{off}$$

简化为：

$$U_0 = (t_{on} + t_{off}) / t_{off} * E = (T / t_{off}) * E$$

上式中的 T/t_{off} 肯定大于等于 1，因此输出电压高于电源电压，故称该电路为升压斩波电路。其中 T/t_{off} 表示升压比，调节其大小，即可改变输出电压 U_0 的大小。 t_{on}/T 就是常说的占空值，假设 $D = t_{on}/T$ ，那么 $U_0 = E/(1 - D)$ ，此公式就是 Boost 电路升压计算公式。

升压斩波电路之所以能使输出电压高于电源电压，关键有两个原因：电感 L 储能之后具有使电压泵升的作用，再者电容 C 可将输出电压保持住。在以上分析中，认为 V 处于通态期间因电容 C 的作用使得输出电压 U_0 不变，但实际上 C 值不能无限大，而且电容存在内阻，在此阶段其向负载放电， U_0 必然会有所下降，故实际输出电压会略低于理论计算值结果，不过在电容 C 值足够大时，误差很小，基本可以忽略。

离线模型操作

接下来介绍 Boost 升压斩波电路的 Simulink 仿真模型的搭建。

实验操作步骤（模型名称 boost_fix_duty.mdl）：

第一步：双击打开 VIEW1000 软件，如下图 3.2.4 所示图标；



图 3.2.4 VIEW1000 软件

第二步：在软件中切换至“工作区”界面，然后在工具栏中单击“实验”，并选择实验二，如下图 3.2.5 所示；

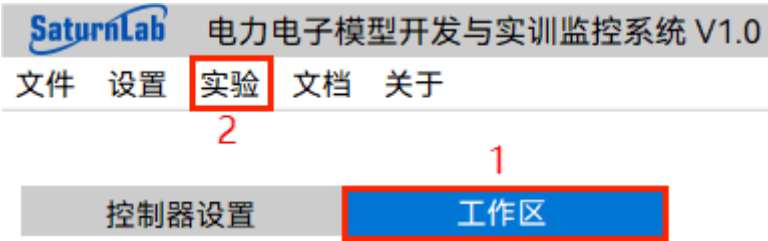


图 3.2.5 实验选择

首先软件界面会切换到实验二中已搭建好的操作界面，图 3.2.6 所示实验二上位机界面（BOOST.sp1000）搭建如下：

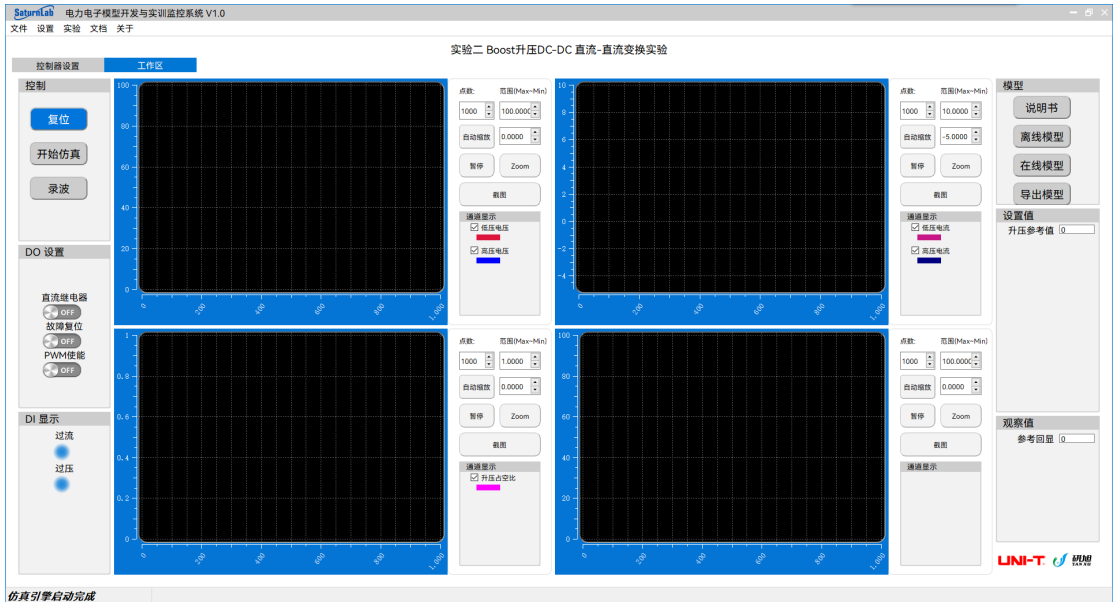


图 3.2.6 实验二上位机软件界面

第三步：在“工作区”界面的右上角“模型”框中点击“离线模型”，如图 3.2.7 所示；



图 3.2.7 打开离线模型

选择 “boost_fix_duty.mdl”，如下图 3.2.8 所示：



图 3.2.8 选择离线模型

然后等待 Matlab 软件打开，并打开已搭建好模型 “boost_fix_duty.mdl”，模型打开后如图 3.2.9 所示：

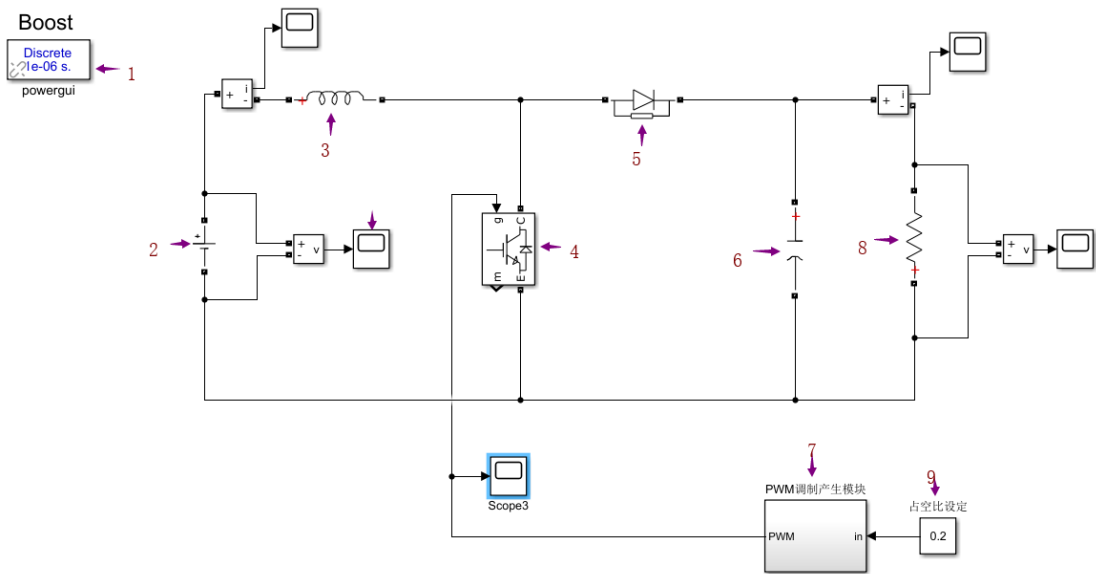


图 3.2.9 boost 电路拓扑

图中红色标注：

标注 1 为 Simscape 电力系统专用技术模型的环境块，设置步长为 $1e-6$ ；

标注 2 为直流源，设置 300V；

标注 3 为电感，设置为 2mH；

标注 4 为 IGBT；

标注 5 为二极管；

标注 6 为电容器，设置 1500uf，初始电压为电源电压 300V 即可；

标注 7 为 PWM 产生模块，具体电路如图 3.2.10 所示。in1 为占空比值，与 20KHz 的等腰三角波载波比较后产生 PWM；

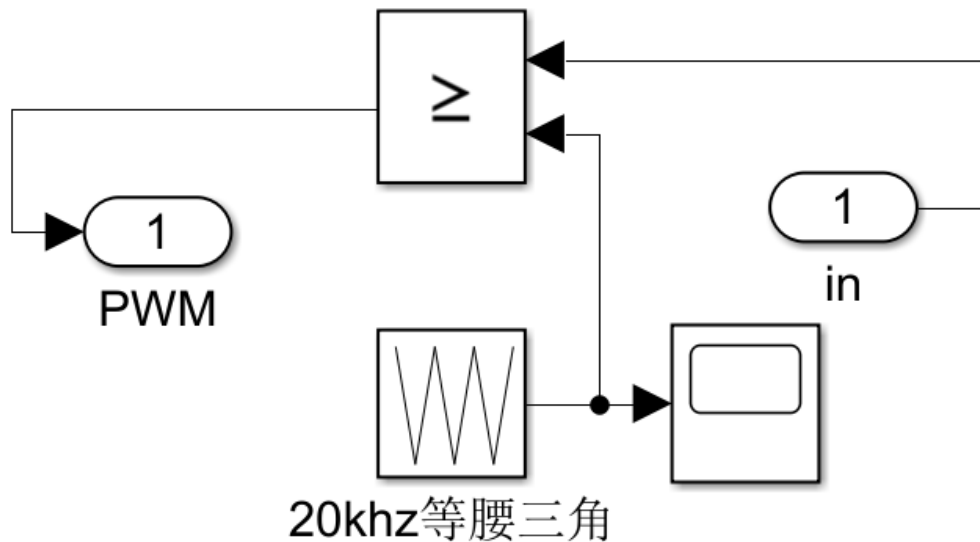


图 3.2.10 PWM 产生电路

标注 8 为电阻值，阻值设定 100 欧姆；

标注 9 为占空比设定值，当前设定 0.2。

理论计算，当占空比设定 0.2 时，此时电压应该升为 $(1/(1 - 0.2)) * 300 = 375V$ 。

图 3.2.11 为电压输出波形。最后稳态在 374.95V 上下波动，波动范围小于 0.05V。当占空比设定 0.5 时，此时电压应该升为 $(1/(1 - 0.5)) * 300 = 600V$ 。图 3.2.12 为电压输出波形。最后稳态在 599.75V 上下波动，波动范围小于 0.05V。通过两种占空比值的实验，发现仿真符合理论。

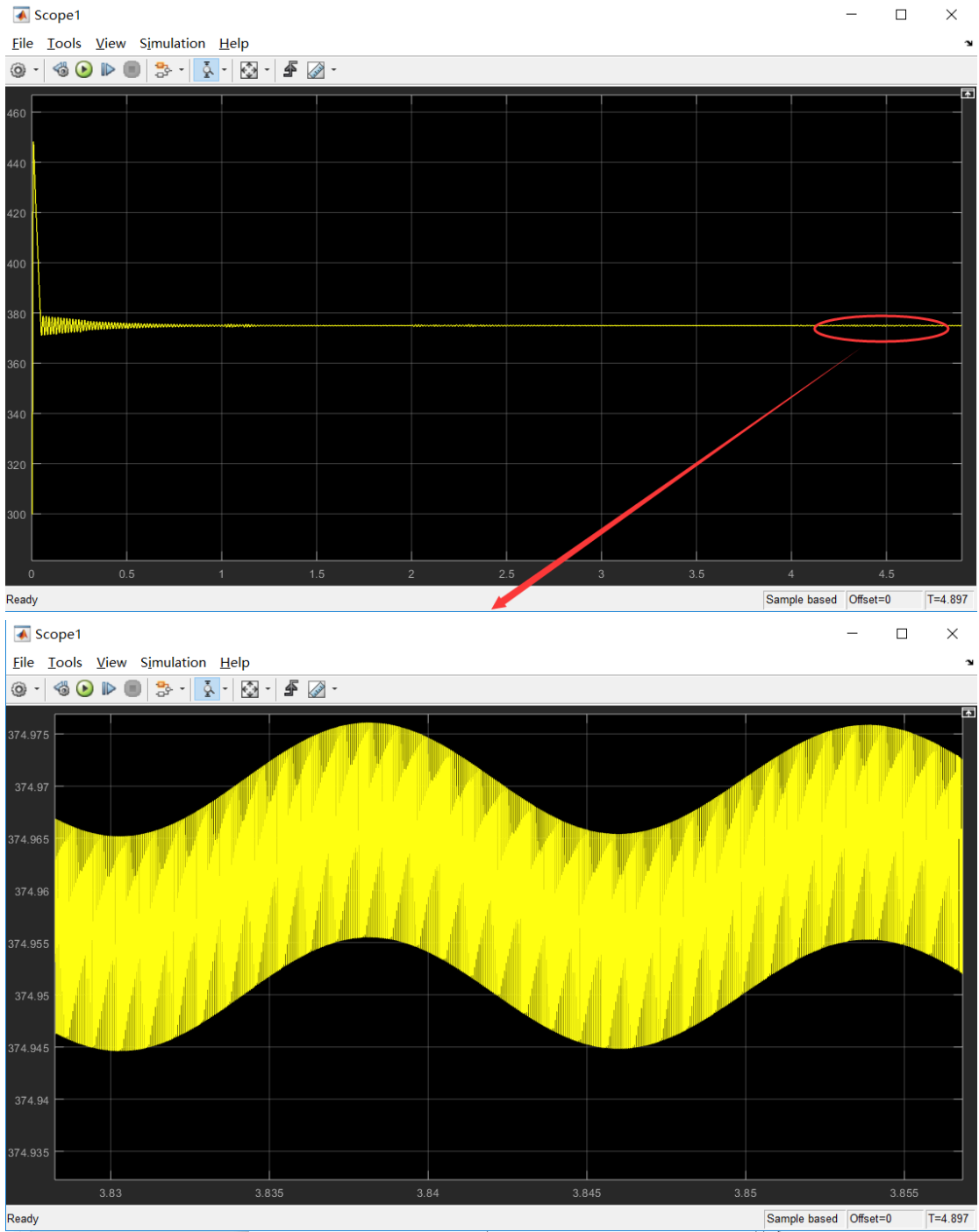


图 3.2.11 boost 输出电压波形 1

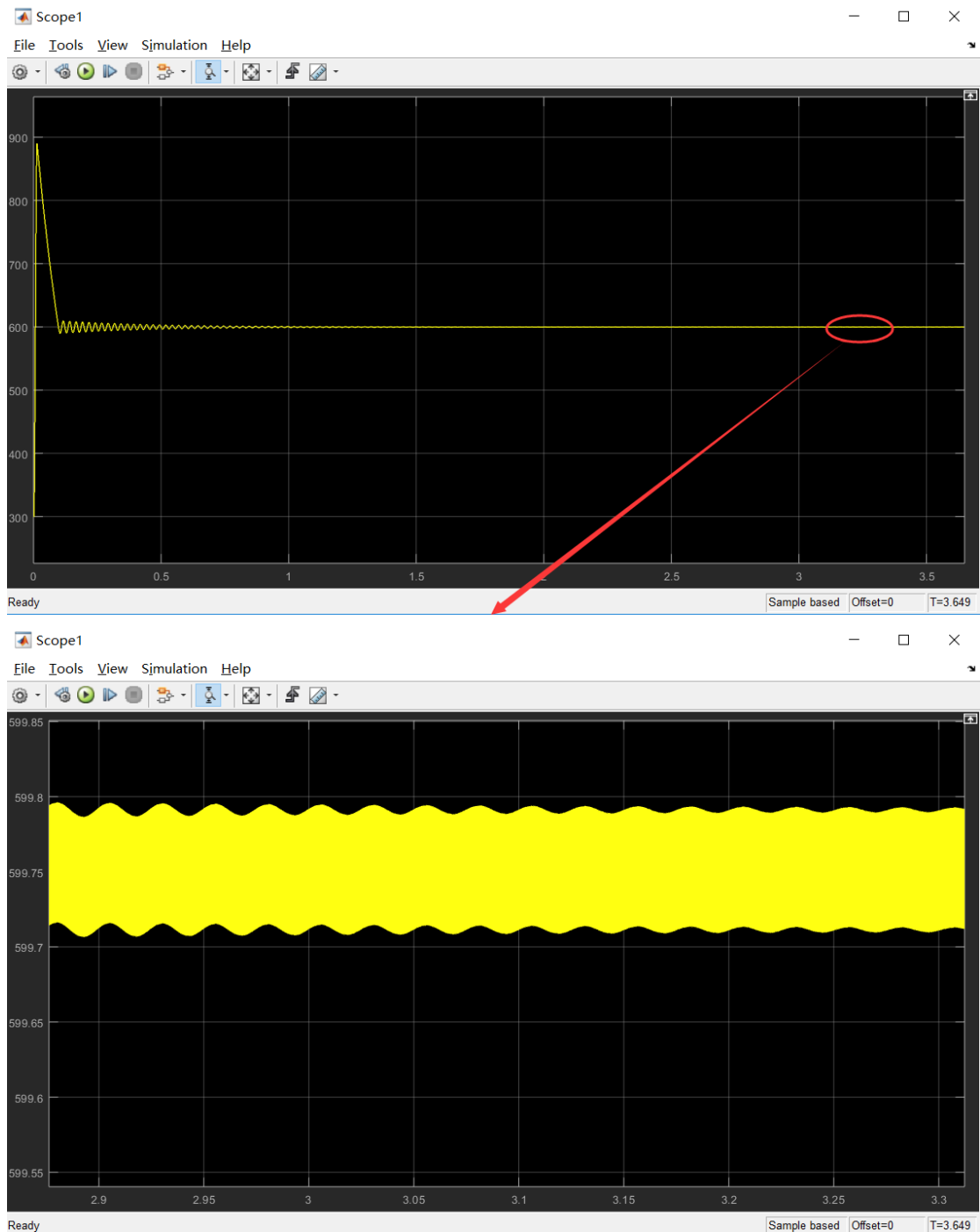


图 3.2.12 boost 输出电压波形 2

上述仿真为固定占空比，固定负载，属于开环控制系统，仅仅是验证理论。理论仿真时电感压降，管子压降基本忽略不计，所以可以达到实际理论值。但是试想当实际电路达到稳态后，负载发生变化时，那么输出电压会不会怎样变化呢？答案是根据负载的变化电压也会变化，达不到理论控制的电压值。而实际场合往往负载是随时变化的，为了防止电压控制不住，那么必须加入电压环和电流环加以控制，才可以满足随着负载变化，电压保持恒定的要求。也就是所谓的闭环控制系统，闭环系统中常用的一种控制方

法为 PID 控制法，下面介绍下 PID 控制的原理。

PID 算法的执行流程是非常简单的，即利用反馈来检测偏差信号，并通过偏差信号来控制被控量。而控制器本身就是比例、积分、微分三个环节的加和。其功能框图如下图 3.2.13 所示：

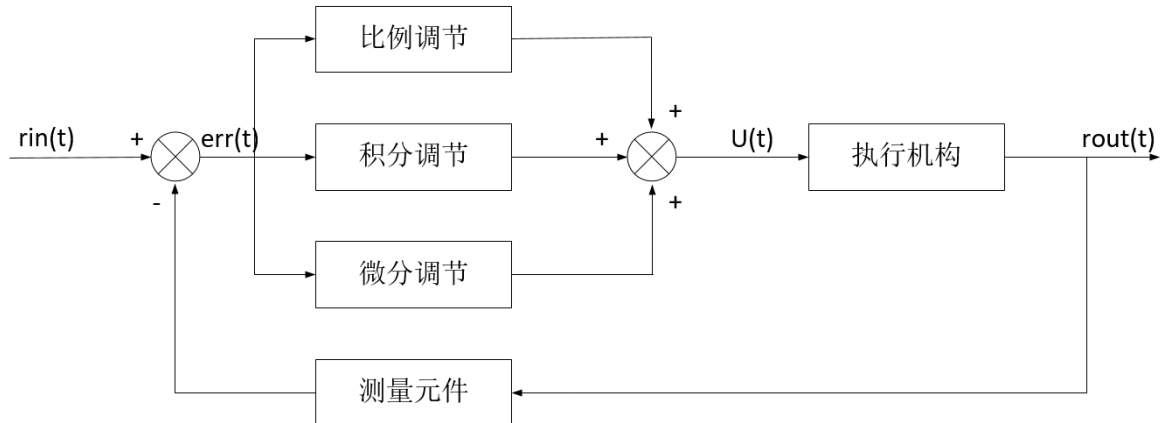


图 3.2.13 PID 控制框图

考虑在某个特定的时刻 t ，此时输入量为 $rin(t)$ ，输出量为 $rout(t)$ ，于是偏差就可计算为：

$$err(t) = rin(t) - rout(t)$$

于是 PID 的基本控制规律就可以表示为如下公式：

$$U(t) = K_p err(t) + K_i \int err(t) dt + \frac{K_d d err(t)}{dt}$$

其中 K_p 为比例系数， K_i 为积分系数， K_d 为微分系数。PID 控制的基本原理就是如此。

➤ 比例

成比例地反映控制系统的偏差信号，偏差一旦产生，立即产生控制作用以减小偏差。比例控制器的输出 $U(t)$ 与输入偏差 $err(t)$ 成正比，能迅速反映偏差，从而减小偏差，但不能消除静差。静差是指系统控制过程趋于稳定时，给定值与输出量的实测值之差。偏差存在，才能使控制器维持一定的控制量输出，因此比例控制器必然存在着静差。由偏差理论知，增大比例系数虽然可以减小偏差，但不能彻底消除偏差。比例控制作用的大小除与偏差 $err(t)$ 有关之外，还取决于比例系数 K_p 的大小。比例系数 K_p 越小，控制作用越小，系统响应越慢；反之，比例系数 K_p 越大，控制作用也越强，则系统响应越快。但

是， K_p 过大会使系统产生较大的超调和振荡，导致系统的稳定性能变差。因此，不能将 K_p 选取过大，应根据被控对象的特性来折中选取 K_p ，使系统的静差控制在允许的范围之内，同时又具有较快的响应速度。

➤ 积分

积分环节的作用，主要用于消除静差提高系统的无差度。积分作用的强弱，取决于积分时间常数 K_i ， K_i 越大积分作用越弱，反之则越强。积分控制作用的存在与偏差 $err(t)$ 的存在时间有关，只要系统存在着偏差，积分环节就会不断起作用，对输入偏差进行积分，使控制器的输出及执行器的开度不断变化，产生控制作用以减小偏差。在积分时间足够的情况下，可以完全消除静差，这时积分控制作用将维持不变。 K_i 越小，积分速度越快，积分作用越强。积分作用太强会使系统超调加大，甚至使系统出现振荡。

➤ 微分

微分环节的作用能反映偏差信号的变化趋势（变化速率），并能在偏差信号的值变得太大之前，在系统中引入一个有效的早期修正信号，从而加快系统的动作速度，减小调节时间。积分控制作用的引入虽然可以消除静差，但是降低了系统的响应速度，特别是对于具有较大惯性的被控对象，用PI控制器很难得到很好的动态调节品质，系统会产生较大的超调和振荡，这时可以引入微分作用。在偏差刚出现或变化的瞬间，不仅根据偏差量作出及时反应（即比例控制作用），还可以根据偏差量的变化趋势（速度）提前给出较大的控制作用（即微分控制作用），将偏差消灭在萌芽状态，这样可以大大减小系统的动态偏差和调节时间，使系统的动态调节品质得以改善。微分环节有助于系统减小超调，克服振荡，加快系统的响应速度，减小调节时间，从而改善了系统的动态性能，但微分时间常数过大，会使系统出现不稳定。微分控制作用一个很大的缺陷是容易引入高频噪声，所以在干扰信号比较严重的流量控制系统中不宜引入微分控制作用。

微分控制作用的阶跃响应特性对于一个恒定的偏差量，不管其数值有多大，微分控制作用均为零。因此，微分作用不能消除静差，单独使用意义不大，一般需要与比例、积分控制作用配合使用，构成PD或PID控制。

对于PID控制，在控制偏差输入为阶跃信号时，立即产生比例和微分控制中作用。由于在偏差输入的瞬时，变化率非常大，微分控制作用很强，此后微分控制作用迅速衰减，但积分作用越来越大，直至最终消除静差。PID控制综合了比例、积分、微分3种作用，既能加快系统响应速度、减小振荡、克服超调，亦能有效消除静差，系统的静态

和动态品质得到很大改善，因而 PID 控制器在工业控制中得到了最为广泛的应用。

介绍完了 PID 控制算法，接下来通过实例介绍基于 PID 控制的闭环控制实例（模型名称 boost.mdl），模型拓扑和上面介绍的一样，只不过加入了电压外环和电流内环。

实验操作步骤（模型名称 boost.mdl）：

第一步：双击打开 VIEW1000 软件，如下图 3.2.14 所示图标；



图 3.2.14 VIEW1000 软件

第二步：在软件中切换至“工作区”界面，然后在工具栏中单击“实验”，并选择实验二，如下图 3.2.15 所示；



图 3.2.15 实验选择

首先软件界面会切换到实验二中已搭建好的操作界面，图 3.2.16 所示实验二上位机界面（BOOST.sp1000）搭建如下：

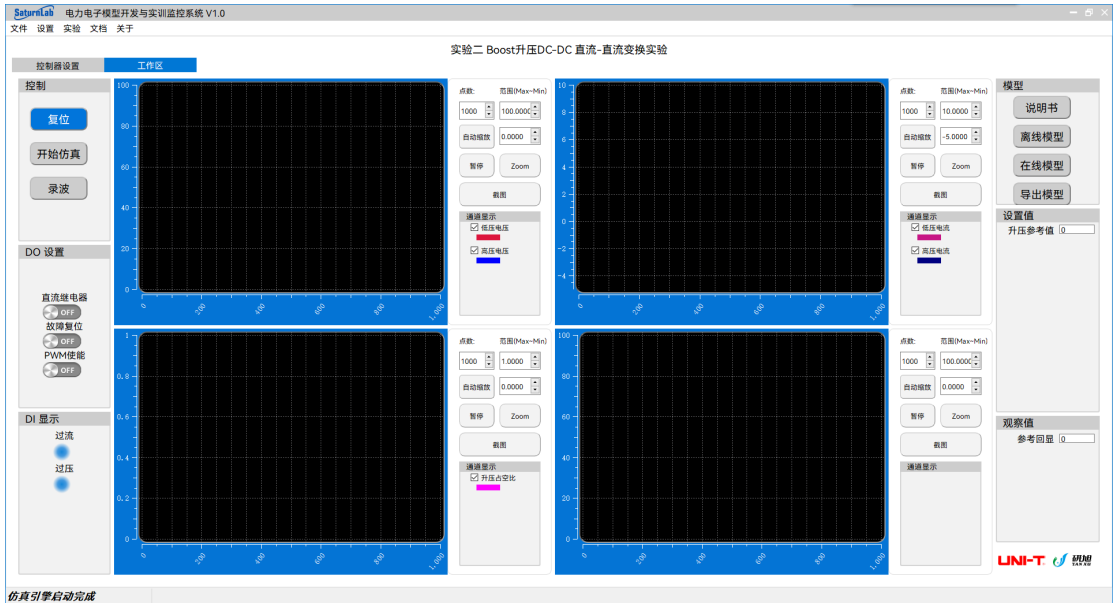


图 3.2.16 实验二上位机软件界面

第三步：在“工作区”界面的右上角“模型”框中点击“离线模型”，如图 3.2.17 所示；



图 3.2.17 打开离线模型

选择“boost.mdl”，如下图 3.2.18 所示：



图 3.2.18 选择离线模型

然后等待 Matlab 软件打开，并打开已搭建好模型“boost.mdl”，模型打开后如图 3.2.19 所示：

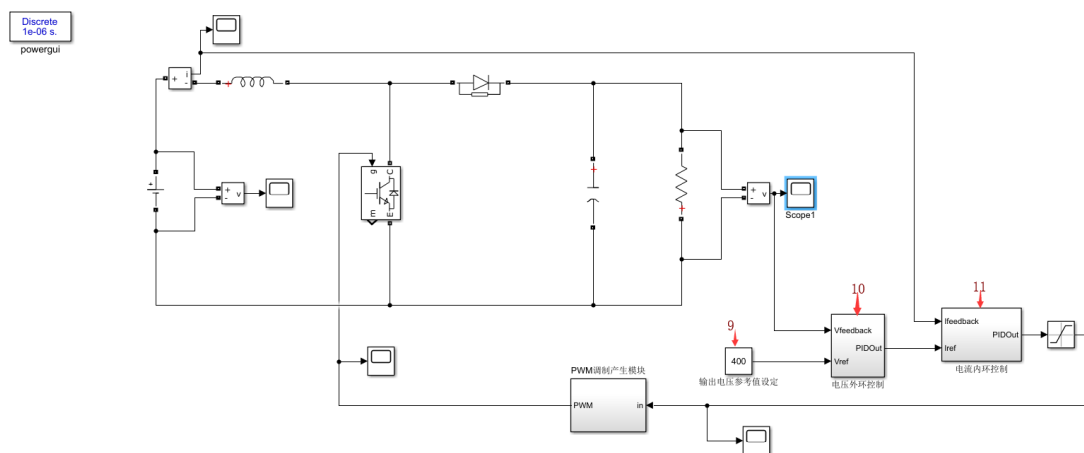


图 3.2.19 boost 电路拓扑

图中红色标注：

标注 9 为输出电压输出目标值。

标注 10 为电压外环 PI 控制，其内部电路如图 3.2.20 所示。Vfeedback 为电压反馈值，Vref 为电压参考值，PI 模块的比例系数为 0.02，积分系数为 0.05。PIDOut 为电压环输出值。

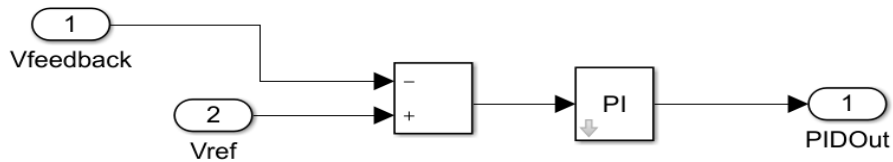


图 3.2.20 电压 PI 控制电路

标注 11 为电流内环 PI 控制，其内部电路如图 3.2.21 所示。Ifedback 为电流反馈值，Iref 为电流参考值，PI 模块比例系数为 0.1，积分系数为 1。

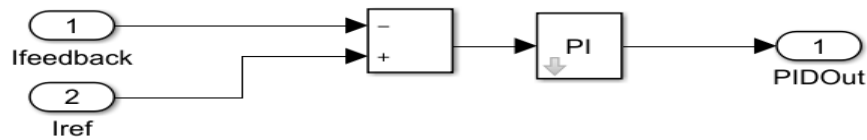
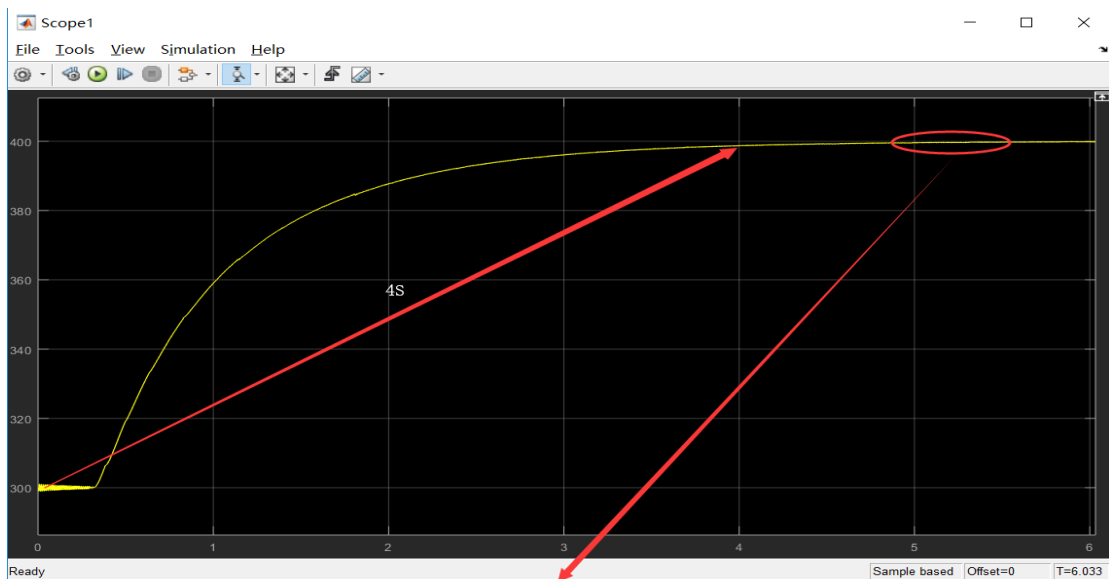


图 3.2.21 电流 PI 控制电路

图 3.2.22 为 boost 电路电压输出波形图。电压从 300V 花费 4s 时间达到 400V 稳定状态，之后在 399.8v 上下变化大概 0.05V 左右。



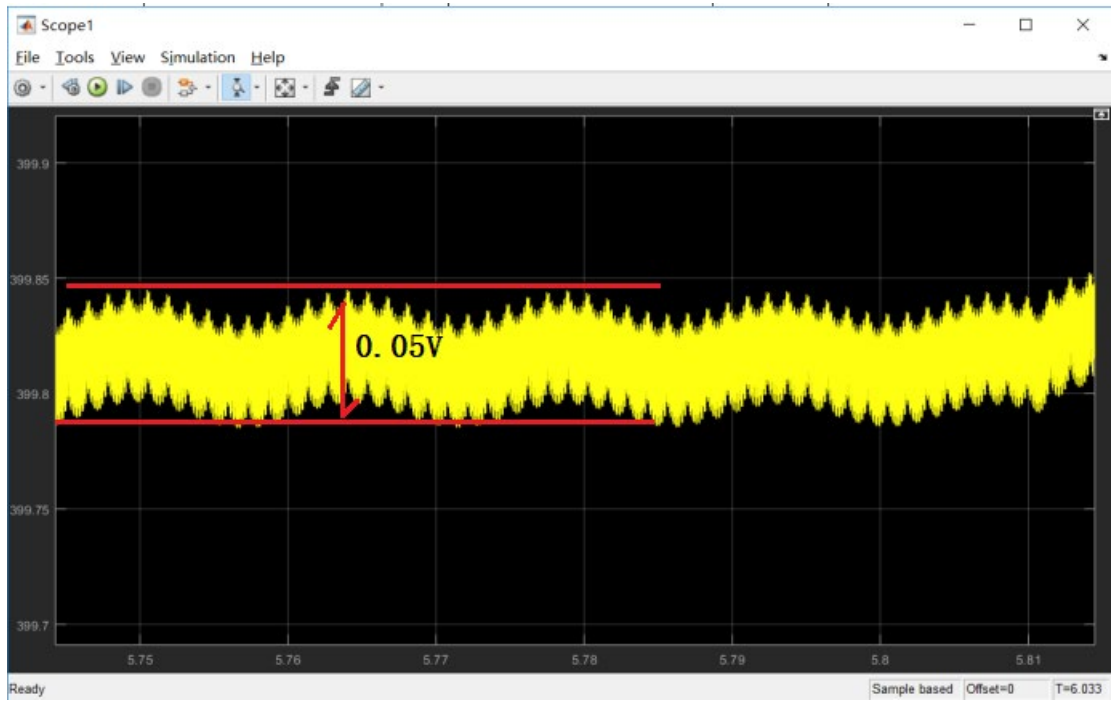
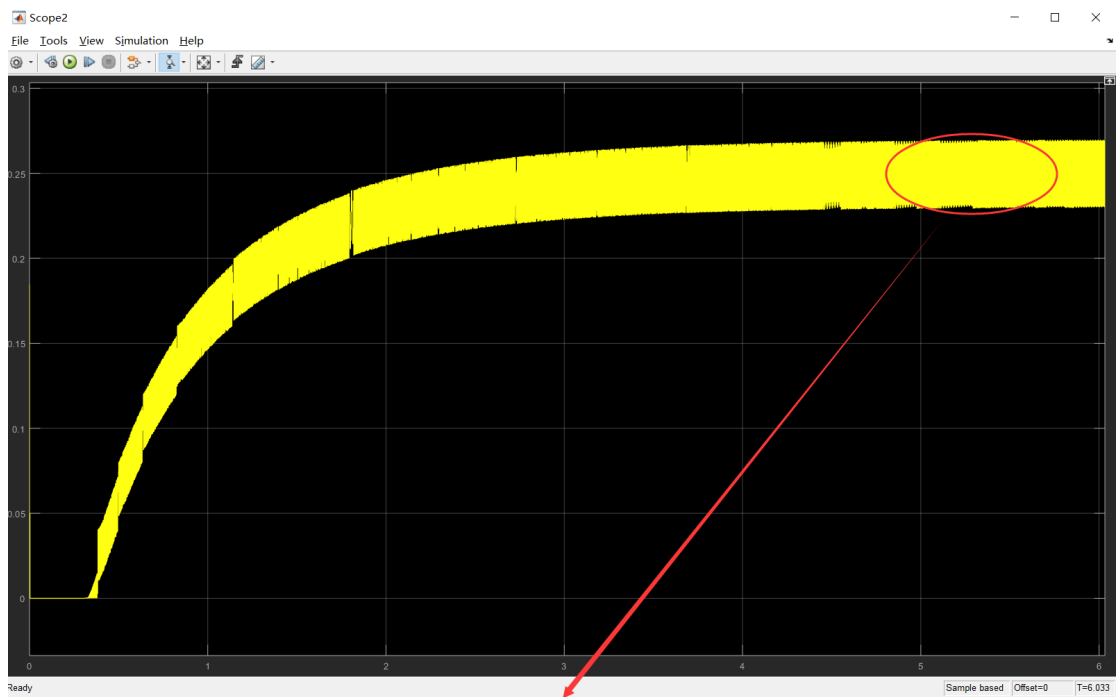


图 3.2.22 Boost 电路输出电压波形 1

图 3.2.23 为占空比波形图。和电压输出波形变化一致。



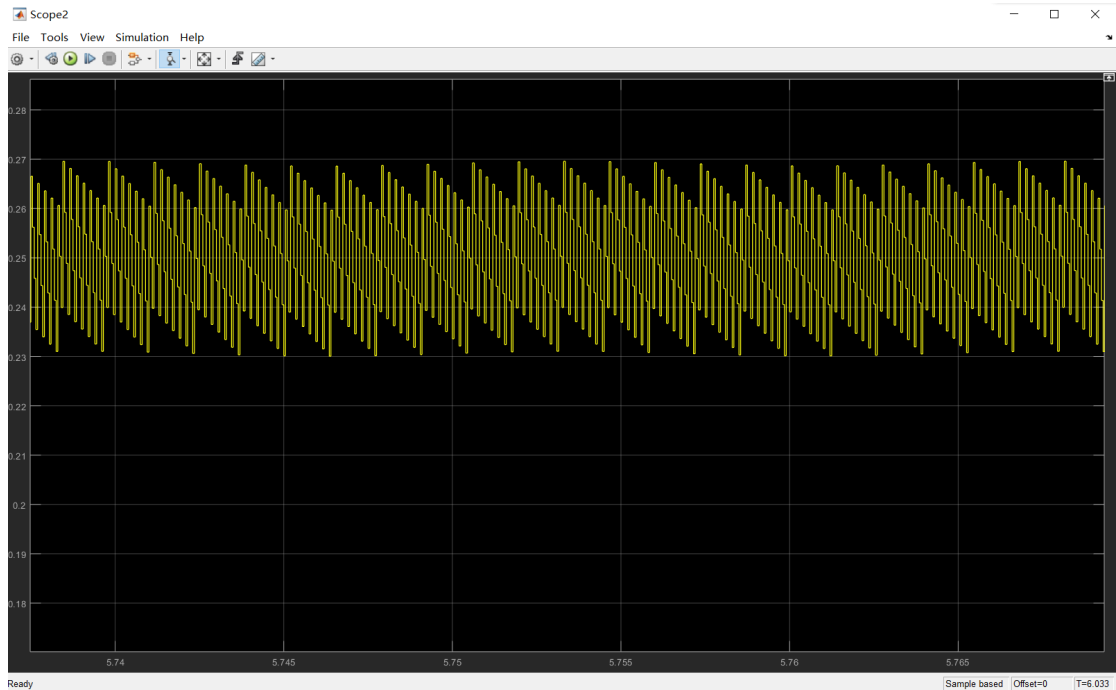


图 3.2.23 Boost 电路占空比波形

在闭环控制系统里面,控制算法至关重要,本仿真采用最为应用广泛的 PI 调节控制。此处对 PI 控制不做详细的介绍,请查看相关介绍资料。修改一组 PI 值,对比一下控制效果,不妨将外环电压 PI 值扩大 10 倍。图 3.2.24 为修改后的波形图,可以对比发现,电压达到稳态的速度由原来的 4S 变为 1.5S,后面输出波形波动变为 0.15V。如果在精度满足的情况下,显然这组 PI 值更加合理,因为不但精度可以满足要求,动态响应也快。



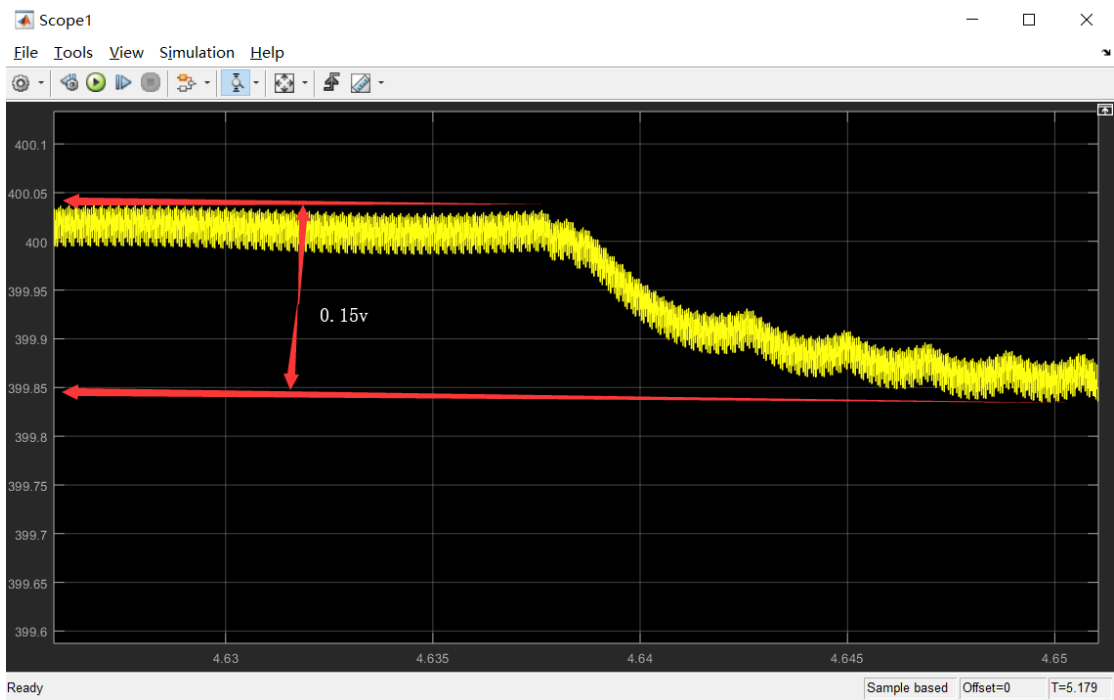


图 3.2.24 Boost 电路占空比波形

在线模型操作

首先统计一下算法模型中参与控制的输入量和输出量。

控制输入量	控制输出量
高压端电压	PWM 输出
低压端电流	-----
升压参考值	-----

清楚了输入量和输出量，需要了解的就是快速原型控制器具体与主电路的信号连接情况。

快速原型控制器	主电路
ADC2	低压端电压
ADC1	低压端电流
ADC5	高压端电压
ADC6	高压端电流
PWM1A_DUTY	Boost 开关管

注意：出于安全问题的考虑，所有功率硬件及仪器设备都采用小功率器件，所以在
线模型仿真中的一些参数也是根据实际情况进行下调。

实验操作步骤（模型名称 BOOST.slx）：

第一步：双击打开 VIEW1000 软件，如下图 3.2.25 所示图标；



图 3.2.25 VIEW1000 软件

第二步：在软件中切换至“工作区”界面，然后在工具栏中单击“实验”，并选择实验二，如下图 3.2.26 所示；

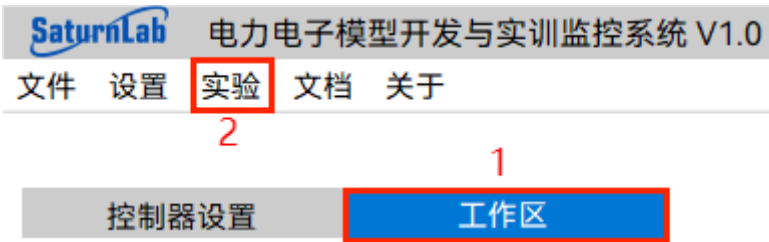


图 3.2.26 实验选择

首先软件界面会切换到实验二中已搭建好的操作界面，图 3.2.27 所示实验二上位机界面（BOOST.sp1000）搭建如下：

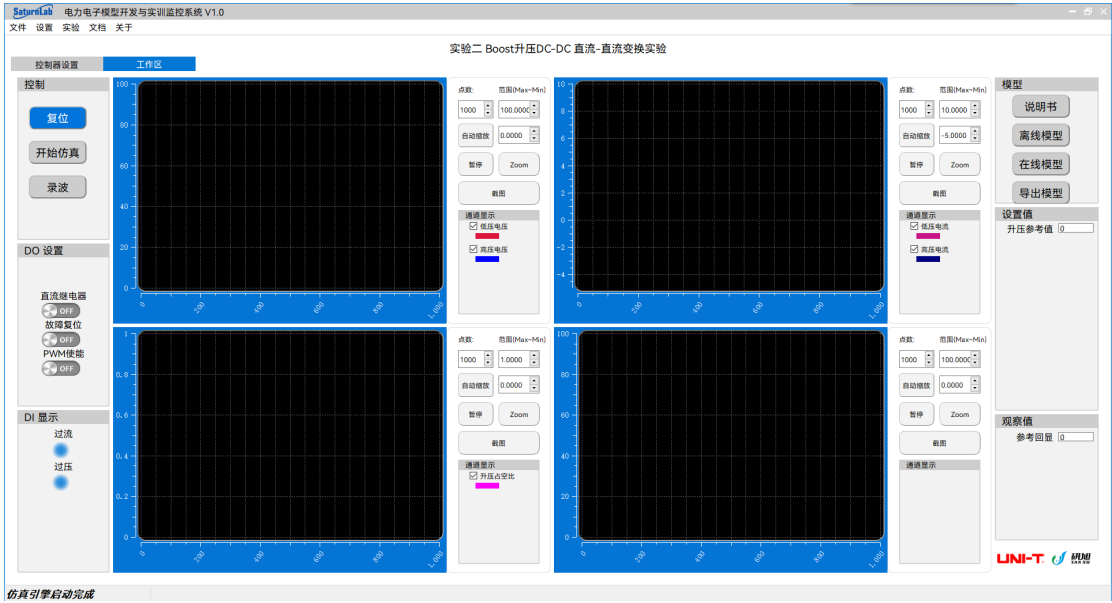


图 3.2.27 BOOST 快速原型上位机软件界面

第三步：在“工作区”界面的右上角“模型”框中点击“在线模型”，然后等待 Matlab 软件打开，并打开已搭建好模型“BOOST.slx”，操作如下图 3.2.28 所示；



图 3.2.28 打开在线模型

模型打开后如图 3.2.29 所示：

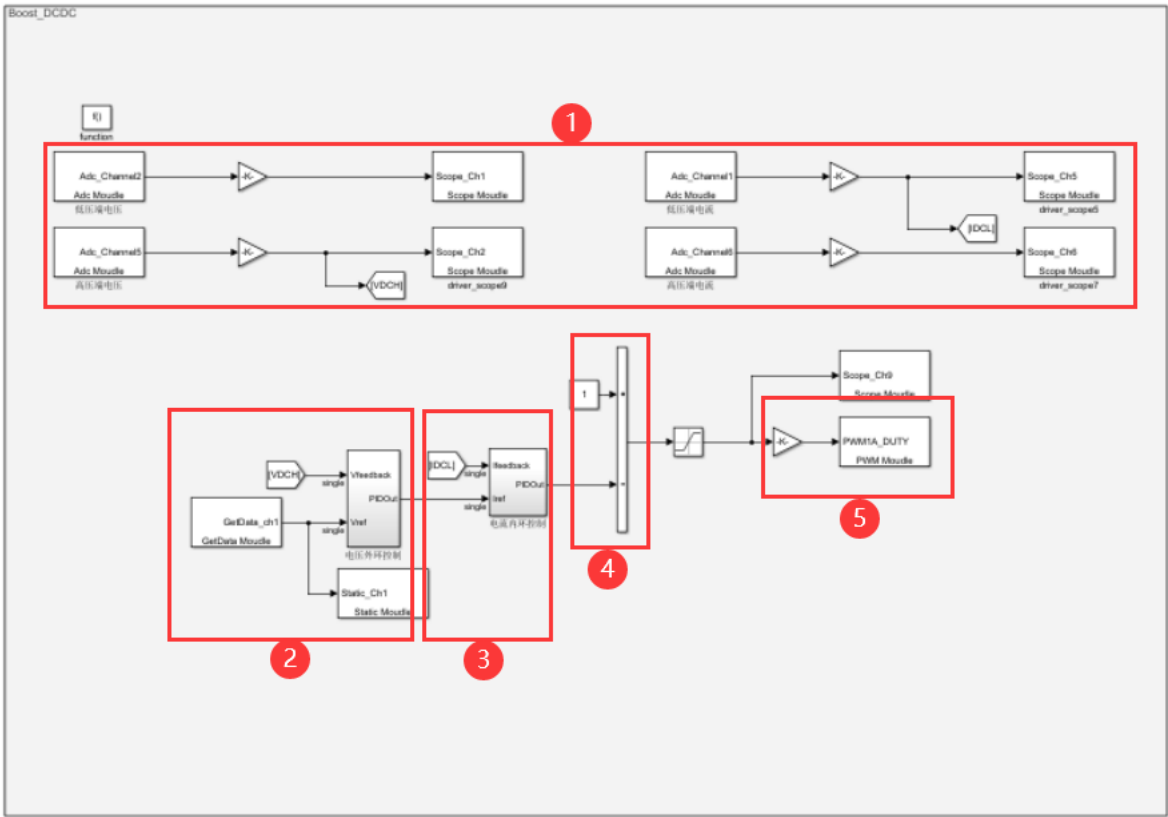


图 3.2.29 BOOST 快速原型控制模型

图中红色标注：

1、ADC 采集模块：通过 ADC 采集模块采集直流

侧电流，转换变比为 $3.0518\text{e-}4 \times 1.6667$ ，Adc_Channel6 采集高压侧电流，转换变比为 $3.0518\text{e-}4 \times 1.6667$ ；

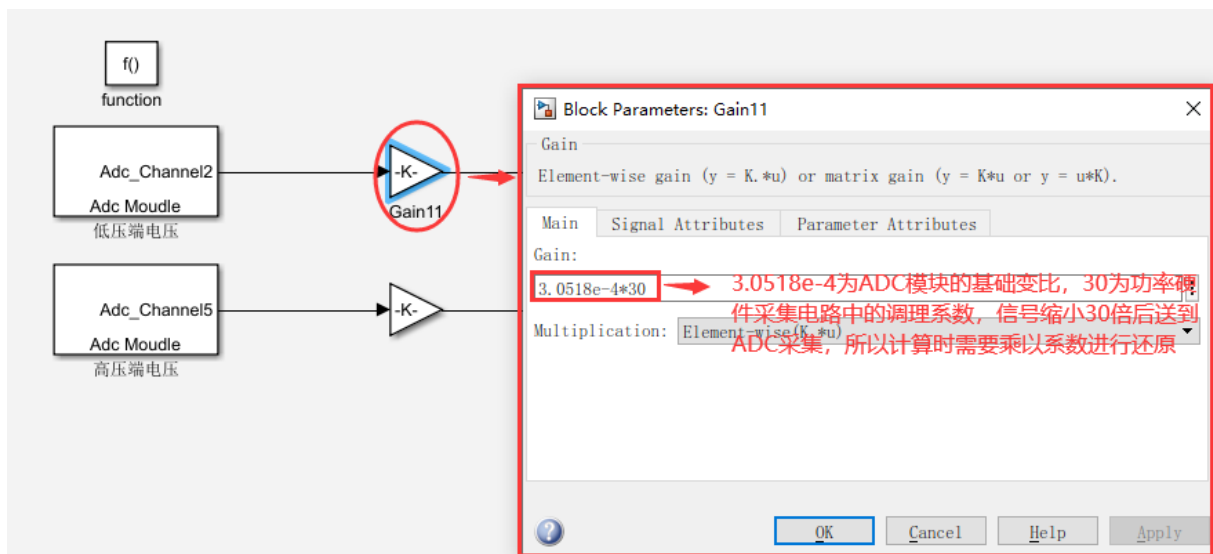


图 3.2.30 增益系数计算

2、外环电压控制：将模型中通过 GetData_ch1 输入的升压参考值减去采集的实际高压侧电压得到偏差值，通过 PI 计算得到参考电流；

3、内环电流控制：将外环电压控制经过 PI 计算得到的参考电流减去采集的实际低压侧电流得到偏差值，通过 PI 计算得到占空比值；

4、升压管占空比计算：之前在详解 Boost 升压值计算的时候给出了升压占空比的计算公式： $U_o = E / (1 - D)$ ，所以最终占空比需要 1 减去双环 PI 计算出的占空比得出；

5、占空比传输模块：将计算得到的占空比，通过 PWM1A_DUTY 模块传输到 PWM 模块进行 PWM 信号的输出。

第四步：将主拓扑图中的 1 与 3 连接，2 与 4 连接，5 与 15 连接，6 与 16 连接。如下图 3.2.31 所示，这样就是一个 BOOST 升压电路。

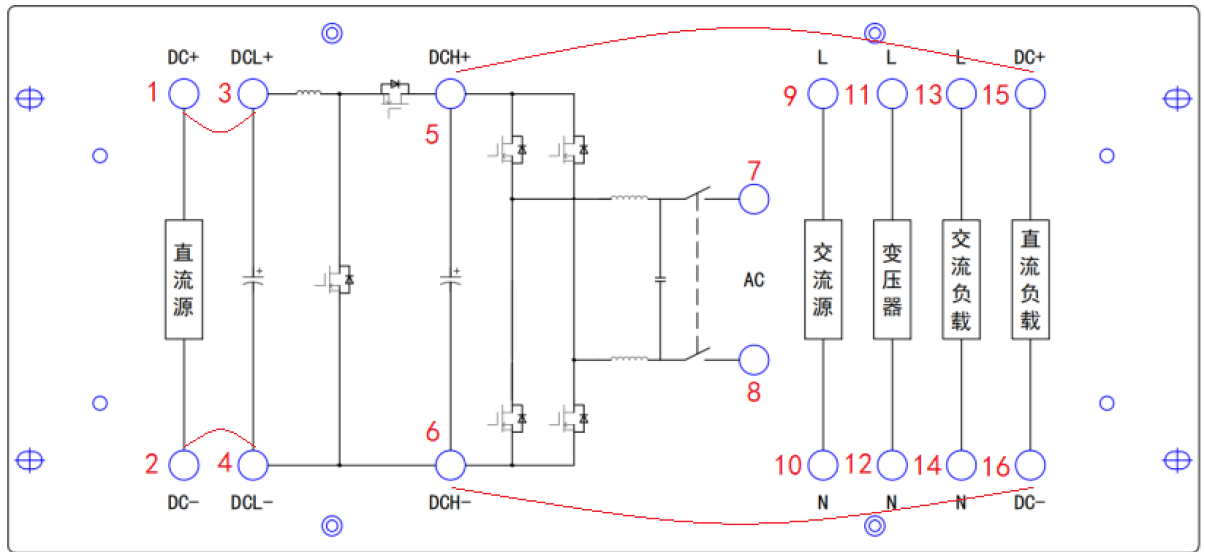


图 3.2.31 Boost 电路拓扑连线

第五步：将柜体总电源开启，为系统供电。

第六步：待直流源启动后，设置输出电压为 50V，输出电流为 3A，点击“ON”按钮。然后设置直流负载，负载模式设置恒流模式，电流设定成 1.5A，带载电压设置成 55V，点击“ON”按钮；

第七步：切换到模型界面，下载模型到控制器，操作如下图 3.2.32 所示；

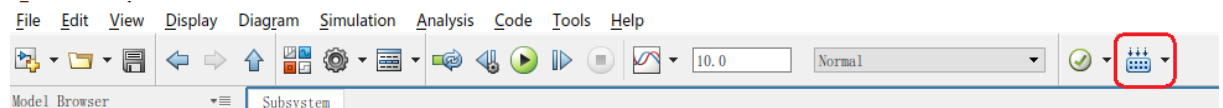


图 3.2.32 下载模型

查看编译过程及下载结果，如下图 3.2.33 所示：

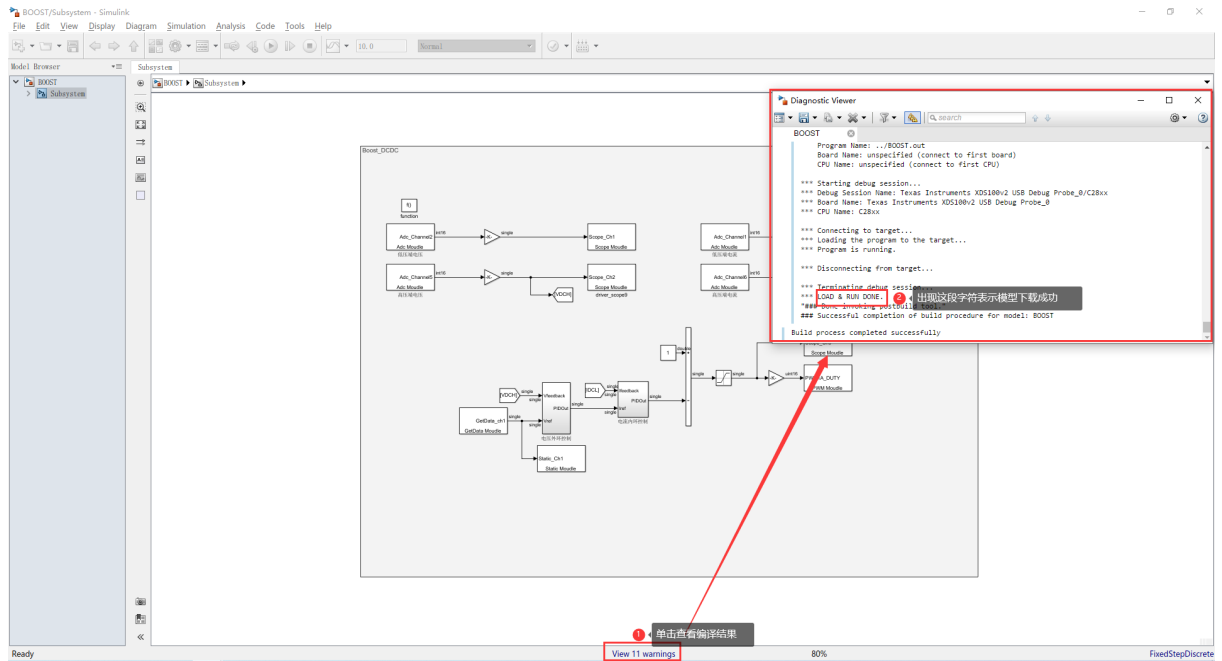


图 3.2.33 模型下载成功

第八步：上位机与计算机建立通信，首先切换到“控制器设置”界面，点击“建立通信”按钮，等连接上之后点击“设置”按钮，具体操作如下图 3.2.34 所示；

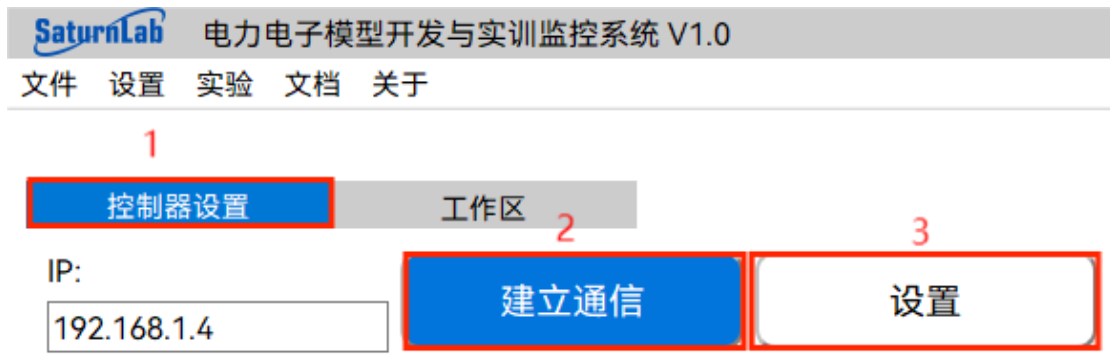


图 3.2.34 建立通信

第九步：运行模型，先切换到“工作区”界面，再将“升压参考值”设置为 60V，并点击计算机键盘“Enter”确认输入（先点击“开始仿真”，“参考回显”框会显示设定值是否生效，如回显值与设定值一样，表示设置生效，否则设置无效，需重新进行第九步操作），然后将“PWM 使能”置“ON”，“故障复位”先置“ON”，再置“OFF”，再将“直流继电器”置“ON”。先点击“复位”，然后立即点击“开始仿真”按钮，具体操作如下图 3.2.35 所示；

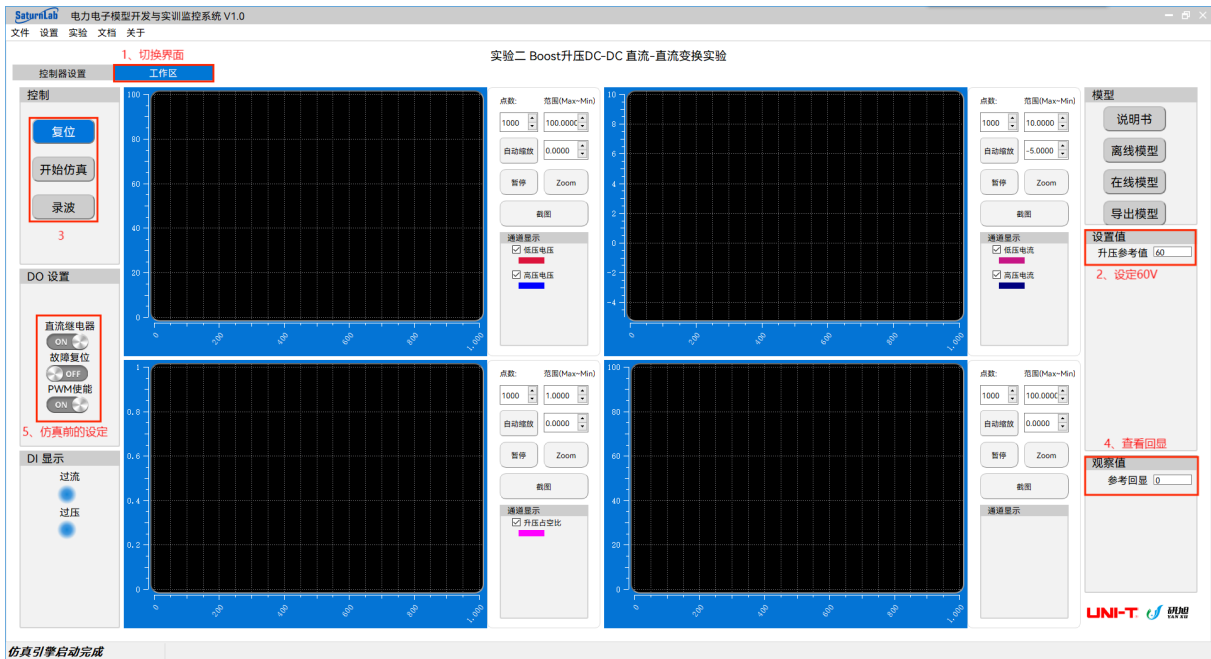


图 3.2.35 具体操作

注意：若系统运行故障，“DI 显示”界面中的两个蓝灯会变成红色，指示其中的一种或两种故障，此时点击“停止仿真”，将“故障复位”重新置“ON”，再置“OFF”，同时点击“复位”按钮，继续点击“开始仿真”即可。

第十步：等高压侧电压稳定在 60V 后，再设置“升压参考值”为 70V，等电压稳定后再继续设置，最小设置 50V（即不升压），最大设置到 80V。模型运行过程中可通过上位机界面查看控制效果，运行结果如下图 3.2.36 所示，同时可以点击“录波”按钮，以备后期分析数据；

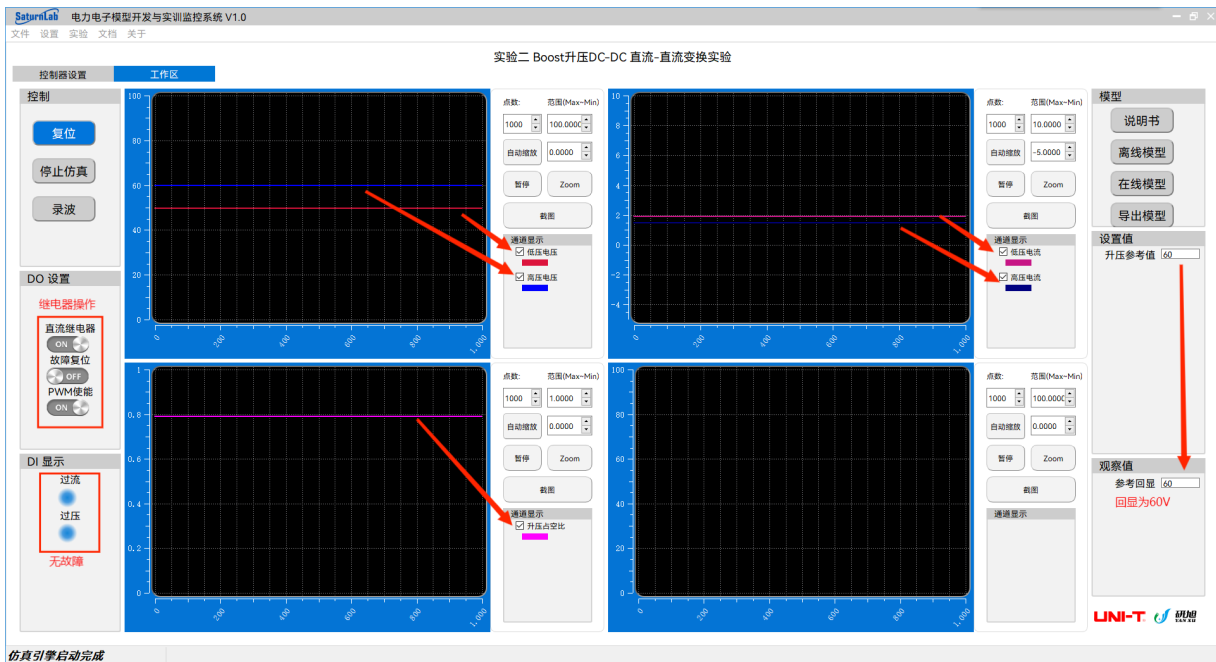


图 3.2.36 运行结果

第十一步：仿真停止，先点击“停止仿真”按钮，然后将“PWM 使能”、“直流继电器”置“OFF”即可停止仿真。如已录播，先点击“停止录播”，然后将录播文件命名为 xx.mat 并保存在桌面或其他文件夹，复制刚刚保存的数据文件 xx.mat 放入 MATLAB 查看，采用 Matlab 的绘图工具对波形进行分析，详细操作如下图 3.2.37~图 3.2.40 所示；

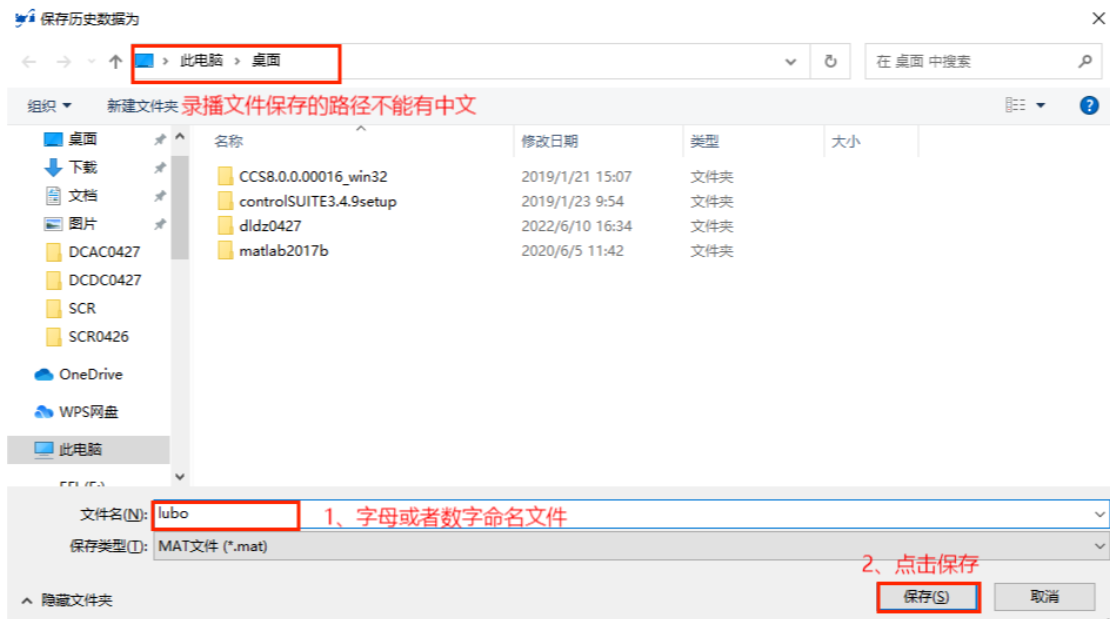


图 3.2.37 保存录播文件

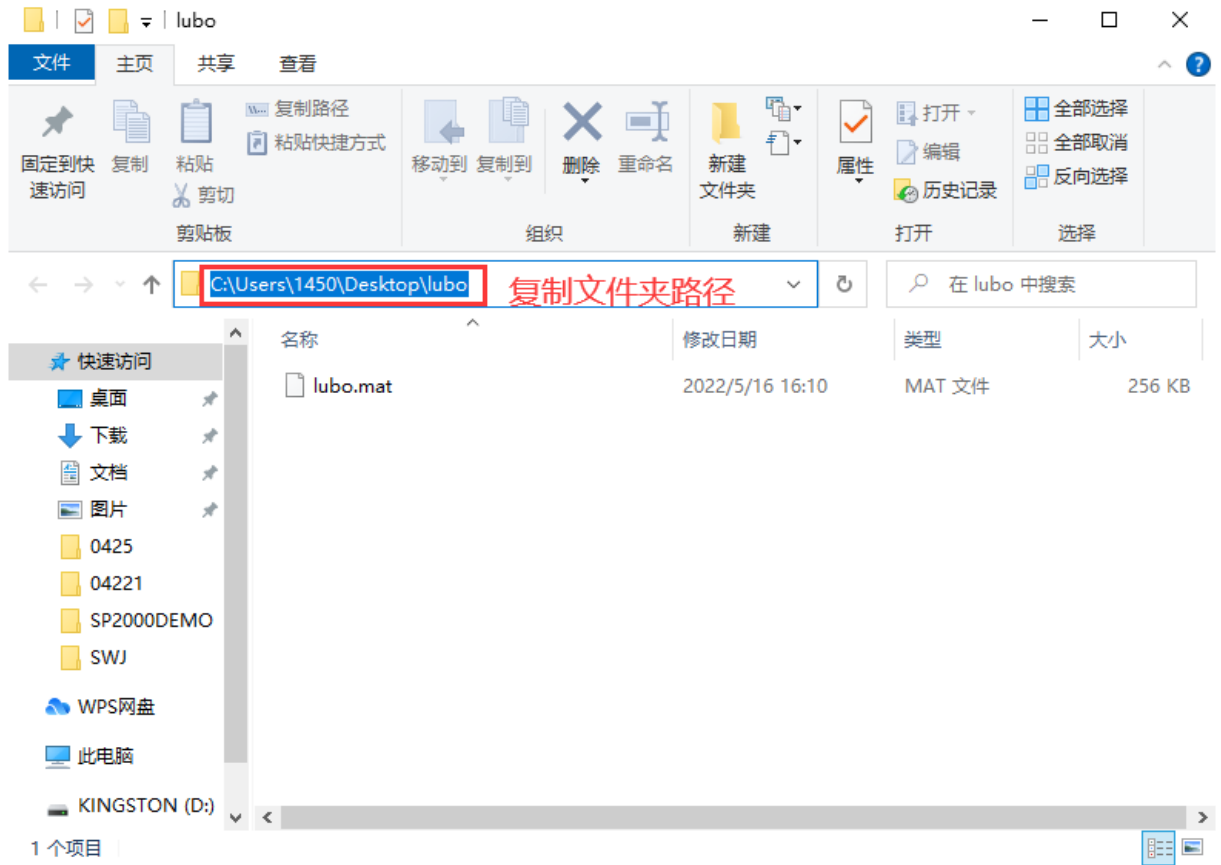


图 3.2.38 复制存放录播文件的文件夹路径

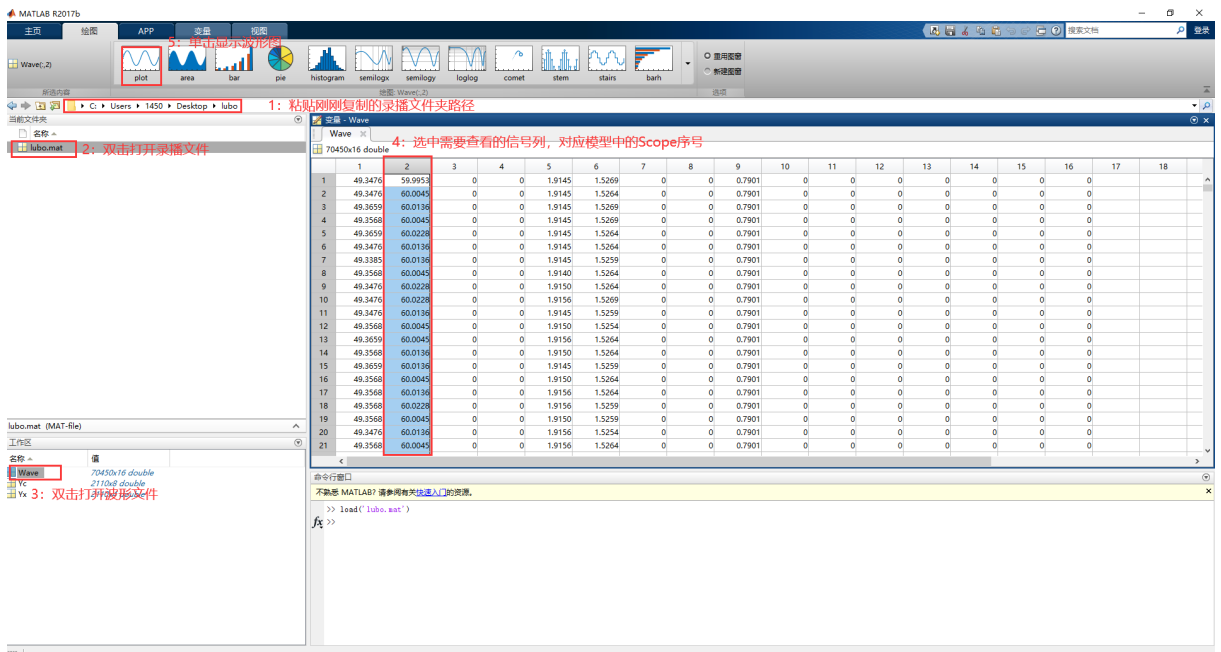


图 3.2.39 查看波形操作

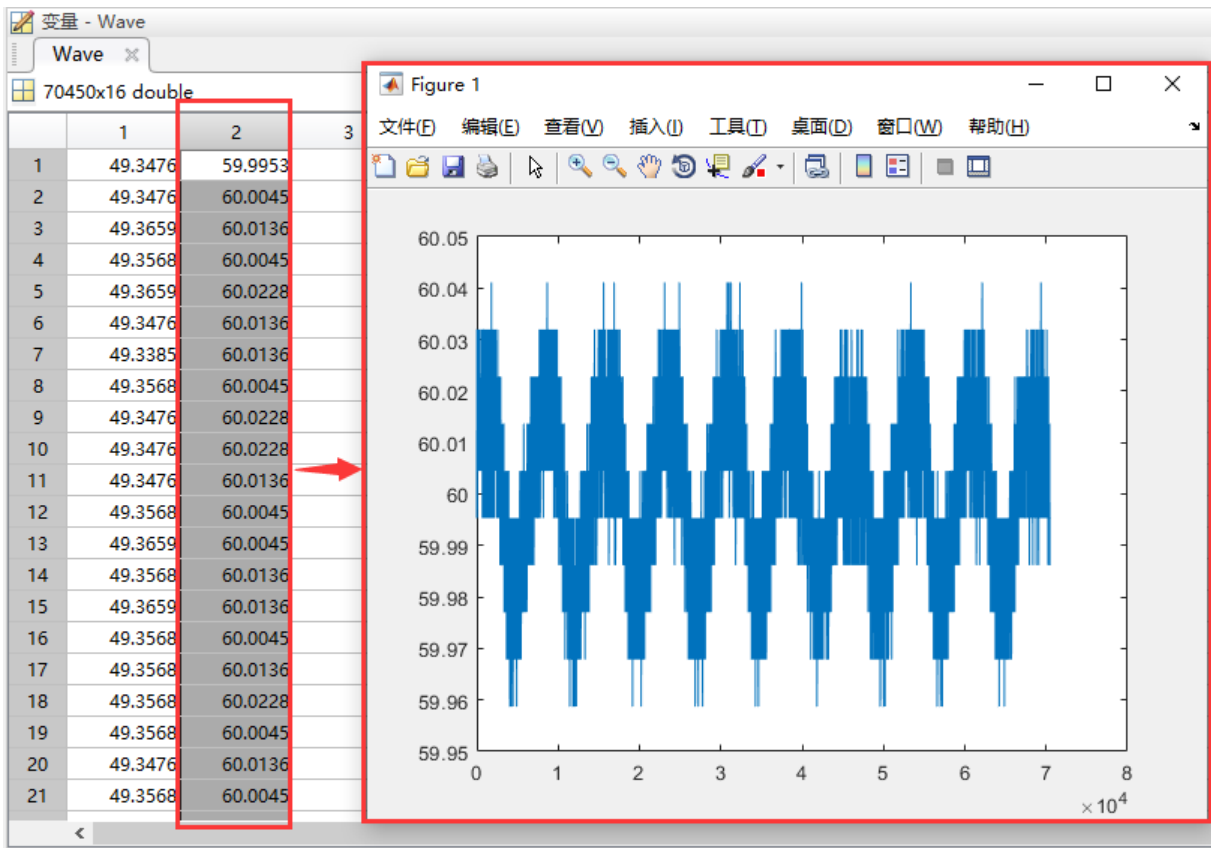


图 3.2.40 查看波形

下图 3.2.41 为高压电压（输出电压）从 50V 升压到 60V，再到 70V，最后到 80V 的输出电压波形。

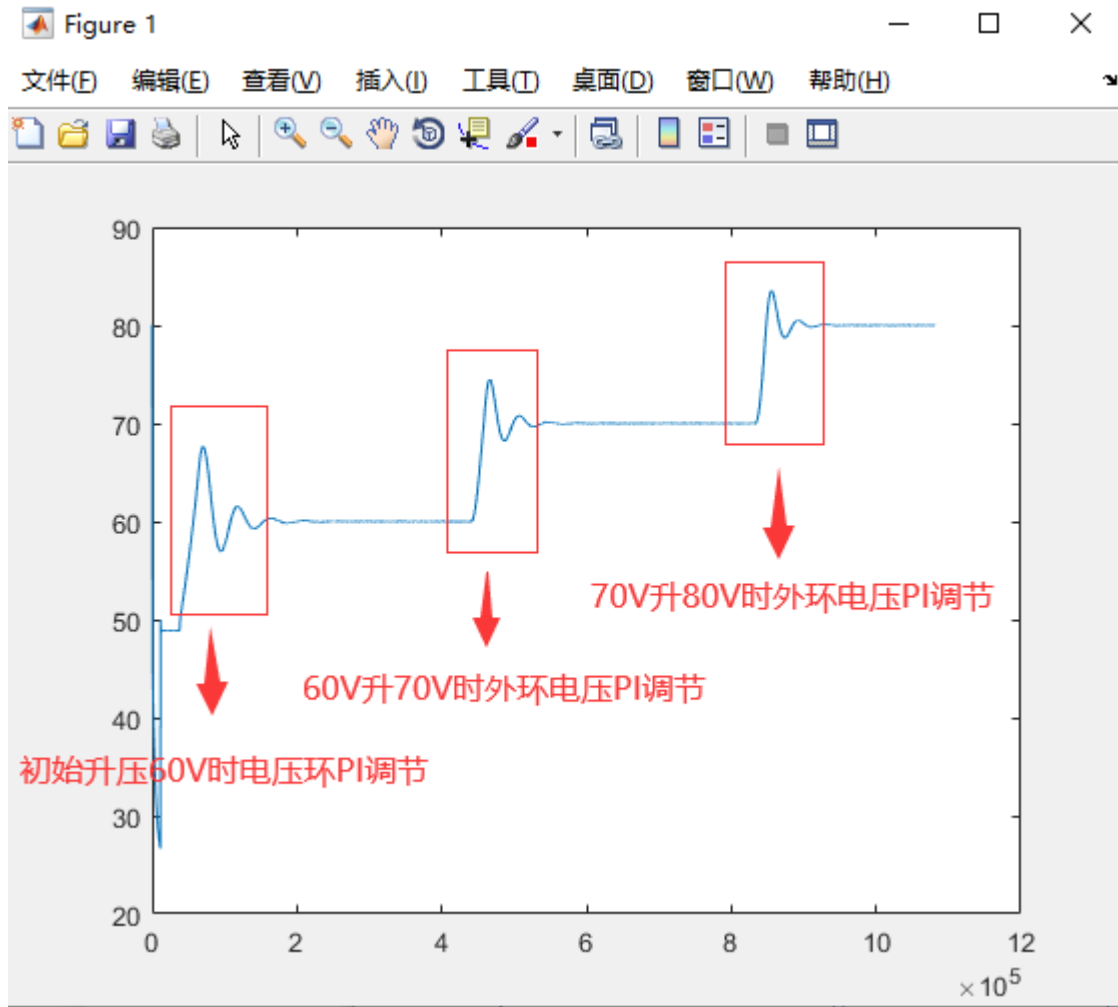


图 3.2.41 高压电压波形

低压电流（输入电流）波形如下图 3.2.42 所示；

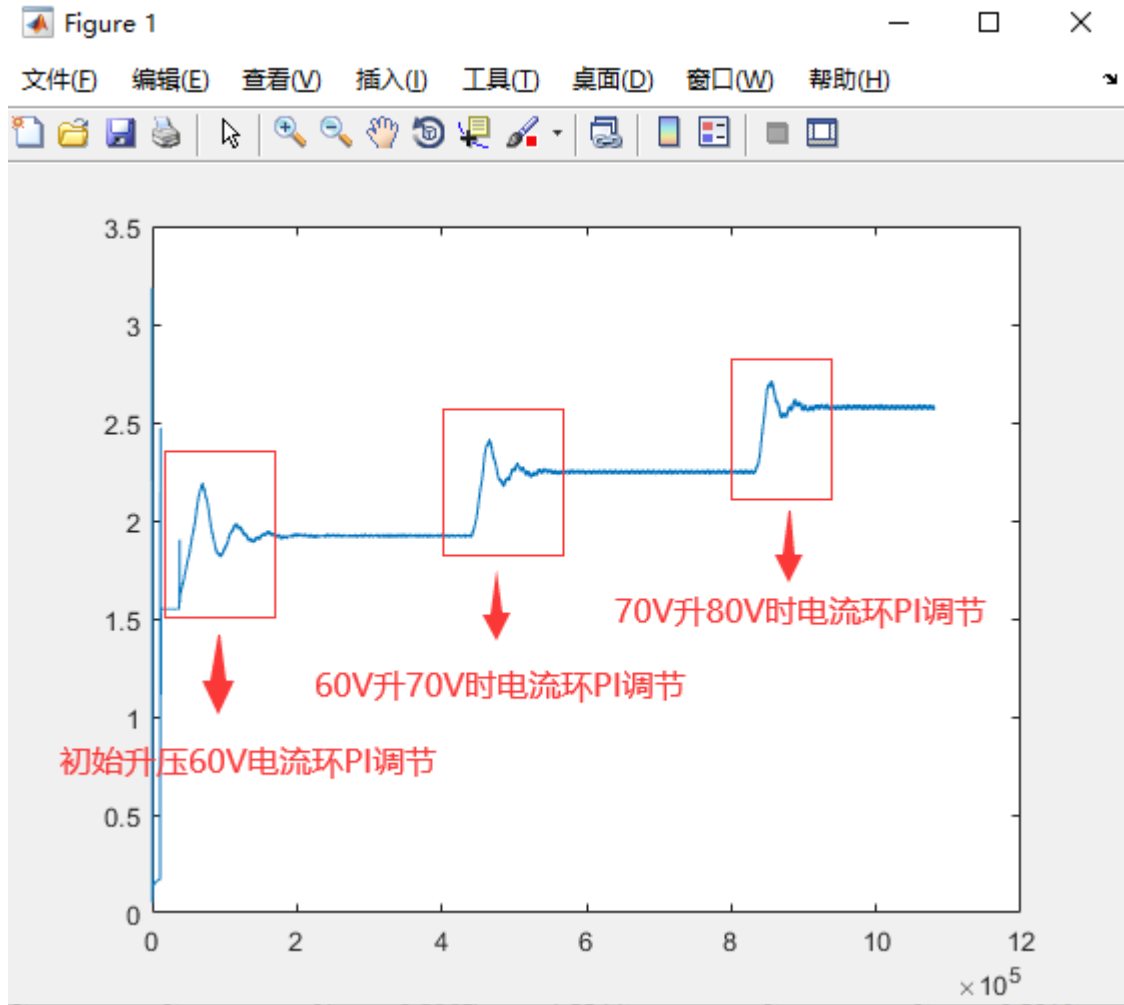


图 3.2.42 低压电流波形

可以看出，随着电压从 50V-80V 逐渐升高，输出的电流也逐渐增加。

注：如需修改模型自行验证，可选择“导出模型”到任意英文目录下，然后重新修改并下载验证，具体操作如下图 3.2.43 所示；



图 3.2.43 导出模型

实验三 Buck 降压 DC-DC 直流-直流变换实验

降压斩波电路（BUCK Chopper）的原理图如图 3.3.1 所示。

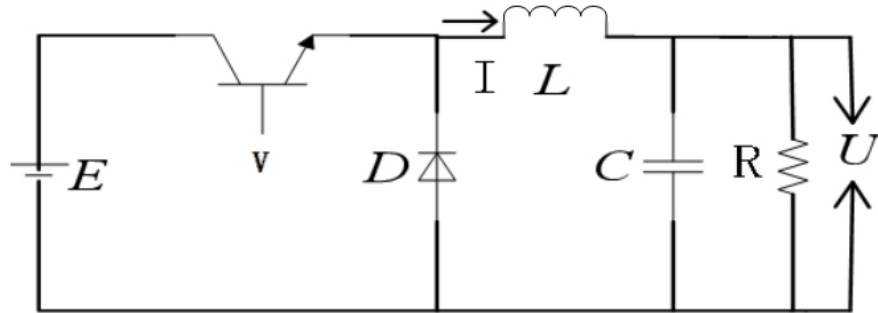


图 3.3.1 BUCK Chopper 电路拓扑图

该电路使用了一个全控型开关器件 V ，在 V 导通时，电路等效图 3.3.2 所示。电源 E 向负载供电，输出电压 $U = E$ ，负载电流 I 线性上升。

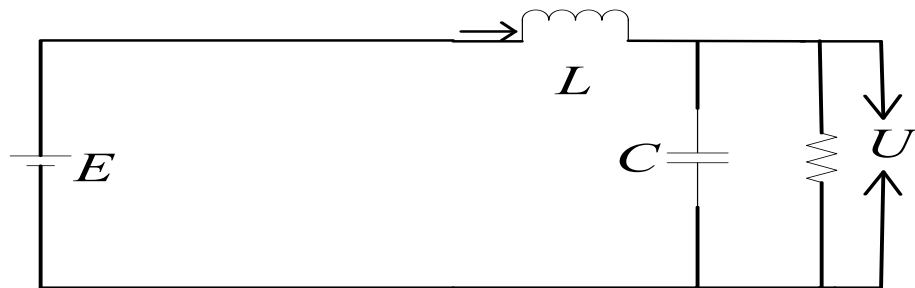


图 3.3.2 BUCK 开关通态等效图

当 V 关断时，电路等效如图 3.3.3 所示。负载电流经过二极管 D 续流，输出电压 U 接近零，负载电流线性衰减。为了使负载电流连续且脉动小，通常串接感量较大的电感。

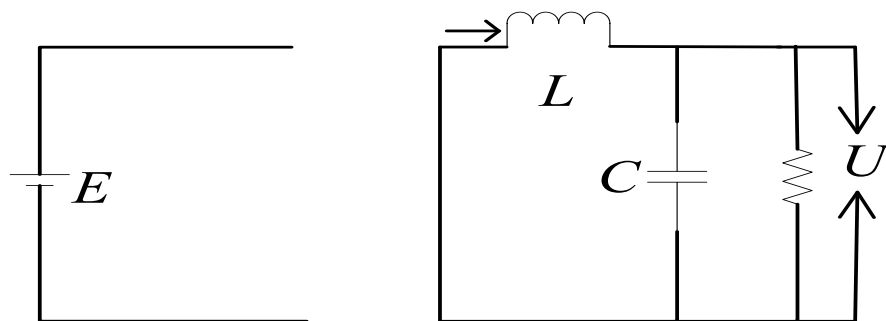


图 3.3.3 BUCK 开关断态等效图

至一个周期 T 结束，再驱动 V 导通，重复上一周期的过程。当电路工作于稳态时，负载电流在一个周期的初值和终值相等。

输出电压与电源关系为：

$$U = (t_{on}/T) * E$$

设 t_{on}/T 为 D ，整理后输出电压与电源关系就是：

$$U = D * E$$

D 就是常说的占空比。

图 3.3.4 为上述过程中，负载电流随开关通断状态的变化波形。

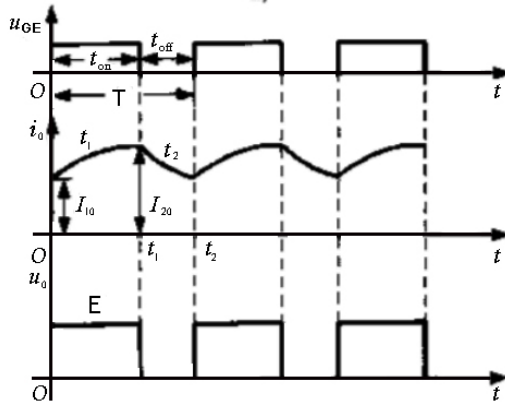


图 3.3.4 BUCK 电路负载电流变化波形图

若负载中的 L 值较小，则在 V 关断后，负载电流很可能在 t_2 时刻变为零，这样就出现了断续的情况。这样就导致负载电压 U 平均值被抬高。一般不希望出现这样的断续的情况。

离线模型操作

接下来介绍 BUCK 降压斩波电路的 Simulink 仿真模型的搭建。

实验操作步骤（模型名称 BUCK_fix_duty.mdl）：

第一步：双击打开 VIEW1000 软件，如下图 3.3.5 所示图标；



图 3.3.5 VIEW1000 软件

第二步：在软件中切换至“工作区”界面，然后在工具栏中单击“实验”，并选择实验三，如下图 3.3.6 所示；

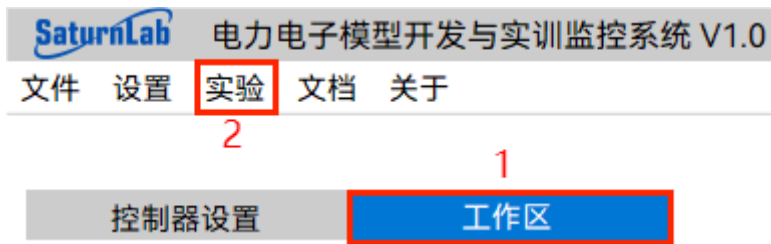


图 3.3.6 实验选择

首先软件界面会切换到实验三中已搭建好的操作界面，图 3.3.7 所示实验三上位机界面（BUCK.sp1000）搭建如下：

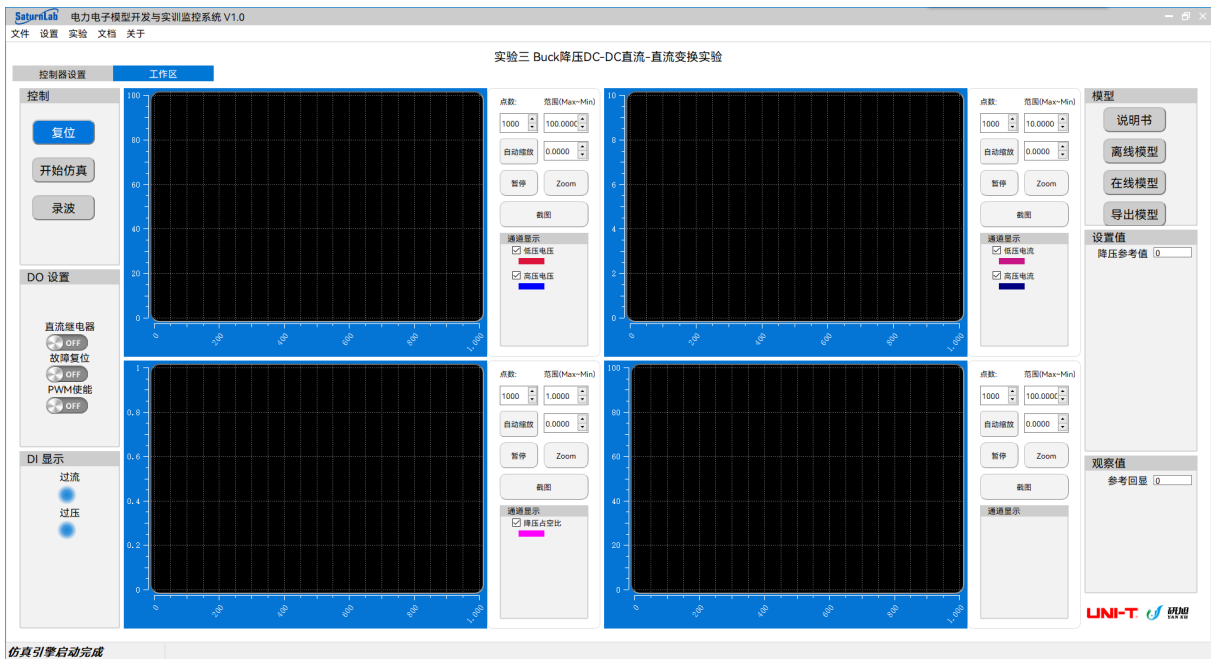


图 3.3.7 实验三上位机软件界面

第三步：在“工作区”界面的右上角“模型”框中点击“离线模型”，如图 3.3.8 所示；



图 3.3.8 打开离线模型

选择“BUCK_fix_duty.mdl”，如下图 3.3.9 所示：



图 3.3.9 选择离线模型

然后等待 Matlab 软件打开，并打开已搭建好模型“BUCK_fix_duty.mdl”，模型打开后如图 3.3.10 所示：

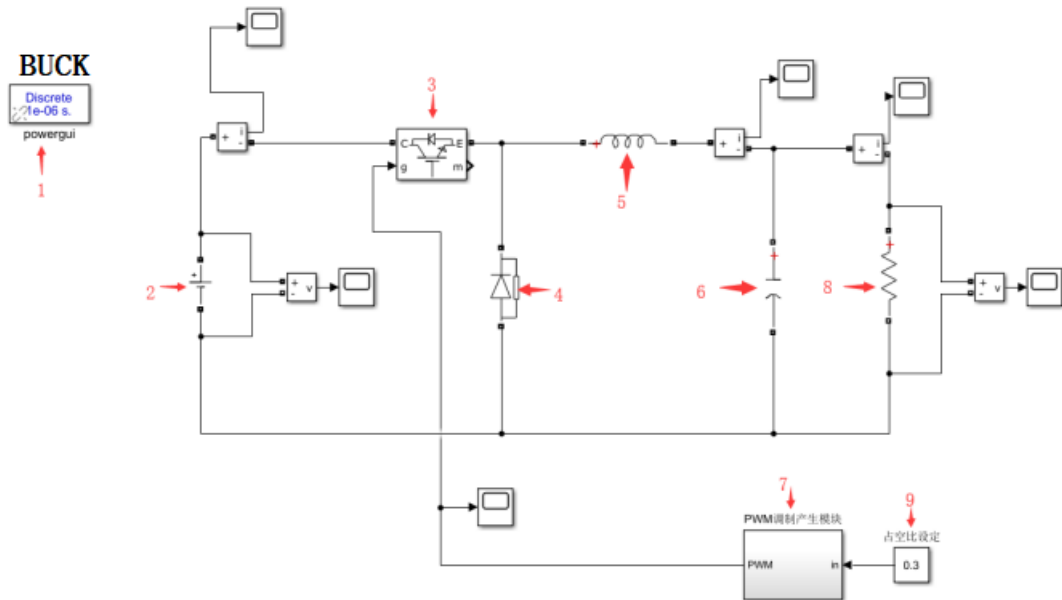


图 3.3.10 BUCK Simulink 模型

图中红色标注：

标注 1 为 Simscape 电力系统专用技术模型的环境块，设置步长为 $1e-6$ ；

标注 2 为直流源，设置 400V；

标注 3 为电感，设置为 2mH；

标注 4 为 IGBT；

标注 5 为二极管；

标注 6 为电容器，设置 1500uf；

标注 7 为 PWM 产生模块，具体电路如图 3.3.11 所示。in1 为占空比值，与 20KHz

的等腰三角波载波比较后产生 PWM；

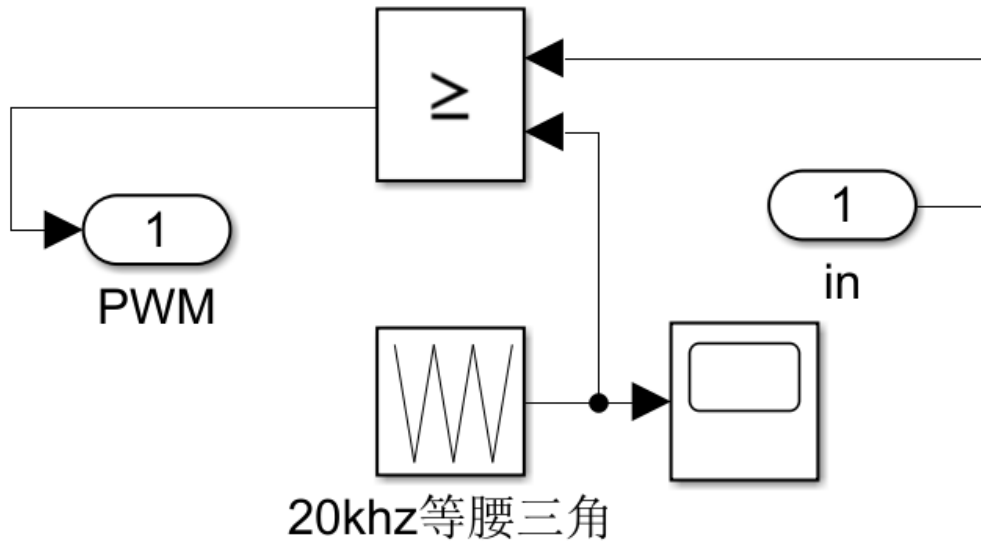
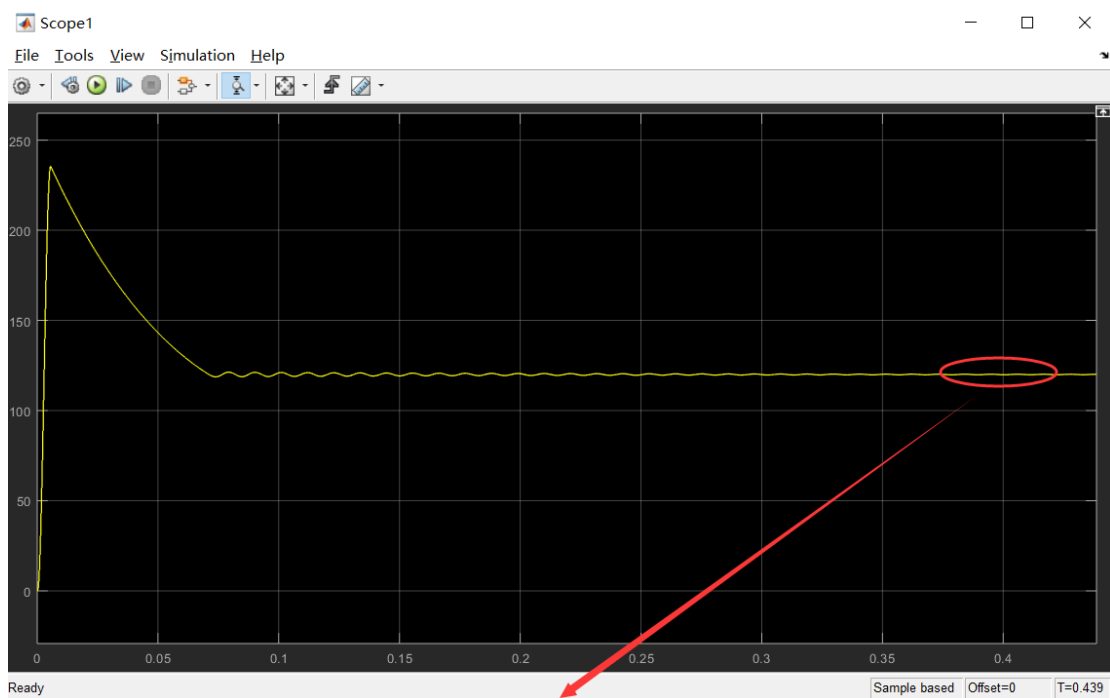


图 3.3.11 PWM 产生电路

标注 8 为电阻值，阻值设定 50 欧姆；

标注 9 为占空比设定值，当前设定 0.3。

理论计算，当占空比设定 0.3 时，此时电压应该降为 $0.3 * 400 = 120V$ 。图 3.3.12 为电压输出波形。最后稳态在 120V 上下波动，波动范围小于 0.4V。当占空比设定 0.5 时，此时电压应该升为 $0.5 * 400 = 200V$ 。图 3.3.13 为电压输出波形。最后稳态在 200V 上下波动，波动范围小于 0.2V。通过两种占空比值的实验，发现仿真符合理论。



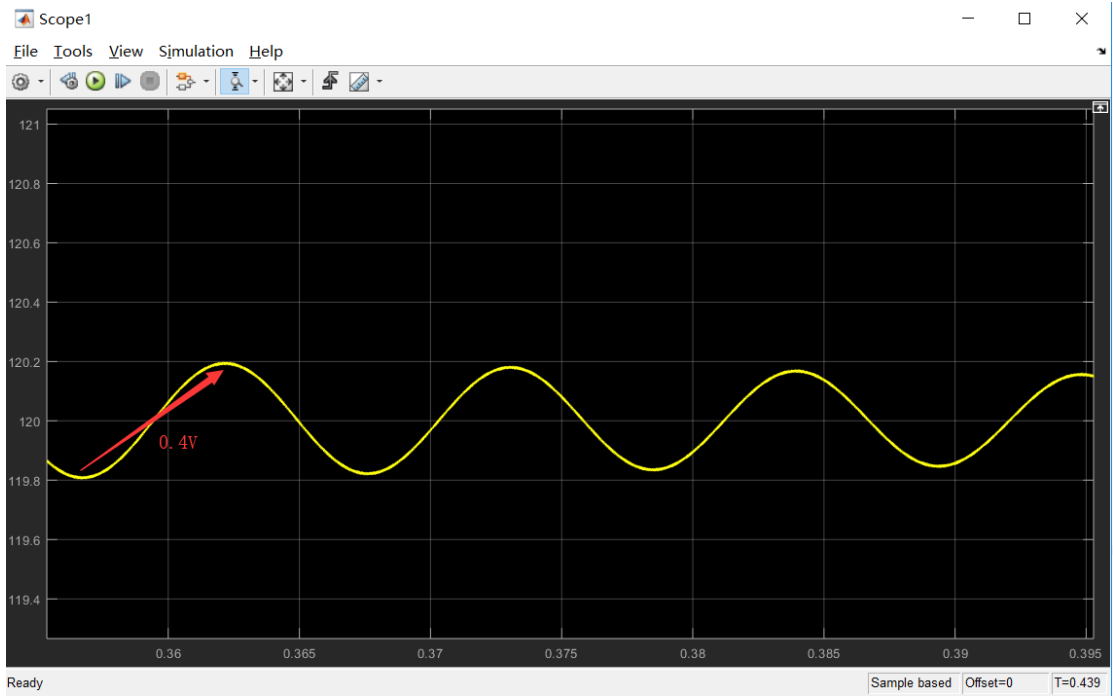
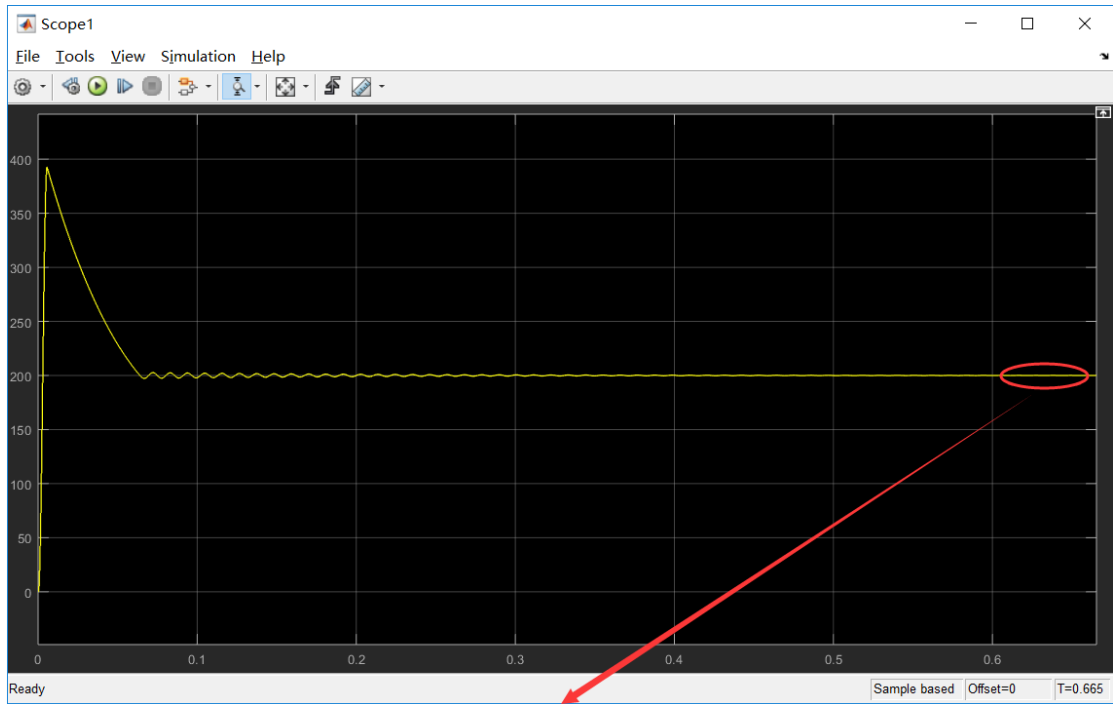


图 3.3.12BUCK 输出电压波形 1



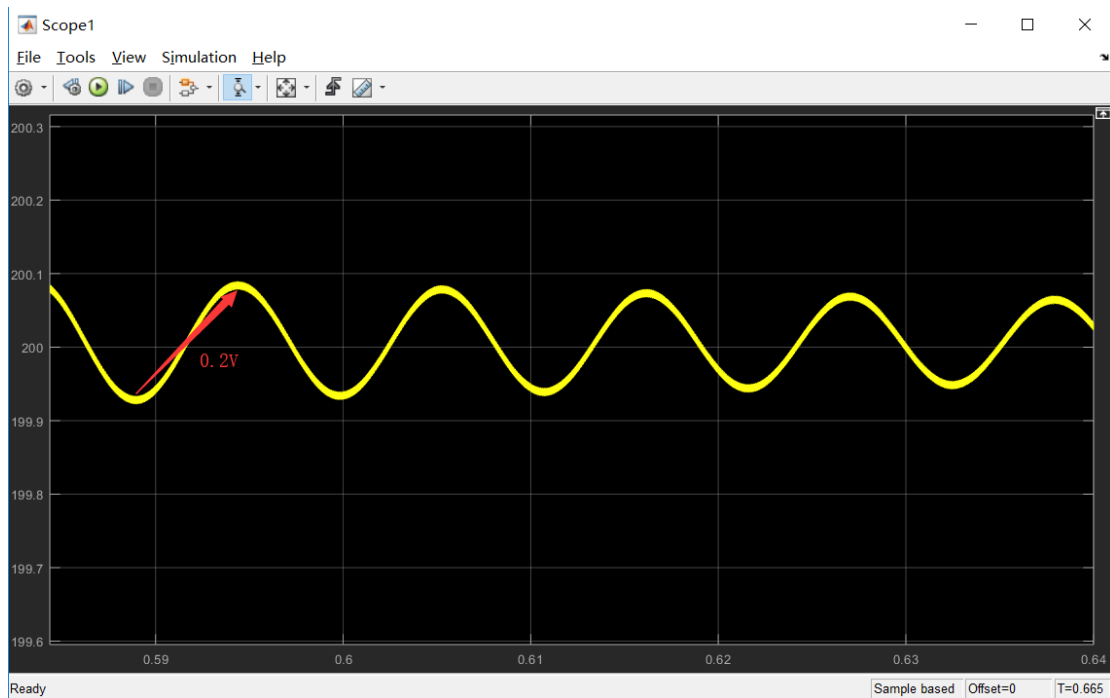


图 3.3.13 BUCK 输出电压波形 2

图 3.3.14 为负载电流变化图，可以清晰的查看到当开关通断时电流的变化情况。

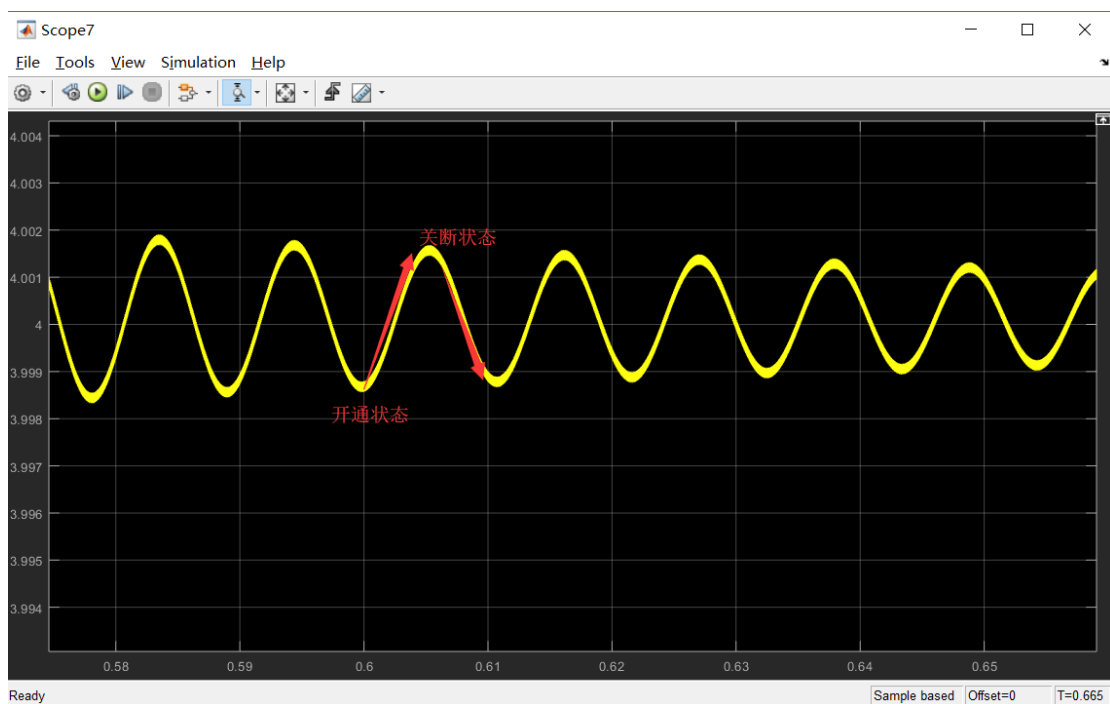


图 3.3.14 负载电流变化图

同 Boost 电路相同，当负载发生变化时，需要加入电压环和电流环控制，闭环控制需要用到 PID 控制算法，在实验二中已有详细介绍，这里不再赘述，下面介绍 BUCK 双闭环控制仿真。

实验操作步骤（模型名称 BUCK.mdl）：

第一步：双击打开 VIEW1000 软件，如下图 3.3.15 所示图标；



图 3.3.15 VIEW1000 软件

第二步：在软件中切换至“工作区”界面，然后在工具栏中单击“实验”，并选择实验三，如下图 3.3.16 所示；

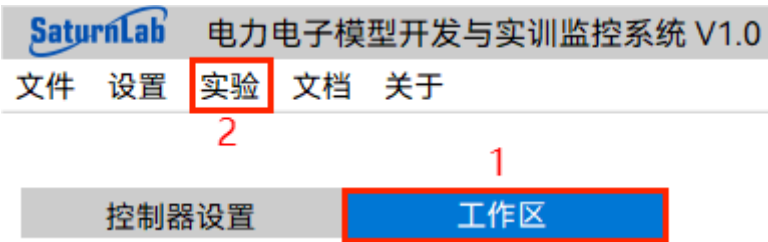


图 3.3.16 实验选择

首先软件界面会切换到实验三中已搭建好的操作界面，图 3.3.17 所示实验三上位机界面（BUCK.sp1000）搭建如下：

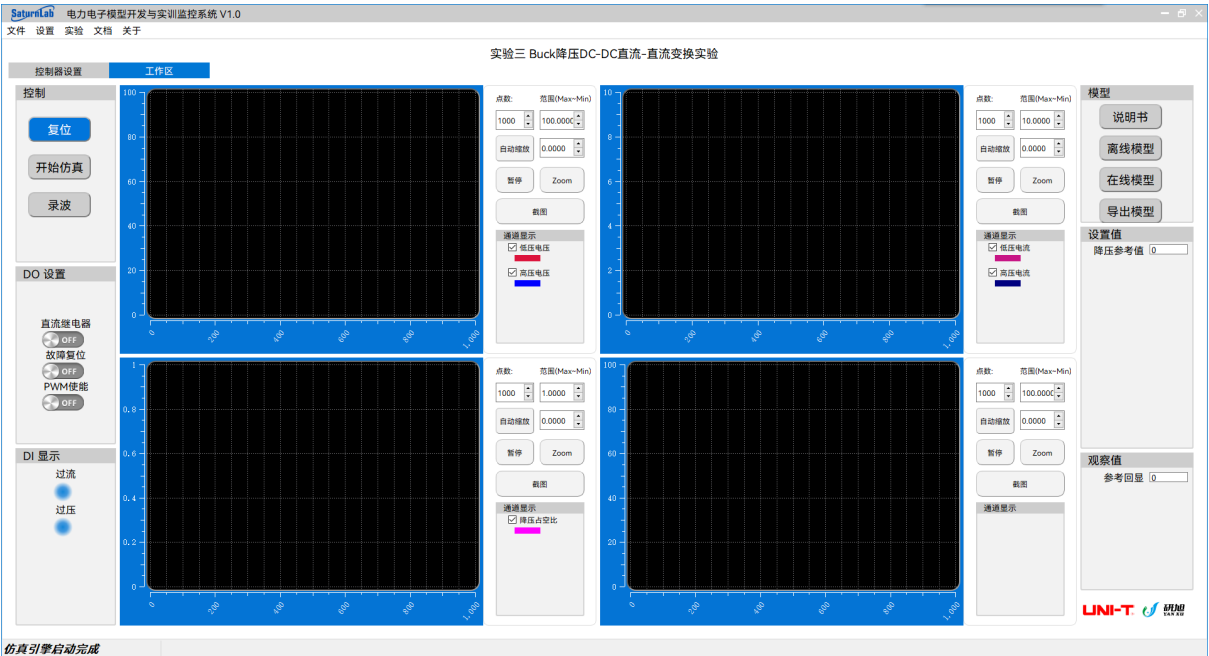


图 3.3.17 BUCK 快速原型上位机软件界面

第三步：在“工作区”界面的右上角“模型”框中单击“离线模型”，如图 3.3.18 所示；



图 3.3.18 打开离线模型

选择“BUCK.mdl”，如下图 3.3.19 所示;

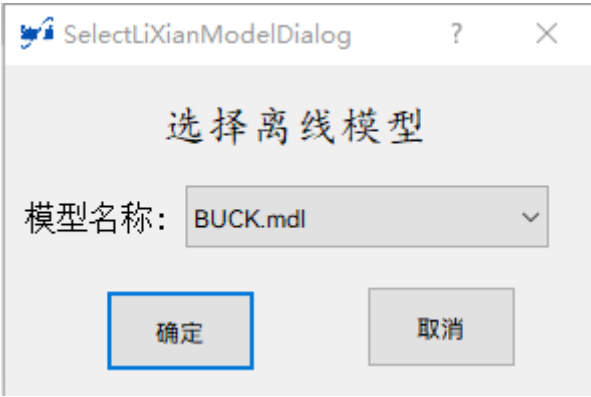


图 3.3.19 选择离线模型

然后等待 Matlab 软件打开，并打开已搭建好模型“BUCK.mdl”，模型打开后如图 3.3.20 所示:

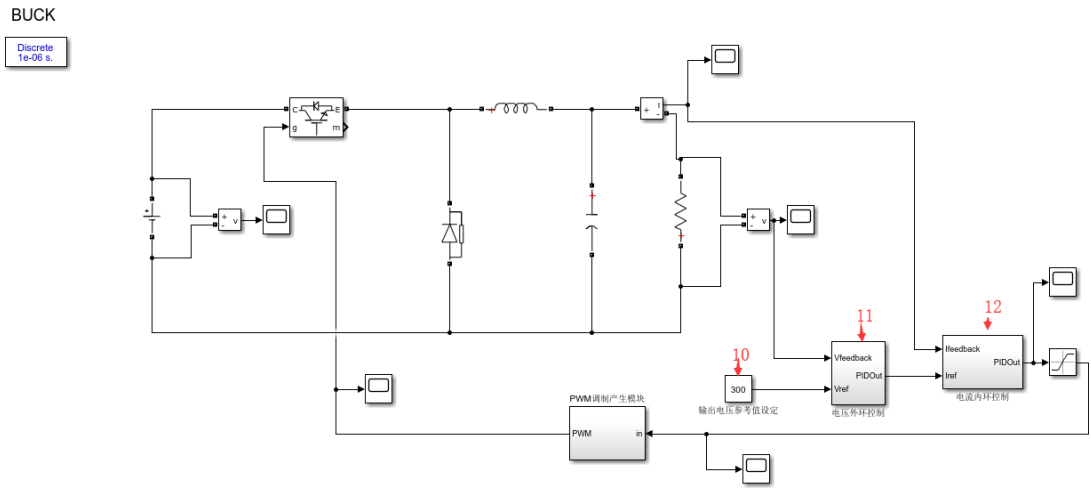


图 3.3.20 BUCK 双闭环控制模型

图中红色标注:

标注 10 为输出电压输出目标值；

标注 11 为电压外环 PI 控制，其内部电路如图 3.3.21 所示。Vfeedback 为电压反馈值，Vref 为电压参考值，PI 模块的比例系数为 0.1，积分系数为 0.2。PIDOut 为电压环输出值。

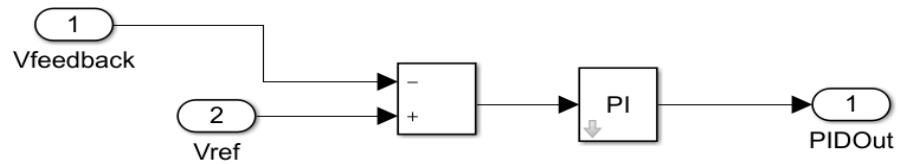


图 3.3.21 电压 PI 控制电路

标注 12 为电流内环 PI 控制，其内部电路如图 3.3.22 所示。Ifedback 为电流反馈值，Iref 为电流参考值，PI 模块比例系数为 2，积分系数为 6。

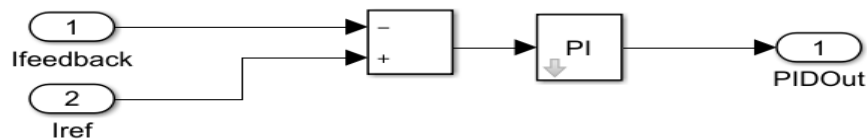


图 3.3.22 电流 PI 控制电路

图 3.3.23 为 BUCK 电路电压输出波形图。电压从 400V 花费 3s 时间达到 300V 稳定状态，之后在 300v 上下变化大概 1V 左右。修改一组 PI 参数查看控制效果的变化，将外环电压的 PI 值全部缩小 10 倍后，如图 3.3.24 所示 BUCK 电路输出的电压波形图。可以看出，稳态时间从原来的 3S 时间变为现在的 7s 时间，明显响应时间加长。

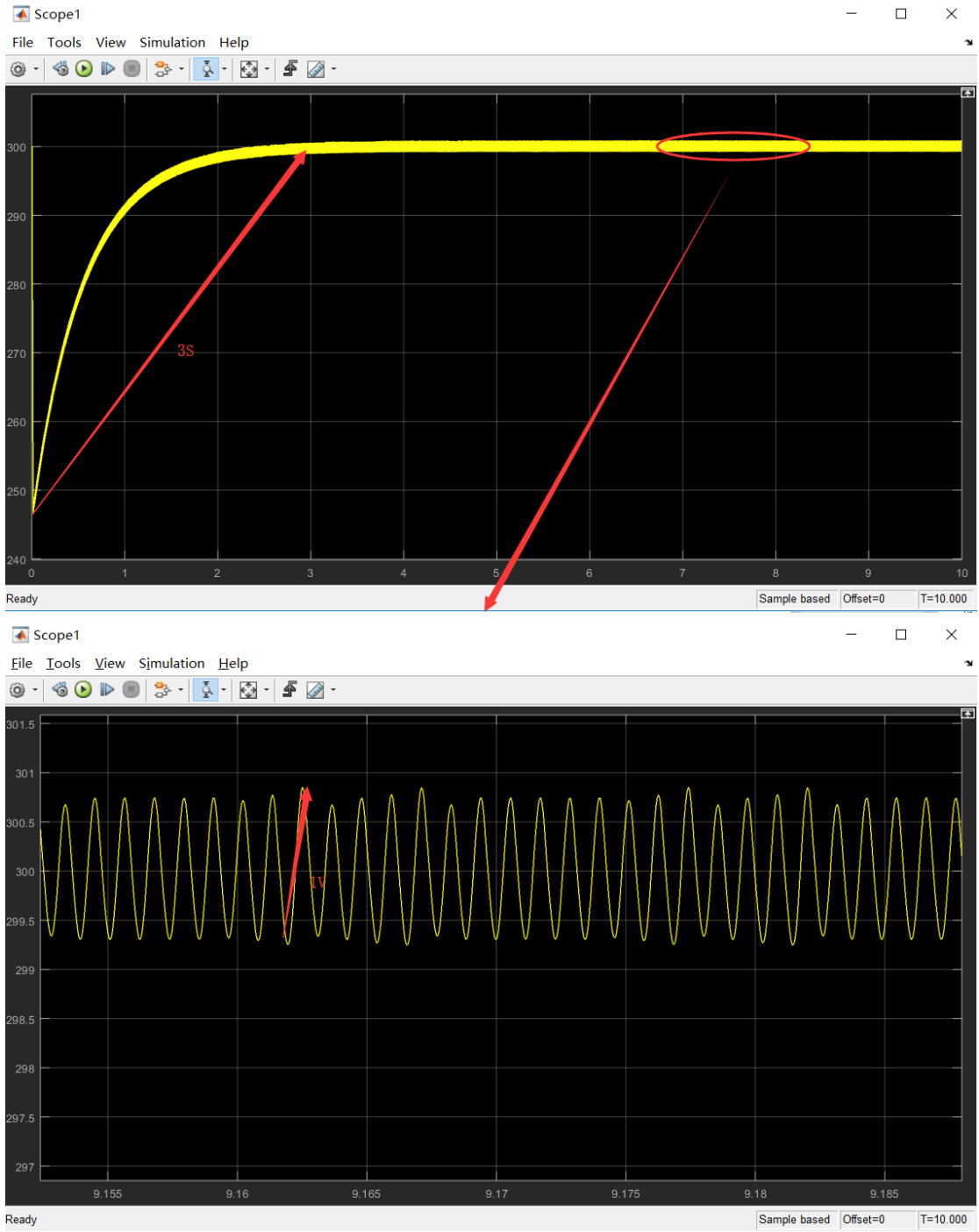


图 3.3.23 BUCK 输出电压波形图 1

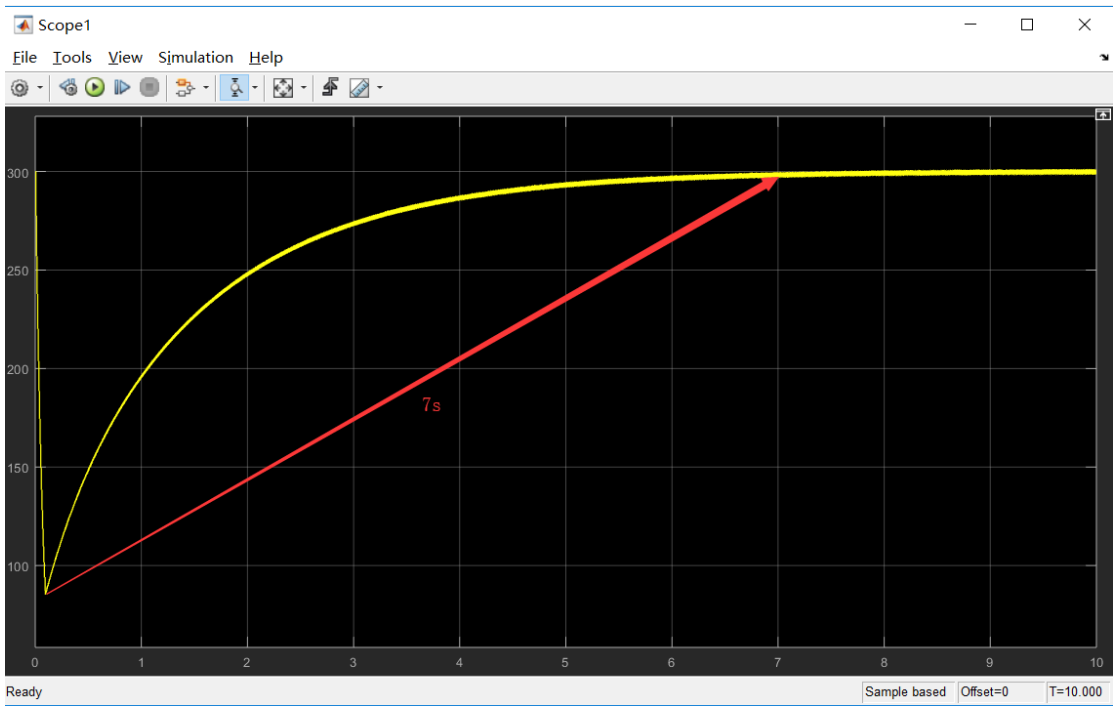


图 3.3.24 BUCK 输出电压波形图 2

在线模型操作

首先统计一下算法模型中参与控制的输入量和输出量。

控制输入量	控制输出量
低压端电压	PWM 输出
高压端电流	-----
降压参考值	-----

清楚了输入量和输出量，需要了解的就是快速原型控制器具体与主电路的信号连接情况。

快速原型控制器	主电路
ADC2	低压端电压
ADC1	低压端电流
ADC5	高压端电压
ADC6	高压端电流
PWM1A_DUTY	BUCK 开关管

注意：出于安全问题的考虑，所有功率硬件及仪器设备都采用小功率器件，所以在
线模型仿真中的一些参数也是根据实际情况进行下调。

实验操作步骤（模型名称 BUCK.slx）：

第一步：双击打开 VIEW1000 软件，如下图 3.3.25 所示图标；



图 3.3.25 VIEW1000 软件

第二步：在软件中切换至“工作区”界面，然后在工具栏中单击“实验”，并选择实验三，如下图 3.3.26 所示；

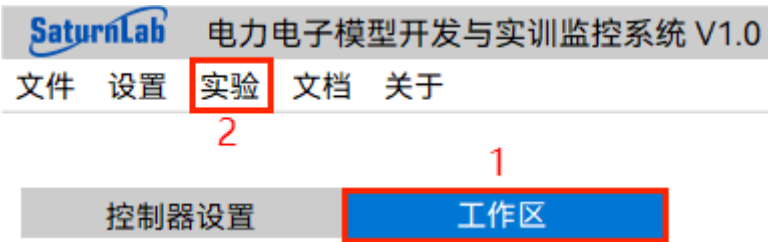


图 3.3.26 实验选择

首先软件界面会切换到实验三中已搭建好的操作界面，图 3.3.27 所示实验三上位机界面（BUCK.sp1000）搭建如下：

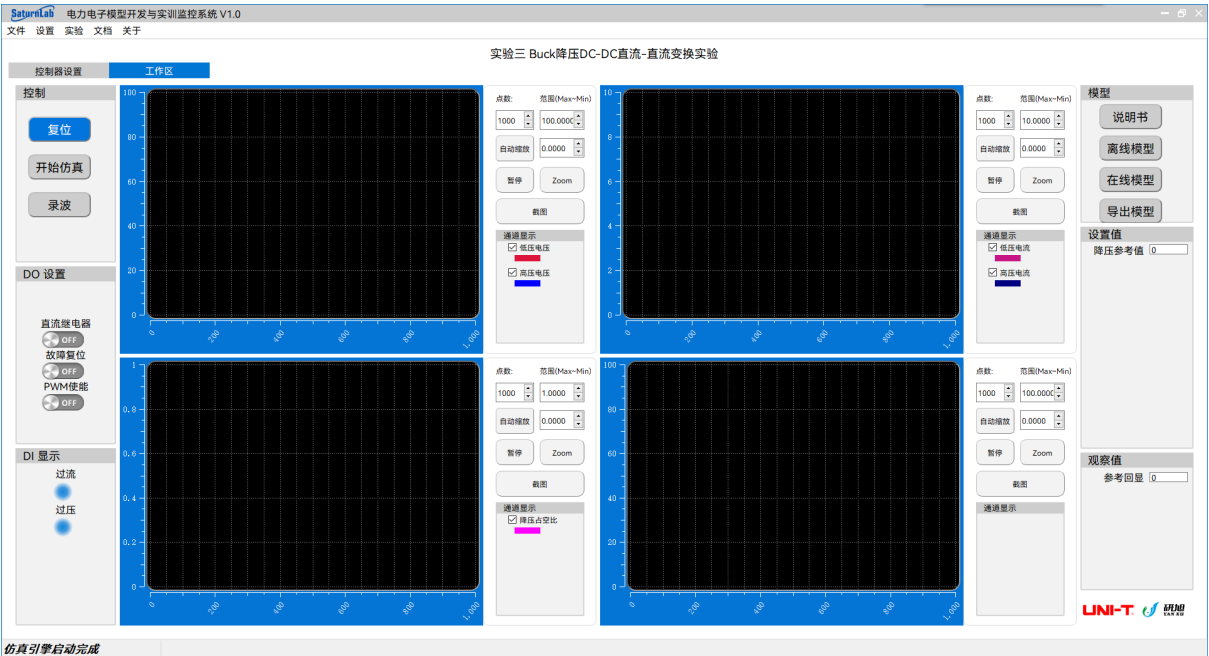


图 3.3.27 BUCK 快速原型上位机软件界面

第三步：在“工作区”界面的右上角“模型”框中点击“在线模型”，然后等待 Matlab 软件打开，并打开已搭建好模型“BUCK.slx”，操作如下图 3.3.28 所示；



图 3.3.28 打开在线模型

模型打开后如图 3.3.29 所示：

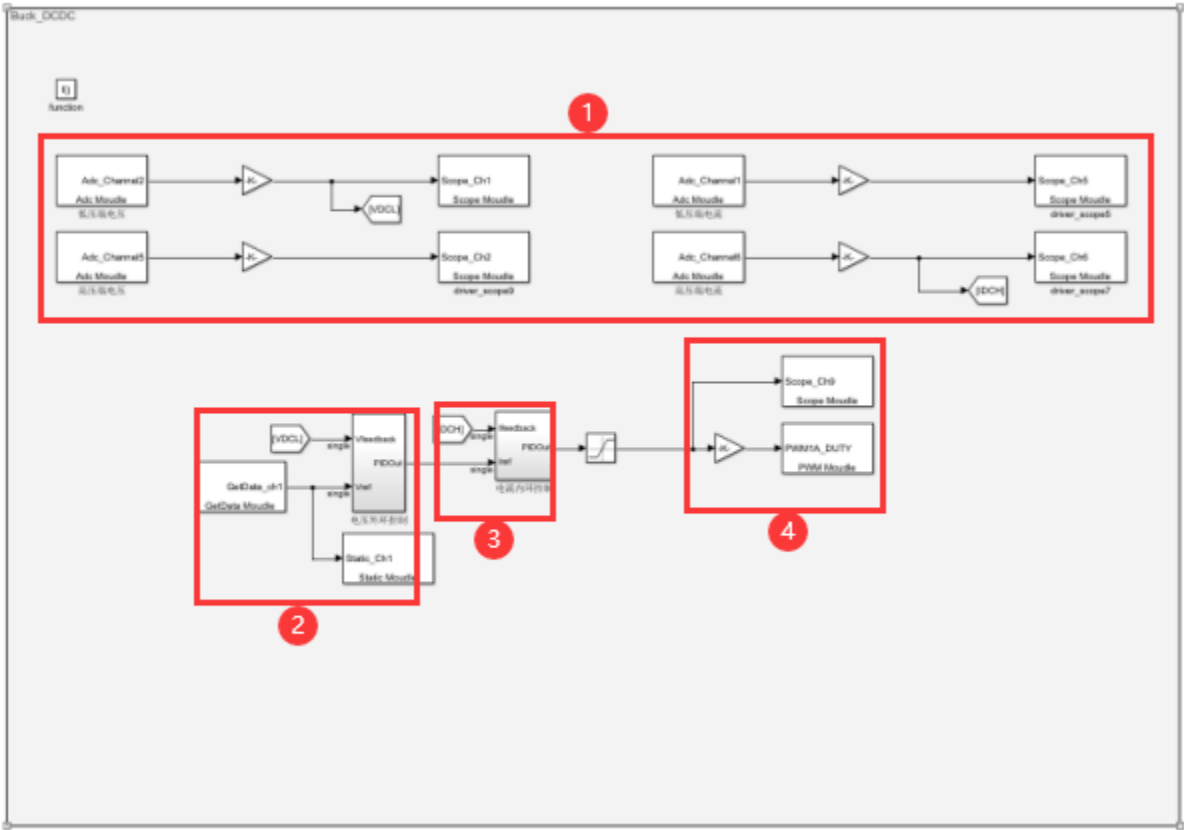


图 3.3.29 BUCK 快速原型控制模型

图中红色标注：

1、ADC 采集模块：通过 ADC 采集模块采集直流高压侧及低压侧电压电流信号，并通过 SCOPE 模块在上位机上显示成电压电流波形；其中 Adc_Channel2 采集低压侧电压，Gain 模块的值为 $3.0518e-4 \times 30$ ，即转换变比为 $3.0518e-4 \times 30$ ，计算原理如下图 3.3.30 所示，Adc_Channel5 采集高压侧电压，转换变比为 $3.0518e-4 \times 30$ ，Adc_Channel1 采集低压

侧电流，转换变比为 $3.0518\text{e-}4 \times 1.6667$ ，Adc_Channel6 采集高压侧电流，转换变比为 $3.0518\text{e-}4 \times 1.6667$ ；

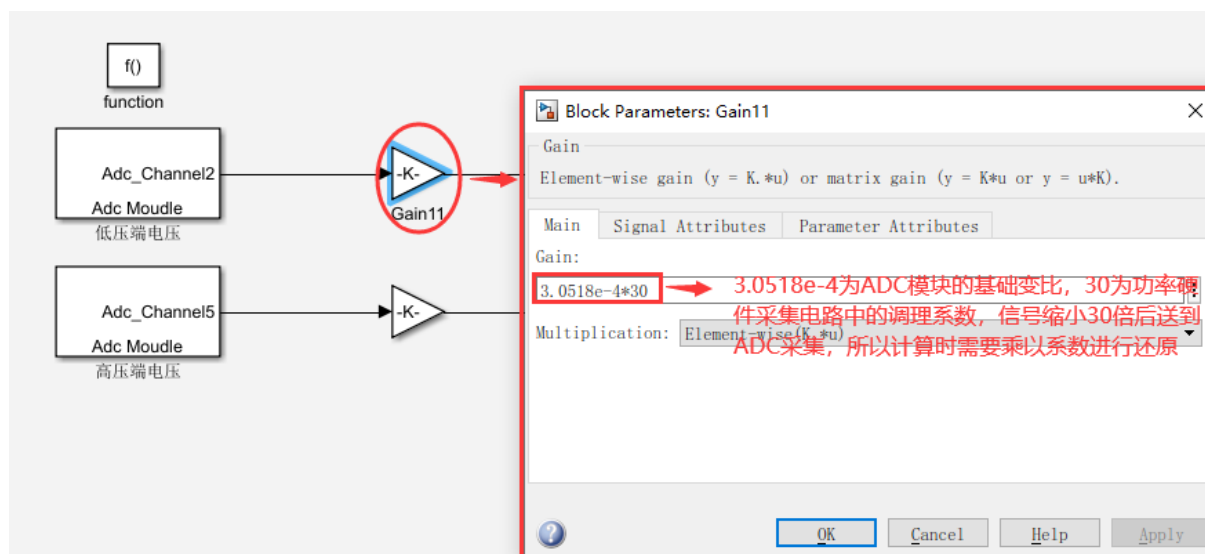


图 3.3.30 增益系数计算

2、外环电压控制：将模型中通过 GetData_ch1 输入的升压参考值减去采集的实际高压侧电压得到偏差值，通过 PI 计算得到参考电流；

3、内环电流控制：将外环电压控制经过 PI 计算得到的参考电流减去采集的实际低压侧电流得到偏差值，通过 PI 计算得到占空比值；

4、占空比传输模块：将计算得到的占空比，通过 PWM1A_DUTY 模块传输到 PWM 模块进行 PWM 信号的输出。

第四步：将主拓扑图中的 1 与 5 连接，2 与 6 连接，3 与 15 连接，4 与 16 连接。如下图 3.3.31 所示，这样就是一个 BUCK 降压电路。

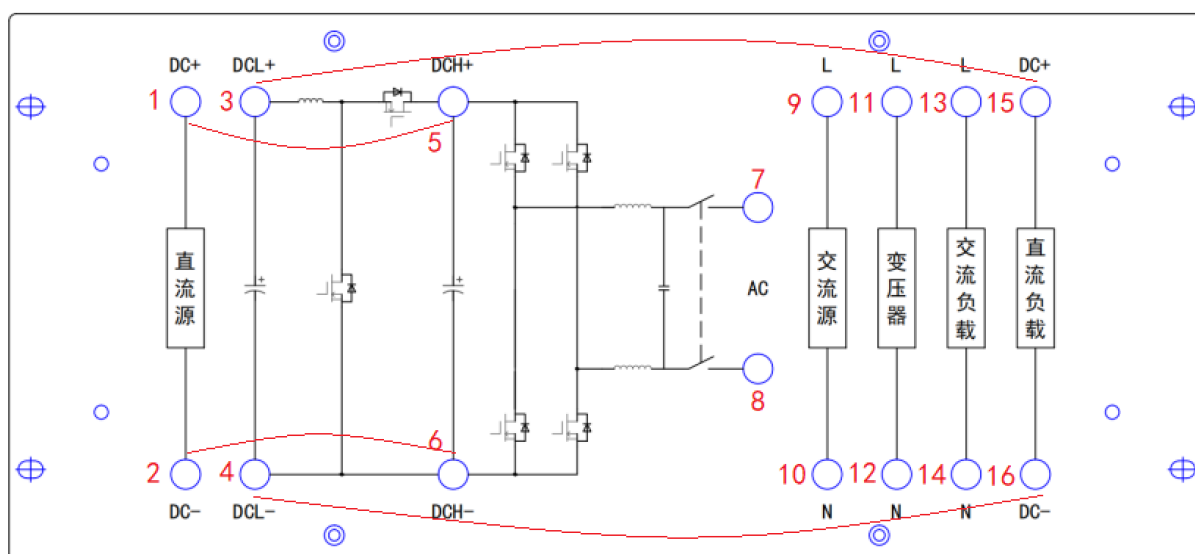


图 3.3.31 BUCK 电路拓扑连线

第五步：将柜体总电源开启，为系统供电。

第六步：待直流源启动后，设置输出电压为 80V，输出电流为 3A，点击“ON”按钮。然后设置直流负载，负载模式设置恒流模式，电流设定成 1.5A，带载电压设置成 7V，点击“ON”按钮；

第七步：切换到模型界面，下载模型到控制器，操作如下图 3.3.32 所示；

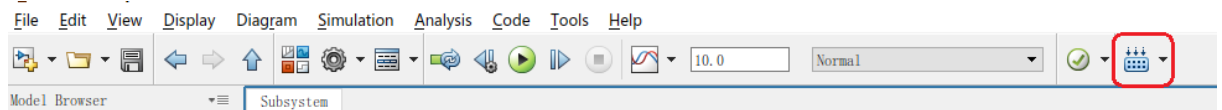


图 3.3.32 下载模型

查看编译过程及下载结果，如下图 3.3.33 所示：

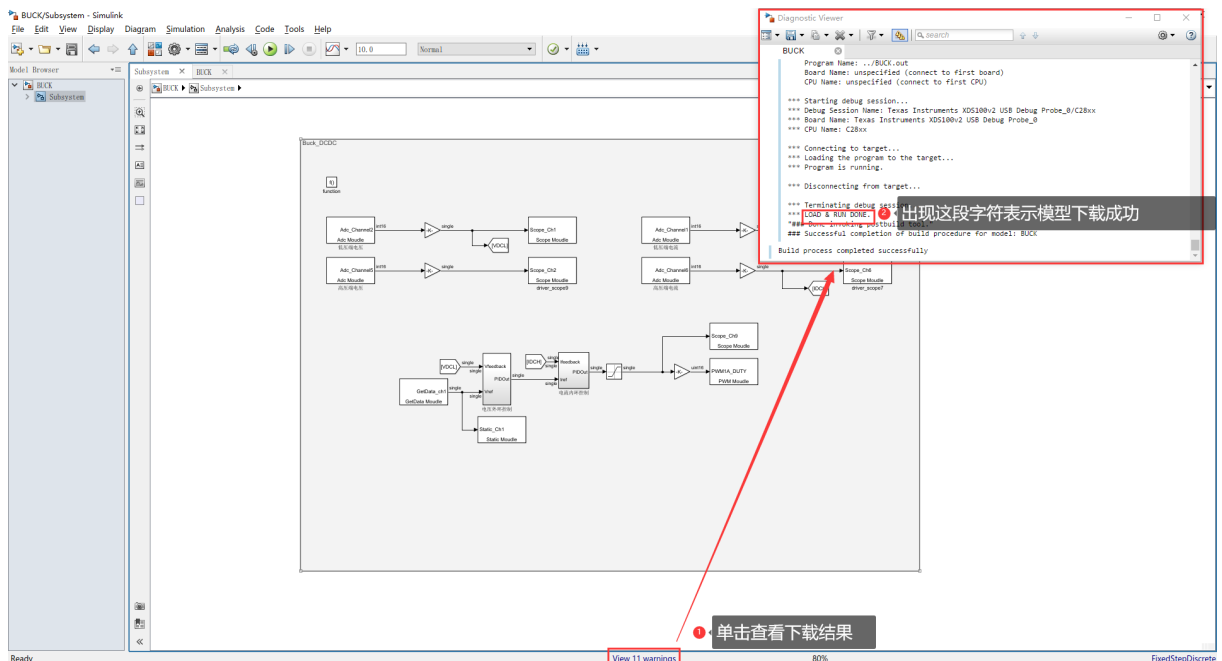


图 3.3.33 模型下载成功

第八步：上位机与计算机建立通信，首先切换到“控制器设置”界面，点击“建立通信”按钮，等连接上之后点击“设置”按钮，具体操作如下图 3.3.34 所示；

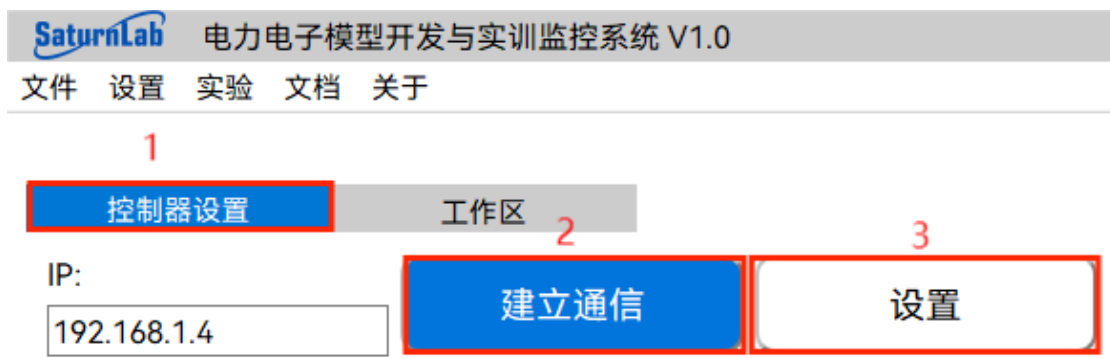


图 3.3.34 建立通信

第九步：运行模型，先切换到“工作区”界面，再将“降压参考值”设置为 60V，并点击计算机键盘“Enter”确认输入（先点击“开始仿真”，“参考回显”框会显示设定值是否生效，如回显值与设定值一样，表示设置生效，否则设置无效，需重新进行第九步操作），然后将“PWM 使能”置“ON”，“故障复位”先置“ON”，再置“OFF”，再将“直流继电器”置“ON”。先点击“复位”，然后立即点击“开始仿真”按钮，具体操作如下图 3.3.35 所示；

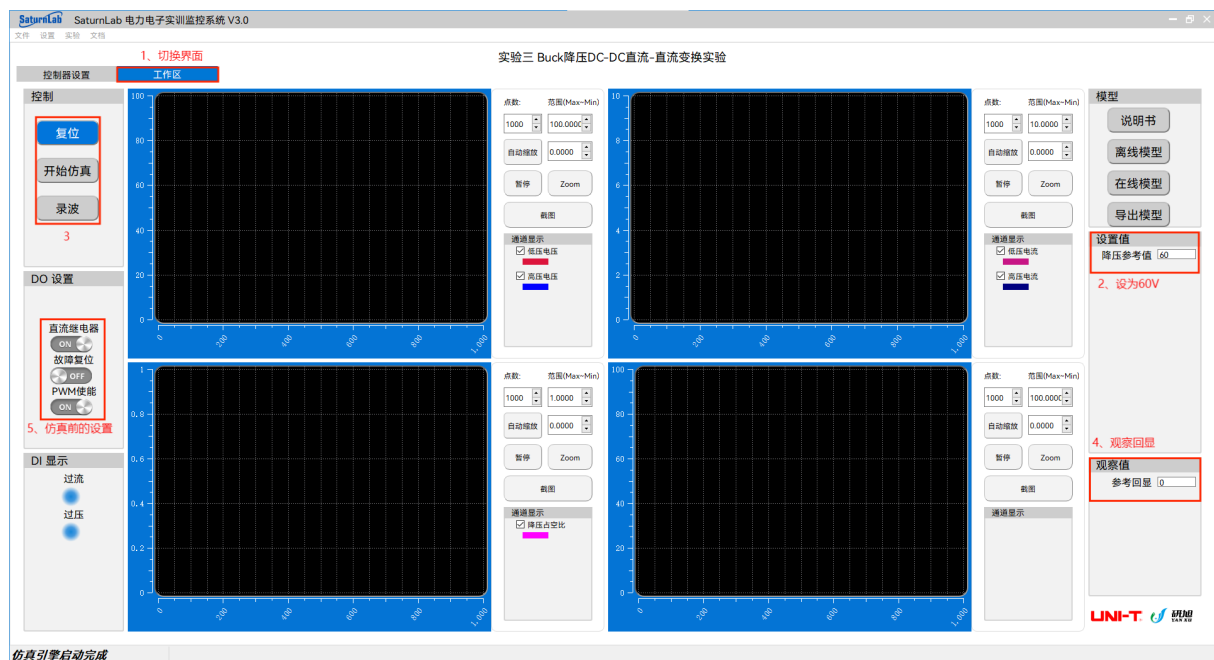


图 3.3.35 具体操作

注意：若系统运行故障，“DI 显示”界面中的两个蓝灯会变成红色，指示其中的一种或两种故障，此时点击“停止仿真”，将“故障复位”重新置“ON”，再置“OFF”，同时点击“复位”按钮，继续点击“开始仿真”即可。

第十步：等高压侧电压稳定在 60V 后，再设置“降压参考值”为 50V，等电压稳定后再继续设置为 40，最小设置到 10V，最大设置到 70V。模型运行过程中可通过上位机界面查看控制效果，运行结果如下图 3.3.36 所示，同时可以点击“录波”按钮，以备后期分析数据；

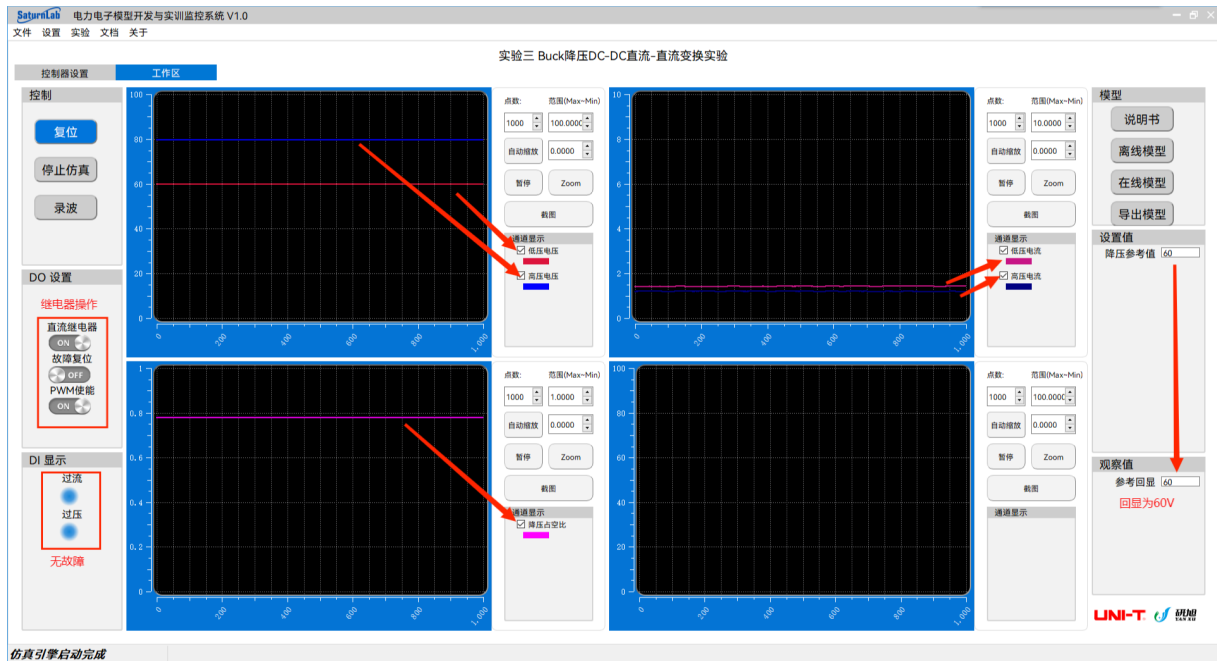


图 3.3.36 运行结果

第十一步：仿真停止，先点击“停止仿真”按钮，然后将“PWM 使能”、“直流继电器”置“OFF”即可停止仿真。如已录播，可将保存的数据 xx.mat 放入 MATLAB 查看，采用 Matlab 的绘图工具对波形进行分析（录播操作在实验二中已有详细介绍）。

下图 3.3.37 为低压电压（输出电压）从 80V 降压到 60V，再到 50V 的，最后到 40V 输出电压波形。

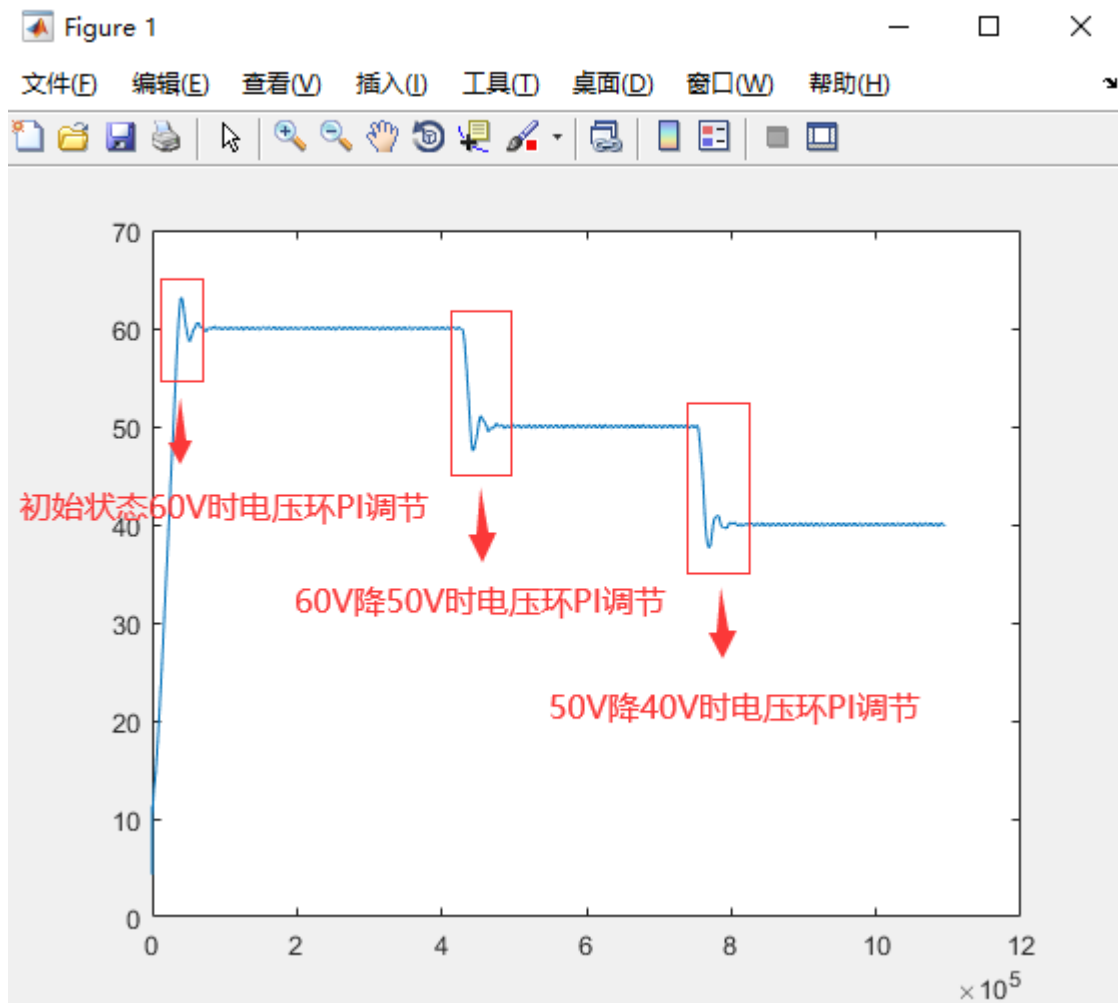


图 3.3.37 低压电压波形

高压电流（输入电流）波形如下图 3.3.38 所示；

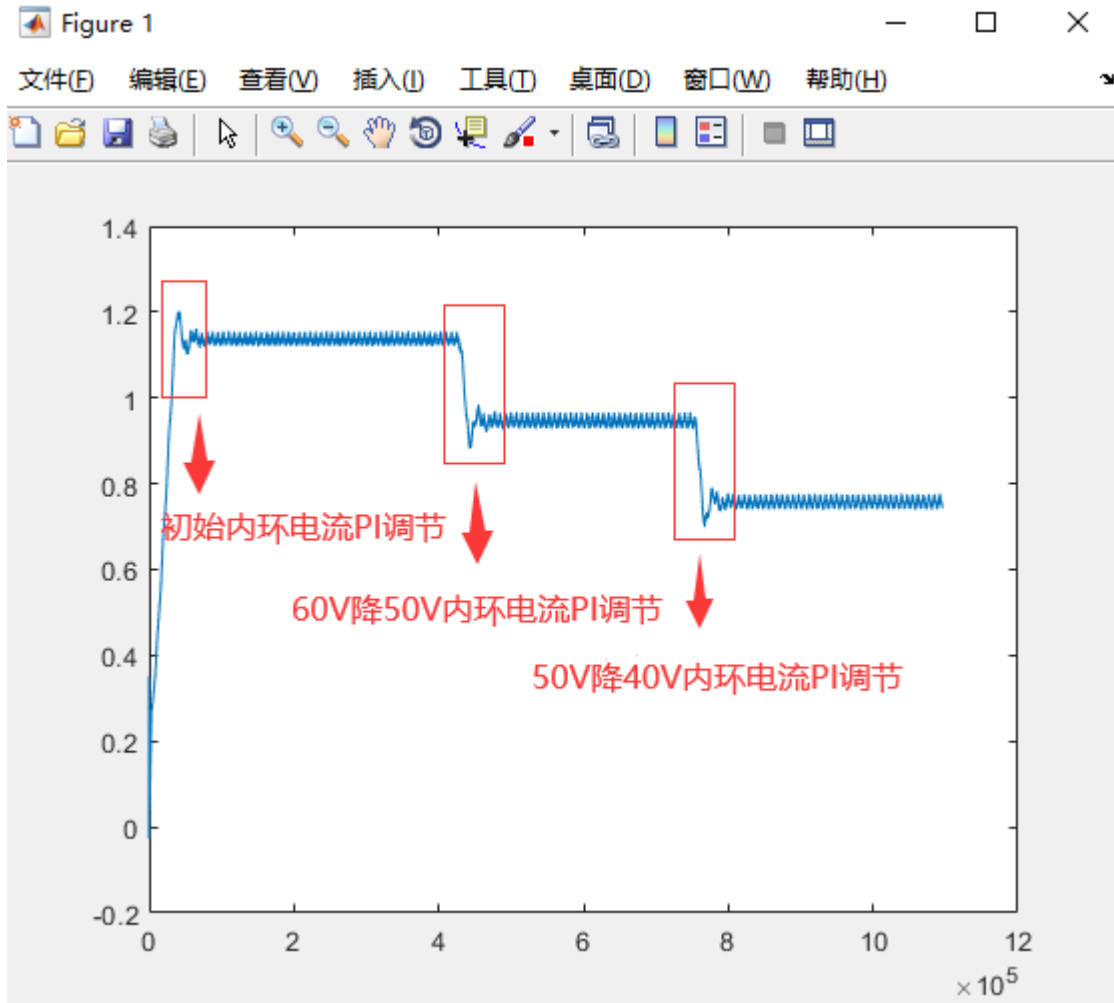


图 3.3.38 低压电流波形

可以看出，随着电压从 60V-40V 逐渐降低，高压电流输出的电流也逐渐减小。

注：如需修改模型自行验证，可选择“导出模型”到任意英文目录下，然后重新修改并下载验证，具体操作如下图 3.3.39 所示；



图 3.3.39 导出模型

实验四 交流整流 AC-DC 交流-直流变换实验

整流电路（Rectifier）是电力电子电路中出现最早的一种，它将交流电变为直流电，应用十分广泛，电路形式多种多样，各具特色。

整流电路分类：按照组成的器件可分为不可控整流、半控整流、全控整流三种；按照电路结构可分桥式电路和零式电路；按照交流输入相数分为单相整流和多相整流；按照变压器二次侧电流的方向分成单向和双向，又分单拍电路和双拍电路。

目前在各个领域实际应用的整流电路几乎都是晶闸管相控整流电路或者二极管整流电路。晶闸管相控整流电路的输入电流滞后于电压，其滞后角随着触发角 α 增大而增大，功率因数也随之降低。同时输入电流中谐波分量也相当大。二极管整流电路输入电流谐波分量很大，所以功率因数也很低。随着以 IGBT 为代表的全控型器件的不断进步，在逆变电路中采用的 PWM 控制技术相当成熟。把逆变器中的 PWM 控制技术用于整流电路就形成了 PWM 整流电路。

如上所述，PWM 整流的性能必须满足以下两个要求：

- 输入电流的波形必须是正弦波；
- 保证网侧功率因数为 1。

单相全桥 PWM 整流电路如图 3.4.1 所示。

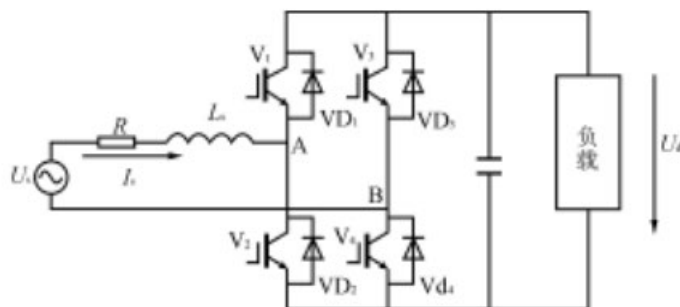


图 3.4.1 单相全桥 PWM 整流电路

图 3.4.2 给出了 PWM 整流电路的向量图，其中 U_N 表示电网电压， U_S 为整流电路输入的交流电压， U_L 为连接电抗器 L_S 的电压。图中滞后的相角 φ ， I_S 和 U_S 的相位完全相同，电路工作在整流状态，且功率因数为 1。这就是 PWM 整流电路的基本工作原理。

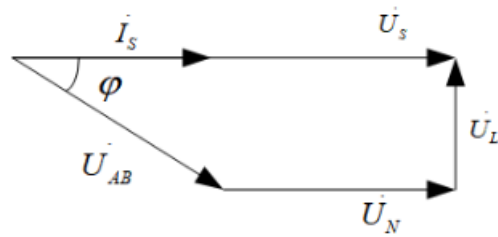


图 3.4.2 单相全桥 PWM 整流电路向量图

同 SPWM 逆变电路控制输出电压类似，可在 PWM 整流电路的交流输入端 AB 之间产生一个正弦波调制 PWM 波 U_{AB} ， U_{AB} 中除了含有与电源同频率的基波分量外，还含有与开关频率有关的高次谐波。由于电感 L_s 的滤波作用，这些高次谐波电压只会使交流电流 I_s 产生很小的脉动。如果忽略这种脉动， I_s 为频率与电源频率相同的正弦波。在交流电源电压 U_s 一定时， I_s 的幅值和相位由 U_{AB} 中基波分量的幅值以及其与 U_s 的相位差决定。改变 U_{AB} 中基波分量的幅值和相位，就可以使 I_s 和 U_s 同相位。

通过上面介绍，搭建 Simulink 仿真模型的思路寻找某种方法使 I_s 与 U_s 同相位。根据 PWM 原理，此类控制一般都是固定频率，调制占空比法。调整占空比这个量无非也就是从两方面考虑，一方面是 PWM 占空比变化规律，另外一方面就是 PWM 占空比大小。PWM 占空比变化规律决定了波形的形状，PWM 占空比大小决定了波形的幅值。

了解了控制量的特点，接下来分析 PWM 控制单个周期内，电感电流的变化情况。如图 3.4.3 所示，为单相全桥电路。假设直流侧电压为 U ，电感值为 L ，电网电压为 E ，PWM 控制周期时间为 T ，某一个控制周期内 PWM 占空比为 D 。

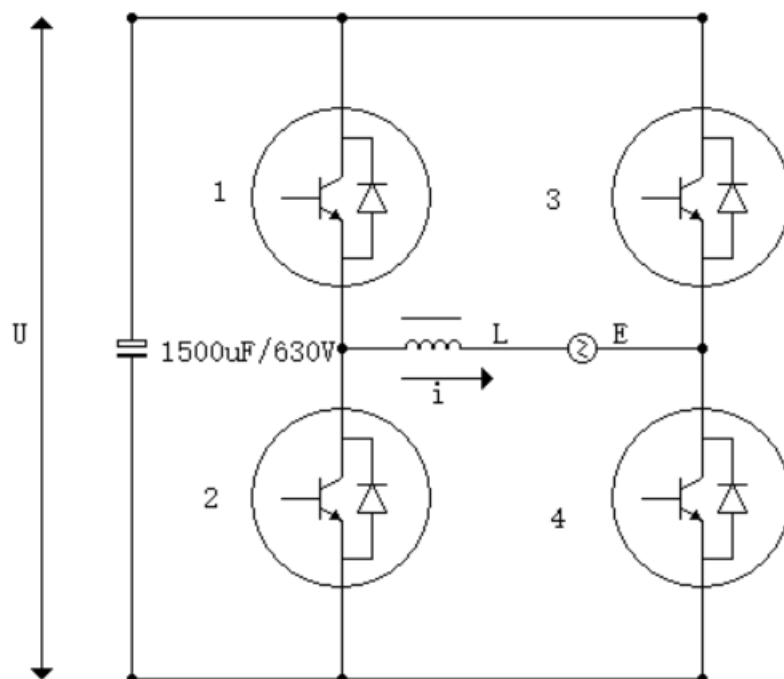


图 3.4.3 单相全桥 PWM 整流电路图

当管子 1 和 4 开通时，直流侧电压 U 对电感 L 作用的时间为 $D \cdot T$ ，电网对电感作用的时间为 T 。由于 T 在控制过程中都非常小，因此近似计算在 T 这个周期内，电感的电流增量平均值为：

$$\Delta I \approx (U \cdot D \cdot T / L - E \cdot T / L) / 2$$

进而推导：

$$D = (2 \cdot \Delta I \cdot L + E \cdot T) / (U \cdot T)$$

可见 D 与电感增量电流 ΔI 、电感、电网电压、直流电压、PWM 周期有关，而这些量除了电感增量电流 ΔI ，其他全部是可以获得的。因此计算出 D 值，就取决于电感增量电流 ΔI 。

那么接下来分析 i 值怎么确定？假设 PWM 上一周期流经电感的电流为 I_0 （此值可以用传感器获取），那么经过上一周期 PWM 控制之后，电感电流就变为： I_0 与电流增量 ΔI 之和。而 $I_0 + \Delta I$ 这个值就是要控制的量，而这个量是由外环电压控制的输出值和电网的标么值乘积决定的。所谓电网的标么值就是用电网值除以电网的峰值。因此计算出的 D 值不仅决定了电流幅值，而且也保证了电流波形与电压波形一致。如下一周期需要产生 I_{REF} 这个电流。这样要求电流增量平均值为：

$$\Delta I' = (I_{REF} - I_0 - \Delta I) / 2$$

那么计算出下一周期的占空比公式就是：

$$D_{NEXT} = (2 \cdot \Delta I' \cdot L + E \cdot T) / (U \cdot T)$$

而当管子 2 和 3 开通，那么对应的加载电感上面的电压全部是反方向的，但是计算过程相同。至此，控制量占空比计算方法就得出来了。

外环电压控制，是指整流输出的电压控制。此控制一般采用普通的 PI 控制即可。外环电压 PI 控制输出值，作为内环电流参考值，即前面提到的 I_{REF} 值。

离线模型操作

实验操作步骤（例程名称为 Rectifier.mdl）：

第一步：双击打开 VIEW1000 软件，如下图 3.4.4 所示图标；



图 3.4.4 VIEW1000 软件

第二步：在软件中切换至“工作区”界面，然后在工具栏中单击“实验”，并选择实验四，如下图 3.4.5 所示；

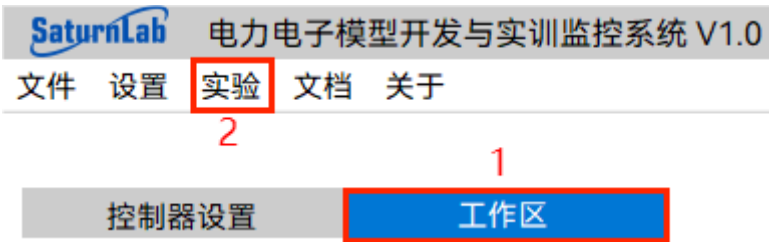


图 3.4.5 实验选择

首先软件界面会切换到实验四中已搭建好的操作界面，图 3.4.6 所示实验四上位机界面搭建如下：

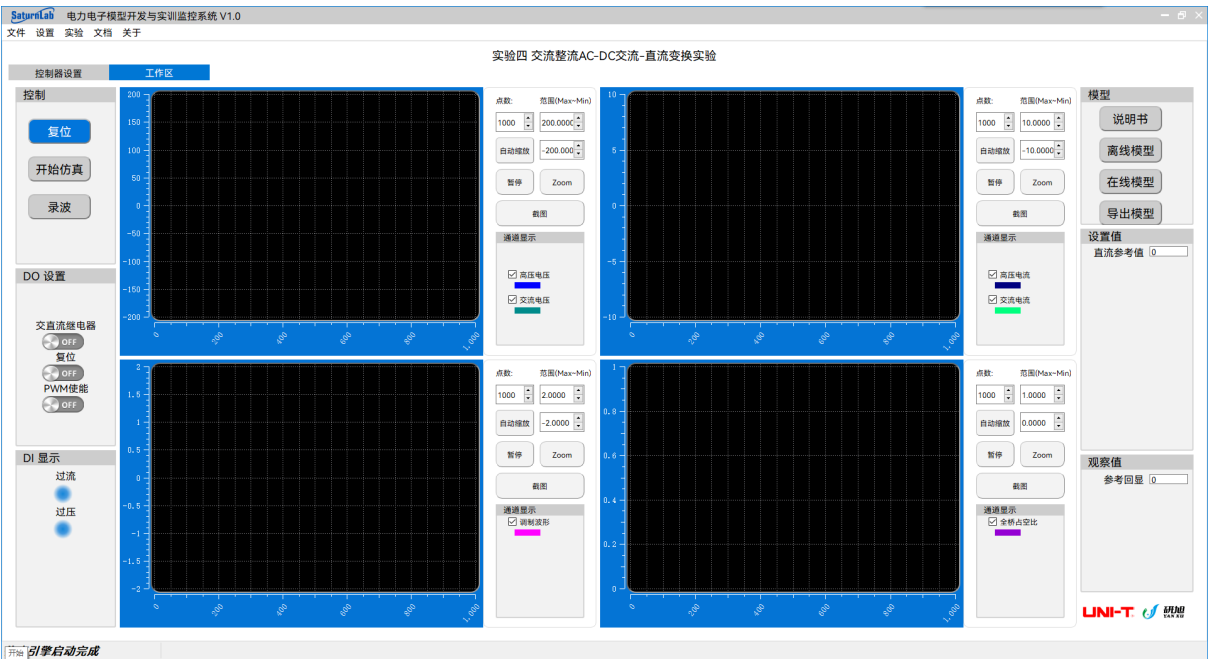


图 3.4.6 实验四上位机软件界面

第三步：在“工作区”界面的右上角“模型”框中点击“离线模型”，如图 3.4.7 所示；



图 3.4.7 打开离线模型

然后等待 Matlab 软件打开，并打开已搭建好模型 “Rectifier.mdl”，模型打开后如图 3.4.8 所示；

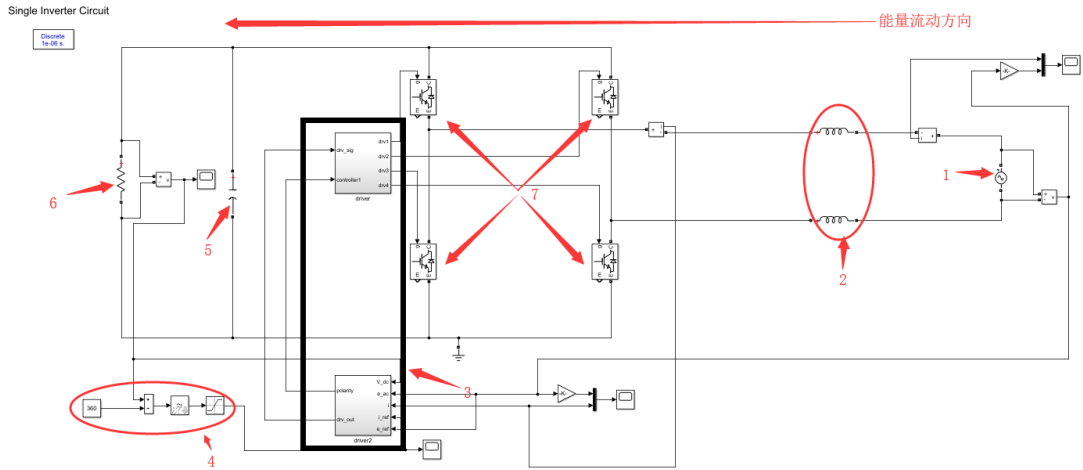


图 3.4.8 单相全桥 PWM 整流模型

- 标注 1 为电网，幅值 220V，频率 50Hz；
- 标注 2 为电感，每个感值为 2mH，两个总和为 4mH；
- 标注 3 为计算占空比的方法模块；
- 标注 4 为外环电压 PI 控制，P 值设置 0.1，I 值设置 6；
- 标注 5 为滤波电容，容值为 1500uf；
- 标注 6 为电阻负载，阻值为 100 欧姆；
- 标注 7 为全桥电路；

外环电压参考值设定 360V。图 3.4.9 为外环电压波形。可以明显看出来，电压纹波比较大，而且这个纹波并不是由于 PI 调节不当导致的，因为在单相电压为正的峰值时，电流也对应正的峰值，这样就输出的电压值达到最大点；而当电压过零点时，电流也视

为过零点，此时输出电压达到最低点；当电压为负的峰值时，电流也对应正的峰值，此时输出电压仍然达到最高点。所以电压纹波较大。而且这个纹波的频率 2 倍于电源频率。目前也有对于减小纹波的处理办法，在此不多做介绍，请自行查阅相关文档。

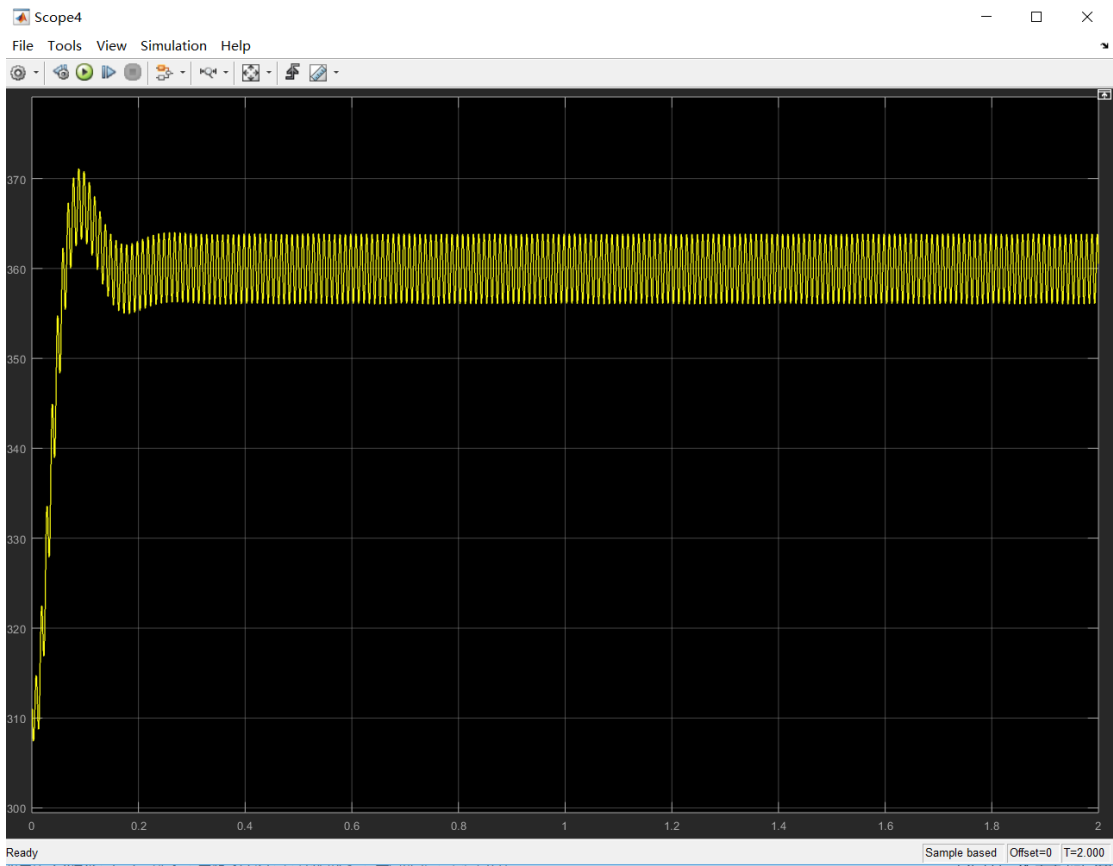


图 3.4.9 PWM 整流电路输出电压波形

在线模型操作

统计一下算法模型中参与控制的输入量和输出量。

控制输入量	控制输出量
高压端电压	PWM 输出
交流源电压	-----
交流源电流	-----

清楚了输入量和输出量，需要了解的就是快速原型控制器具体与主电路的信号连接情况。

快速原型控制器	主电路
ADC4	交流电流

ADC3	交流电压
ADC5	高压端电压
ADC6	高压端电流
PWM2A_DUTY、PWM3A_DUTY	全桥电路 IGBT

注意：出于安全问题的考虑，所有功率硬件及仪器设备都采用小功率器件，所以在
线模型仿真中的一些参数也是根据实际情况进行下调。

空载实验操作步骤（模型名称 Rectifier.slx）：

第一步：双击打开 VIEW1000 软件，如下图 3.4.10 所示图标；



图 3.4.10 VIEW1000 软件

第二步：在软件中切换至“工作区”界面，然后在工具栏中单击“实验”，并选择
实验四，如下图 3.4.11 所示；

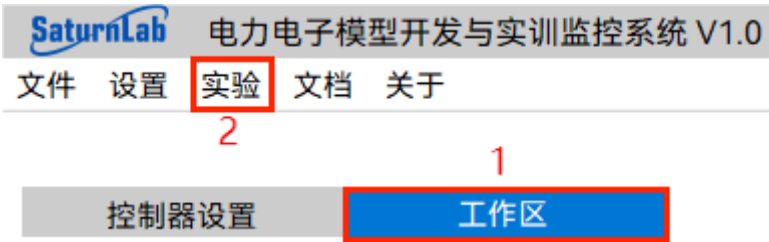


图 3.4.11 实验选择

首先软件界面会切换到实验四中已搭建好的操作界面，图 3.4.12 所示实验四上位机
界面（Rectifier.sp1000）搭建如下：

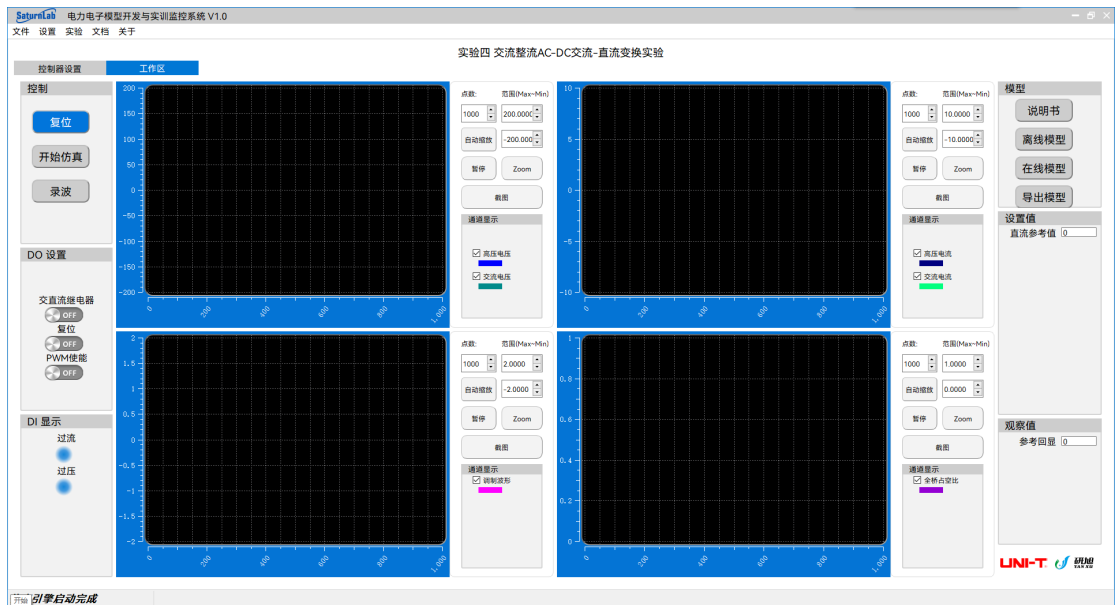


图 3.4.12 Rectifier 快速原型上位机软件界面

第三步：在“工作区”界面的右上角“模型”框中点击“在线模型”，然后等待 Matlab 软件打开，并打开已搭建好模型“Rectifier.slx”，操作如下图 3.4.13 所示；



图 3.4.13 打开在线模型

模型打开后如图 3.4.14 所示；

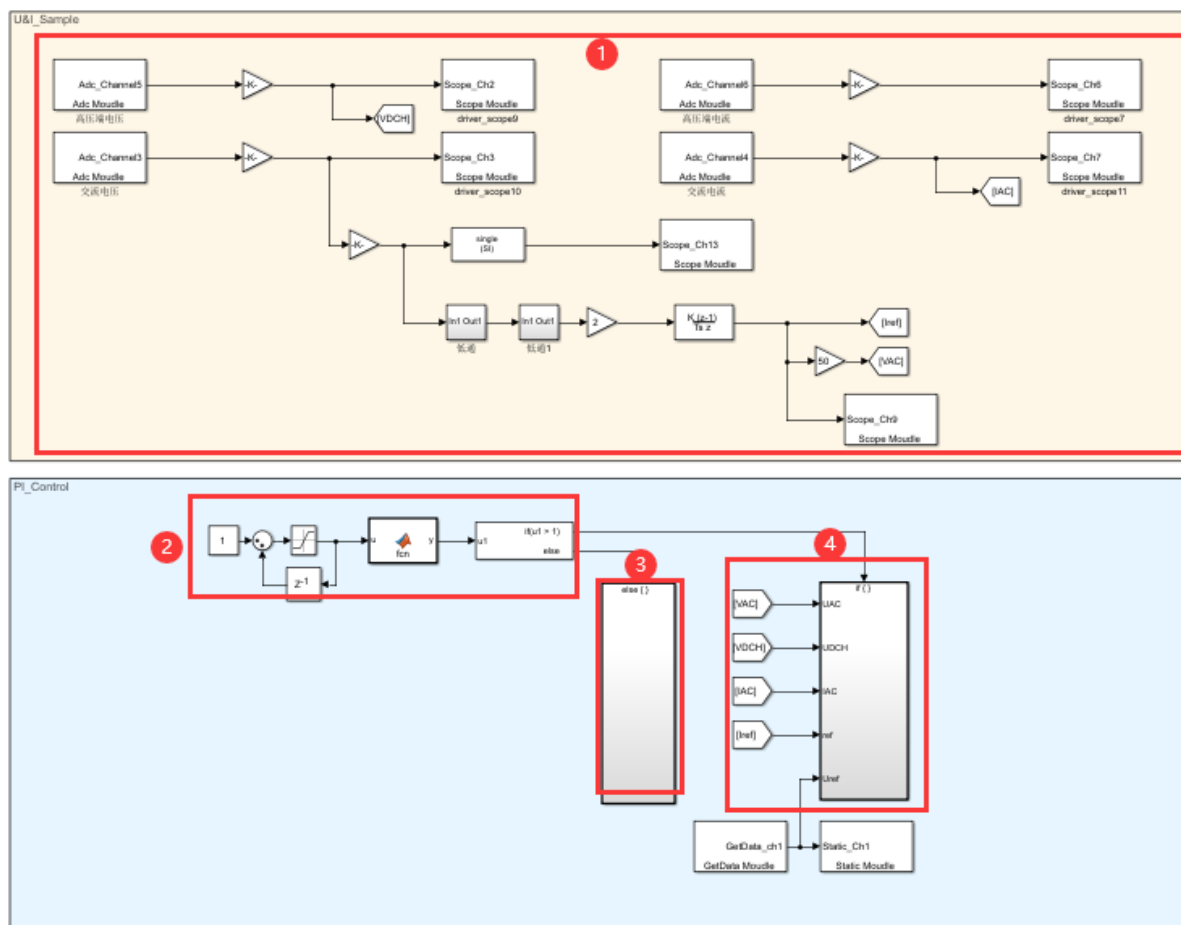


图 3.4.14 Rectifier 快速原型控制模型

图中红色标注:

1、ADC 采集模块：通过 ADC 采集模块采集直流高压侧及交流侧电压电流信号，并通过 SCOPE 模块在上位机上显示成电压电流波形；其中 Adc_Channel3 采集交流侧电压，Gain 模块的值为 $3.0518\text{e-}4 \times 30$ ，即转换变比为 $3.0518\text{e-}4 \times 30$ ，计算原理如下图 3.4.15 所示，Adc_Channel5 采集高压侧电压，转换变比为 $3.0518\text{e-}4 \times 30$ ，Adc_Channel4 采集交流电流，转换变比为 $3.0518\text{e-}4 \times 1.6667$ ，Adc_Channel6 采集高压侧电流，转换变比为 $3.0518\text{e-}4 \times 1.6667$ ；

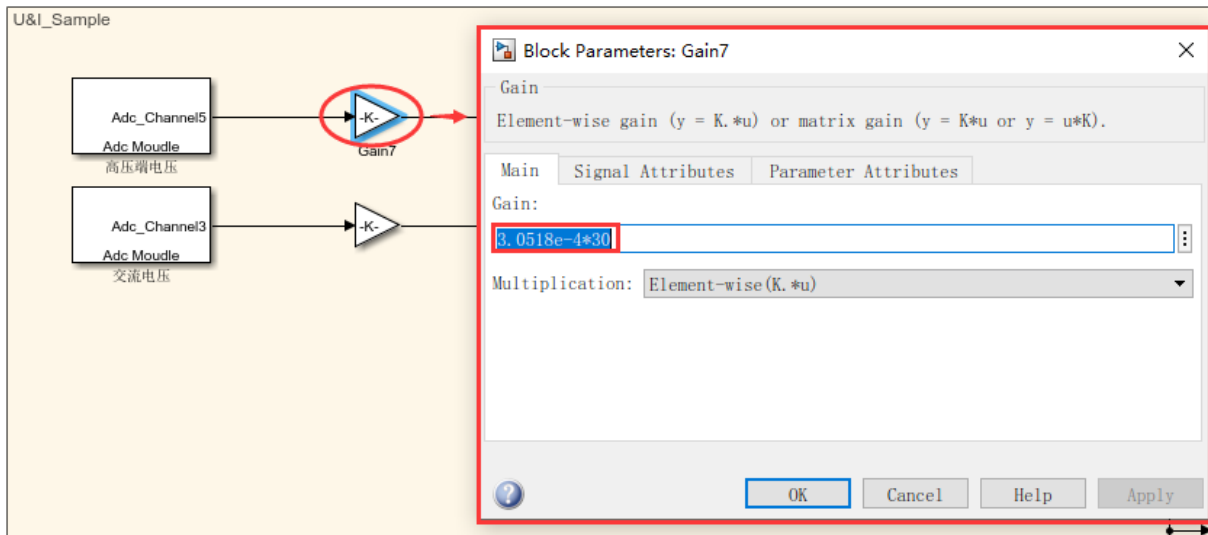


图 3.4.15 增益系数计算

- 2、延迟触发模块：延迟一段时间触发 if-function；
- 3、全桥模块的初始占空比给定：初始状态下，PWM 信号不定，所以给予一个确切的占空比信息，使全桥模块全部关闭，防止误触发，导致故障；
- 4、全桥模块闭环占空比计算：将计算得到的占空比，通过 PWM2A_DUTY、PWM2B_DUTY、PWM3A_DUTY 及 PWM3B_DUTY 模块传输到 PWM 模块进行 PWM 信号的输出。

双击打开标注 4 所示模块，如下图 3.4.16 所示；

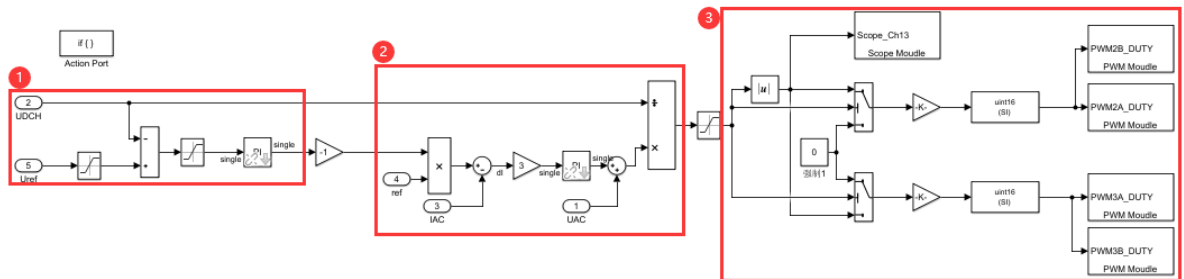


图 3.4.16 全桥占空比闭环调节

图中红色标注：

- 1、电压外环控制模块：将模型中通过 GetData_ch1 输入的升压参考值减去采集的实际高压侧电压得到偏差值，通过 PI 计算得到参考电流；
- 2、电流内环控制模块：将电压外环控制输出的参考电流与实际交流电流的有效值进行减法运算，在通过 PI 计算得到全桥占空比；
- 3、SPWM 控制输出模块：电流环 PI 计算输出得到占空比乘以交流电压得到确定相

位的占空比信息，再经过 SPWM 解算得到 PWM2 和 PWM3 的占空比，并通过 PWM2A_DUTY、PWM2B_DUTY、PWM3A_DUTY 及 PWM3B_DUTY 模块传输到 PWM 模块进行 PWM 信号的输出。

第四步：将主拓扑图中的 5 和 15 连接，6 和 16 连接，7 和 9 连接，8 和 10 连接，如下图 3.4.17 所示，就是一个单相全桥整流电路；

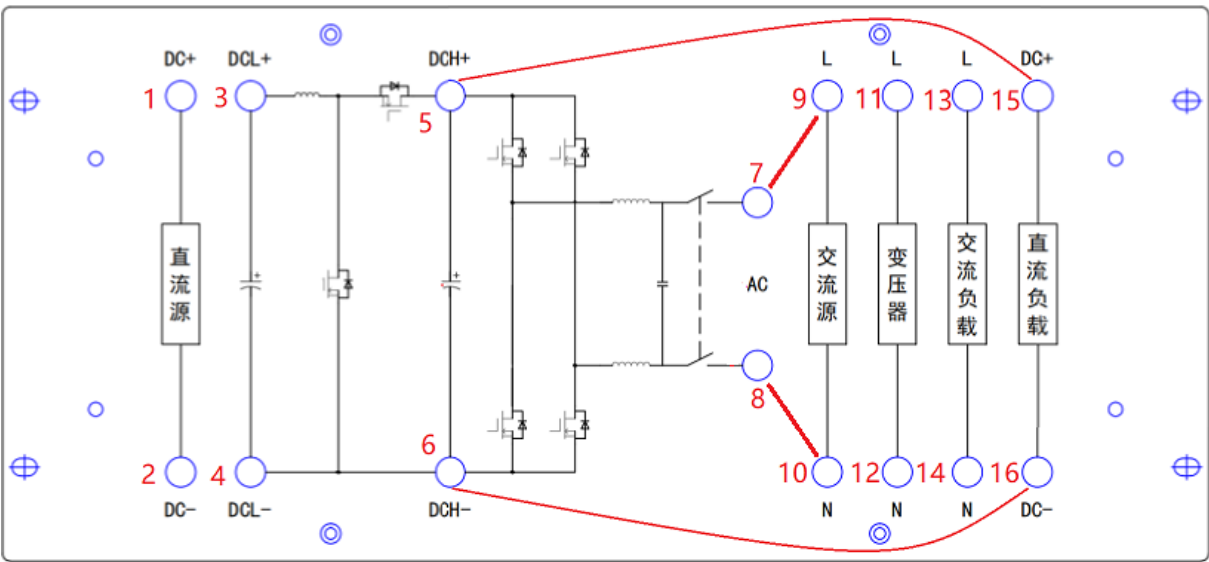


图 3.4.17 Rectifie 全控整流电路拓扑连线

- 第五步：将柜体总电源开启，为系统供电；
- 第六步：待交流源启动后，设置交流电压为 36V，频率为 50Hz，点击 “on/off” 按钮。
- 第七步：切换到模型界面，下载模型到控制器，操作如下图 3.4.18 所示；

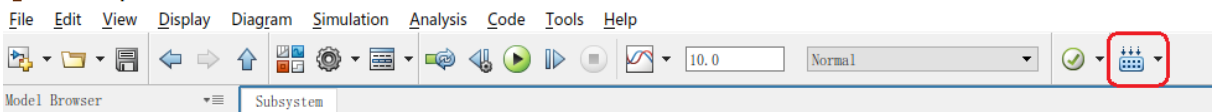


图 3.4.18 下载模型

查看编译过程及下载结果，如下图 3.4.19 所示：

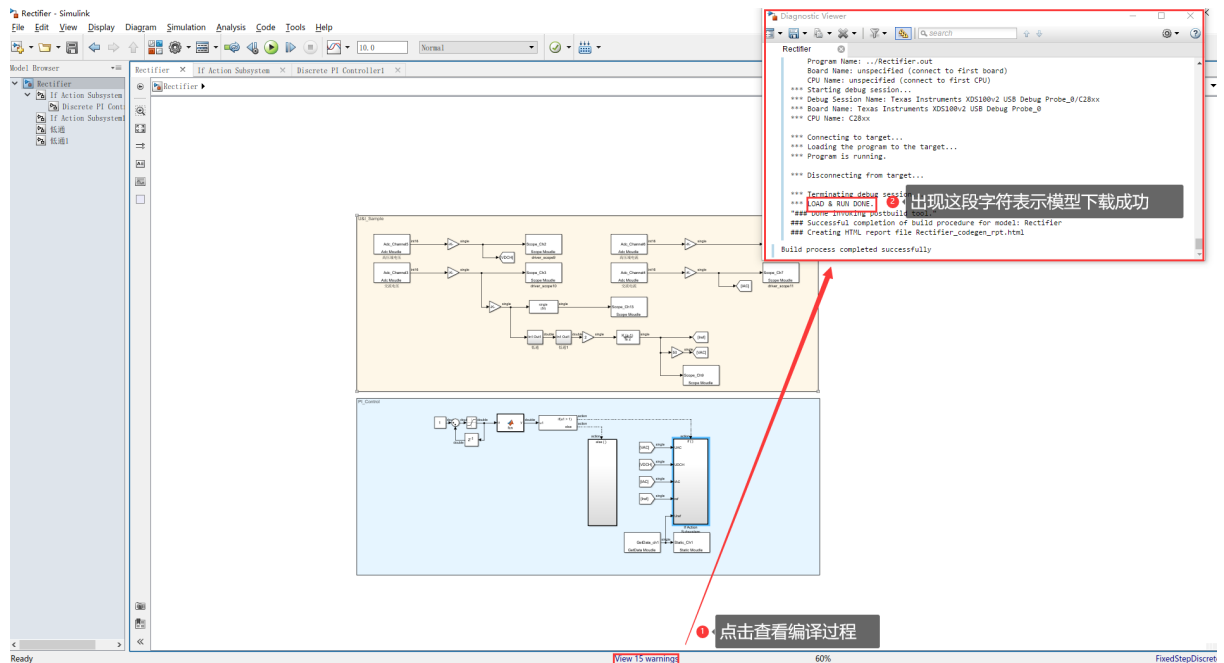


图 3.4.19 模型下载成功

第八步：上位机与计算机建立通信，首先切换到“控制器设置”界面，点击“建立通信”按钮，等连接上之后点击“设置”按钮，具体操作如下图 3.4.20 所示；

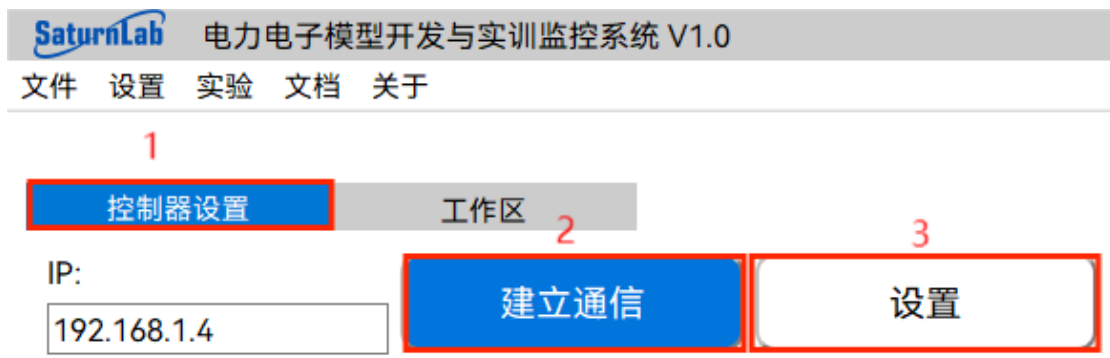


图 3.4.20 建立通信

第九步：运行模型，先切换到“工作区”界面，再将“直流参考值”设置为 60V，并点击计算机键盘“Enter”确认输入（先点击“开始仿真”，“参考回显”框会显示设定值是否生效，如回显值与设定值一样，表示设置生效，否则设置无效，需重新进行第九步操作），然后将“PWM 使能”置“ON”，“故障复位”先置“ON”，再置“OFF”，再将“交直流继电器”置“ON”。先点击“复位”，然后立即点击“开始仿真”按钮，具体操作如下图 3.4.21 所示；

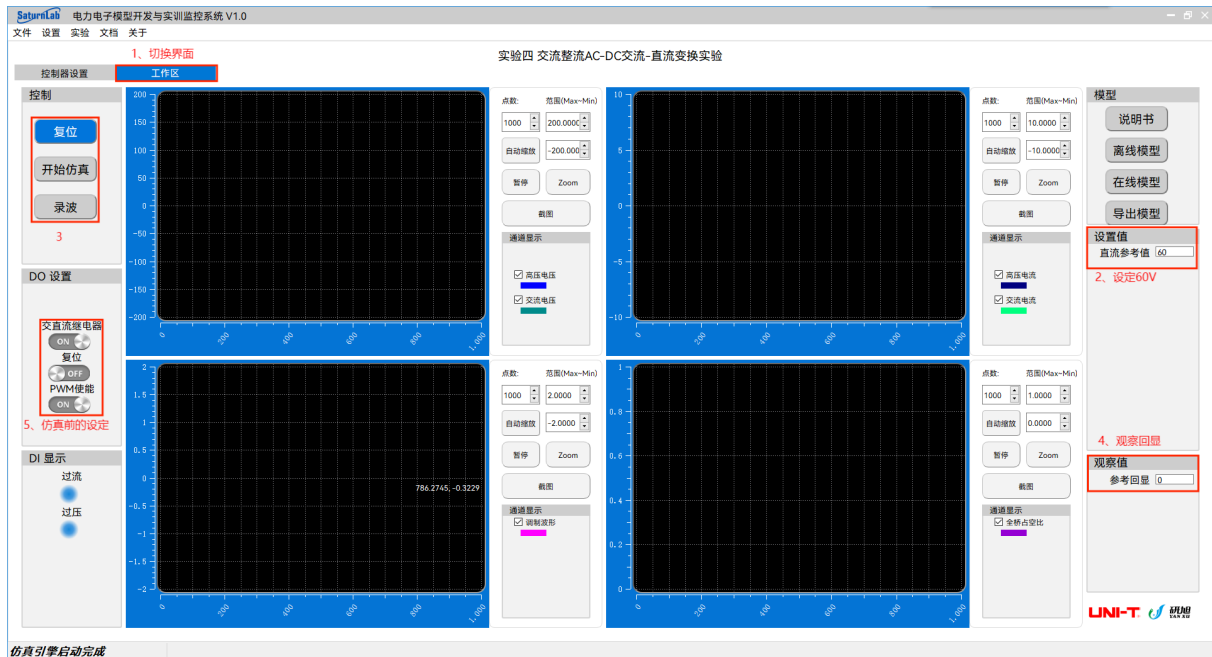


图 3.4.21 具体操作

注意：若系统运行故障，“DI 显示”界面中的两个蓝灯会变成红色，指示其中的一种或两种故障，此时点击“停止仿真”，将“故障复位”重新置“ON”，再置“OFF”，同时点击“复位”按钮，继续点击“开始仿真”即可。

第十步：等高压侧电压稳定在 60V 后，再设置“直流参考值”为 70V，等电压稳定后再继续设置为 80V，最小设置到 60V（稍大于不控整流出来的直流电压），最大设置到 80V。模型运行过程中可通过上位机界面查看控制效果，运行结果如下图 3.4.22 所示，同时可以点击“录波”按钮，以备后期分析数据；

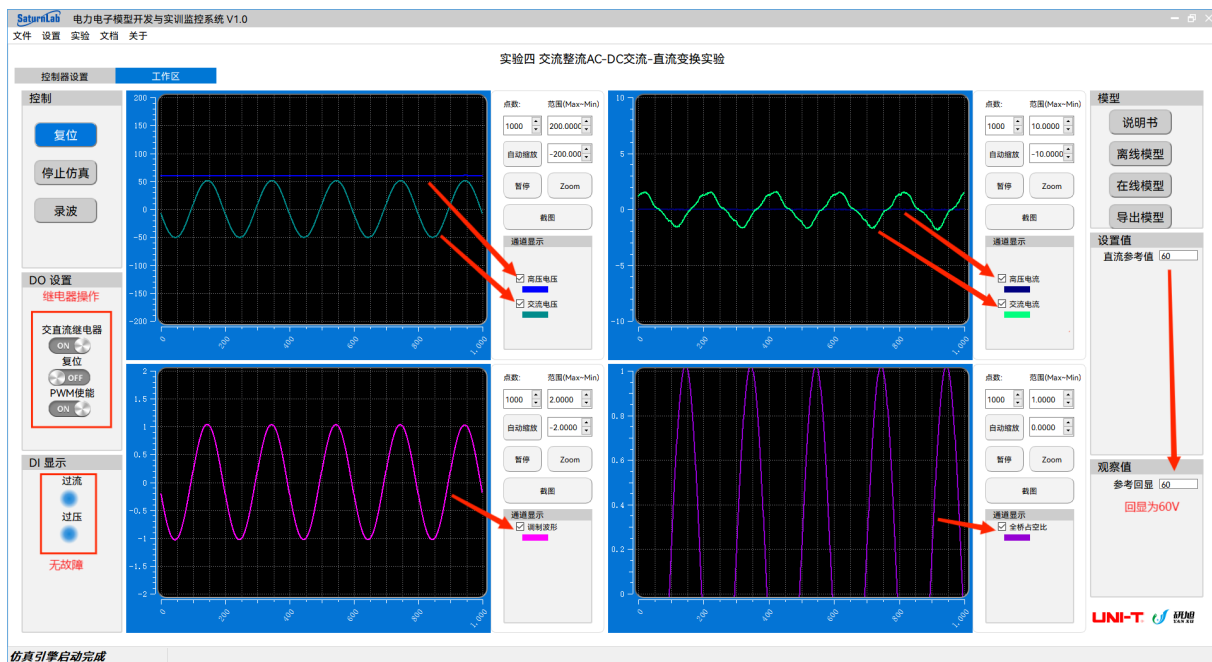


图 3.4.22 运行结果

第十一步：仿真停止，先点击“停止仿真”按钮，然后将“PWM 使能”、“直流继电器”置“OFF”即可停止仿真。如已录播，可将保存的数据 xx.mat 放入 MATLAB 查看，采用 Matlab 的绘图工具对波形进行分析（录播操作在实验二中已有详细介绍）。

下图 3.4.23 为高压电压（直流输出电压）从 60V 升压到 70V，最后到 80V 输出电压波形。

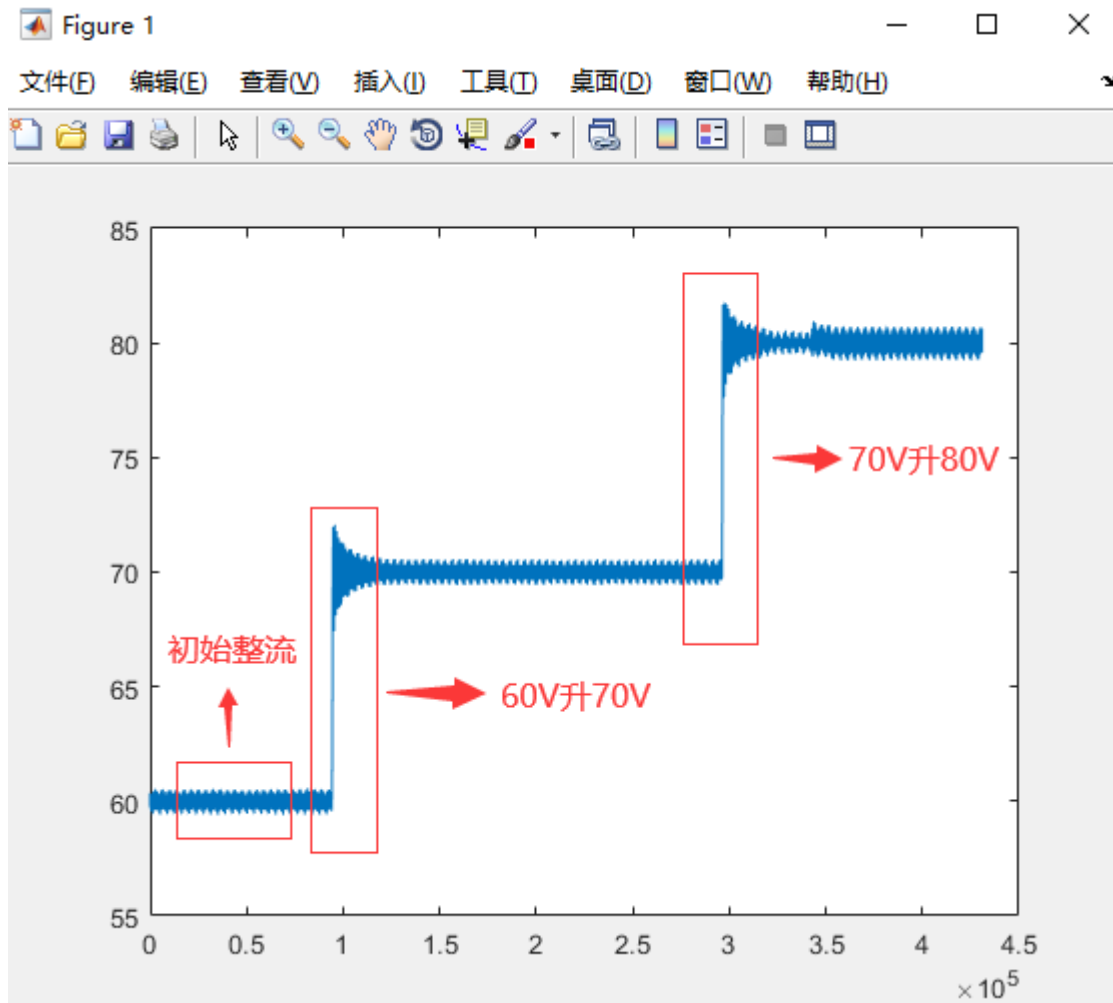


图 3.4.23 高压电压波形

高压电流（直流输出电流）波形如下图 3.4.24 所示；

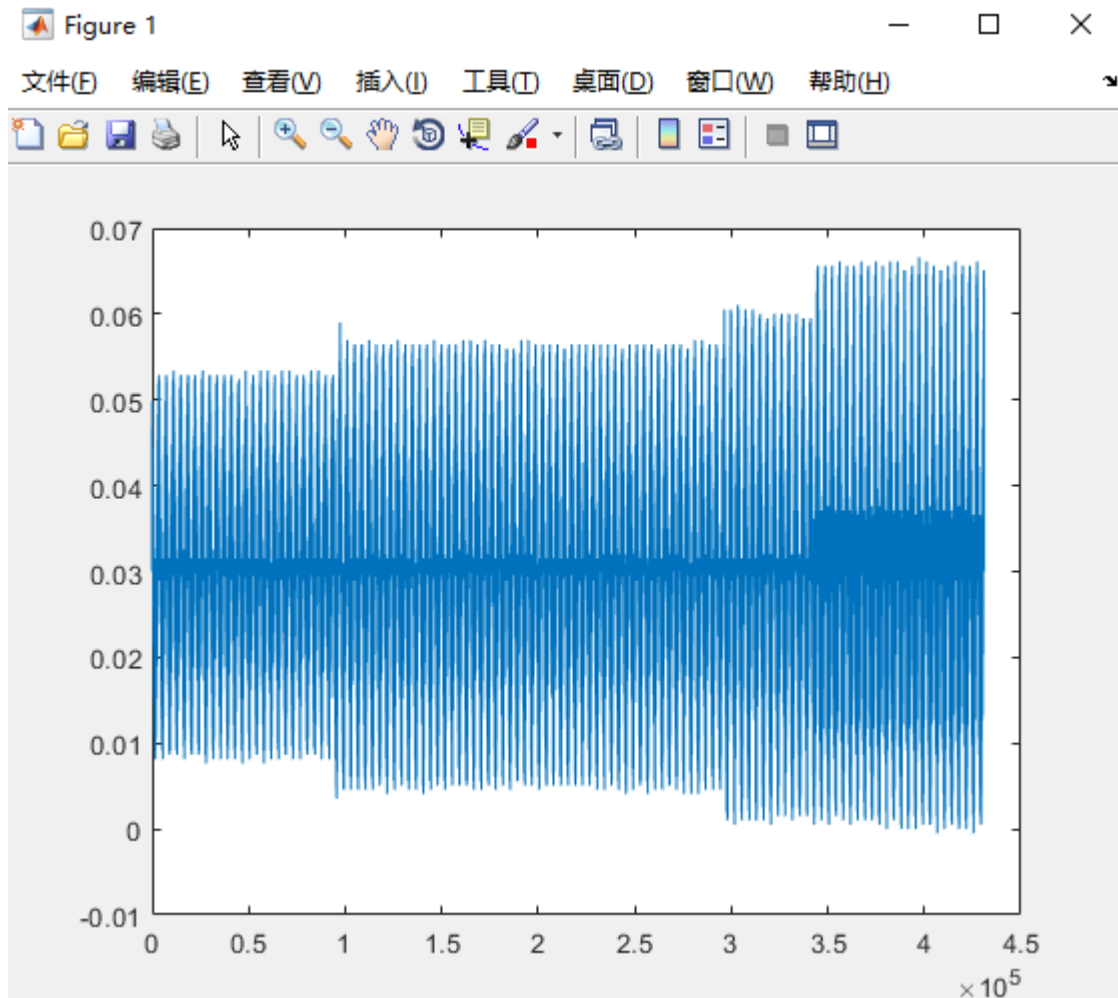


图 3.4.24 直流输出电流波形

可以看出，由于空载，直流输出电流基本为 0。

带载实验

与空载试验操作相同，等高压电压稳定在 80V 后，然后设置直流负载，负载模式设置恒流模式，电流设定成 1.5A，带载电压设置成 45V，点击“OK”按钮，即可观察上位机中的高压电流变化，实际运行结果如下图 3.4.25 所示；

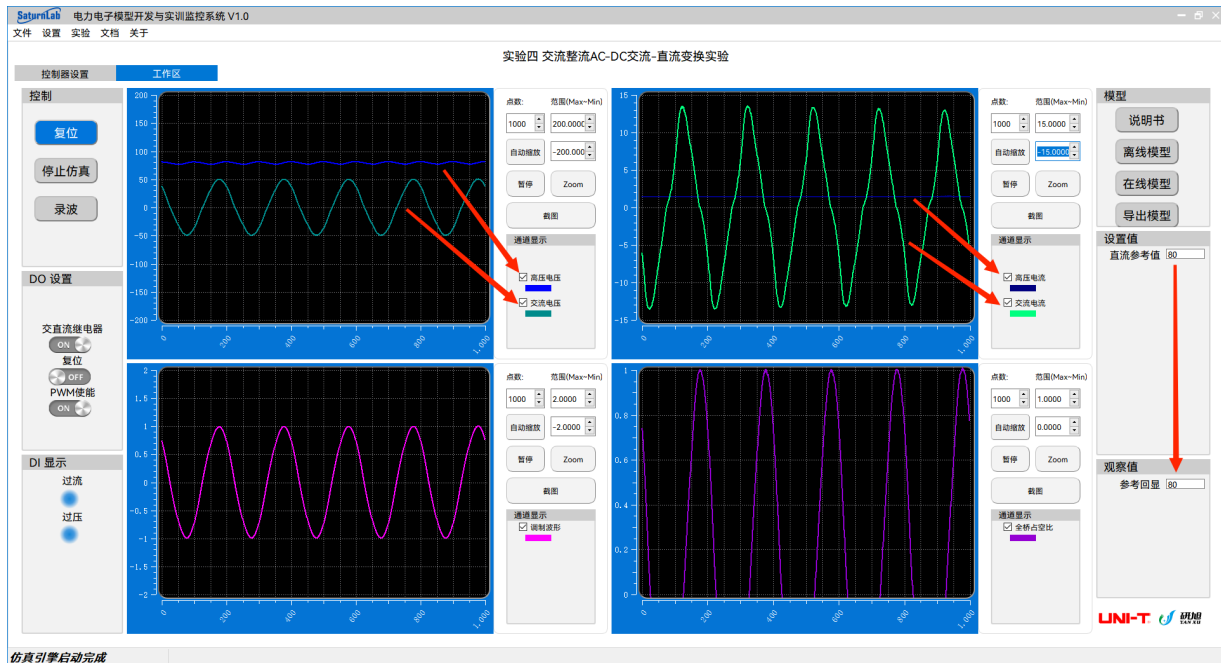


图 3.4.25 带载运行结果

可以看出直流电流由于负载的存在，稳定在 1.5A 左右；

卸载操作步骤：先关闭电子负载按钮，按“OK”键即可关闭负载，然后点击软件界面的“停止仿真”按钮即可，最后将“PWM 使能”及“交直流继电器”即可。

图 3.4.26 为整流 80V 状态下的，加载及卸载输出电流变化：

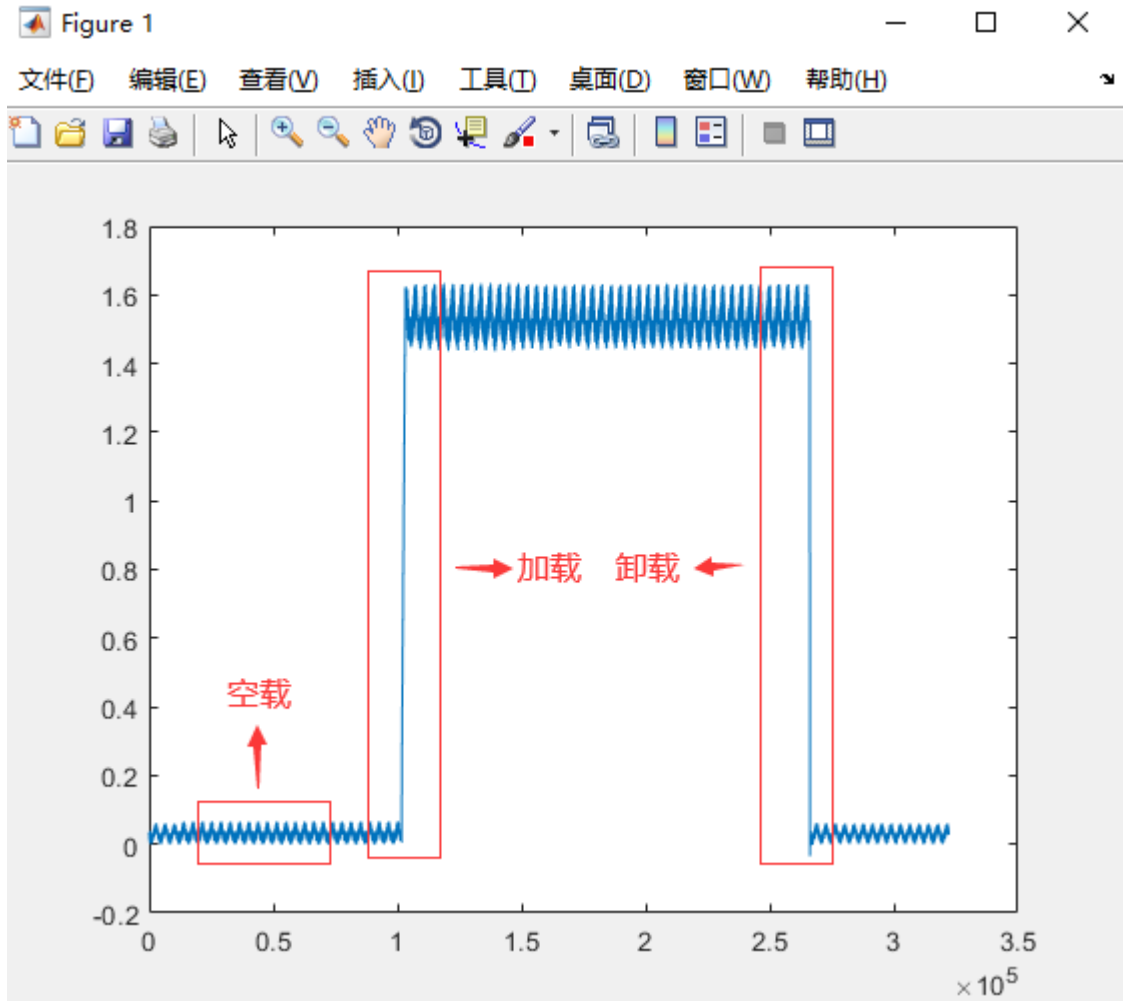


图 3.4.26 加载及卸载直流输出电流变化

注：如需修改模型自行验证，可选择“导出模型”到任意英文目录下，然后重新修改并下载验证，具体操作如下图 3.4.27 所示；



图 3.4.27 导出模型

实验五 光伏离网逆变 DC-AC 直流-交流变换实验

与整流相对应，把直流电变为交流电称作逆变。当交流侧接在电网上，即交流侧接有电源时，称作有源逆变，也就是我们常说的并网逆变；当交流侧直接和负载连接时，称作无源逆变，也就是我们常说的独立逆变或者离网逆变。

单相全桥独立逆变，也可以被称作电压型全桥逆变电路，原理图已在图 3.5.1 给出，它共有 4 个桥臂，可以看成由两个半桥电路组合而成。把桥臂 1 和 4 作为一对，桥臂 2 和 3 作为另外一对，成对的两个桥臂同时导通，两对交替各导通 180° 。在 V1 和 V4 导通时，负载电压是左正右负，负载电流的流经方向为 U_d+ 经过 V1、R、L+、L- 及 V4 回到 U_d- ，负载电压 $U_o = U_d$ ，负载电流线性增加。当 V1 和 V4 截止时，由于感性负载电流不能突变，且电感的两侧形成左低右高的电势差，由于电势差的原因，V2 和 V3 不能导通，负载电流的流经方向为 L- 经过 VD3、C、VD2、R 回到 L+ 续流，在不考虑二极管导通压降的前提下，L- 点的电位等于 U_d+ ，L+ 点的电位等于 U_d- ，所以负载电压 $U_o = -U_d$ ，负载电流线性衰减，电容 C 在这一阶段起到吸收无功电流的作用。当负载电流下降到零后，V2 和 V3 导通，负载电压是左负右正，负载电流的流经方向为 U_d+ 经过 V3、L-、L+、R 及 V2 回到 U_d- ，负载电压 $U_o = -U_d$ ，负载电流继续减小。当 V2 和 V3 截止时，同样由于感性负载电流不能突变，且电感的两侧形成左高右低的电势差，由于电势差的原因，V1 和 V4 不能导通，负载电流的流经方向为 L+ 经过 R、VD1、C、VD4、回到 L- 续流，在不考虑二极管导通压降的前提下，L+ 点的电位等于 U_d+ ，L- 点的电位等于 U_d- ，所以负载电压 $U_o = U_d$ ，负载电流线性增加，负载电流过零点后，V1 和 V4 导通，电容 C 在这一阶段同样起到吸收无功电流的作用，然后重复整个过程。这样在负载 RL 上面就产生了方波电压波形。如果按照前面介绍过的 SPWM 调制后，在负载 RL 上面就产生了正弦波。

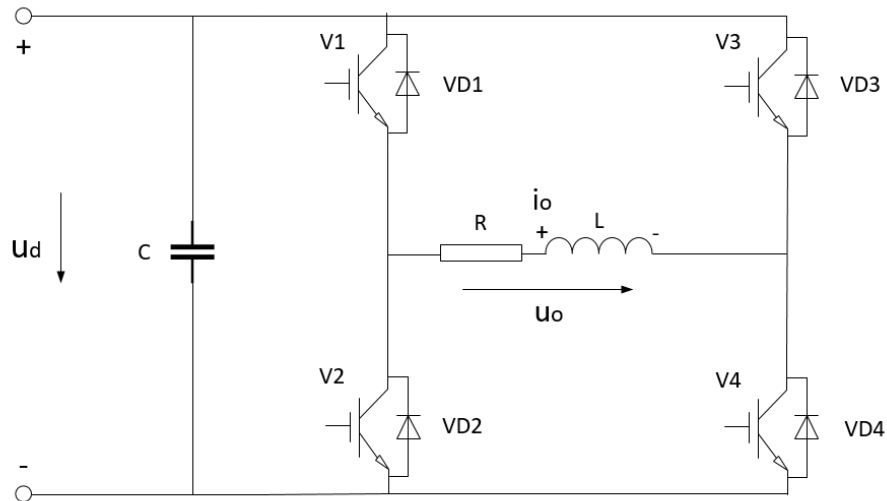


图 3.5.1 单相全桥逆变电路

此部分内容与实验一中 SPWM 调制法基本相同，只不过实验一介绍的是 SPWM 的产生模型，在此节，主要介绍 SPWM 闭环控制模型。

离线模型操作

实验操作步骤（例程名称为 spwm_closetloop.mdl）：

第一步：双击打开 VIEW1000 软件，如下图 3.5.2 所示图标；



图 3.5.2 VIEW1000 软件

第二步：在软件中切换至“工作区”界面，然后在工具栏中单击“实验”，并选择实验五，如下图 3.5.3 所示；

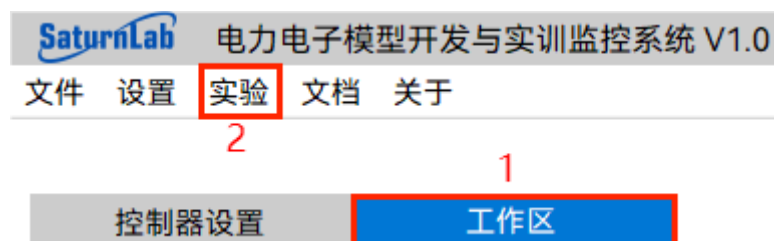


图 3.5.3 实验选择

首先软件界面会切换到实验五中已搭建好的操作界面，图 3.5.4 所示实验五上位机界面搭建如下：

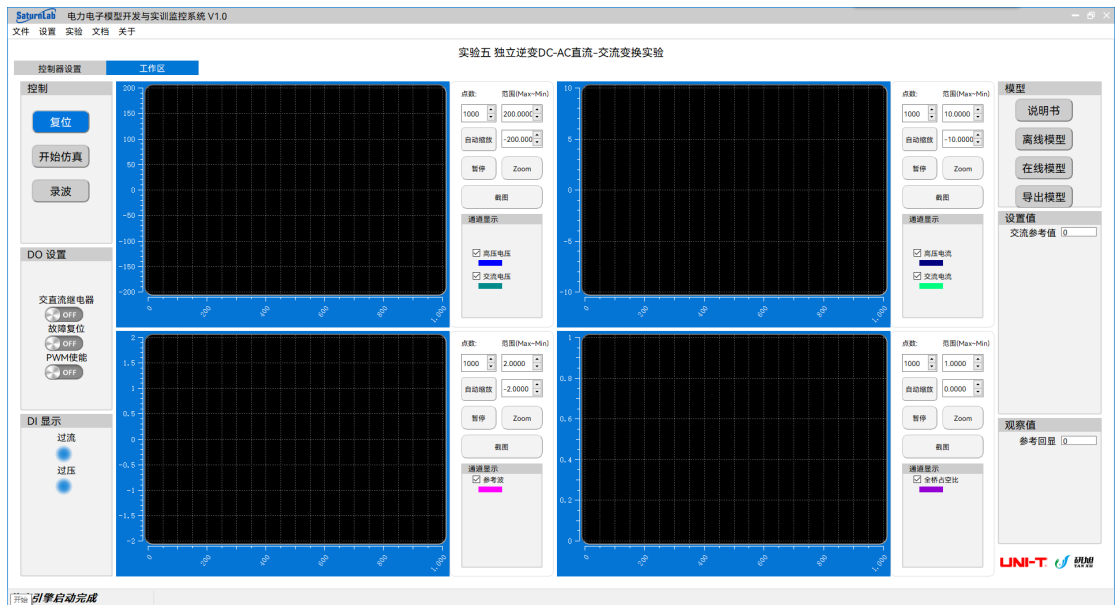


图 3.5.4 实验五上位机软件界面

第三步：在“工作区”界面的右上角“模型”框中点击“离线模型”，如图 3.5.5 所示；



图 3.5.5 打开离线模型

然后等待 Matlab 软件打开，并打开已搭建好模型“spwm_closeloop.mdl”，模型打开后如图 3.5.6 所示；

Single Inverter Circuit

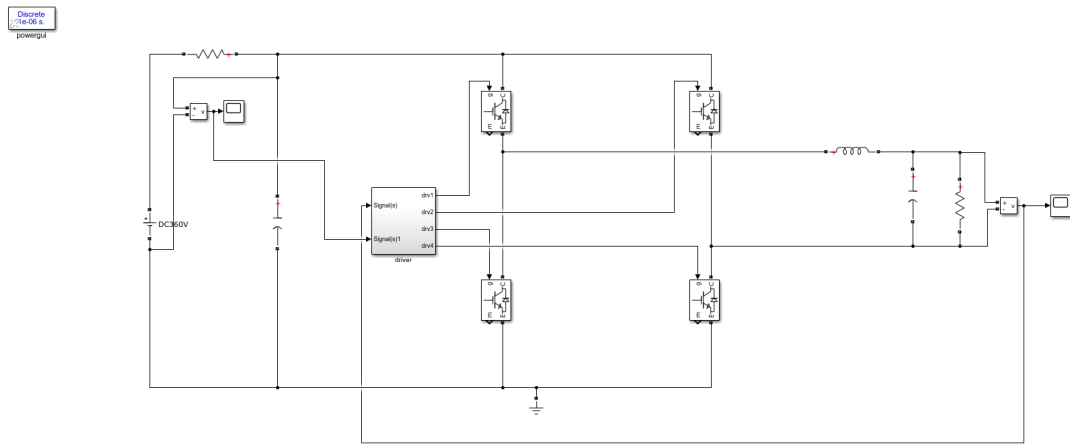


图 3.5.6 单相全桥逆变电路 Simulink 模型

图 3.5.7 为电压闭环控制模型：

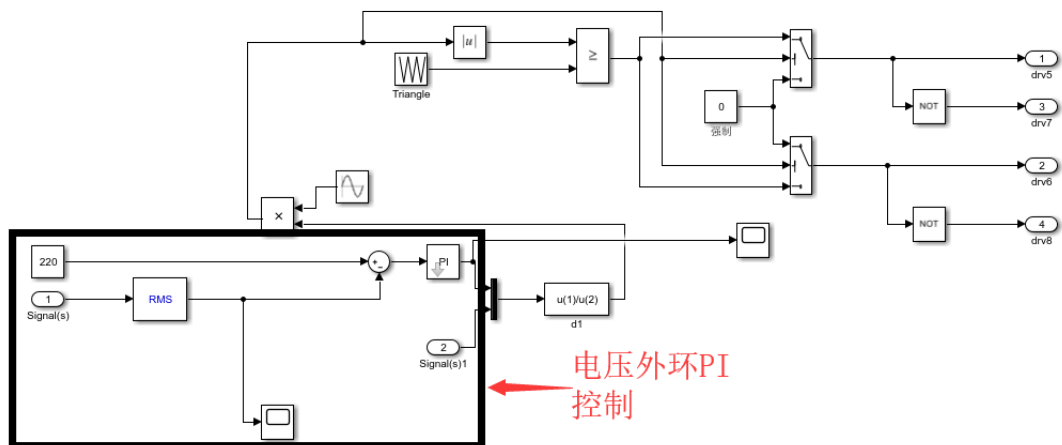


图 3.5.7 电压外环 PI 控制模块

模型中对输出电压求有效值，然后与 220 设定值进行 PI 控制，其中 P 值为 0.1，I 值为 0.8，PWM 频率为 10KHz。图 3.5.8 为交流电压输出波形：可以看出电压输出稳态花费 2.5s 时间，稳态后波形的周期为 0.02s，即 50Hz，峰值为 310V。

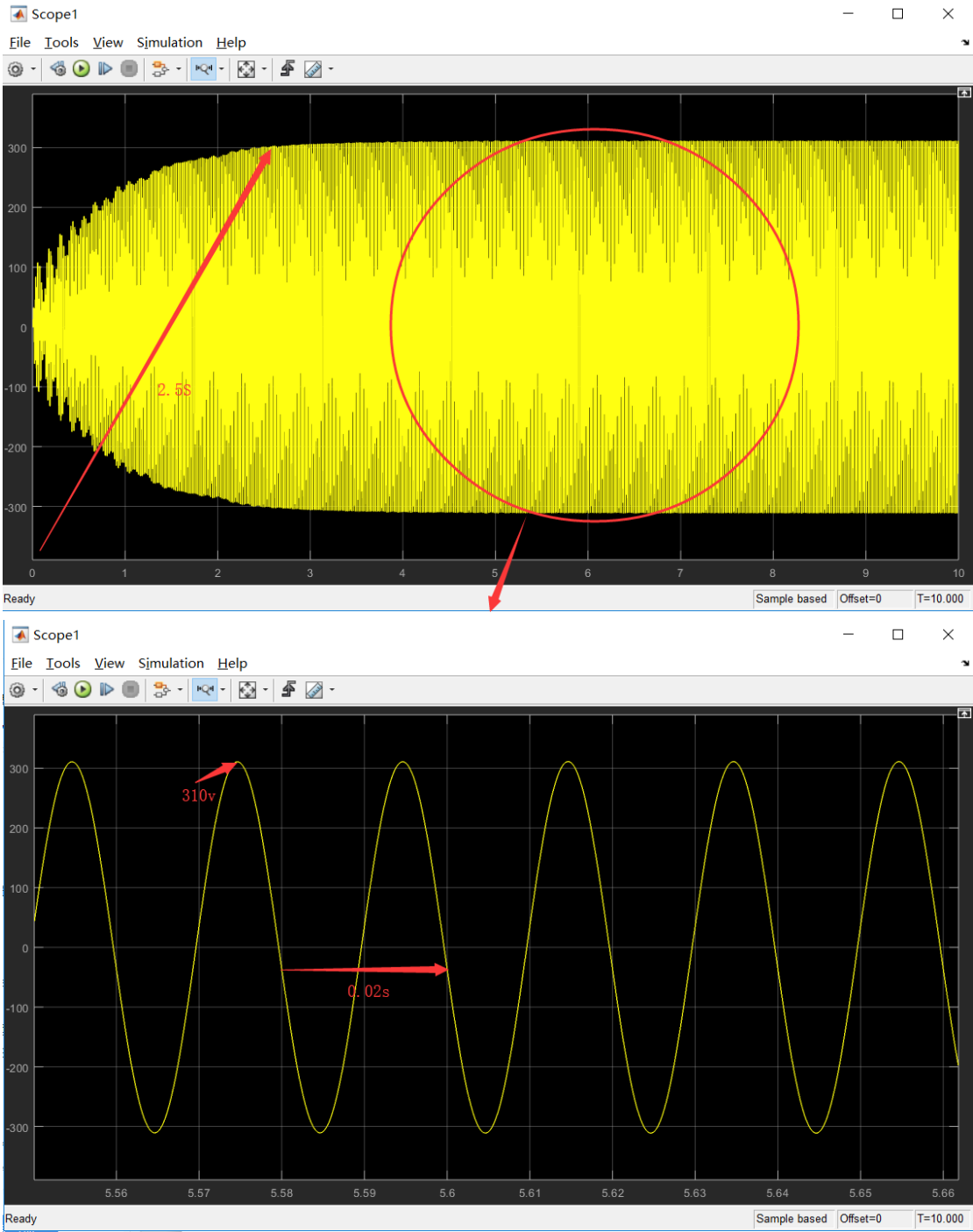


图 3.5.8 电压输出波形图

在线模型操作

统计一下算法模型中参与控制的输入量和输出量。

控制输入量	控制输出量
高压端电压	PWM 输出
交流电压	-----

交流电流	-----
------	-------

清楚了输入量和输出量，需要了解的就是快速原型控制器具体与主电路的信号连接情况。

快速原型控制器	主电路
ADC4	交流电流
ADC3	交流电压
ADC5	高压端电压
PWM2A_DUTY、PWM3A_DUTY	全桥电路 IGBT

注意：出于安全问题的考虑，所有功率硬件及仪器设备都采用小功率器件，所以在
线模型仿真中的一些参数也是根据实际情况进行下调。

空载实验操作步骤（模型名称 SPWM.slx）：

第一步：双击打开 VIEW1000 软件，如下图 3.5.9 所示图标；



图 3.5.9 VIEW1000 软件

第二步：在软件中切换至“工作区”界面，然后在工具栏中单击“实验”，并选择实验五，如下图 3.5.10 所示；



图 3.5.10 实验选择

首先软件界面会切换到实验五中已搭建好的操作界面，图 3.5.11 所示实验五上位机
界面（SPWM.sp1000）搭建如下：

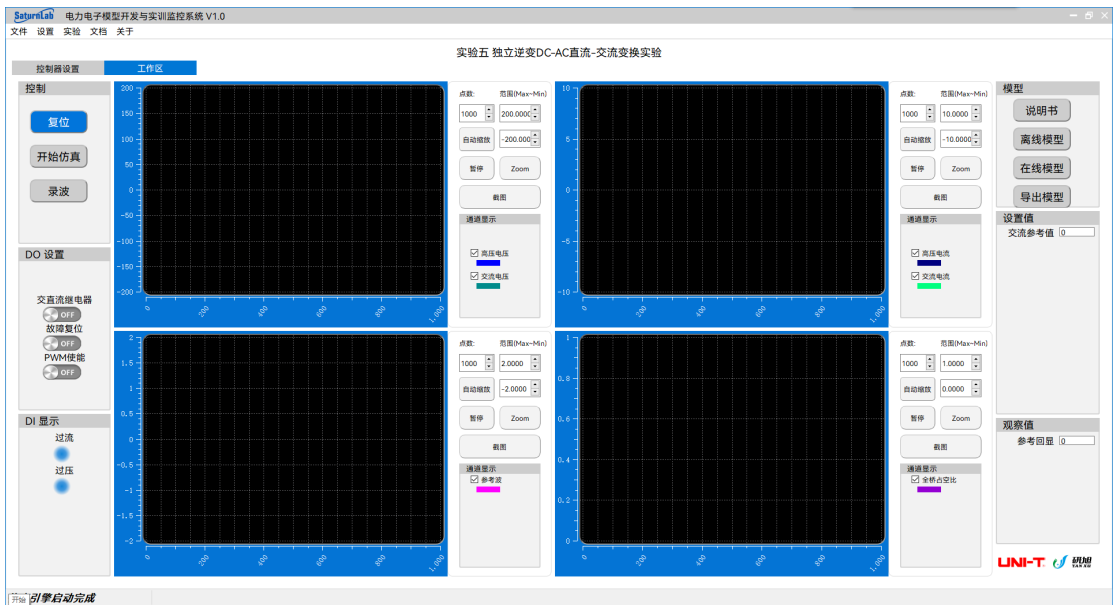


图 3.5.11 SPWM 快速原型上位机软件界面

第三步：在“工作区”界面的右上角“模型”框中点击“在线模型”，然后等待 Matlab 软件打开，并打开已搭建好模型“SPWM.slx”，操作如下图 3.5.12 所示；



图 3.5.12 打开在线模型

模型打开后如图 3.5.13 所示：

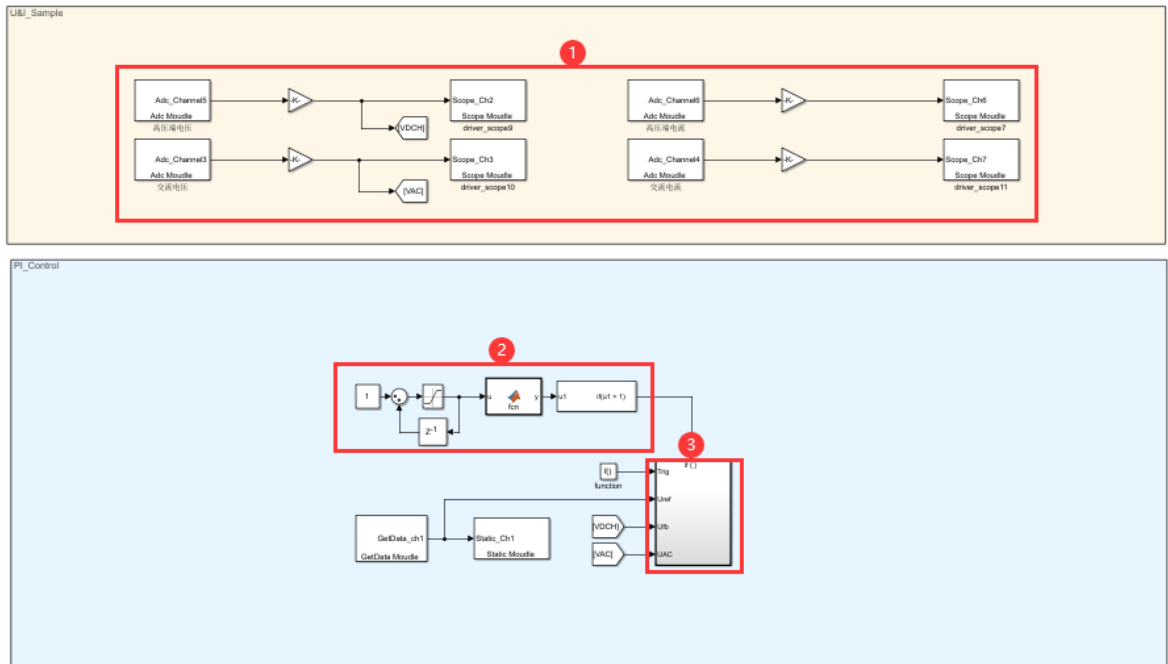


图 3.5.13 SPWM 快速原型控制模型

图中红色标注：

1、ADC 采集模块：通过 ADC 采集模块采集直流高压侧及交流侧电压电流信号，并通过 SCOPE 模块在上位机上显示成电压电流波形；其中 Adc_Channel3 采集交流侧电压，Gain 模块的值为 $3.0518e-4 \times 30$ ，即转换变比为 $3.0518e-4 \times 30$ ，计算原理如下图 3.5.14 所示，Adc_Channel5 采集高压侧电压，转换变比为 $3.0518e-4 \times 30$ ，Adc_Channel4 采集交流电流，转换变比为 $3.0518e-4 \times 1.6667$ ，Adc_Channel6 采集高压侧电流，转换变比为 $3.0518e-4 \times 1.6667$ ；

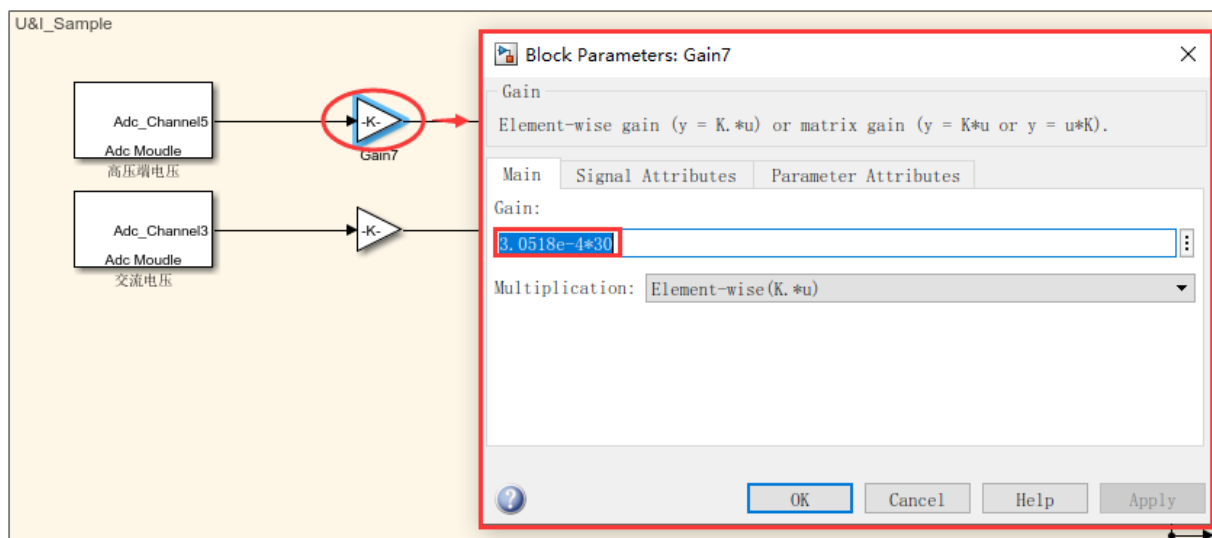


图 3.5.14 增益系数计算

2、延迟触发模块：延迟一段时间触发 if-function；

3、全桥模块闭环占空比计算：将计算得到的占空比，通过 PWM2A_DUTY、PWM2B_DUTY、PWM3A_DUTY 及 PWM3B_DUTY 模块传输到 PWM 模块进行 PWM 信号的输出。

双击打开标注 3 所示模块，如下图 3.5.15 所示；

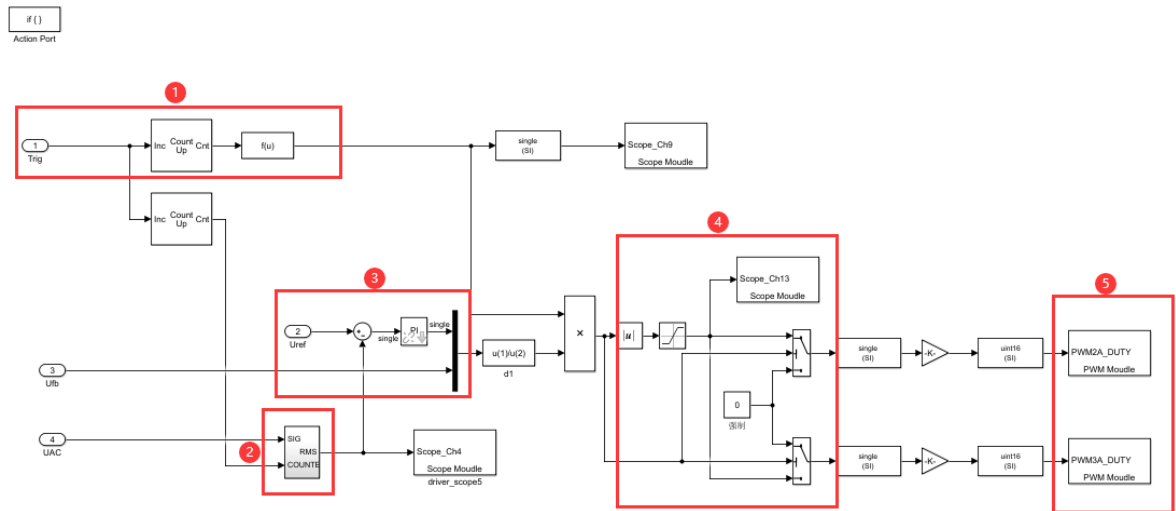


图 3.5.15 全桥占空比闭环调节

图中红色标注：

1、50Hz 参考波生成模块：以仿真步长（10K）为时基，通过计数器计数 200 个点，即 $10K/200=50Hz$ ，再通过正弦函数生成峰峰值为 ± 1 的正弦波；

2、交流电压有效值计算模块：以仿真步长（10K）为时基，通过计数器计数 800 个点，计算有效值；

3、电压环 PI 计算：将模型中通过 GetData_ch1 输入的交流电压有效值减去采集计算得出的交流电压有效值得到偏差值，通过 PI 计算得到全桥占空比；

4、SPWM 控制输出模块：电流环 PI 计算输出得到占空比乘以交流电压得到确定相位的占空比信息，再经过 SPWM 解算得到 PWM2 和 PWM3 的占空比，并通过 PWM2A_DUTY、PWM2B_DUTY、PWM3A_DUTY 及 PWM3B_DUTY 模块传输到 PWM 模块进行 PWM 信号的输出。

第四步：将主拓扑图中的 1 与 5 连接，2 与 6 连接，如图 3.5.16 所示就是一个单相全桥独立逆变电路；

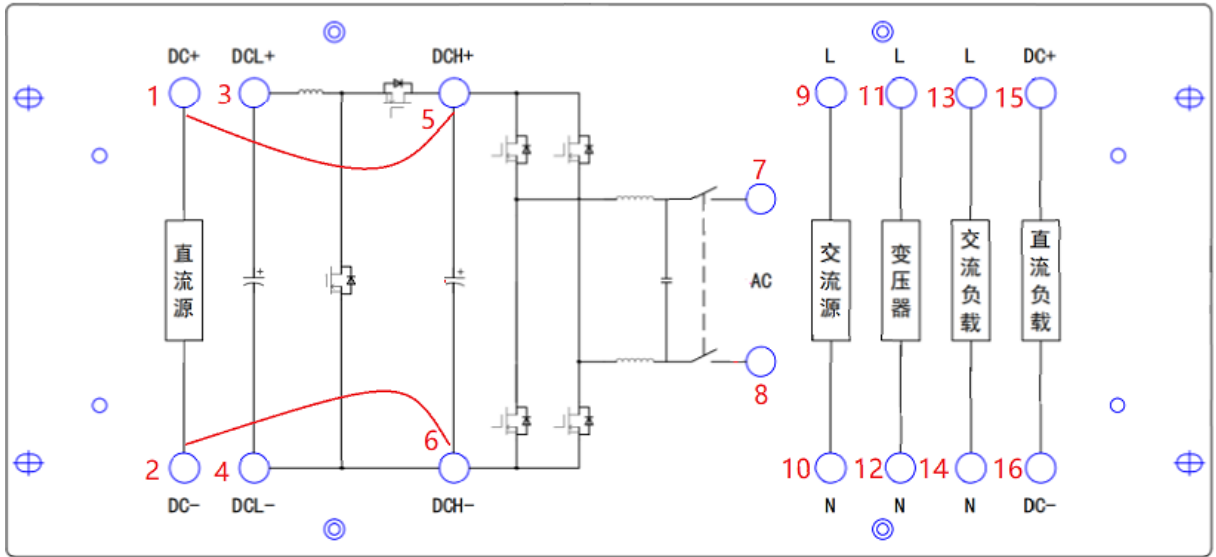


图 3.5.16 单相全桥独立逆变电路拓扑连线

第五步：将柜体总电源开启，为系统供电。

第六步：待直流源启动后，设置直流电压为 70V，电流为 3A，点击“ON”按钮启动。

第七步：切换到模型界面，下载模型到控制器，操作如下图 3.5.17 所示：

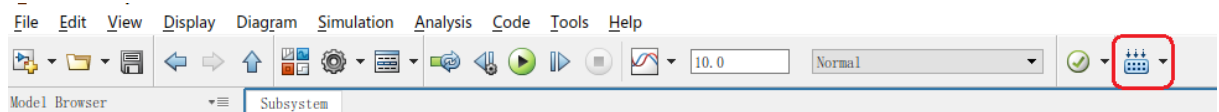


图 3.5.17 下载模型

查看编译过程及下载结果，如下图 3.5.18 所示：

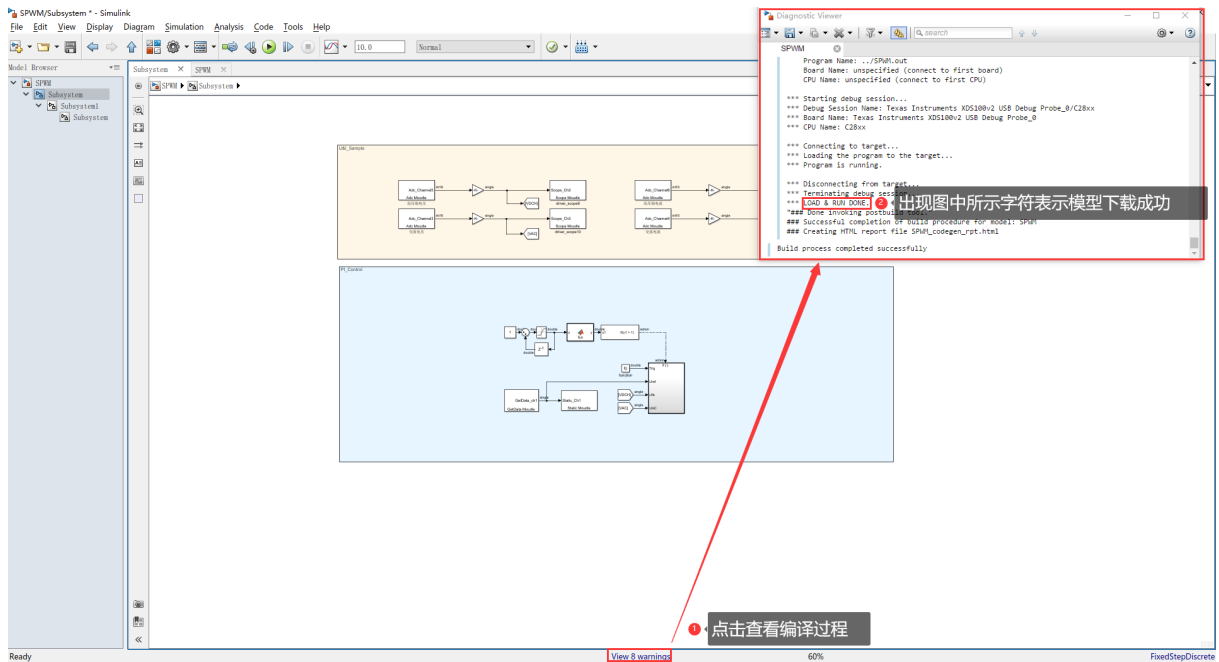


图 3.5.18 模型下载成功

第八步：上位机与计算机建立通信，首先切换到“控制器设置”界面，点击“建立通信”按钮，等连接上之后点击“设置”按钮，具体操作如下图 3.5.19 所示；

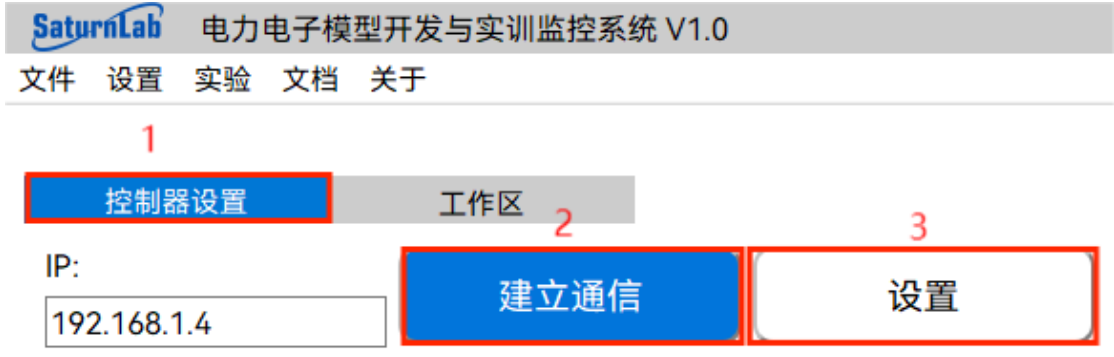


图 3.5.19 建立通信

第九步：运行模型，先切换到“工作区”界面，再将“交流参考值”设置为 36V（交流有效值），并点击计算机键盘“Enter”确认输入（先点击“开始仿真”，“参考回显”框会显示设定值是否生效，如回显值与设定值一样，表示设置生效，否则设置无效，需重新进行第九步操作），然后将“PWM 使能”置“ON”，“故障复位”先置“ON”，再置“OFF”，再将“交直流继电器”置“ON”。先点击“复位”，然后立即点击“开始仿真”按钮，具体操作如下图 3.5.20 所示；

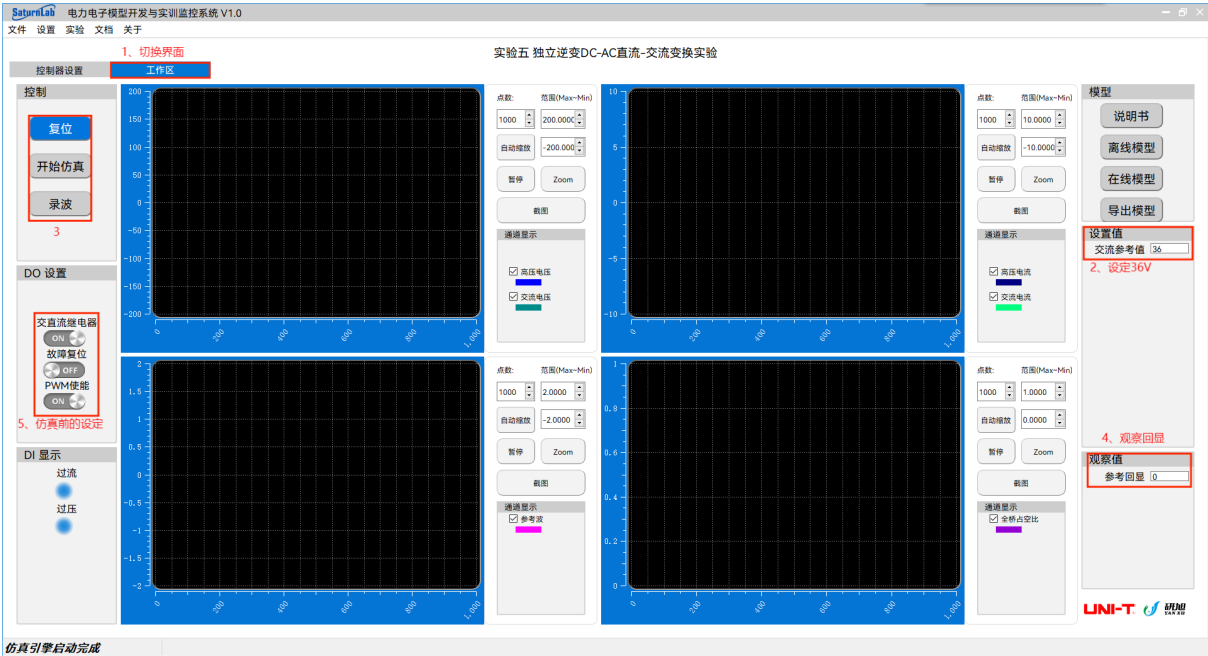


图 3.5.20 具体操作

注意：若系统运行故障，“DI 显示”界面中的两个蓝灯会变成红色，指示其中的一种或两种故障，此时点击“停止仿真”，将“故障复位”重新置“ON”，再置“OFF”，

同时点击“复位”按钮，继续点击“开始仿真”即可。

第十步：可观察软件界面的示波器，看交流电压是否稳定在峰峰值 $\pm 50\text{V}$ ，即交流有效值 36V 。模型运行过程中可通过上位机界面查看控制效果，运行结果如下图 3.5.21 所示，同时可以点击“录波”按钮，以备后期分析数据；

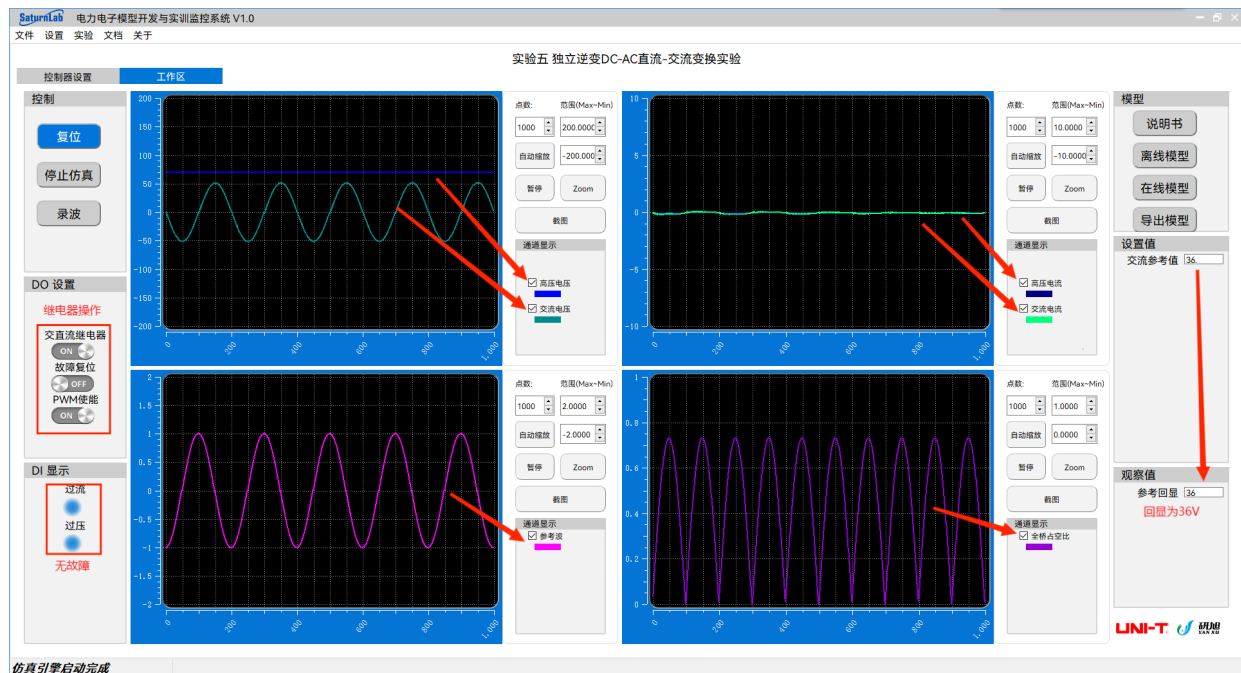
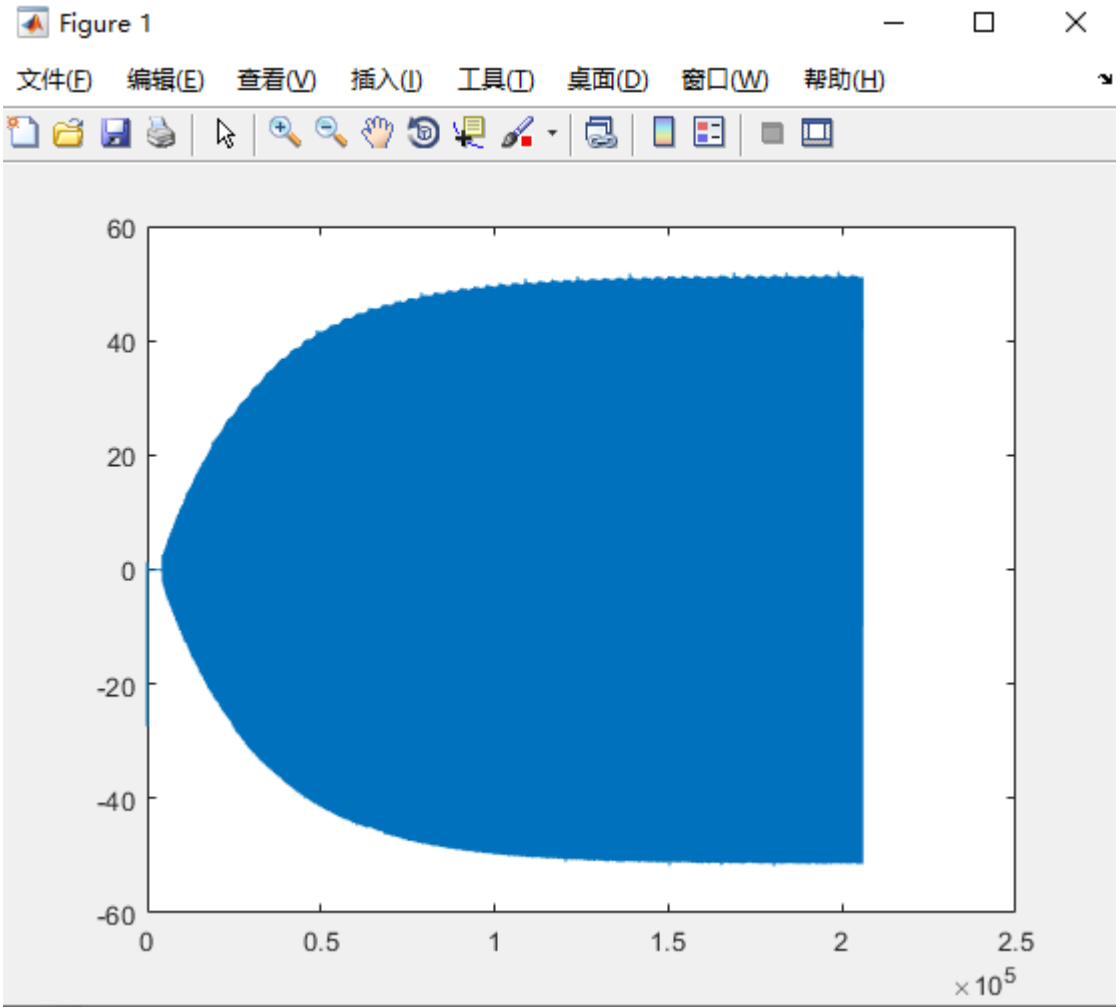


图 3.5.21 运行结果

第十一步：仿真停止，先点击“停止仿真”按钮，然后将“PWM 使能”、“直流继电器”置“OFF”即可停止仿真。如已录播，可将保存的数据 xx.mat 放入 MATLAB 查看，采用 Matlab 的绘图工具对波形进行分析（录播操作在实验二中已有详细介绍）。

下图 3.5.22 为交流电压波形。



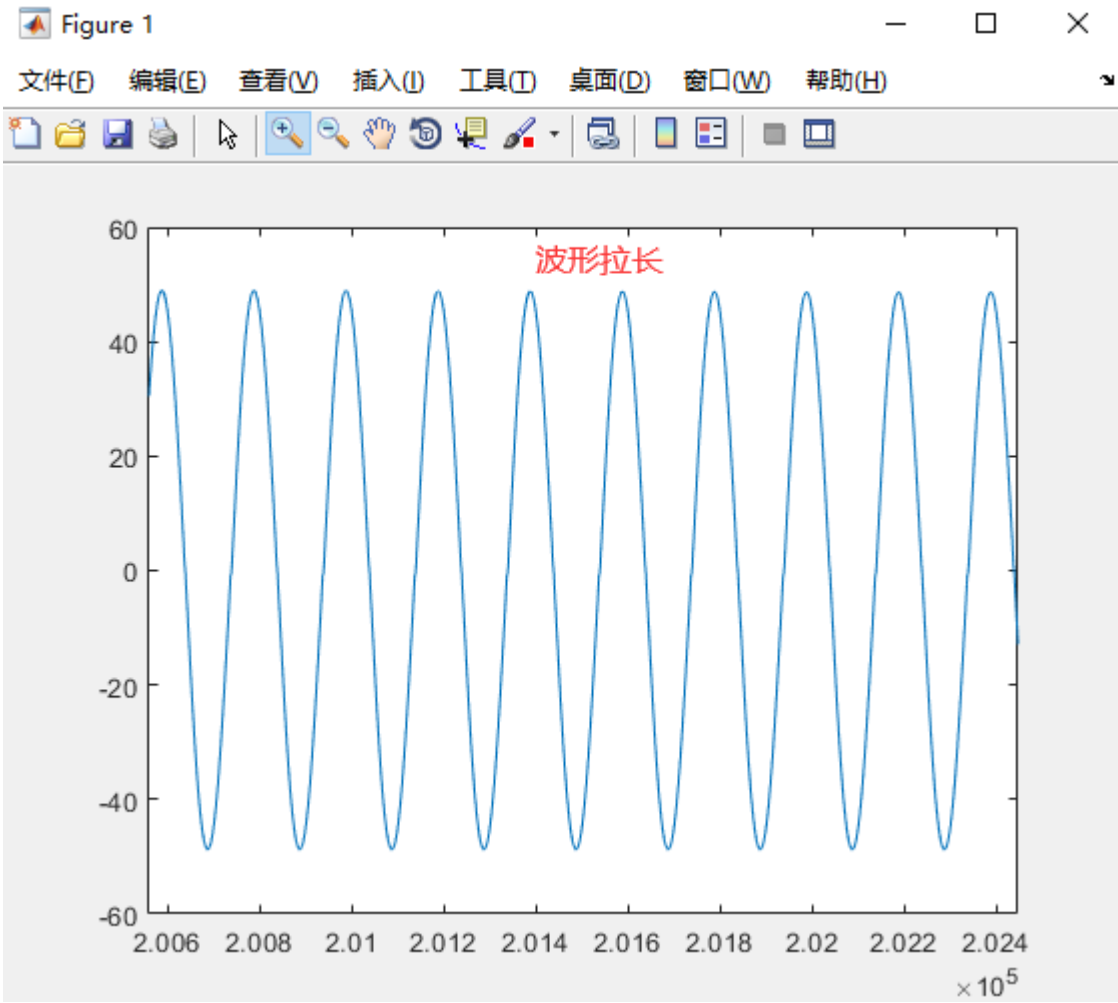
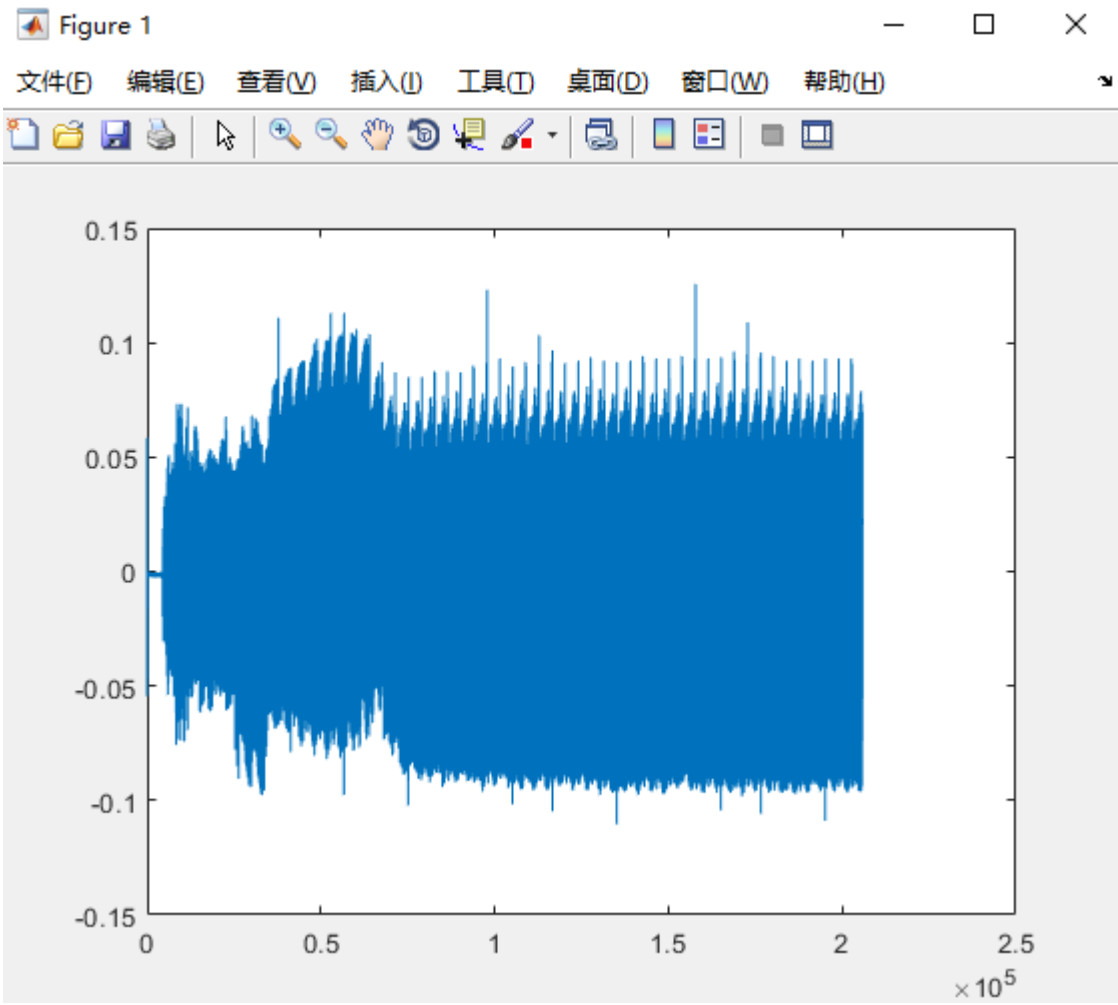


图 3.5.22 交流电压波形

交流电流波形如下图 3.5.23 所示；



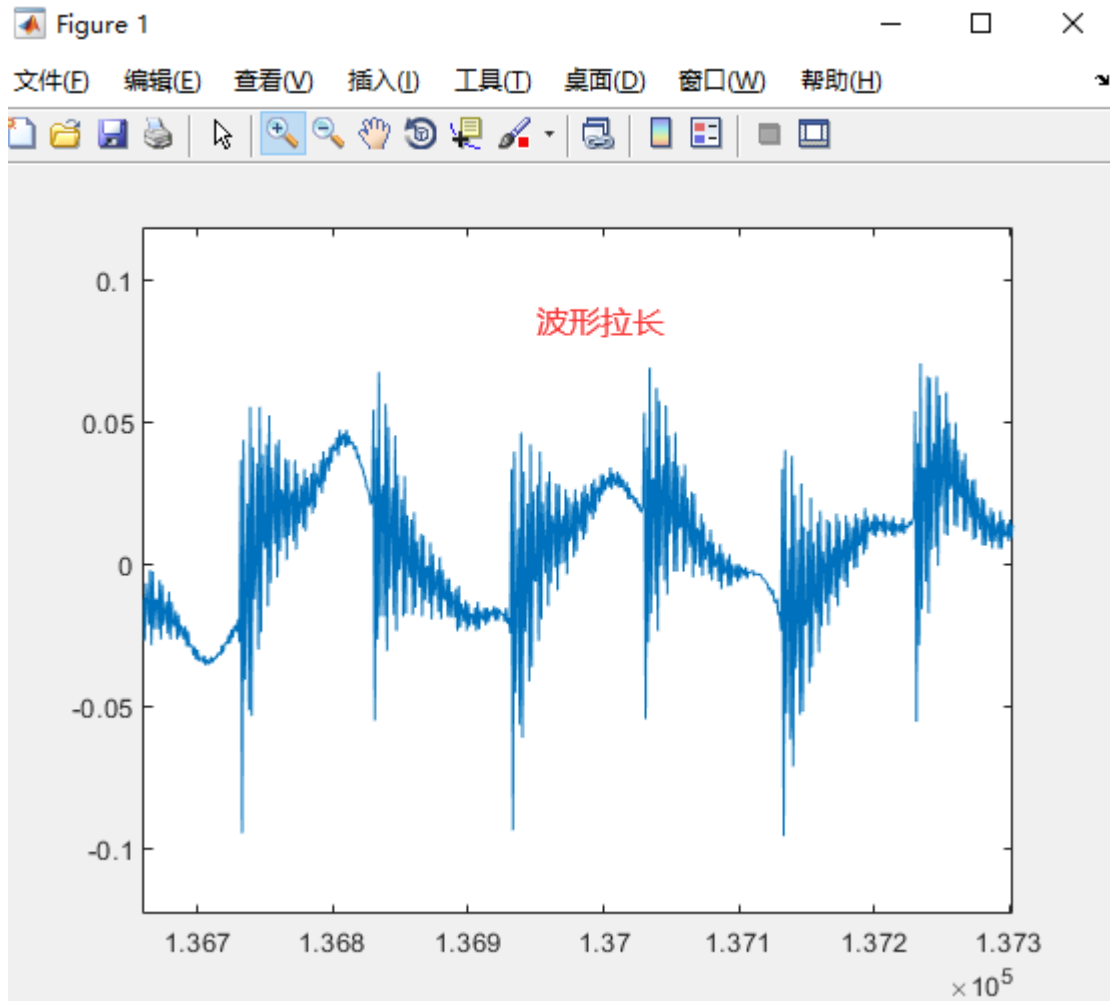


图 3.5.23 交流电流波形

可以看出，由于没有负载，交流电流基本为 0。

带载实验

与空载试验操作相同，等交流电压稳定在峰峰值±50V 后，需要进行拓扑连线，将拓扑图中的 7 和 13 连接，8 和 14 连接，其他不变，如下图 3.5.24 所示，即可观察上位机中的交流电压及电流变化。

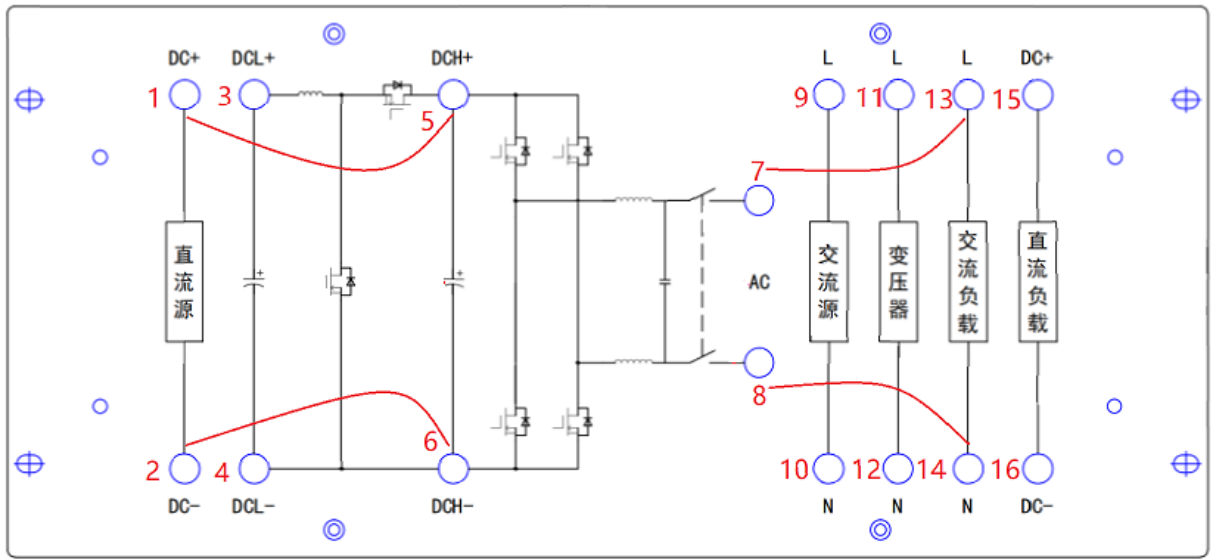


图 3.5.24 交流带载实验拓扑连线

实际运行结果如下图 3.5.25 所示：

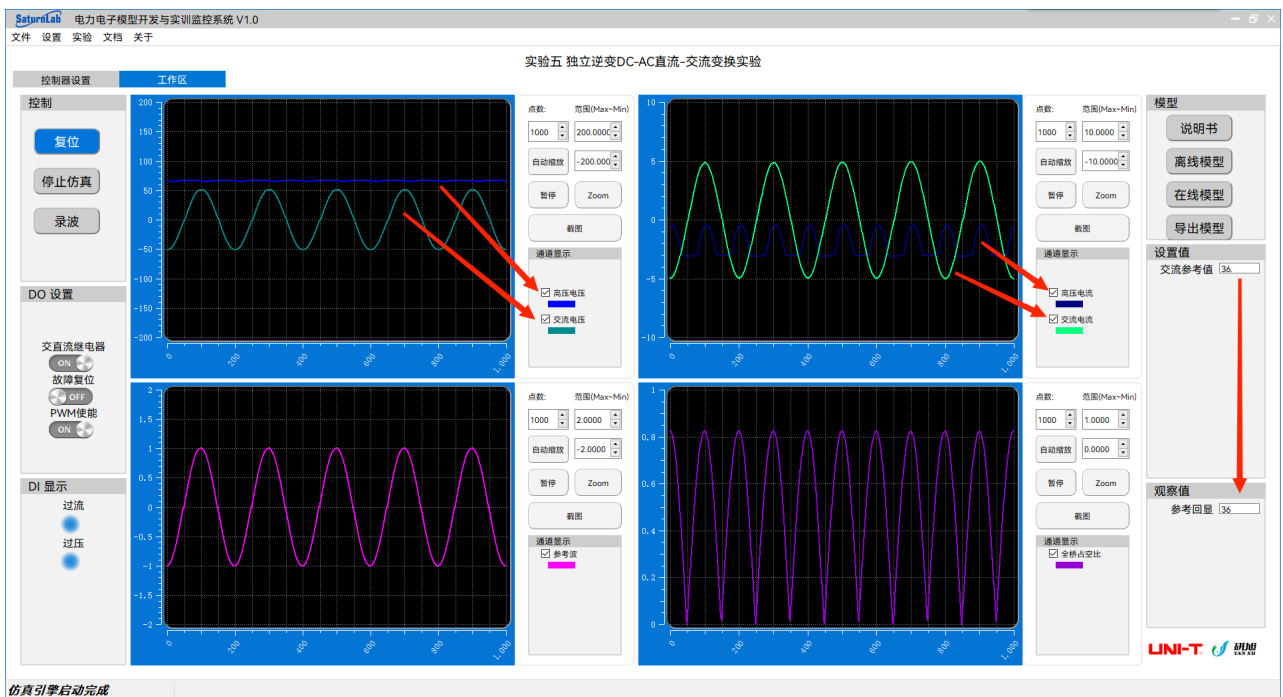
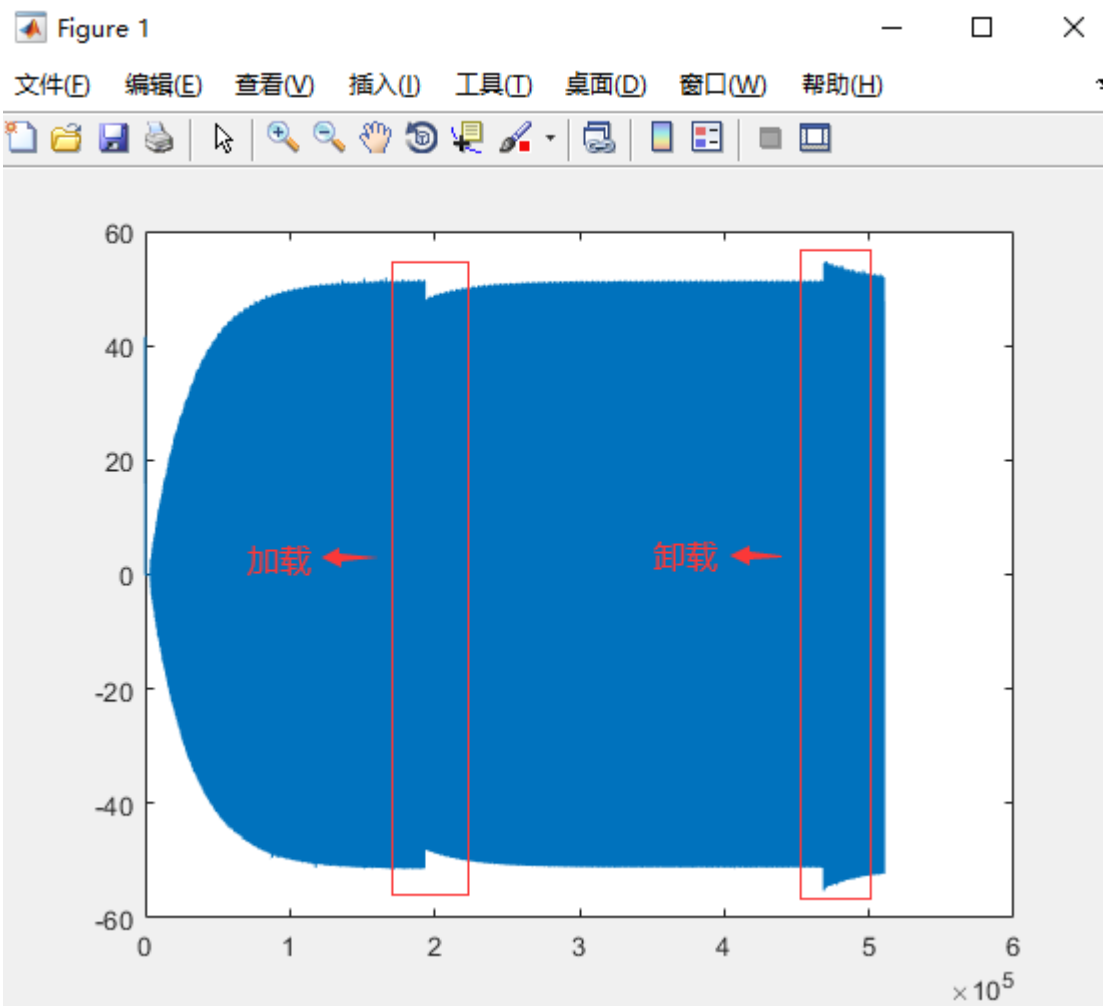


图 3.5.25 带载运行结果

可以看出，加载后交流电流增大，由于交流负载为 10 欧姆的电阻，所以，交流电流峰峰值为 $\pm 5A$ ；

卸载操作步骤：拔掉拓扑图 7 和 13、8 和 14 连线，然后点击软件界面的“停止仿真”按钮即可，最后将“PWM 使能”及“交直流继电器”即可。

图 3.5.26 为单相独立逆变状态下的，加载及卸载输出交流电压变化；



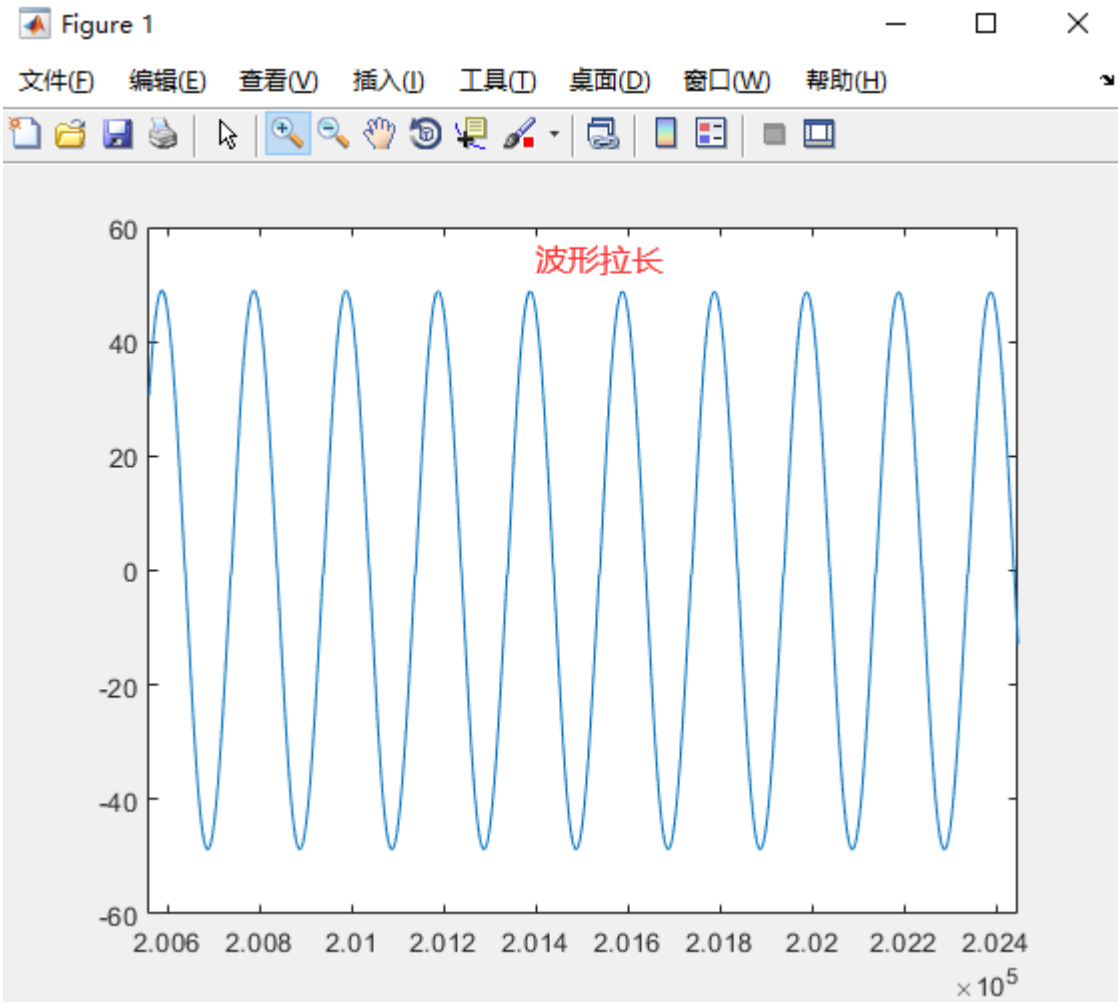
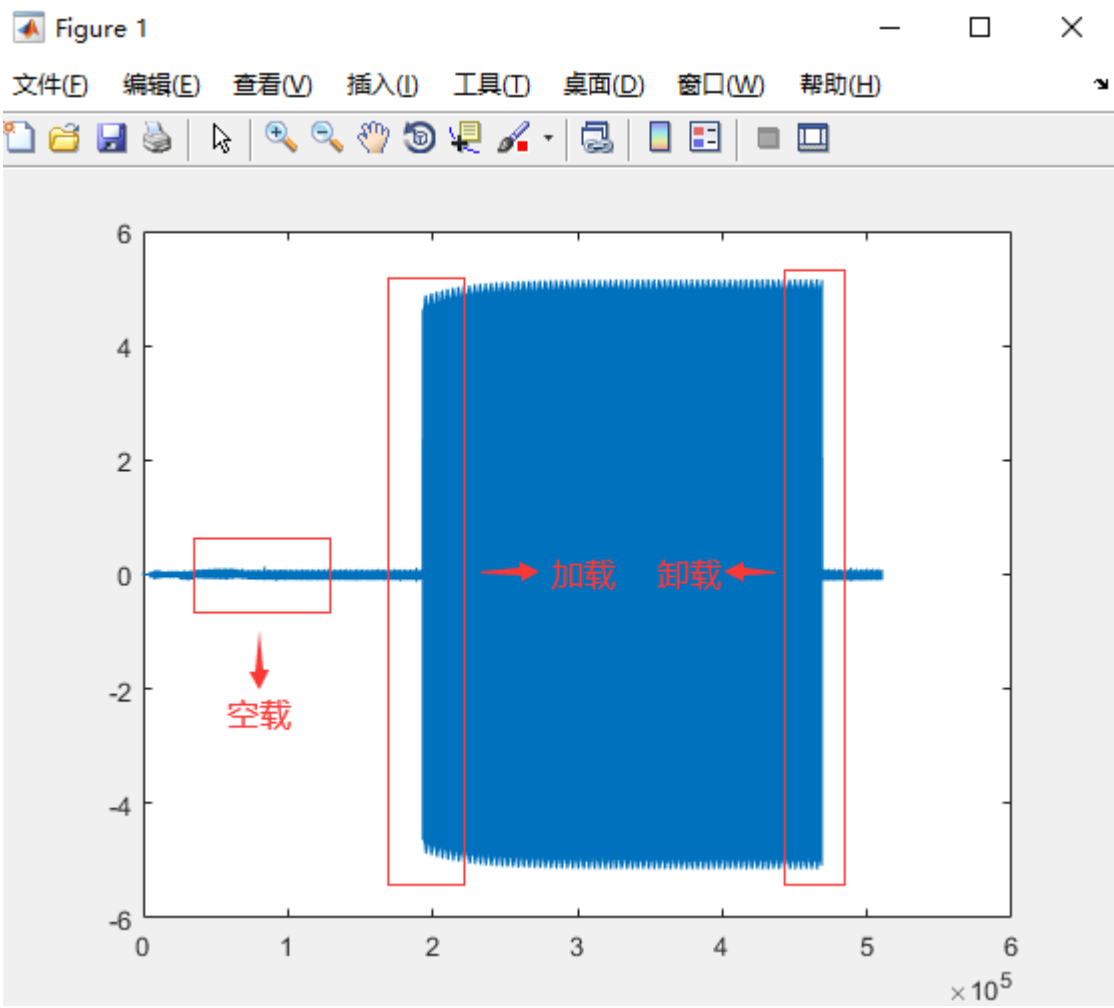


图 3.5.26 加载及卸载状态下交流电压的变化

图 3.5.27 为单相独立逆变状态下的，加载及卸载输出交流电流变化；



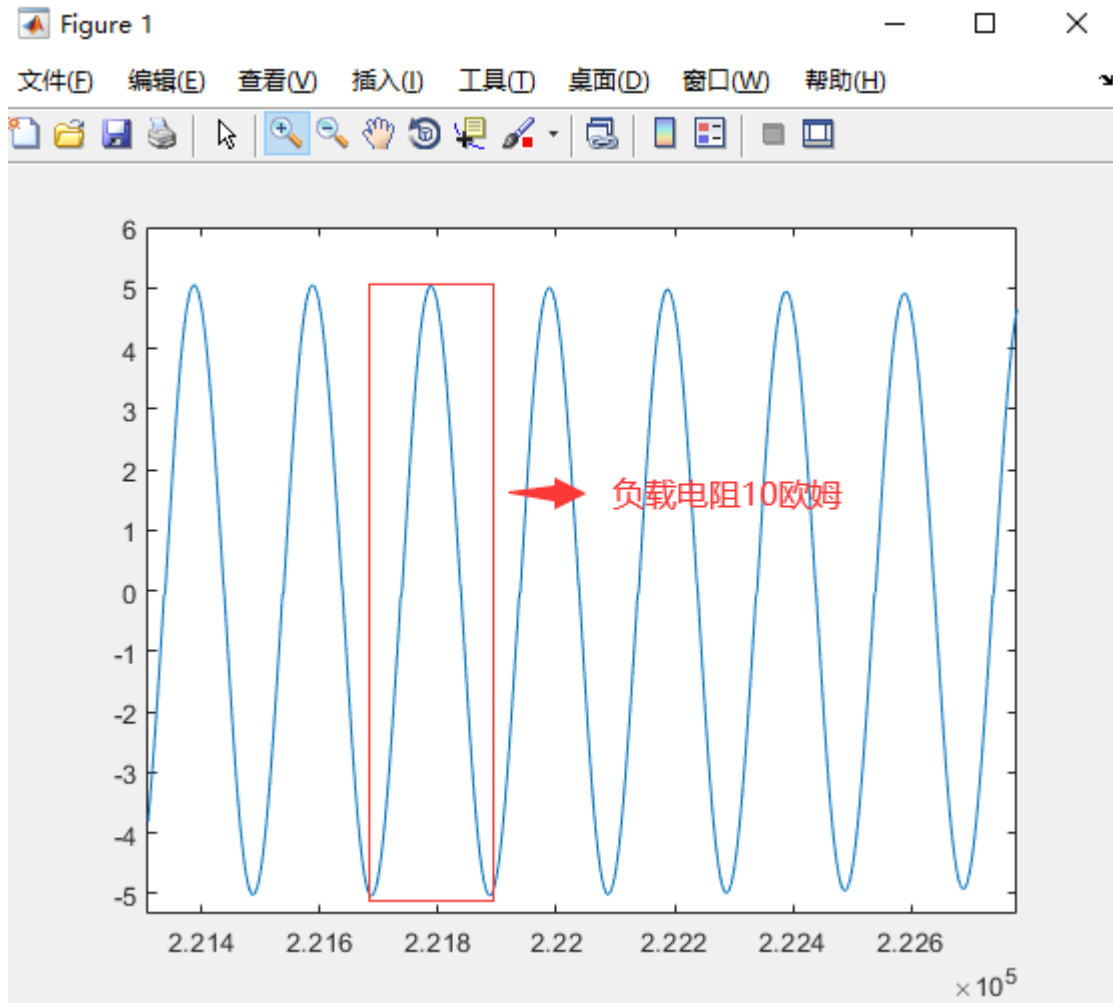


图 3.5.27 加载及卸载状态下的交流电流变化

注：如需修改模型自行验证，可选择“导出模型”到任意英文目录下，然后重新修改并下载验证，具体操作如下图 3.5.28 所示；



图 3.5.28 导出模型

实验六 光伏并网逆变 DC-AC 直流-交流变换实验

前面介绍了单相全桥电压型逆变电路原理，此节介绍的并网型逆变与其有什么区别呢？实验五介绍的也称作离网逆变器，即脱离电网，独立逆变成 220V 的模拟电网，为负载供电。如图 3.6.1 所示的为单相全桥并网逆变器电路。此逆变电路输出直接与电网连接，说的更加直白一些，就是电网作为逆变器的“负载”。试想，当逆变器输出电压与电网正常连接后，其输出电压是被电网钳制的，并网逆变器只能控制输出电流，因此这类并网逆变器属于电流型逆变器。

实验五介绍的调制波是个不考虑相位、只考虑幅值和频率的正弦波，而在并网实验中要求调制波必须是与电网同相位、同幅值、同频率的，所以需要追踪电网的相位，如何追踪电网相位呢？实验中对电网电压进行采集，用采集值除以电网电压的峰值即可得到相应的调制波形。

单相全桥并网逆变与单相全桥 PWM 整流是相反的过程，实现方式也是相同的。在此就不多做叙述了。

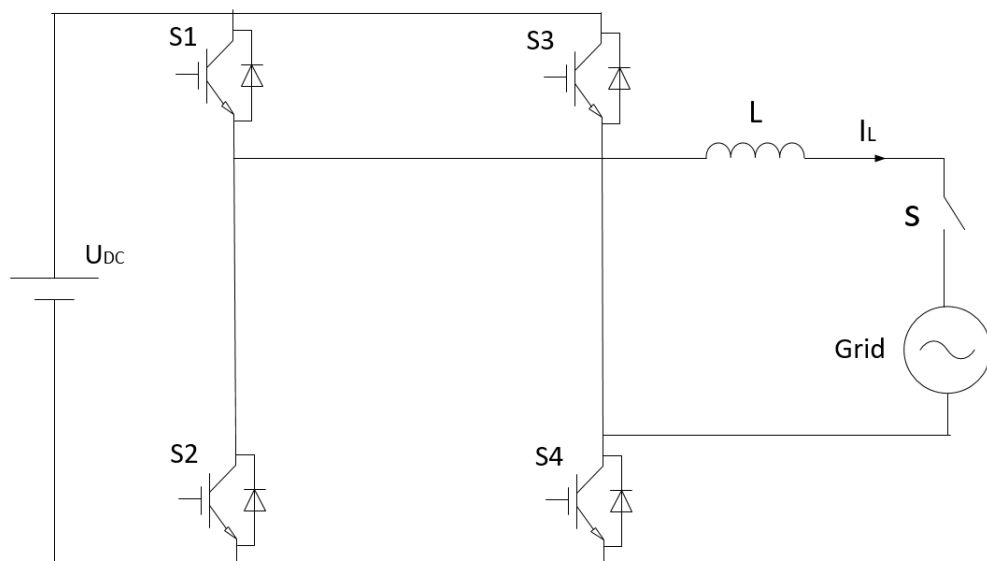


图 3.6.1 单相全桥并网逆变电路

离线模型操作

实验操作步骤（例程名称为 GRID_Interver.mdl）：

第一步：双击打开 VIEW1000 软件，如下图 3.6.2 所示图标；



图 3.6.2 VIEW1000 软件

第二步：在软件中切换至“工作区”界面，然后在工具栏中单击“实验”，并选择实验六，如下图 3.6.3 所示；



图 3.6.3 实验选择

首先软件界面会切换到实验六中已搭建好的操作界面，图 3.6.4 所示实验六上位机界面搭建如下：

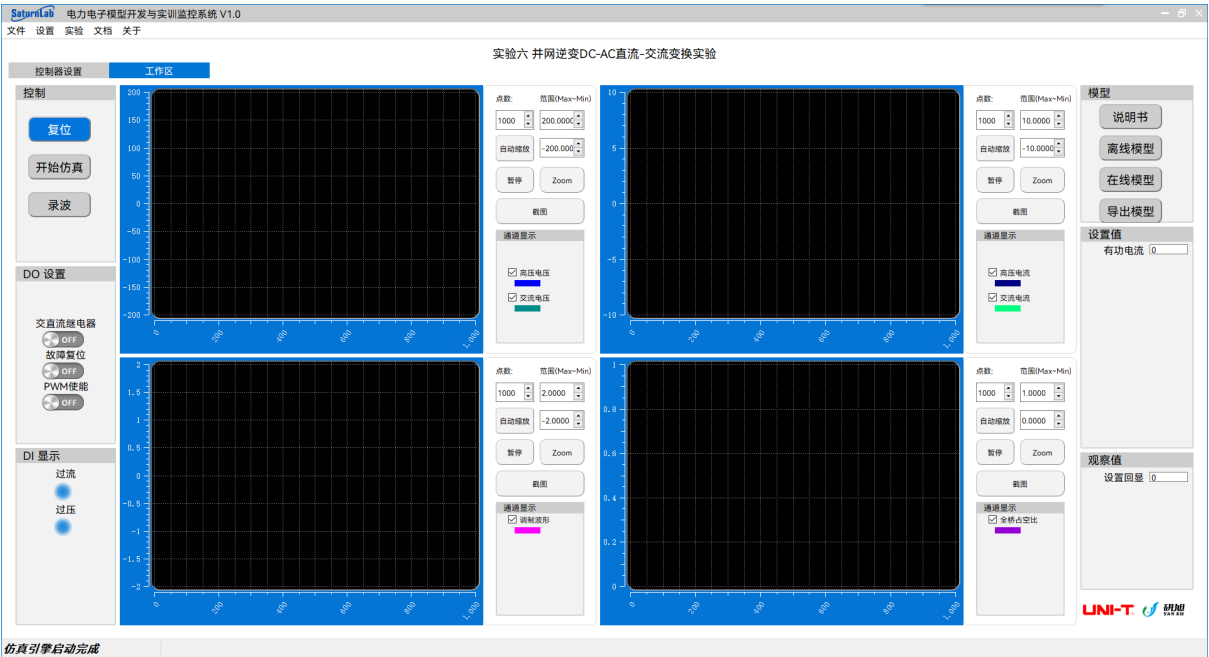


图 3.6.4 实验六上位机软件界面

第三步：在“工作区”界面的右上角“模型”框中点击“离线模型”，如图 3.6.5 所示；



图 3.6.5 打开离线模型

然后等待 Matlab 软件打开，并打开已搭建好模型“GRID_Interver.mdl”，模型打开后如图 3.6.6 所示；

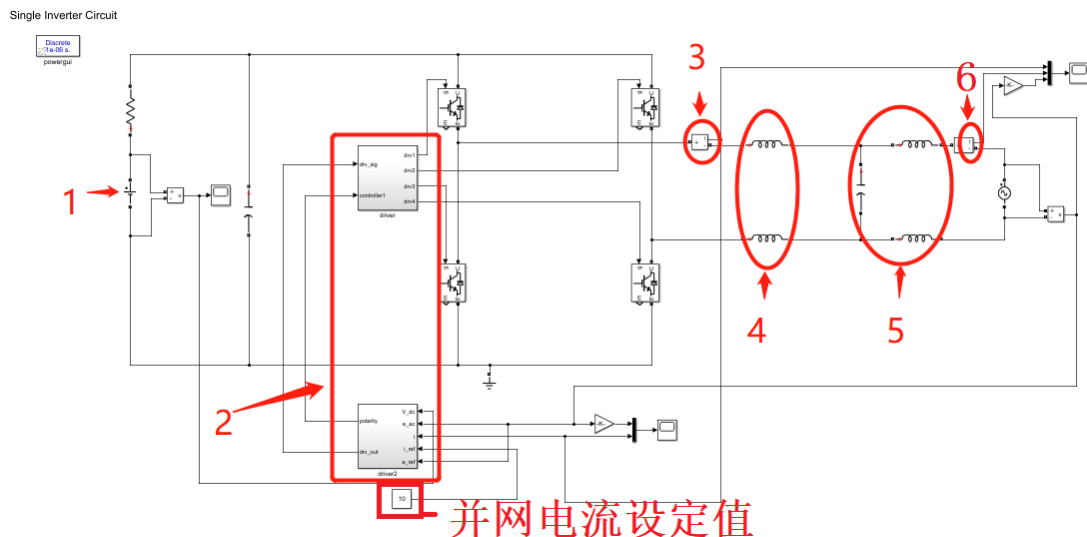


图 3.6.6 单相全桥并网逆变电路模型

图中红色标注：

标注 1：直流电源，设置 400V；

标注 2：控制算法和 PWM 产生模块，控制算法和 PWM 整流相同；

标注 3：测量电感电流；

标注 4：电感，感值各为 2mH；

标注 5：与标号 4 形成了 LCL 滤波电路；

标注 6：测量并网电流。

并网电流设定值，决定了并网的电流幅值，进而也决定了并网功率值。运行模型得到图 3.6.7 的电流和电压对比图。1 为电网电压波形，2 为电感电流波形，3 为并网电流

波形。由图不难对比出，电感电流与电网相位差基本一致，而实际并网电流波形比电感电流波形波动小，但是与电网产生很小的相位差。原因是并网电流是电感电流经过 LCL 滤波得到的。各有优缺点，如果但用单 L 滤波电路，那么并网电流与电网电压相位差小，得到的功率因数近似 1，但是向电网注入了高次谐波。如果用 LCL 滤波电路，那么并网电流向电网注入的谐波减小，但是功率却变小了。

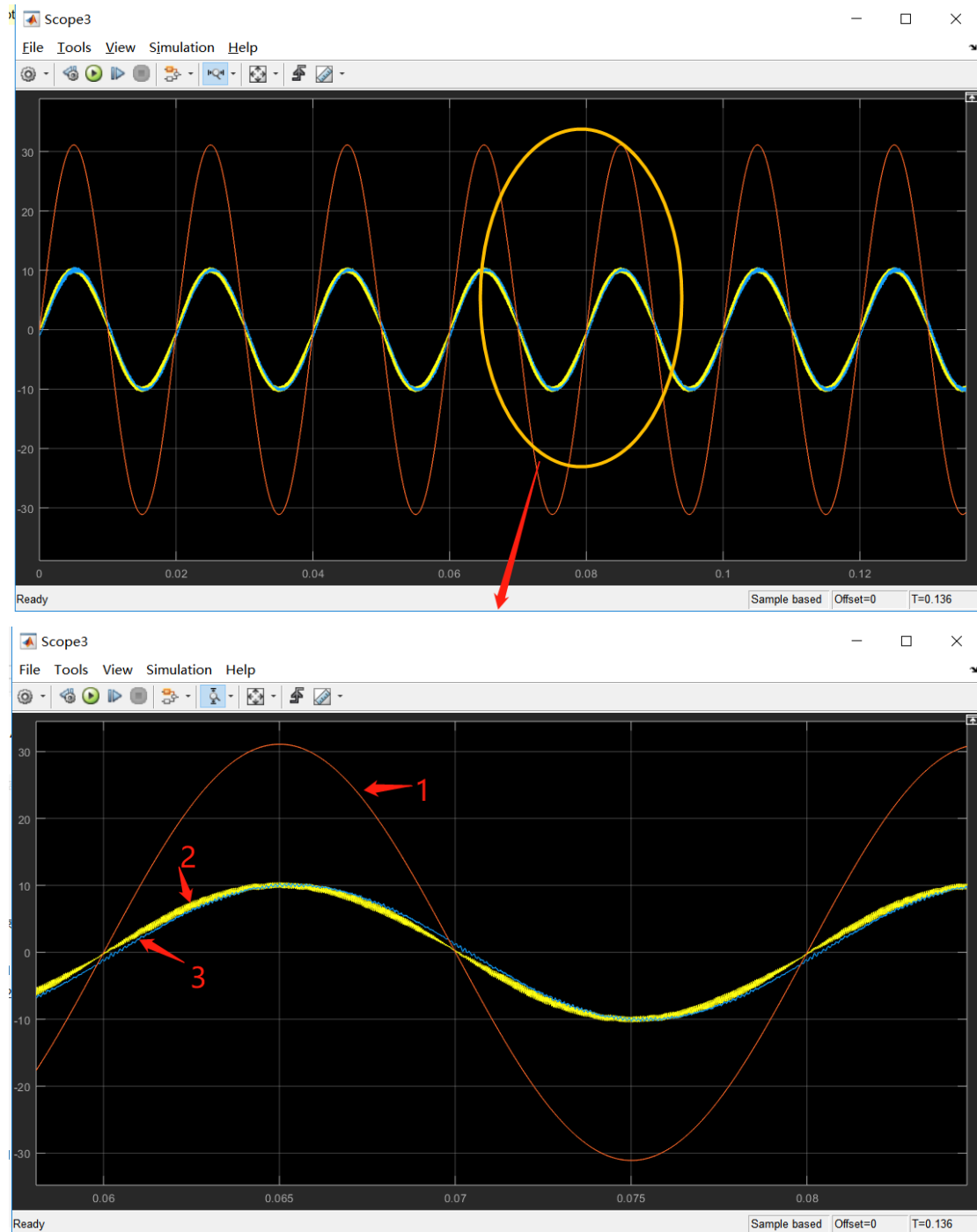


图 3.6.7 并网电压电流波形图

在线模型操作

首先统计一下算法模型中参与控制的输入量和输出量。

控制输入量	控制输出量
高压端电压	PWM 输出
电网电压	-----
电网电流	-----

清楚了输入量和输出量，需要了解的就是快速原型控制器具体与主电路的信号连接情况。

快速原型控制器	主电路
ADC4	交流电流
ADC3	交流电压
ADC5	高压端电压
ADC6	高压端电流
PWM2A_DUTY、PWM3A_DUTY	全桥电路 IGBT

注意：出于安全问题的考虑，所有功率硬件及仪器设备都采用小功率器件，所以在
线模型仿真中的一些参数也是根据实际情况进行下调。

实验操作步骤（模型名称 Interver.slx）：

第一步：双击打开 VIEW1000 软件，如下图 3.6.8 所示图标；



图 3.6.8 VIEW1000 软件

第二步：在软件中切换至“工作区”界面，然后在工具栏中单击“实验”，并选择
实验六，如下图 3.6.9 所示；



图 3.6.9 实验选择

首先软件界面会切换到实验六中已搭建好的操作界面，图 3.6.10 所示实验六上位机界面（Interver.sp1000）搭建如下：

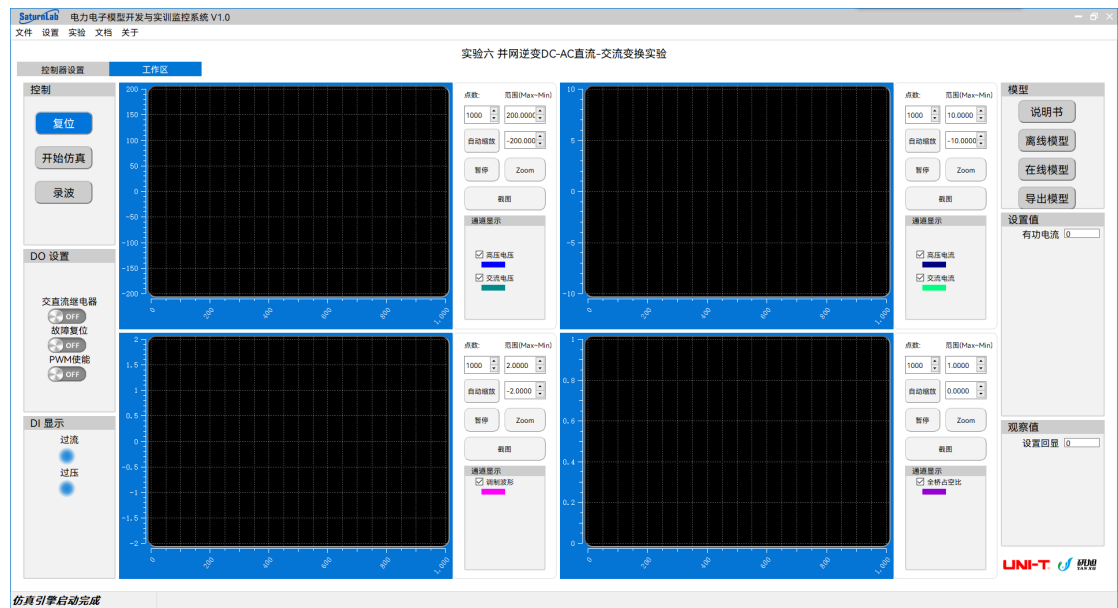


图 3.6.10 单相全桥并网逆变上位机软件界面

第三步：在“工作区”界面的右上角“模型”框中点击“在线模型”，然后等待 Matlab 软件打开，并打开已搭建好模型“Interver.slx”，操作如下图 3.6.11 所示；



图 3.6.11 打开在线模型

模型打开后如图 3.6.12 所示；

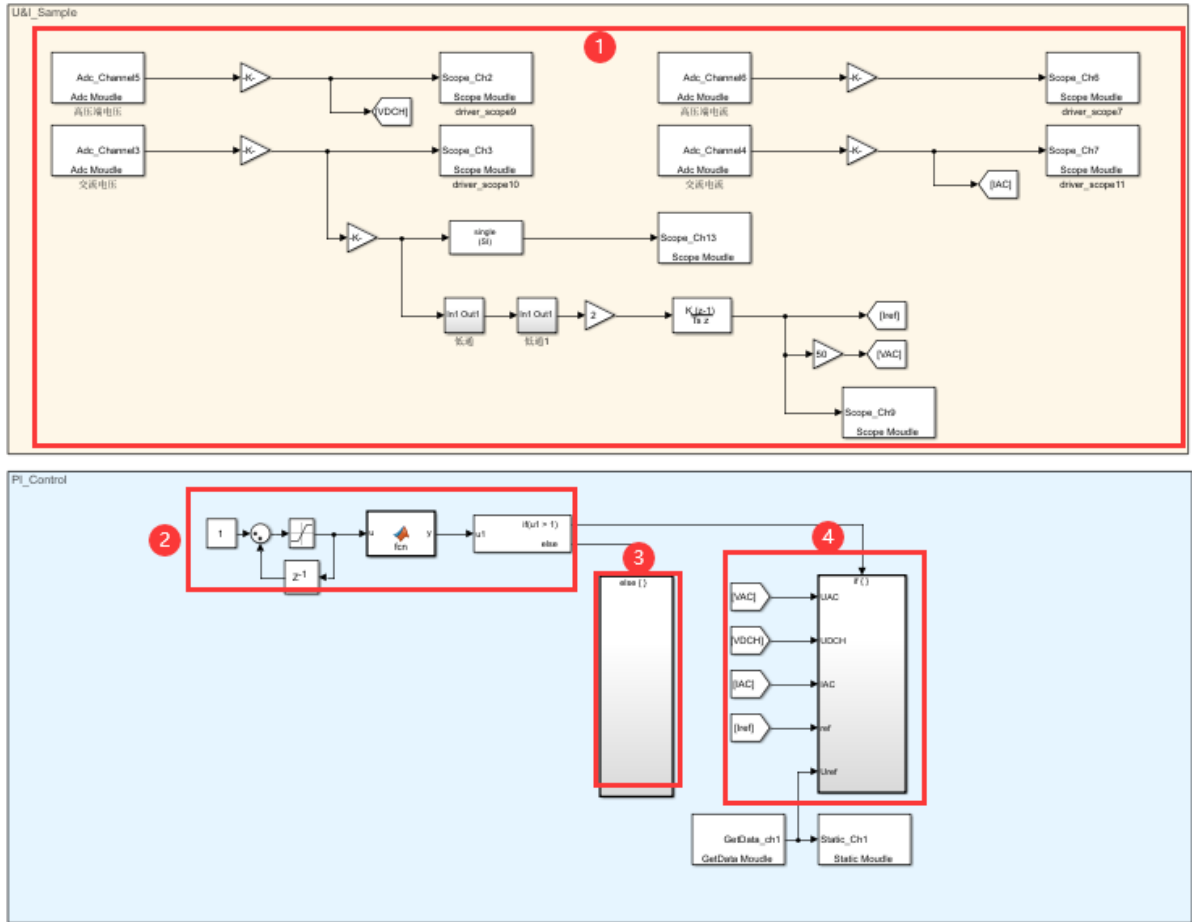


图 3.6.12 Interferer 快速原型控制模型

图中红色标注：

1、ADC 采集模块：通过 ADC 采集模块采集直流高压侧及交流侧电压电流信号，并通过 SCOPE 模块在上位机上显示成电压电流波形；其中 Adc_Channel3 采集交流侧电压，Gain 模块的值为 $3.0518e-4 \times 30$ ，即转换变比为 $3.0518e-4 \times 30$ ，计算原理如下图 3.6.13 所示，Adc_Channel5 采集高压侧电压，转换变比为 $3.0518e-4 \times 30$ ，Adc_Channel4 采集交流电流，转换变比为 $3.0518e-4 \times 1.6667$ ，Adc_Channel6 采集高压侧电流，转换变比为 $3.0518e-4 \times 1.6667$ ；

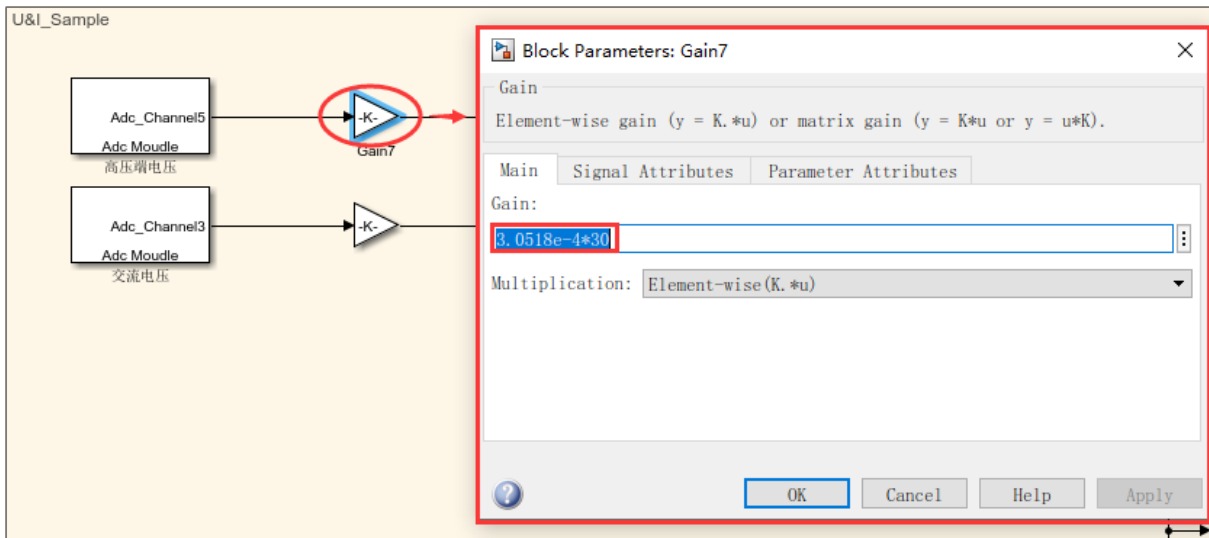


图 3.6.13 增益系数计算

- 2、延迟触发模块：延迟一段时间触发 if-function；
- 3、全桥模块的初始占空比给定：初始状态下，PWM 信号不定，所以给予一个确切的占空比信息，使全桥模块全部关闭，防止误触发，导致故障；
- 4、全桥模块闭环占空比计算：将计算得到的占空比，通过 PWM2A_DUTY、PWM2B_DUTY、PWM3A_DUTY 及 PWM3B_DUTY 模块传输到 PWM 模块进行 PWM 信号的输出。

双击打开标注 4 所示模块，如下图 3.6.14 所示；

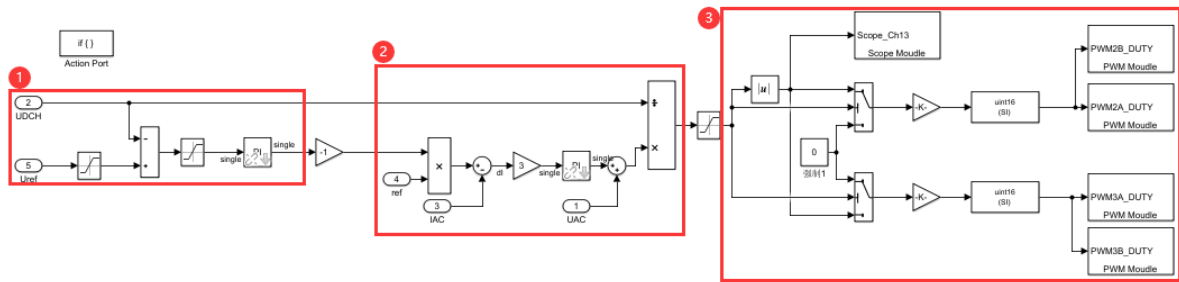


图 3.6.14 全桥占空比闭环调节

图中红色标注：

- 1、电压外环控制模块：将模型中通过 GetData_ch1 输入的升压参考值减去采集的实际高压侧电压得到偏差值，通过 PI 计算得到参考电流；
- 2、电流内环控制模块：将电压外环控制输出的参考电流与实际交流电流的有效值进行减法运算，在通过 PI 计算得到全桥占空比；
- 3、SPWM 控制输出模块：电流环 PI 计算输出得到占空比乘以交流电压得到确定相

位的占空比信息，再经过 SPWM 解算得到 PWM2 和 PWM3 的占空比，并通过 PWM2A_DUTY、PWM2B_DUTY、PWM3A_DUTY 及 PWM3B_DUTY 模块传输到 PWM 模块进行 PWM 信号的输出。

第四步：将主拓扑图中的 1 与 5 连接，2 与 6 连接，7 和 11 连接，8 和 12 连接，如下图 3.6.15 所示；

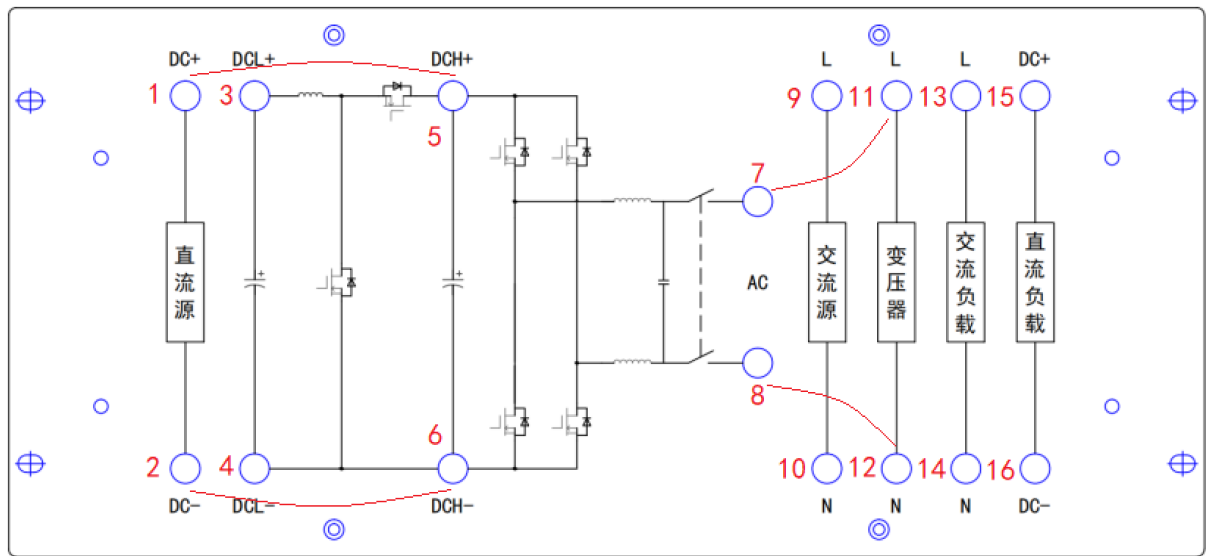


图 3.6.15 单相全桥并网逆变拓扑连线

第五步：将柜体总电源开启，为系统供电；

第六步：待直流源启动后，设置输出电压为 70V，输出电流为 3A，点击“ON”按钮；

第七步：切换到模型界面，下载模型到控制器，操作如下图 3.6.16 所示；

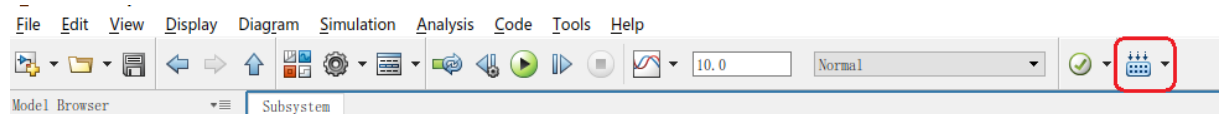


图 3.6.16 下载模型

查看编译过程及下载结果，如下图 3.6.17 所示：

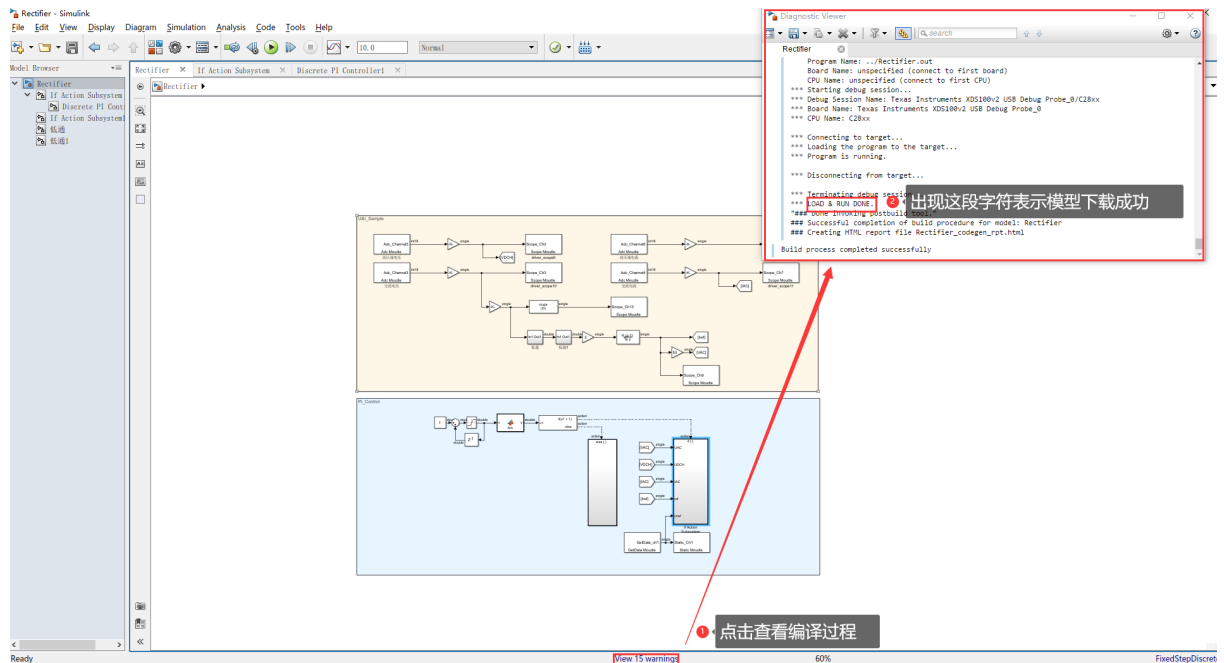


图 3.6.17 模型下载成功

第八步：上位机与计算机建立通信，首先切换到“控制器设置”界面，点击“建立通信”按钮，等连接上之后点击“设置”按钮，具体操作如下图 3.6.18 所示；

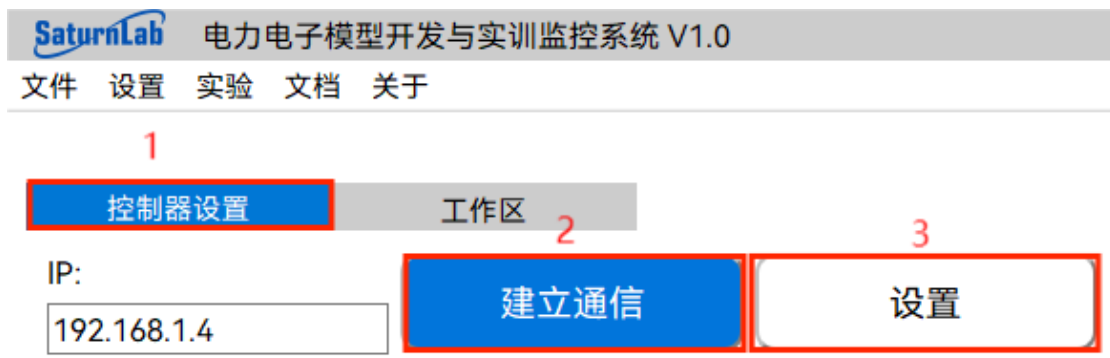


图 3.6.18 建立通信

第九步：运行模型，先切换到“工作区”界面，再将“有功电流”（即并网电流）设置为 0A，并点击计算机键盘“Enter”确认输入（先点击“开始仿真”，“参考回显”框会显示设定值是否生效，如回显值与设定值一样，表示设置生效，否则设置无效，需重新进行第九步操作），然后将“PWM 使能”置“ON”，“故障复位”先置“ON”，再置“OFF”，再将“交直流继电器”置“ON”。先点击“复位”，然后立即点击“开始仿真”按钮，具体操作如下图 3.6.19 所示；

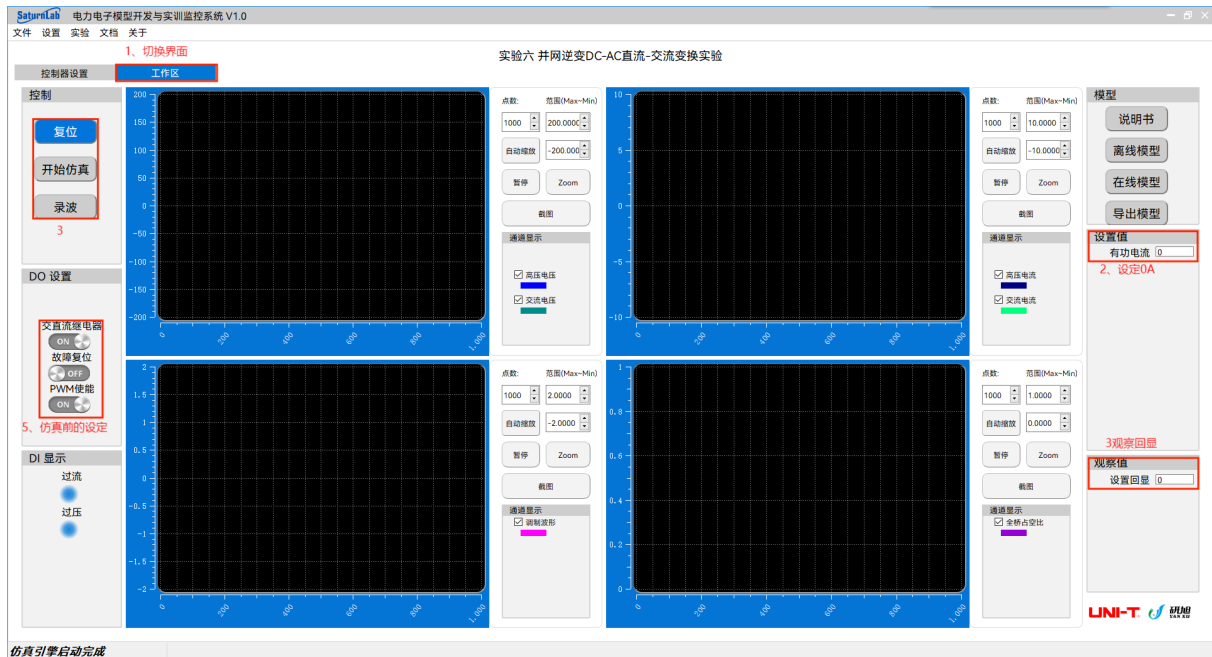


图 3.6.19 具体操作

注意：若系统运行故障，“DI 显示”界面中的两个蓝灯会变成红色，指示其中的一种或两种故障，此时点击“停止仿真”，将“故障复位”重新置“ON”，再置“OFF”，同时点击“复位”按钮，继续点击“开始仿真”即可。

第十步：等交流电流稳定后，再设置“有功电流”为 1A，等电压稳定后再继续设置为 2A，直至 4A，最小设置 0A，最大设置到 4A，然后再降到 2A，最后停止仿真。模型运行过程中可通过上位机界面查看控制效果，运行结果如下图 3.6.20 所示，同时可以点击“录波”按钮，以备后期分析数据；

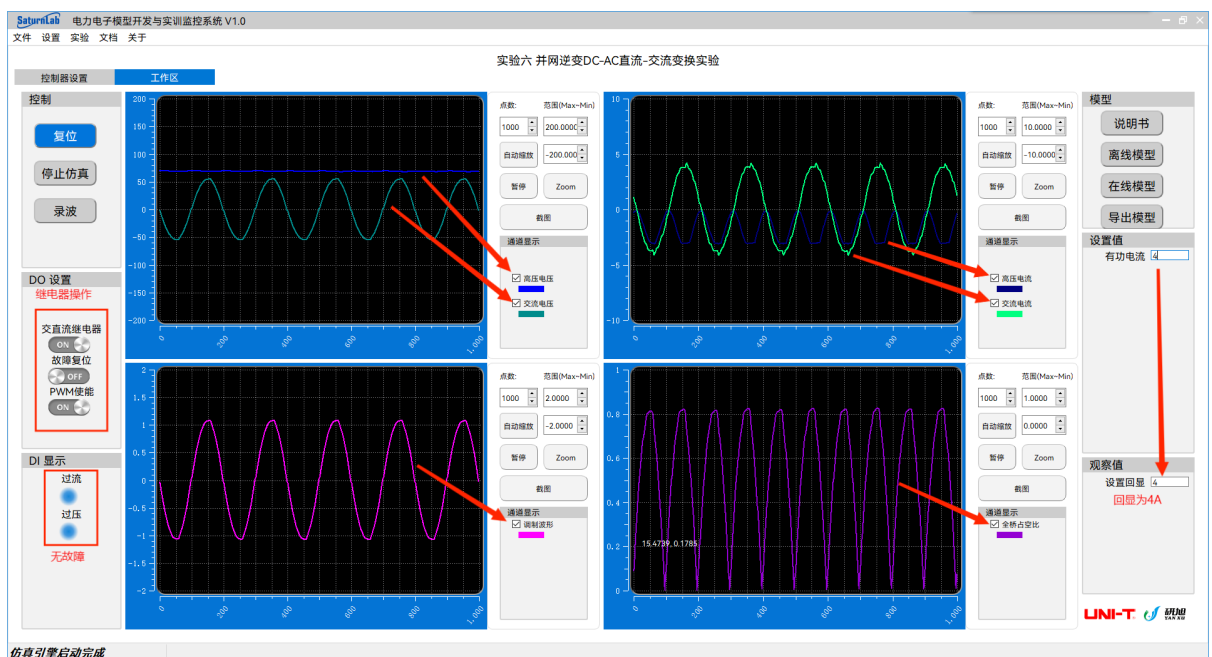
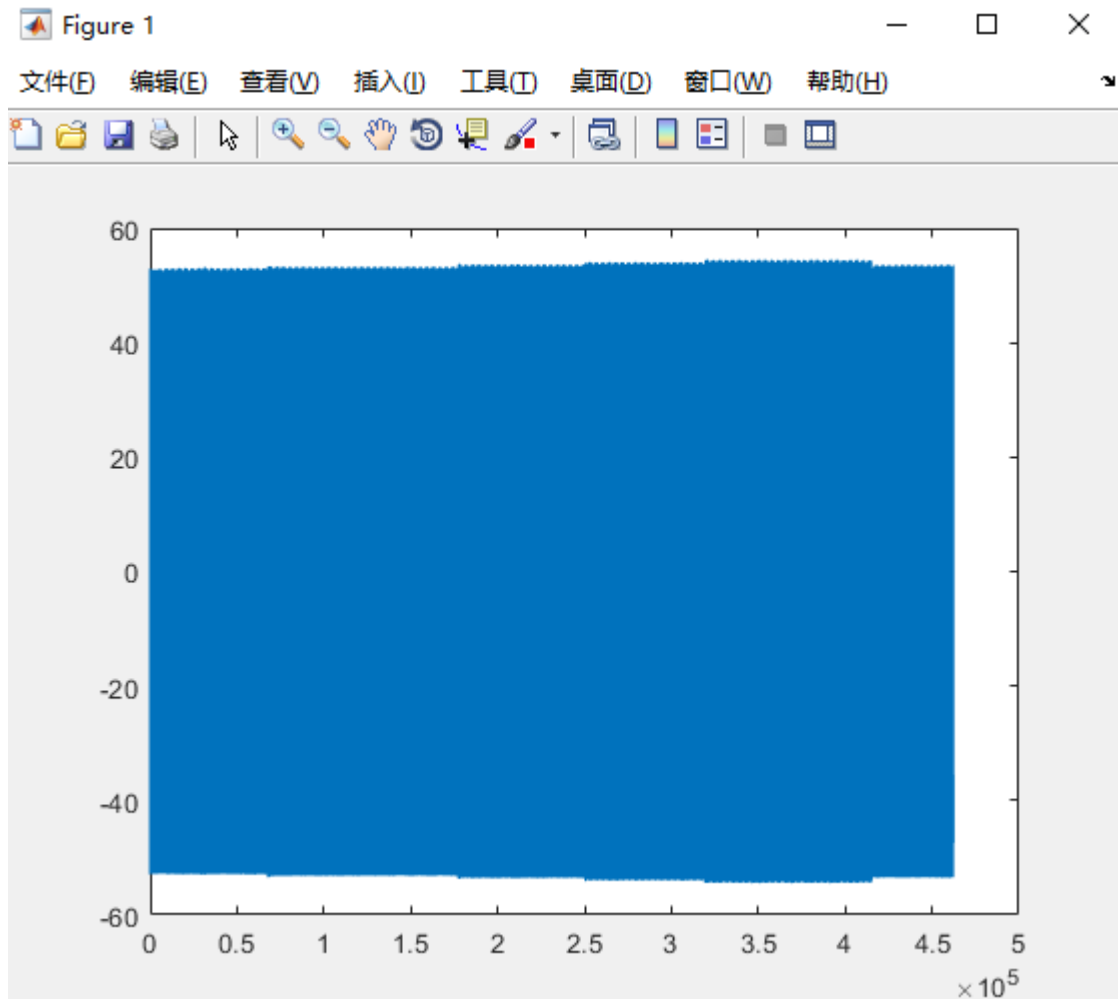


图 3.6.20 运行结果

第十一步：仿真停止，先点击“停止仿真”按钮，然后将“PWM 使能”、“交直流继电器”置“OFF”即可停止仿真。如已录播，可将保存的数据 xx.mat 放入 MATLAB 查看，采用 Matlab 的绘图工具对波形进行分析（录播操作在实验二中已有详细介绍）。

下图 3.6.21 为交流电压波形图；



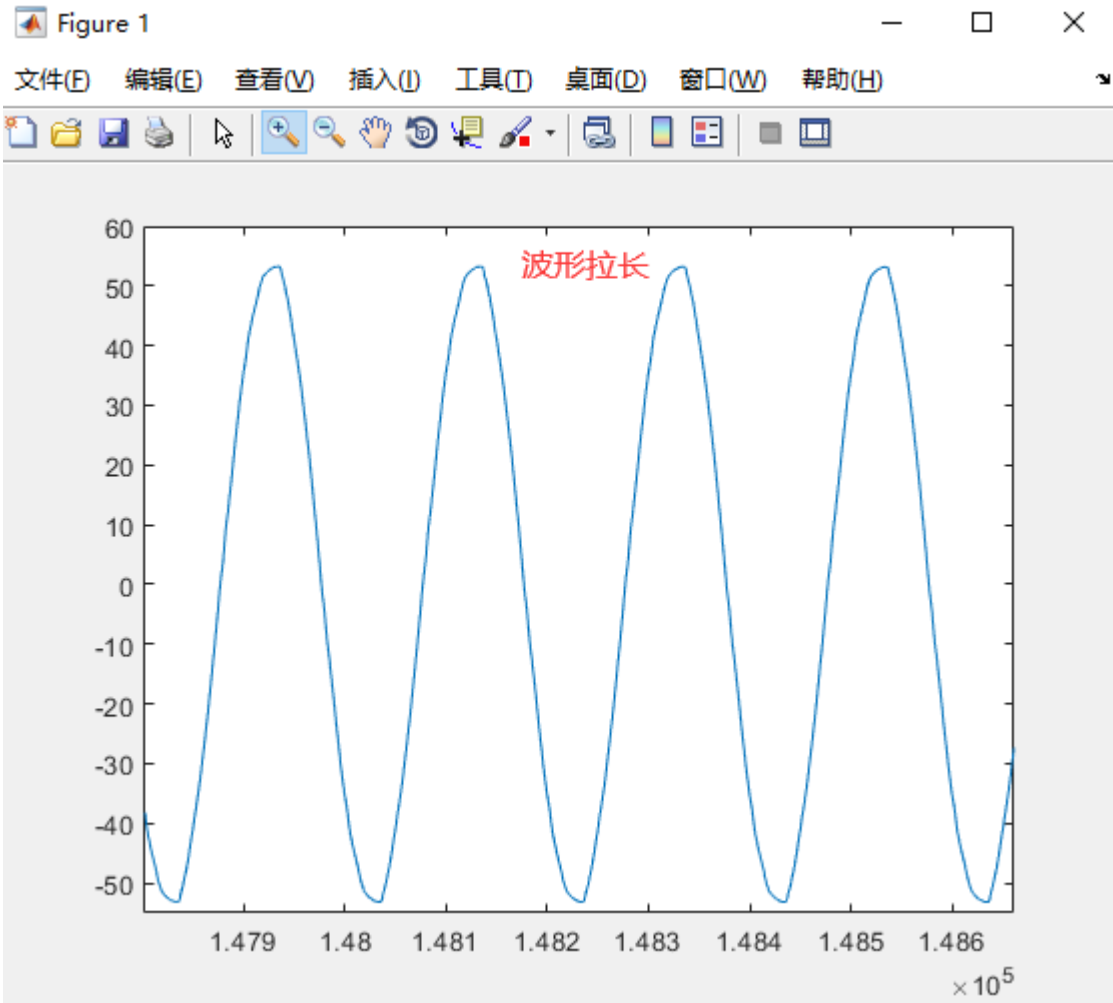
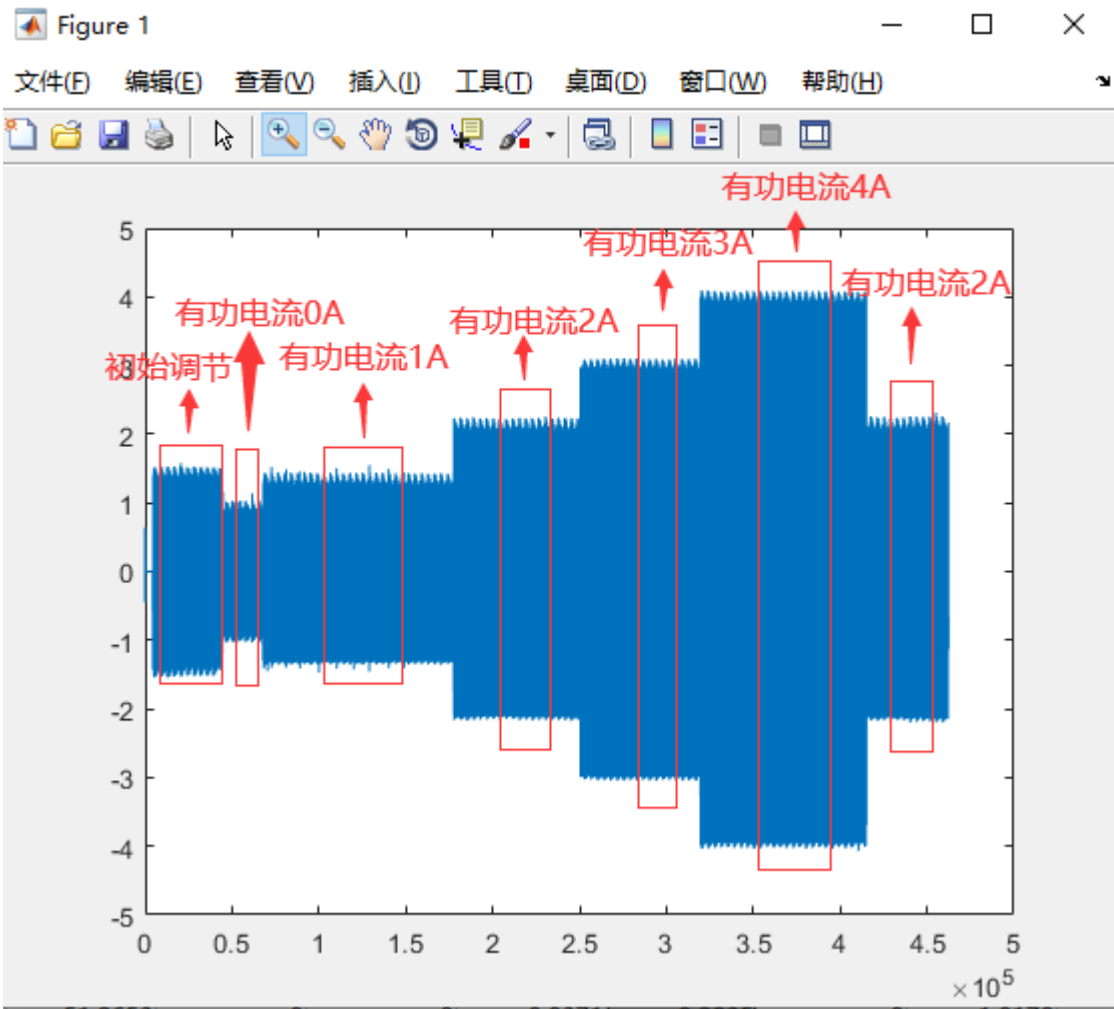


图 3.6.21 交流电压波形

交流电流在不同的有功电流限制下的波形如下图 3.6.22 所示；



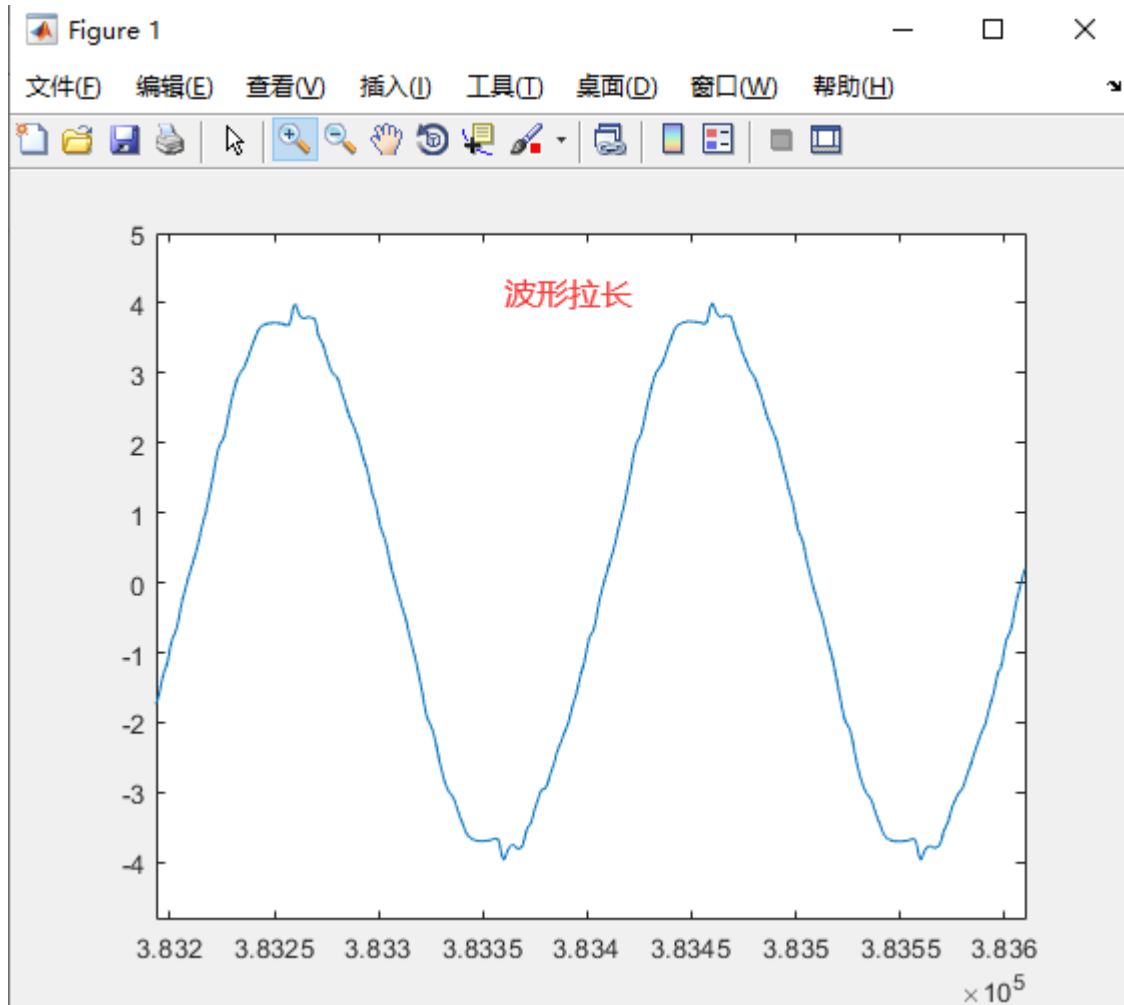


图 3.6.22 交流电流波形

可以看出，随着有功电流的增加，交流电流也随着变大。

注：如需修改模型自行验证，可选择“导出模型”到任意英文目录下，然后重新修改并下载验证，具体操作如下图 3.6.23 所示；



图 3.6.23 导出模型

四、进阶实验篇

实验七 光伏离网逆变 DC-DC-AC 直流-直流-交流两级变换实验

在基础实验篇关于 **Boost** 升压以及单相全桥独立逆变电路都进行了详细的讲解，此实验只是将二者连在一起工作。这样做的目的是什么呢？

在实际应用过程中，直流侧电源往往电压比较低，比如说电池源，考虑成本，串联的电池组较少，这样导致直流电压比较低，而又想对其进行 **220V** 单相逆变操作，此时就必须先经过 **Boost** 对电池升压，再逆变。包括光伏组件，由于光伏组件串联时，整体组件功率会被单体组件影响，因此为了降低这种影响因素，往往减少多块串联，这样势必导致光伏输出电压较低，因此同样需要 **Boost** 升压模块。

离线模型操作

实验操作步骤（例程名称为 DCDC_DCAC.mdl）：

第一步：双击打开 **VIEW1000** 软件，如下图 4.7.1 所示图标；



图 4.7.1 VIEW1000 软件

第二步：在软件中切换至“工作区”界面，然后在工具栏中单击“实验”，并选择实验七，如下图 4.7.2 所示；

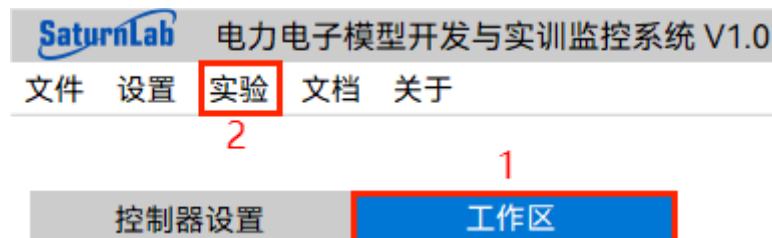


图 4.7.2 实验选择

首先软件界面会切换到实验七中已搭建好的操作界面，图 4.7.3 所示实验七上位机界面搭建如下；

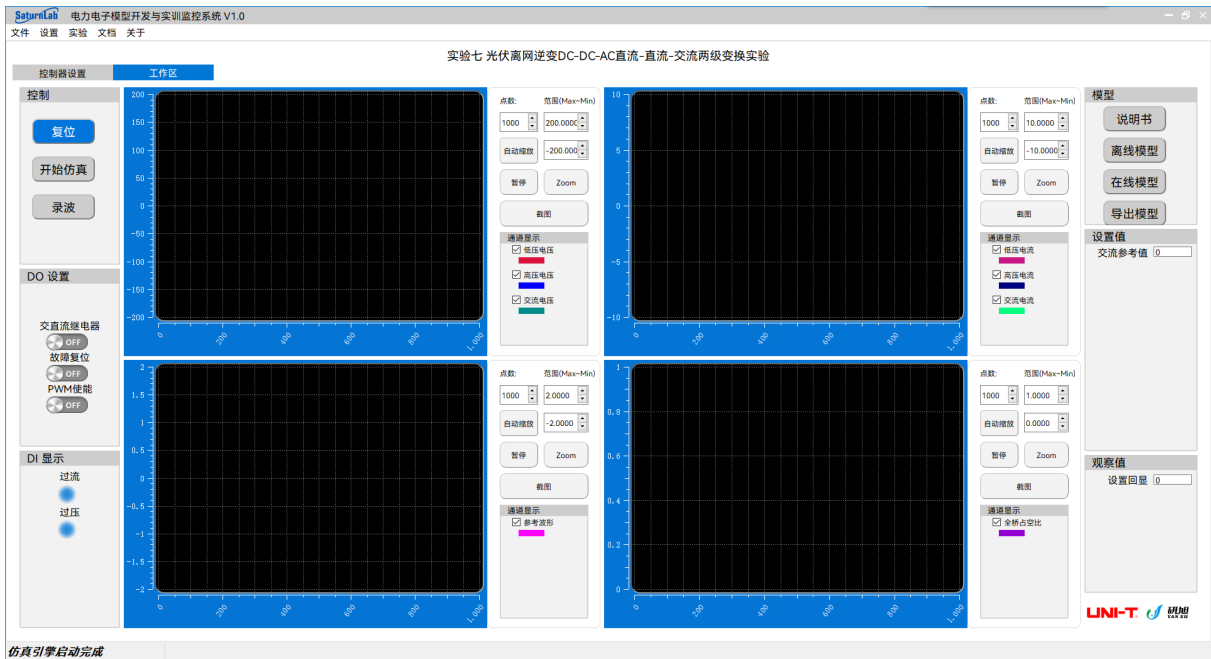


图 4.7.3 实验七上位机软件界面

第三步：在“工作区”界面的右上角“模型”框中点击“离线模型”，如图 4.7.4 所示；



图 4.7.4 打开离线模型

然后等待 Matlab 软件打开，并打开已搭建好模型“DCDC_DCAC.mdl”，模型打开后如图 4.7.5 所示；

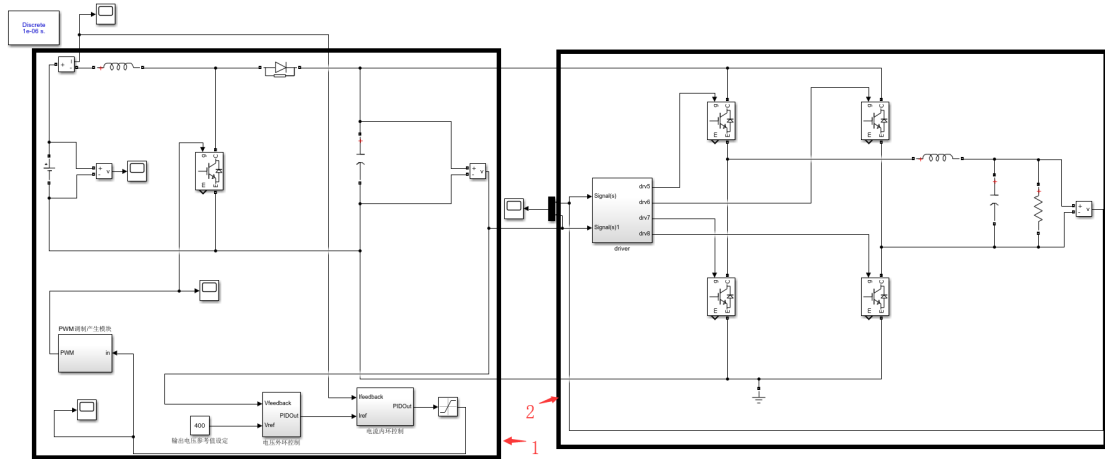
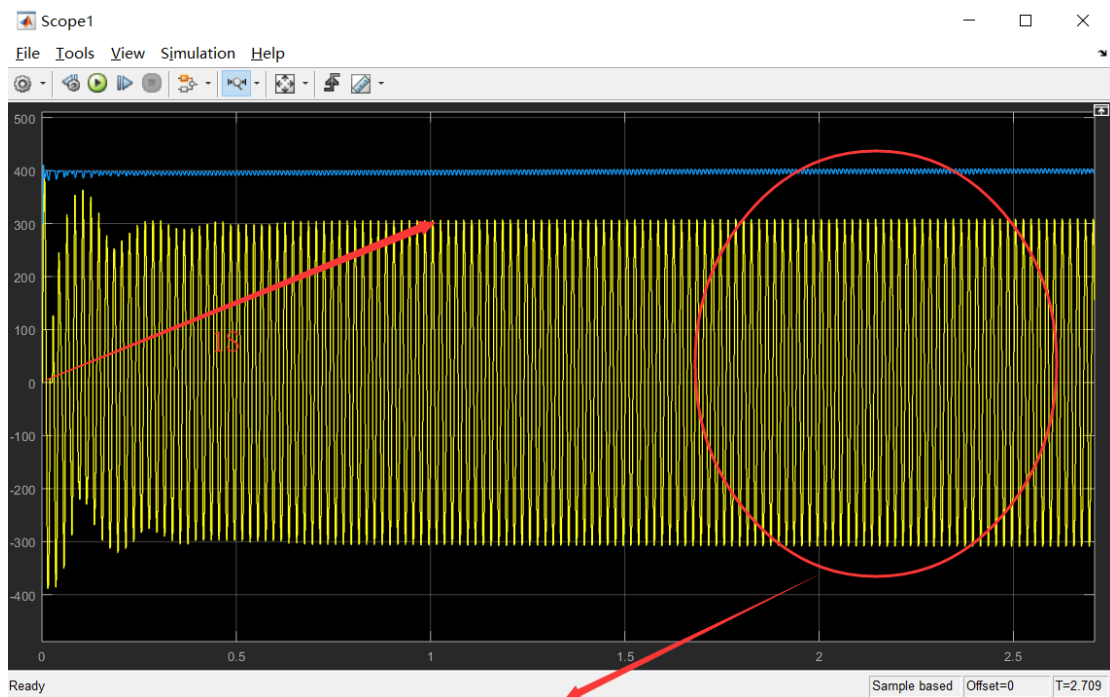


图 4.7.5 DCDC_DCAC 模型

图中标号 1 为 Boost 电路以及控制部分,标号 2 为单相独立逆变电路以及控制部分。两部分联合工作,最主要的参数就是二者的 PI 控制参数。Boost 外环电压 P 值 1, I 值为 1, 内环电流 P 值为 1, I 值为 5, 单相全桥逆变电压 P 值为 10, I 值为 20。仿真波形如图 4.7.6 所示:



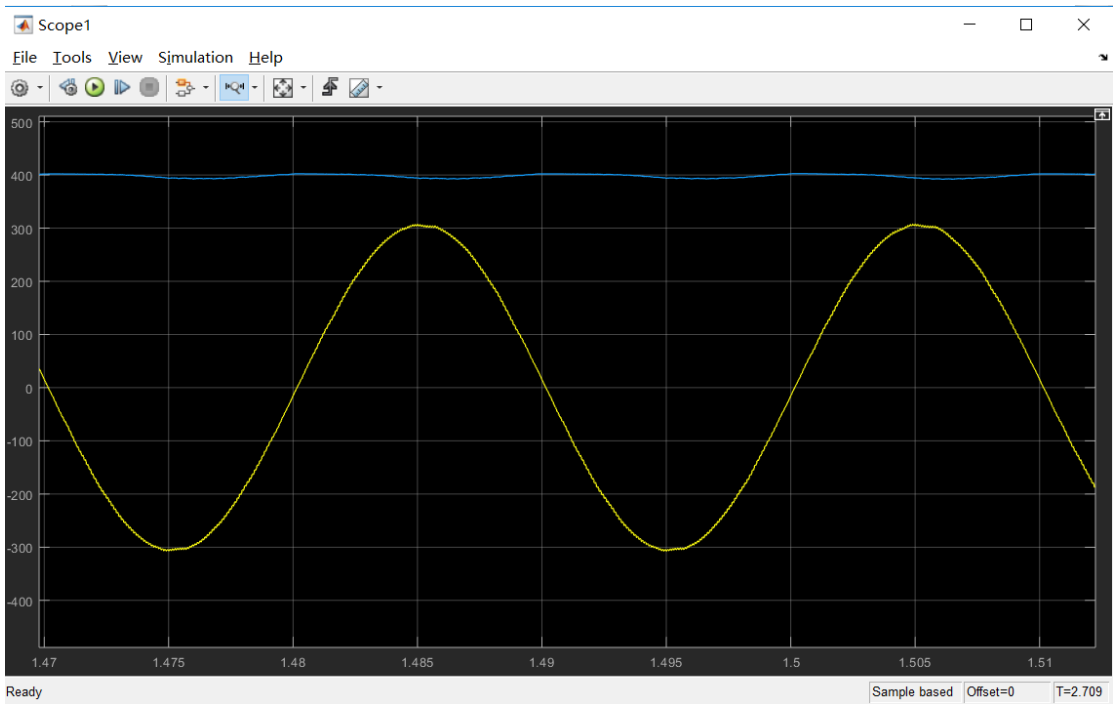


图 4.7.6 DCDC_DCAC 仿真波形

由上图可以看到，蓝色为母线电压曲线，黄色为逆变的交流电压曲线。当逆变电压达到峰值时，直流电压都会向下凹，原因是当交流电压峰值时，所带负载功率最大，因此电压会下降。

在线模型操作

统计一下算法模型中参与控制的输入量和输出量。

控制输入量	控制输出量
高压端电压	PWM 输出
电网电压	-----
电网电流	-----
交流参考值	-----

清楚了输入量和输出量，需要了解的就是快速原型控制器具体与主电路的信号连接情况。

快速原型控制器	主电路
ADC4	交流负载电流
ADC3	独立逆变电压

ADC5	高压端电压
ADC6	高压端电流
ADC2	低压端电压
ADC1	低压端电流
PWM1A_DUTY、PWM2A_DUTY、 PWM3A_DUTY	BOOST 开关管、全桥电路 IGBT

注意：出于安全问题的考虑，所有功率硬件及仪器设备都采用小功率器件，所以在
线模型仿真中的一些参数也是根据实际情况进行下调。

空载实验操作步骤（模型名称 Boost_SPWM.slx）：

第一步：双击打开 VIEW1000 软件，如下图 4.7.7 所示图标；



图 4.7.7 VIEW1000 软件

第二步：在软件中切换至“工作区”界面，然后在工具栏中单击“实验”，并选择
实验七，如下图 4.7.8 所示；

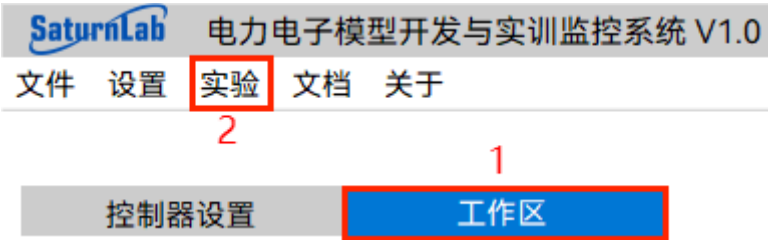


图 4.7.8 实验选择

首先软件界面会切换到实验七中已搭建好的操作界面，图 4.7.9 所示实验七上位机
界面（Boost_SPWM.sp1000）搭建如下：

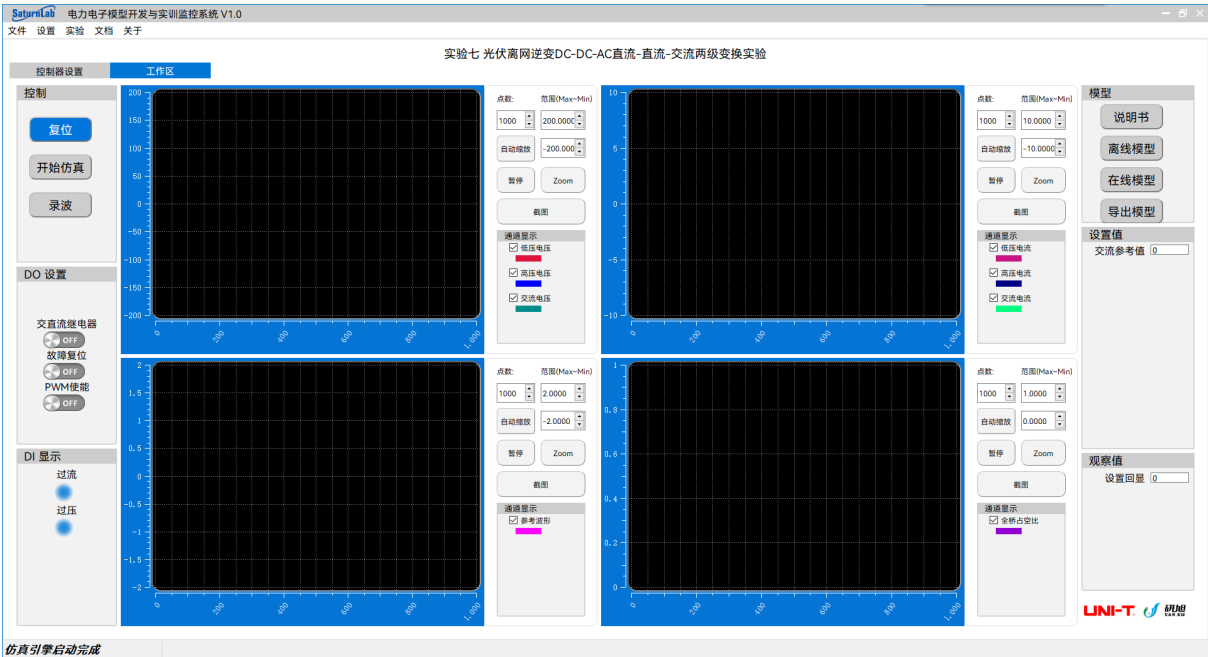


图 4.7.9 DC-DC+DC-AC 光伏离网逆变上位机软件界面

第三步：在“工作区”界面的右上角“模型”框中点击“在线模型”，然后等待 Matlab 软件打开，并打开已搭建好模型“Boost_SPWM.slx”，操作如下图 4.7.10 所示；



图 4.7.10 打开在线模型

模型打开后如图 4.7.11 所示：

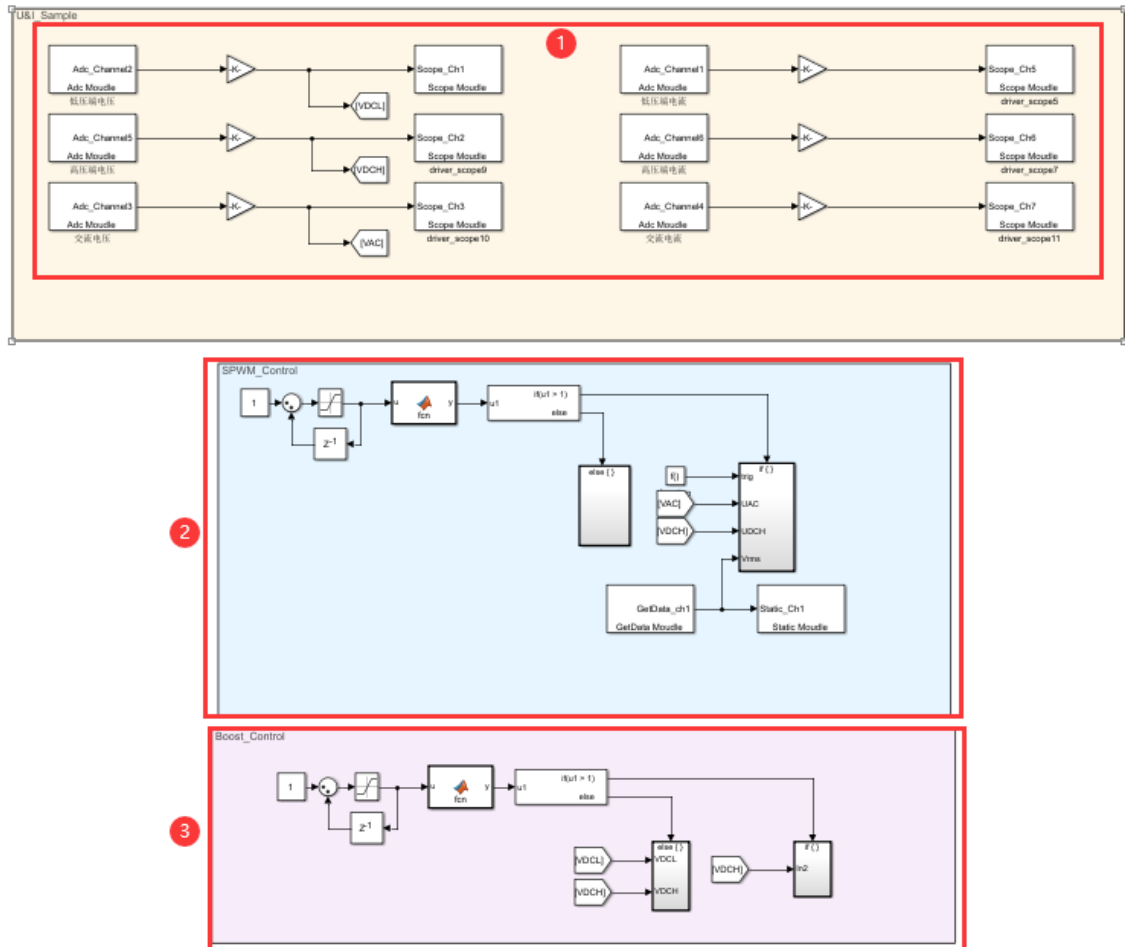


图 4.7.11 DC-DC+DC-AC 两级独立逆变快速原型控制模型

图中红色标注：

1、ADC 采集模块：通过 ADC 采集模块采集直流高压侧及交流侧电压电流信号，并通过 SCOPE 模块在上位机上显示成电压电流波形；其中 Adc_Channel3 采集交流侧电压，Gain 模块的值为 $3.0518e-4 \times 30$ ，即转换变比为 $3.0518e-4 \times 30$ ，计算原理如下图 4.7.12 所示，Adc_Channel5 采集高压侧电压，转换变比为 $3.0518e-4 \times 30$ ，Adc_Channel4 采集交流电流，转换变比为 $3.0518e-4 \times 1.6667$ ，Adc_Channel6 采集高压侧电流，转换变比为 $3.0518e-4 \times 1.6667$ ；

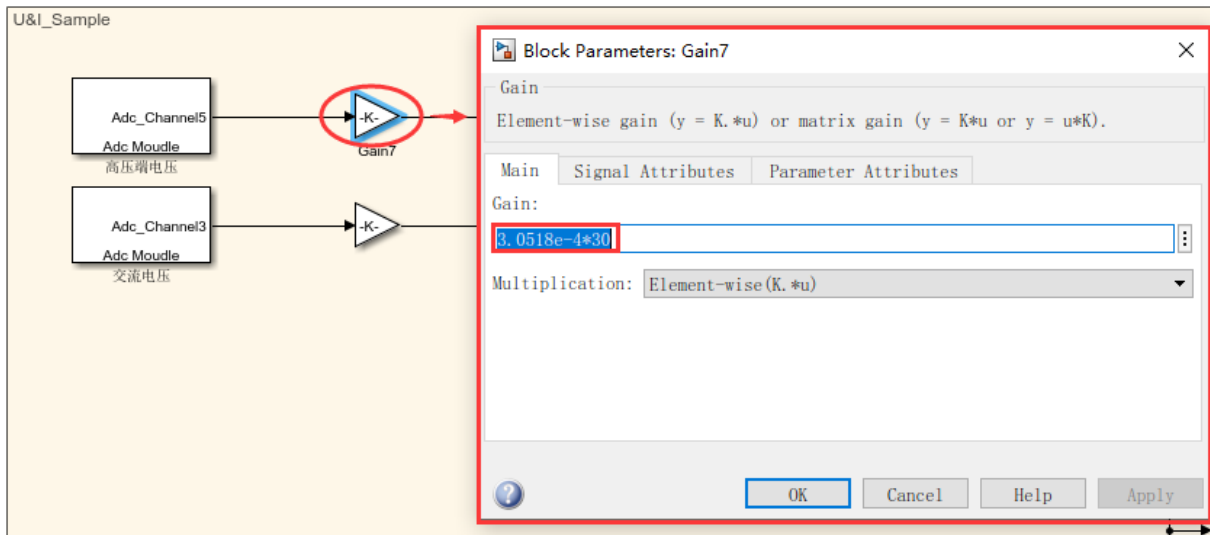


图 4.7.12 增益系数计算

2、光伏离网逆变控制模块：实验五已有详细介绍；

3、Boost 升压控制模块：实验一已有详细介绍。

第四步：将主拓扑图中的 1 与 3 连接，2 与 4 连接，如图 4.7.13 所示就是一个 DC-DC+DC-AC 两级独立逆变电路；

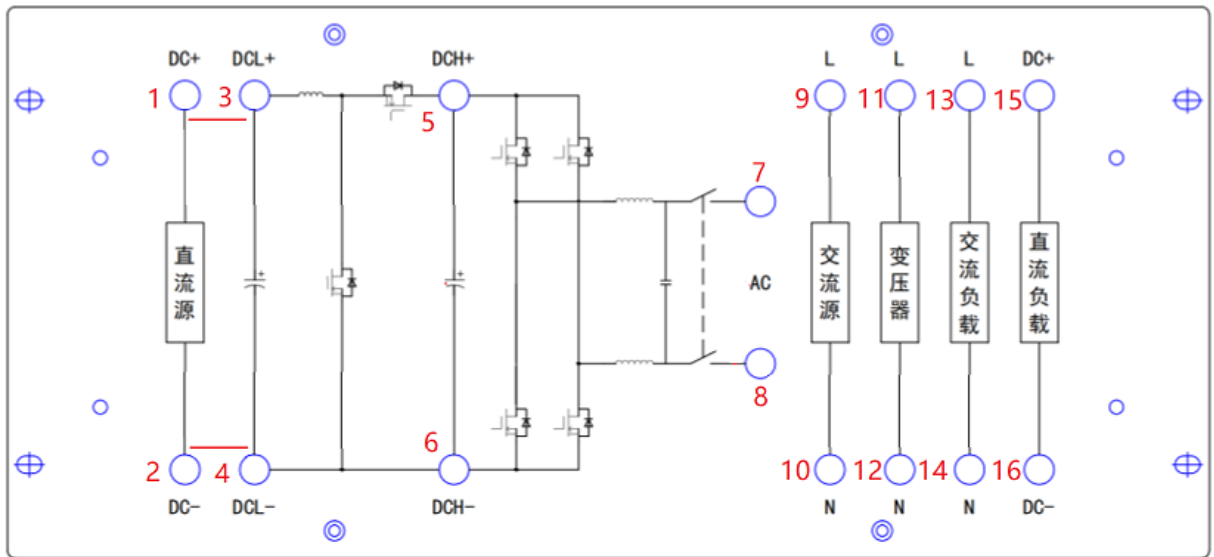


图 4.7.13 DC-DC+DC-AC 两级独立逆变电路拓扑连线

第五步：将柜体总电源开启，为系统供电。

第六步：待直流源启动后，设置直流电压为 70V，电流为 3A，点击“ON”按钮启动。

第七步：切换到模型界面，下载模型到控制器，操作如下图 4.7.14 所示；

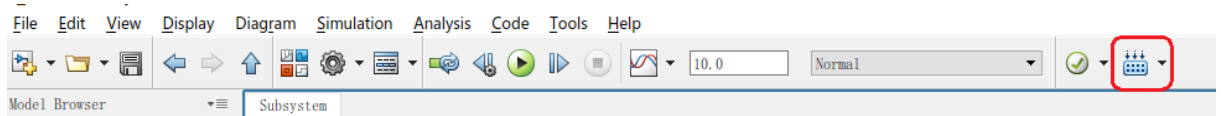


图 4.7.14 下载模型

查看编译过程及下载结果，如下图 4.7.15 所示：

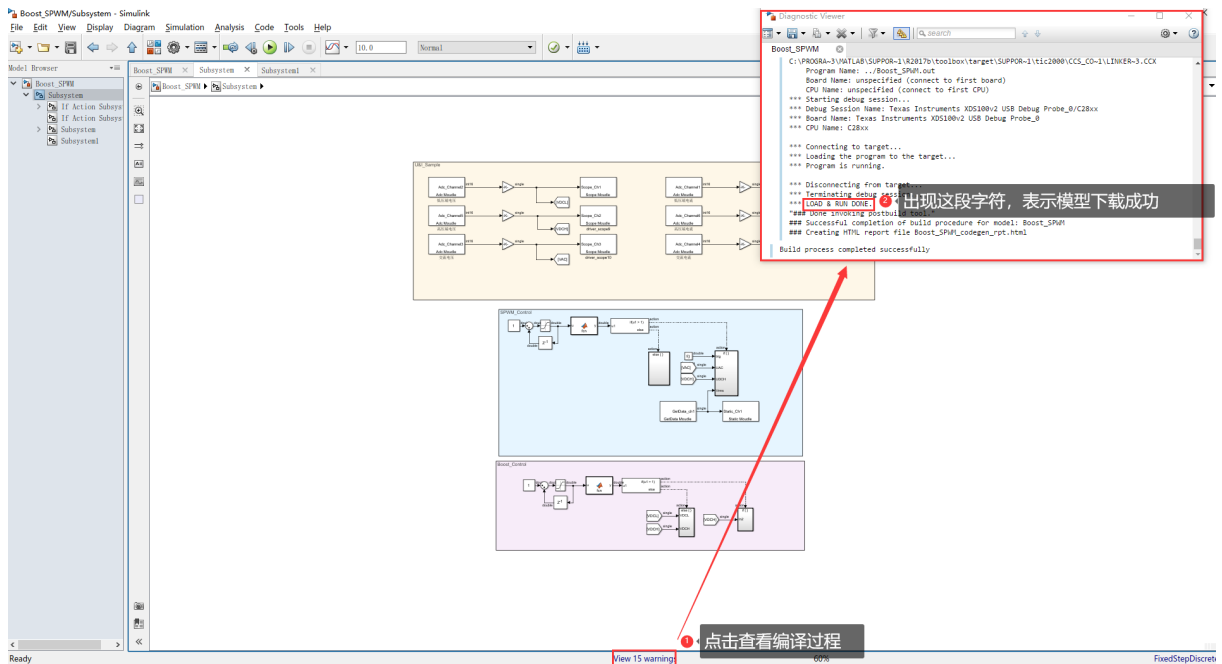


图 4.7.15 模型下载成功

第八步：上位机与计算机建立通信，首先切换到“控制器设置”界面，点击“建立通信”按钮，等连接上之后点击“设置”按钮，具体操作如下图 4.7.16 所示；

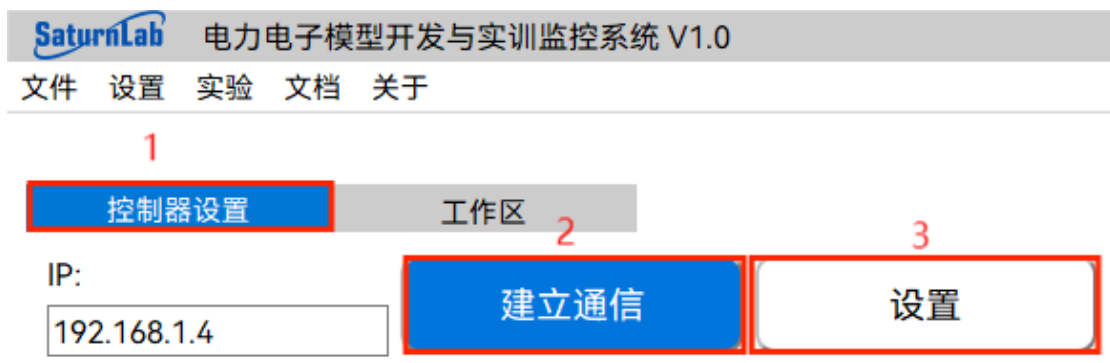


图 4.7.16 建立通信

第九步：运行模型，先切换到“工作区”界面，再将“交流参考值”设置为 36V（交流有效值），并点击计算机键盘“Enter”确认输入（先点击“开始仿真”，“参考回显”框会显示设定值是否生效，如回显值与设定值一样，表示设置生效，否则设置无效，需

重新进行第九步操作），然后将“PWM 使能”置“ON”，“故障复位”先置“ON”，再置“OFF”，再将“交直流继电器”置“ON”。先点击“复位”，然后立即点击“开始仿真”按钮，具体操作如下图 4.7.17 所示；

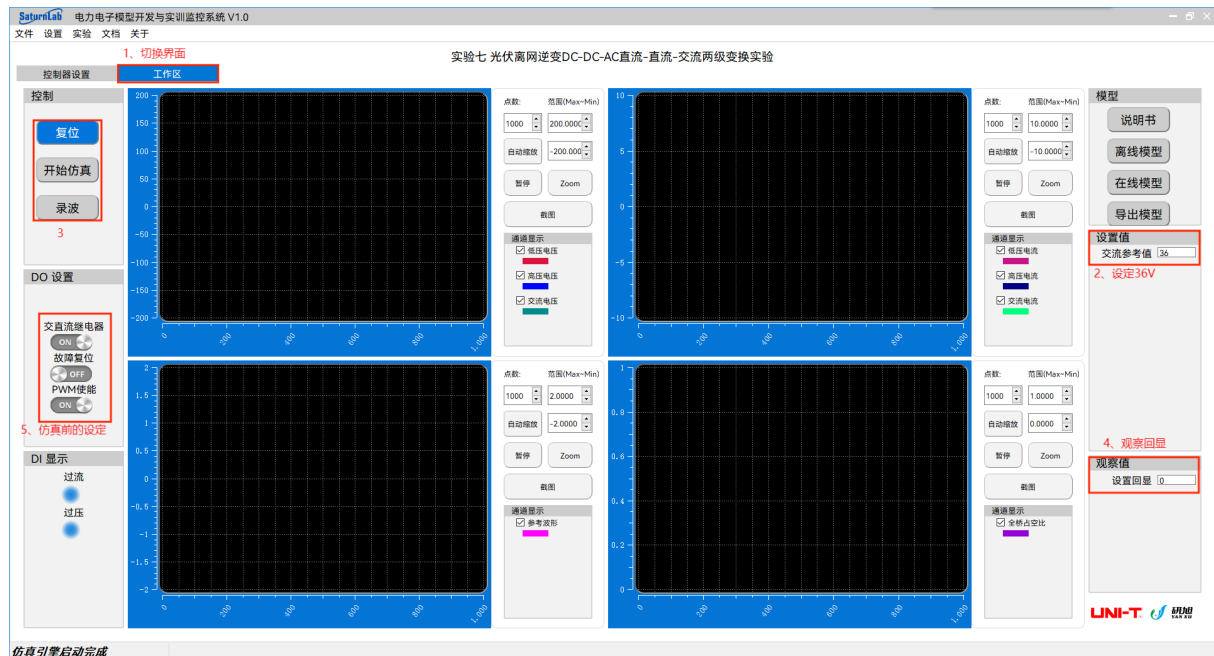


图 4.7.17 具体操作

注意：若系统运行故障，“DI 显示”界面中的两个蓝灯会变成红色，指示其中的一种或两种故障，此时点击“停止仿真”，将“故障复位”重新置“ON”，再置“OFF”，同时点击“复位”按钮，继续点击“开始仿真”即可。

第十步：可观察软件界面的示波器，看交流电压是否稳定在峰峰值 $\pm 50\text{V}$ ，即交流有效值 36V。模型运行过程中可通过上位机界面查看控制效果，运行结果如下图 4.7.18 所示，同时可以点击“录波”按钮，以备后期分析数据；

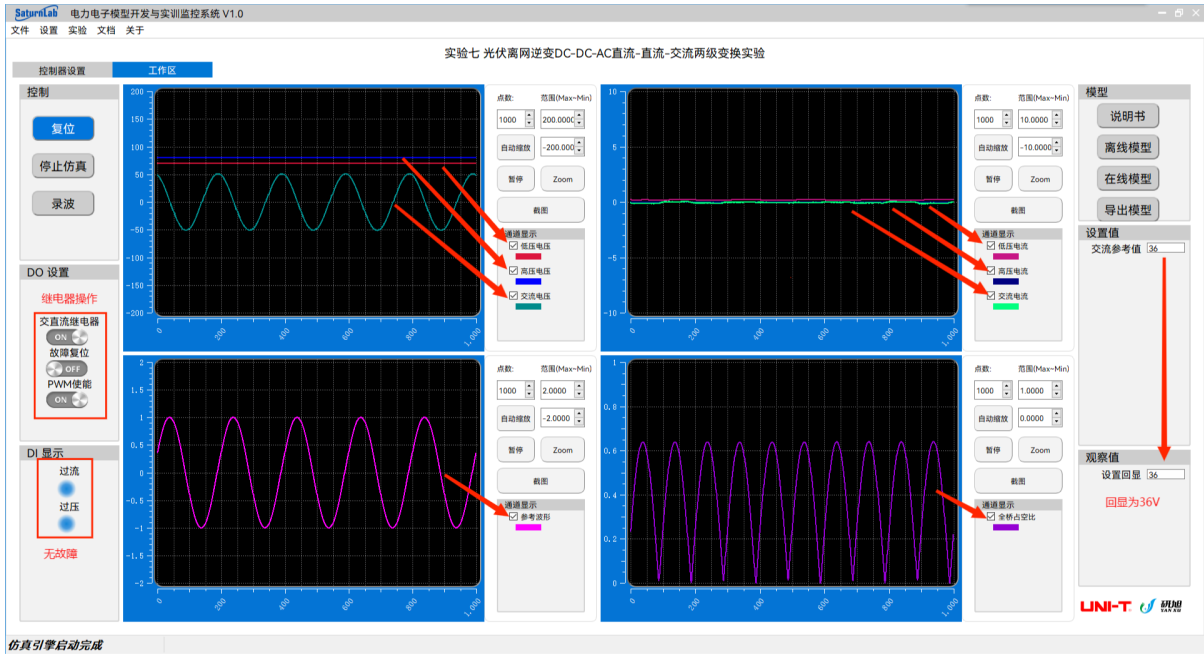
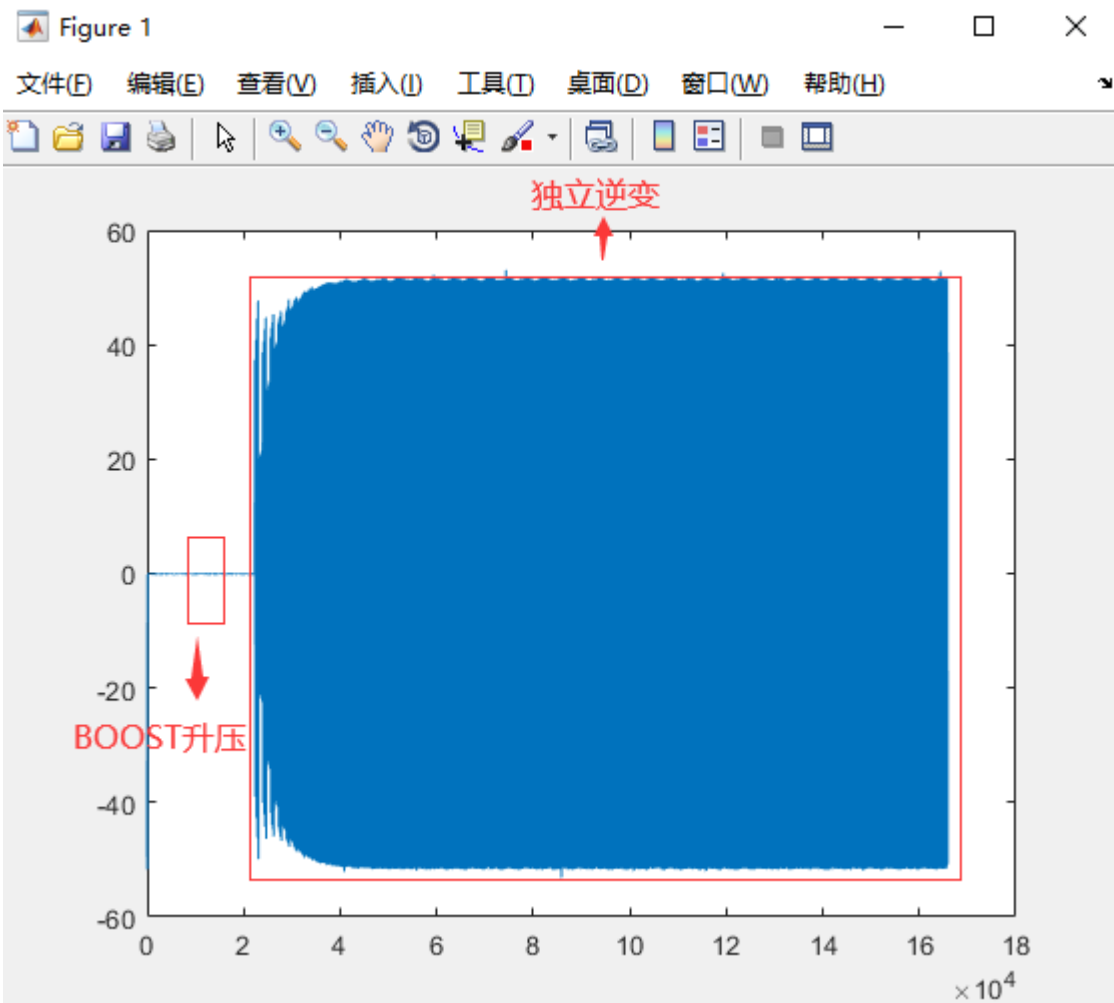


图 4.7.18 运行结果

第十一步：仿真停止，先点击“停止仿真”按钮，然后将“PWM 使能”、“直流继电器”置“OFF”即可停止仿真。如已录播，可将保存的数据 xx.mat 放入 MATLAB 查看，采用 Matlab 的绘图工具对波形进行分析（录播操作在实验二中已有详细介绍）。

下图 4.7.19 为交流电压波形；



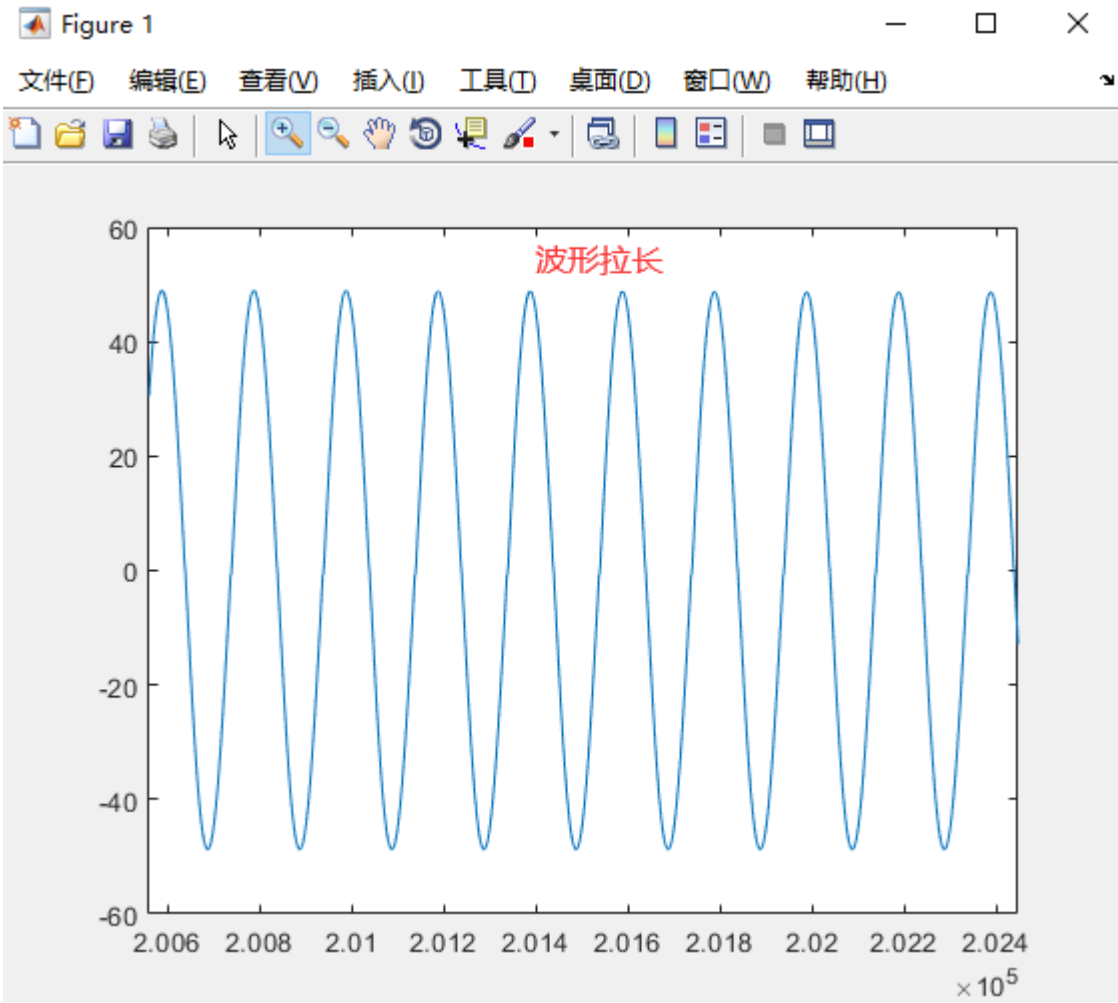
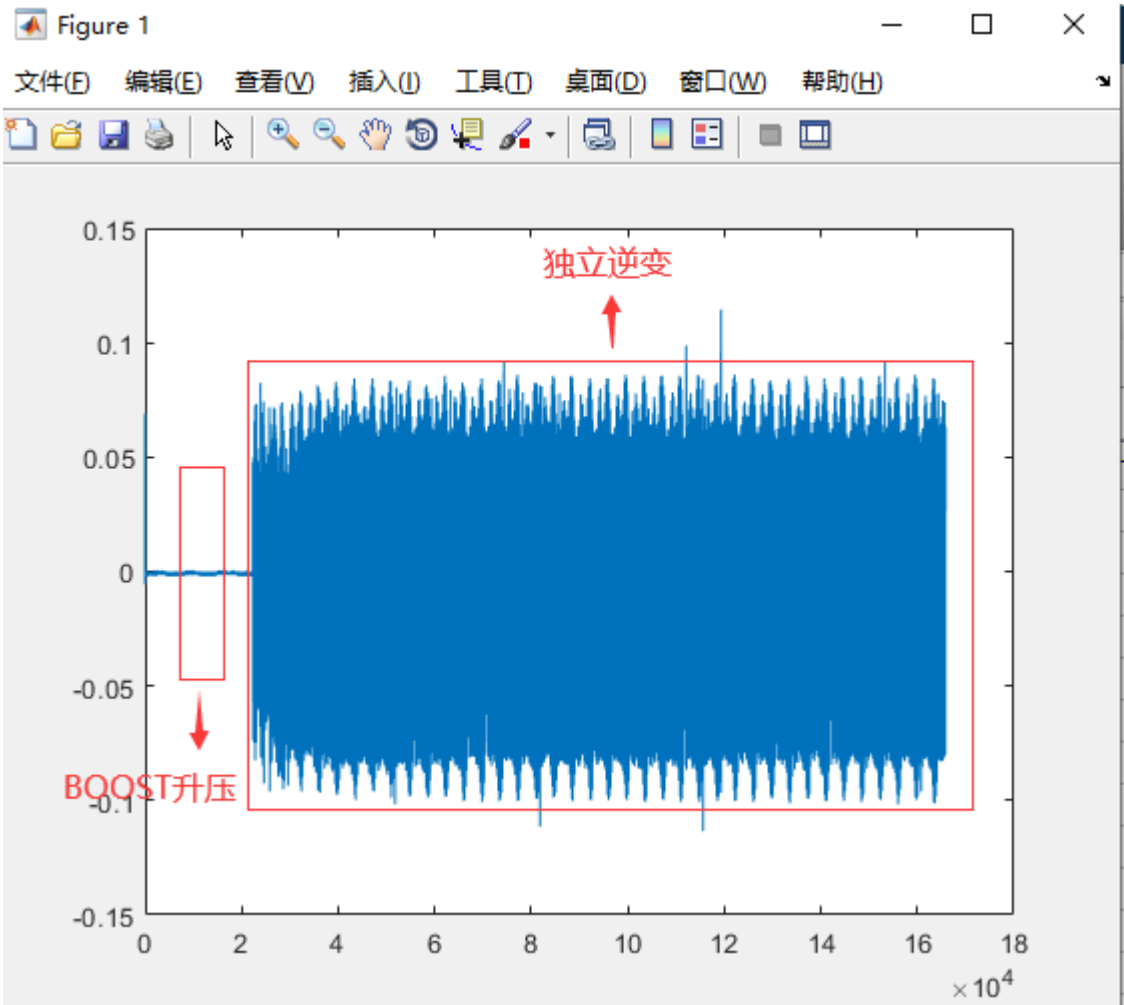


图 4.7.19 交流电压波形

交流电流波形如下图 4.7.20 所示；



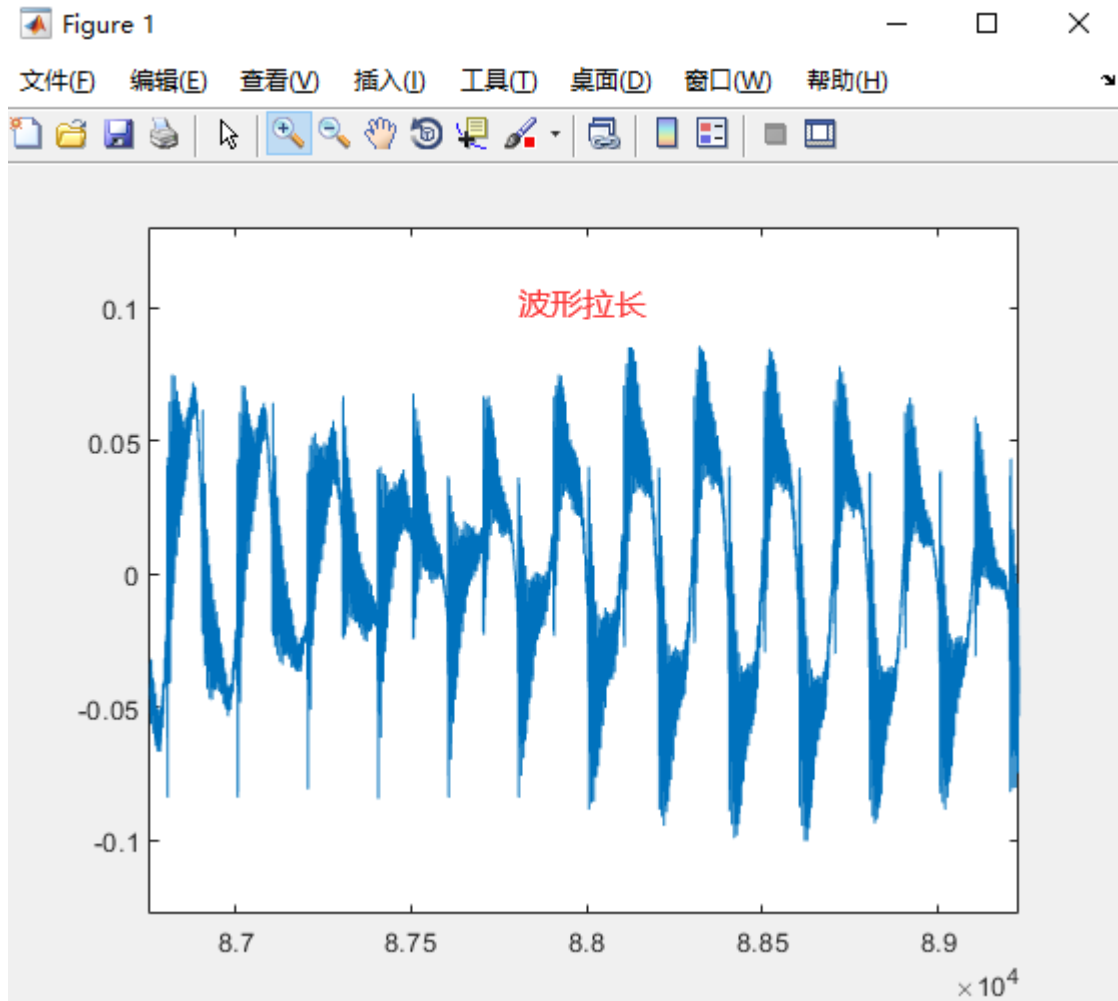


图 4.7.20 交流电流波形

可以看出，由于没有负载，交流电流基本为 0。

带载实验：

与空载试验操作相同，等交流电压稳定在峰峰值±50V 后，需要进行拓扑连线，将拓扑图中的 7 和 13 连接，8 和 14 连接，其他不变，如下图 4.7.21 所示，即可观察上位机中的交流电压及电流变化。

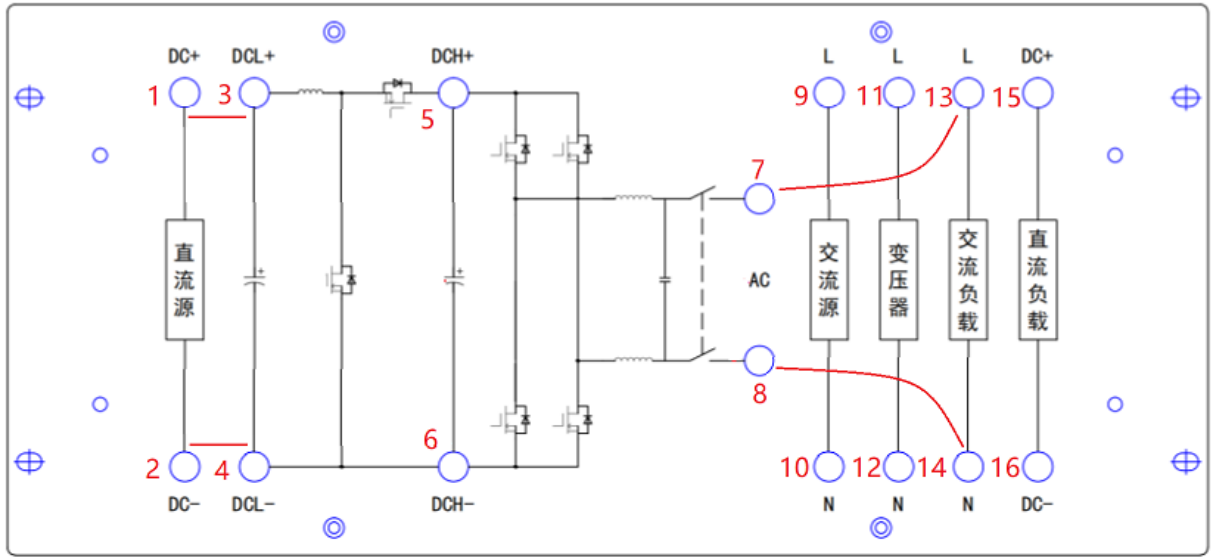


图 4.7.21 交流带载实验拓扑连线

实际运行结果如下图 4.7.22 所示：

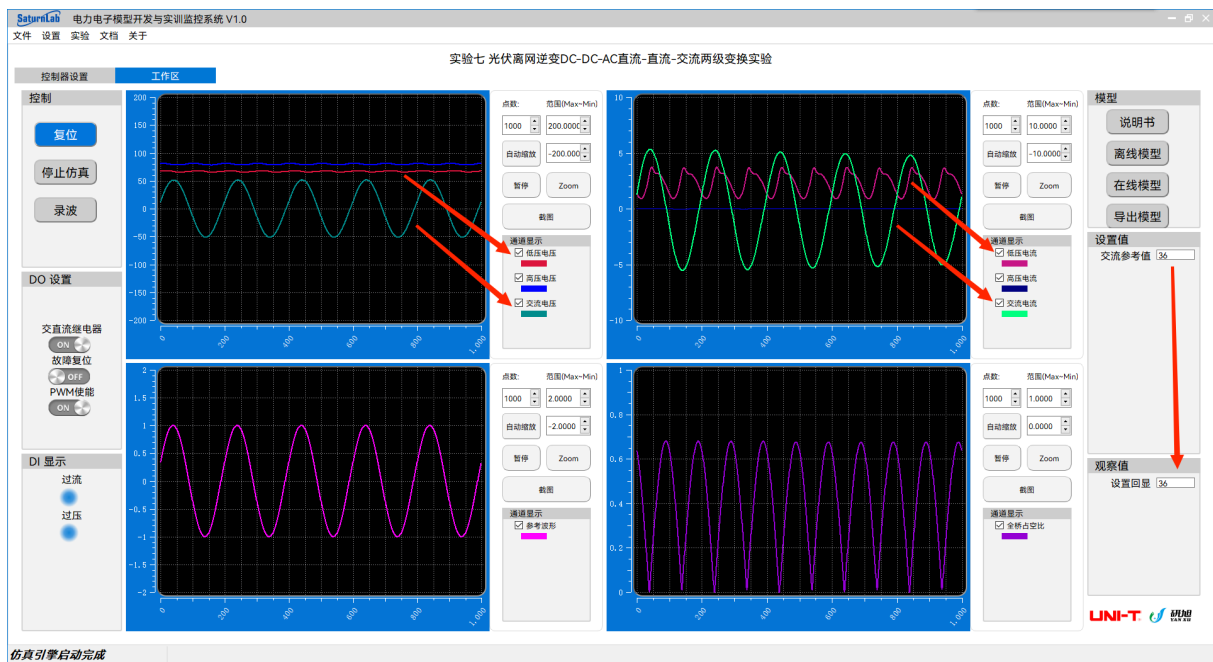
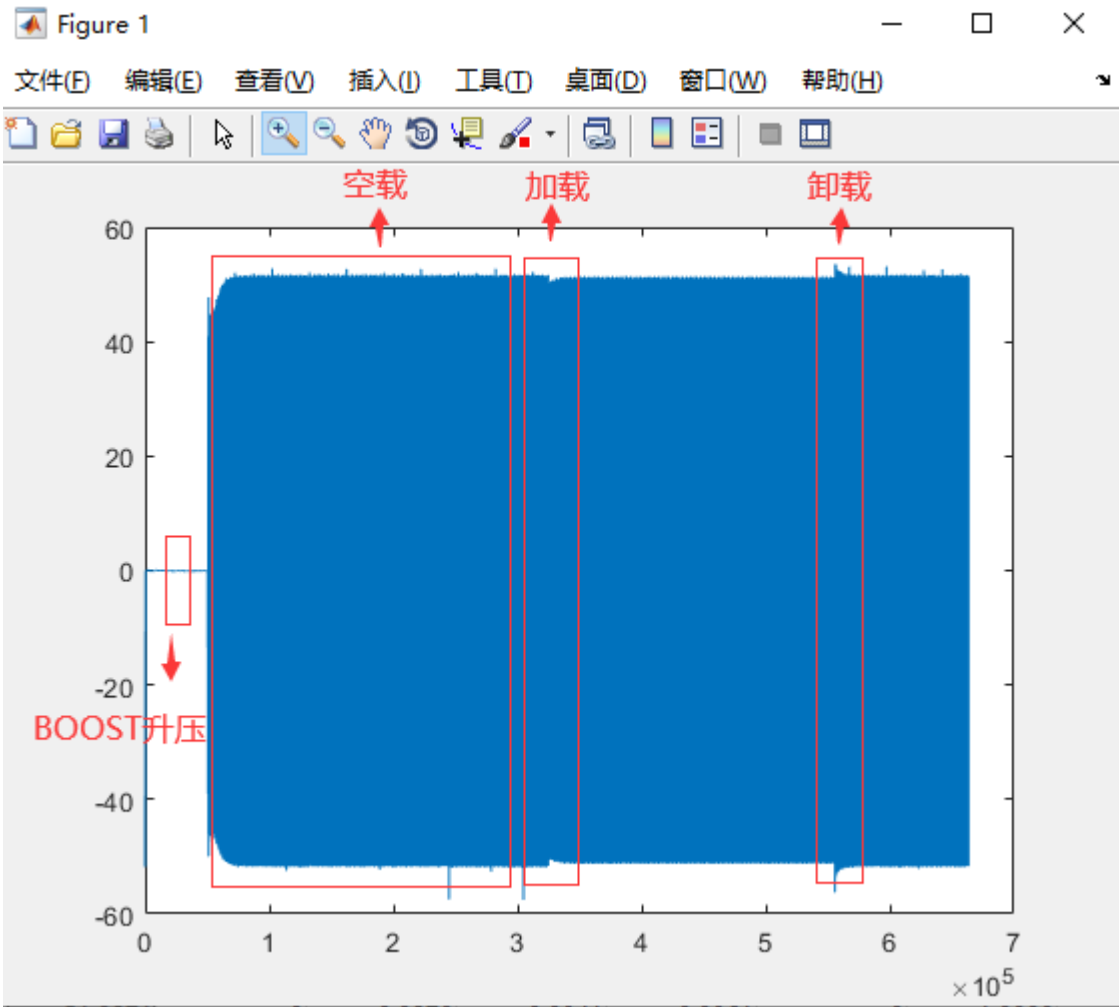


图 4.7.22 带载运行结果

可以看出，加载后交流电流增大，由于交流负载为 10 欧姆的电阻，所以，交流电流峰峰值为 $\pm 5A$ ；

卸载操作步骤：拔掉拓扑图 7 和 13、8 和 14 连线，然后点击软件界面的“停止仿真”按钮即可，最后将“PWM 使能”及“交直流继电器”即可。

图 4.7.23 为两级拓扑独立逆变状态下的，加载及卸载输出交流电压变化；



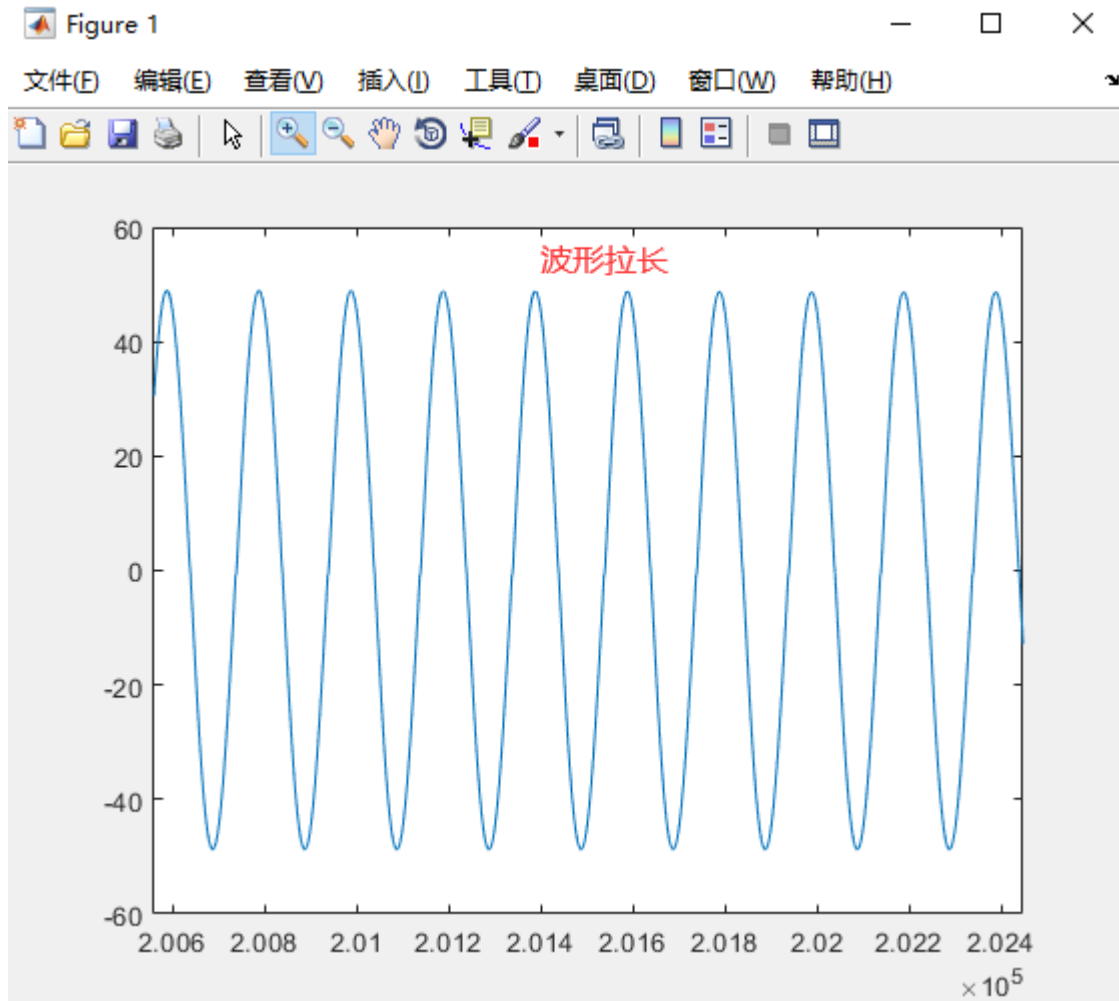
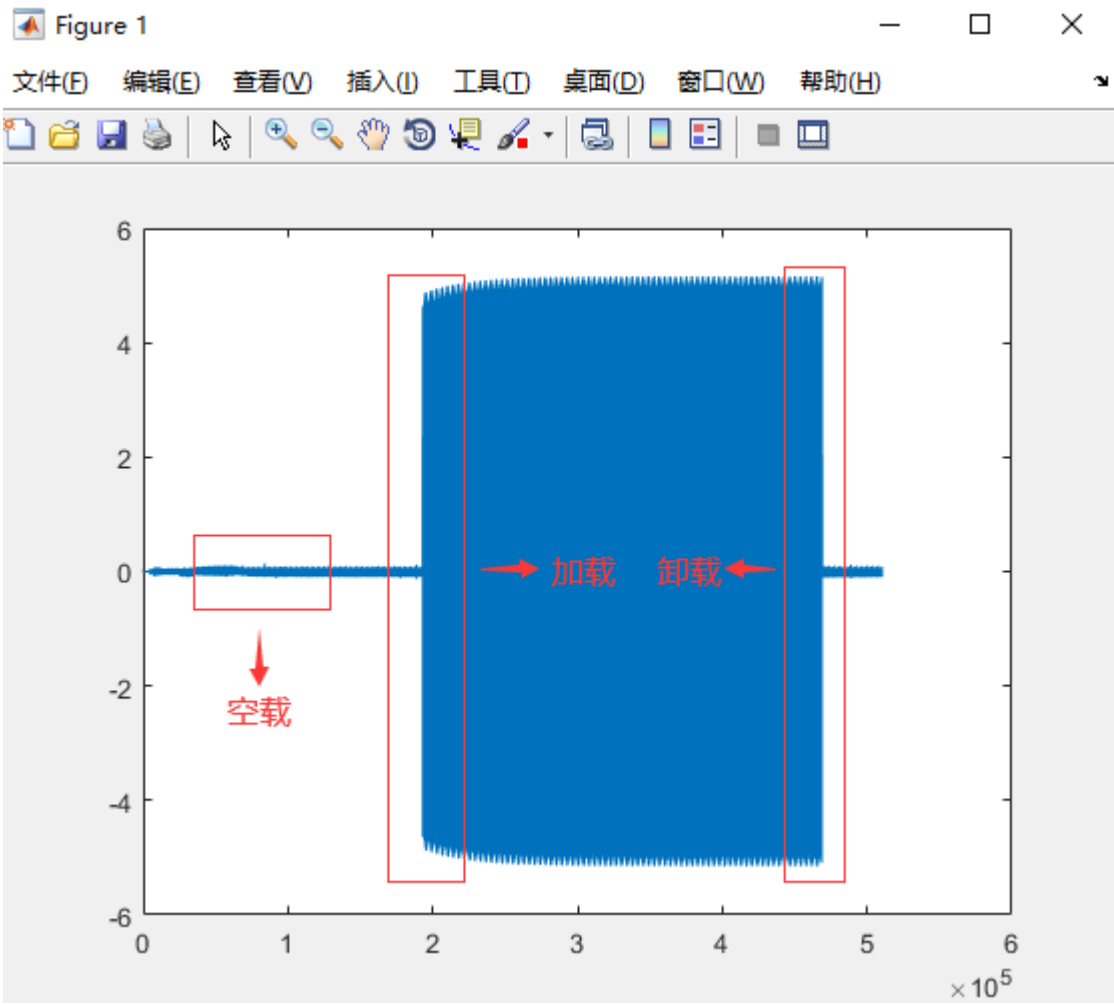


图 4.7.23 加载及卸载状态下交流电压的变化

图 4.7.24 为两级拓扑独立逆变状态下的，加载及卸载输出交流电流变化；



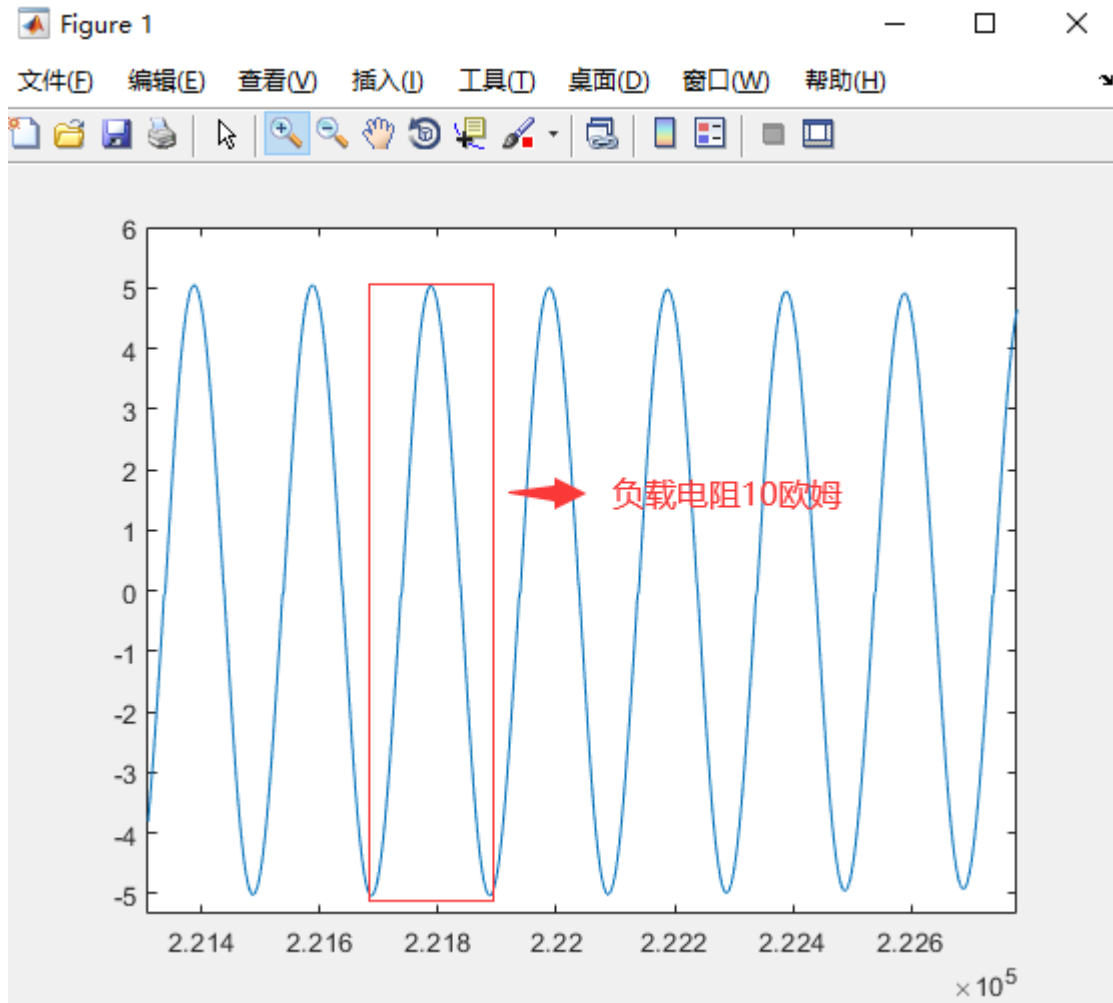


图 4.7.24 加载及卸载状态下的交流电流变化

注：如需修改模型自行验证，可选择“导出模型”到任意英文目录下，然后重新修改并下载验证，具体操作如下图 4.7.25 所示；



图 4.7.25 导出模型

实验八 光伏并网逆变 DC-DC-AC 直流-直流-交流两级变换实验

前面介绍了 Boost 升压斩波电路和单相全桥并网逆变电路的原理和模型搭建，此节主要将二者联合起来。

离线模型操作

实验操作步骤（例程名称为 DCDC_DCAC_GRID.mdl）：

第一步：双击打开 VIEW1000 软件，如下图 4.8.1 所示图标：



图 4.8.1 VIEW1000 软件

第二步：在软件中切换至“工作区”界面，然后在工具栏中单击“实验”，并选择实验八，如下图 4.8.2 所示：



图 4.8.2 实验选择

首先软件界面会切换到实验八中已搭建好的操作界面，图 4.8.3 所示实验八上位机界面搭建如下：

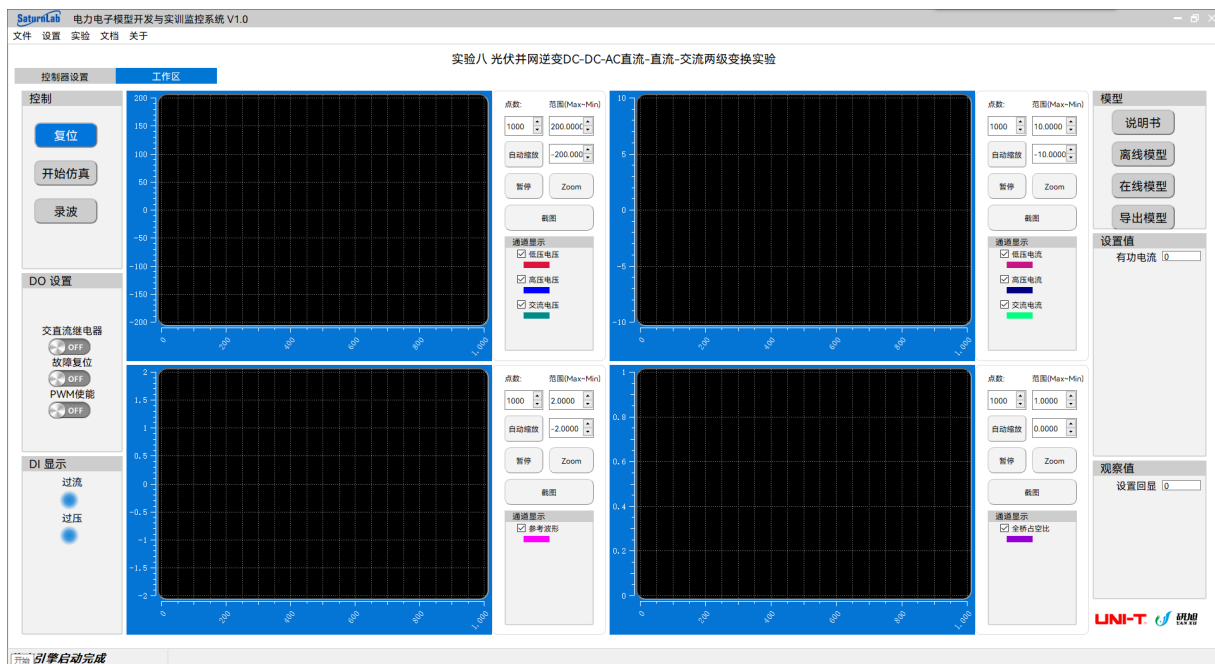


图 4.8.3 实验八上位机软件界面

第三步：在“工作区”界面的右上角“模型”框中点击“离线模型”，如图 4.8.4 所示；



图 4.8.4 打开离线模型

然后等待 Matlab 软件打开，并打开已搭建好模型“DCDC_DCAC_GRID.mdl”，图 4.8.5 为 DCDC+DCAC 并网电路仿真模型。

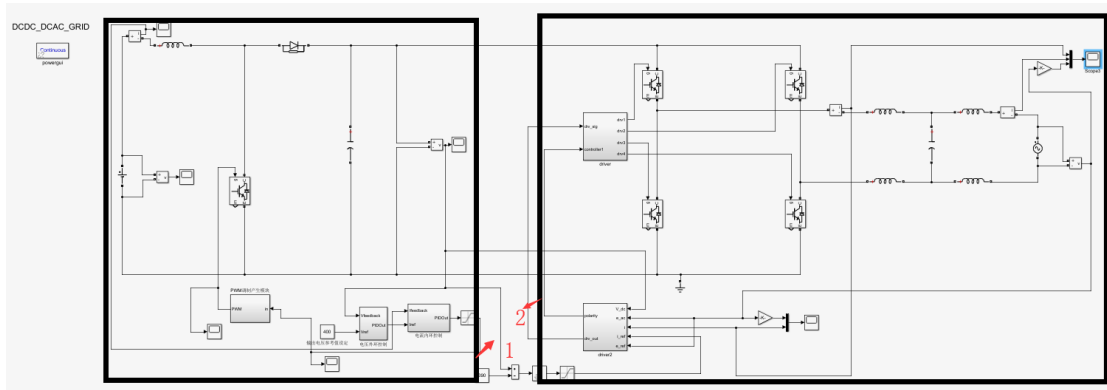
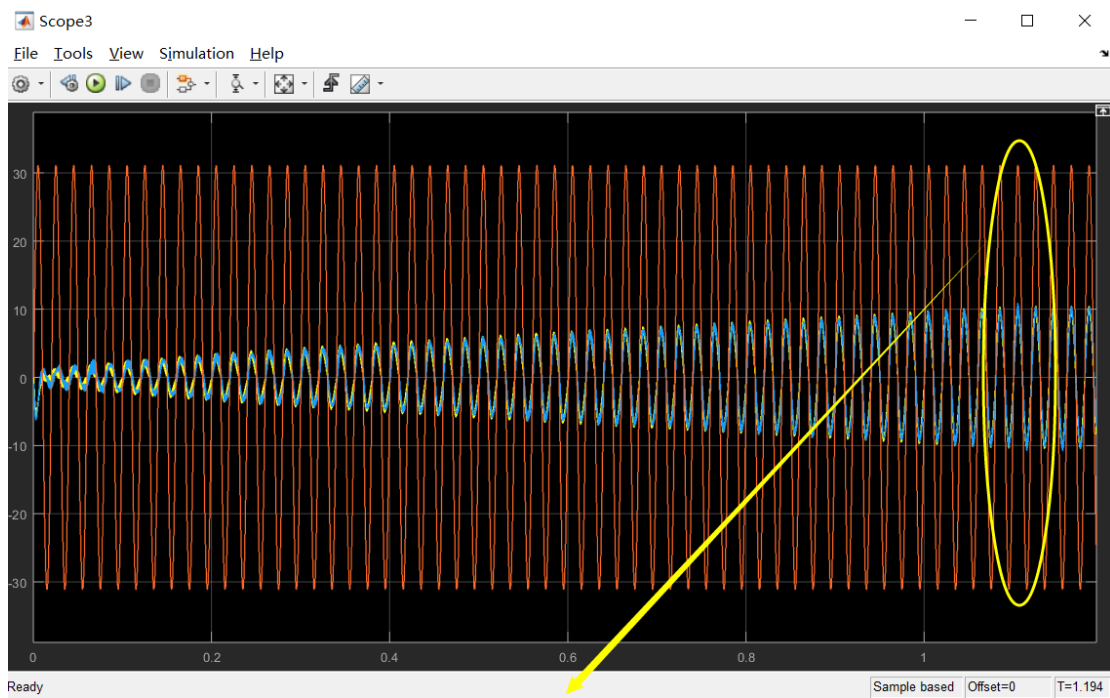


图 4.8.5 DCDC+DCAC 并网电路仿真模型

图中标号 1 为 Boost 升压电路与控制模块，标号 2 为单相全桥并网电路模型。图 4.8.6 为电网电压和并网电流，图 4.8.7 为直流母线电压波形图。



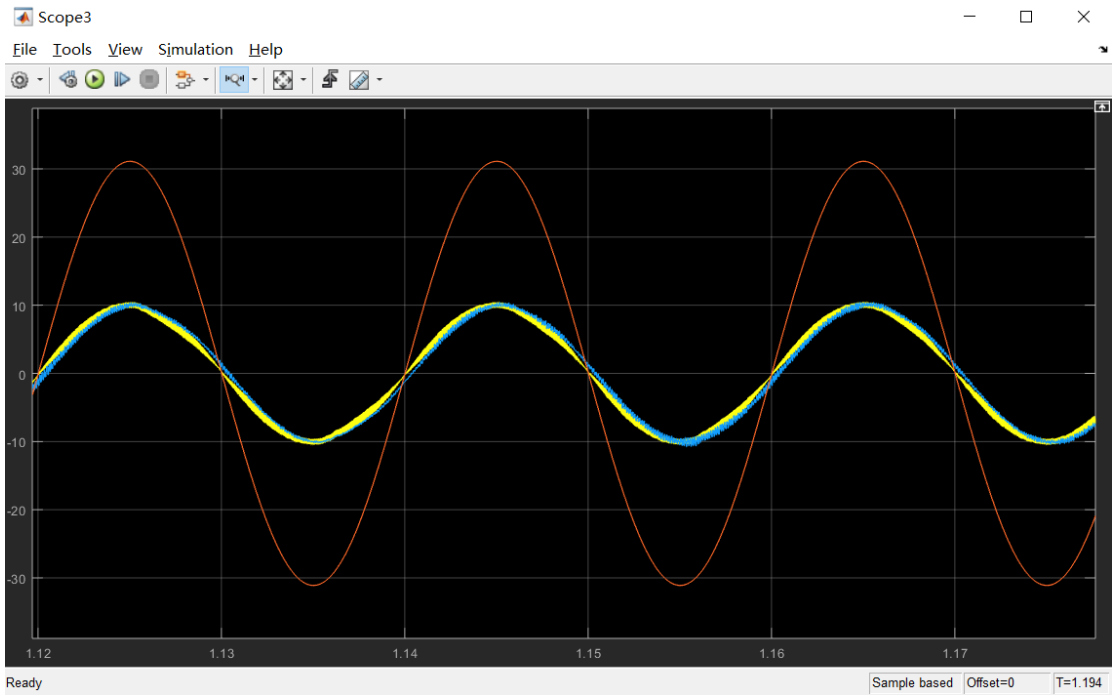


图 4.8.6 为仿真模型电压与电流图

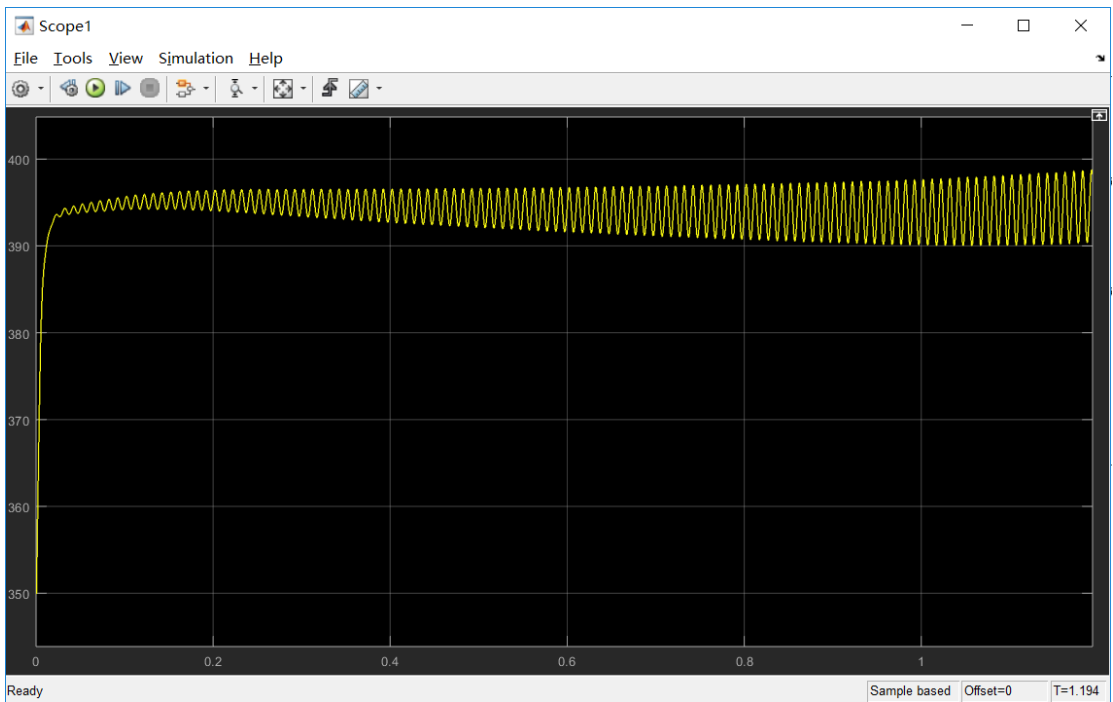


图 4.8.7 直流母线电压波形图

在线模型操作

前面介绍了 DC-DC+DC-AC 两级并网逆变电路的离线仿真，接下来介绍快速原型控制。
首先统计一下算法模型中参与控制的输入量和输出量。

控制输入量	控制输出量
-------	-------

高压端电压	PWM 输出
电网电压	-----
电网电流	-----

清楚了输入量和输出量，需要了解的就是快速原型控制器具体与主电路的信号连接情况。

快速原型控制器	主电路
ADC4	并网电流
ADC3	电网电压
ADC5	高压端电压
ADC6	高压端电流
ADC2	低压端电压
ADC1	低压端电流
PWM1A_DUTY、PWM2A_DUTY、 PWM3A_DUTY	BOOST 开关管、全桥电路 IGBT

注意：出于安全问题的考虑，所有功率硬件及仪器设备都采用小功率器件，所以在
线模型仿真中的一些参数也是根据实际情况进行下调。

实验操作步骤（模型名称 Boost_GRID.slx）：

第一步：双击打开 VIEW1000 软件，如下图 4.8.8 所示图标；



图 4.8.8 VIEW1000 软件

第二步：在软件中切换至“工作区”界面，然后在工具栏中单击“实验”，并选择
实验八，如下图 4.8.9 所示；

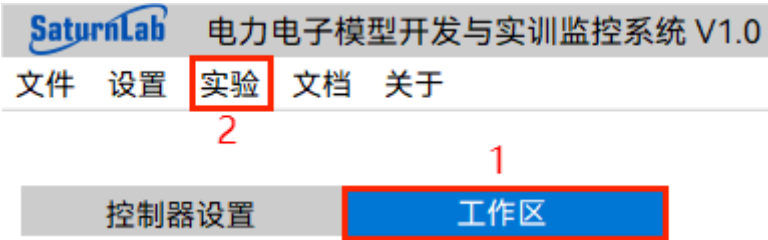


图 4.8.9 实验选择

首先软件界面会切换到实验八中已搭建好的操作界面，图 4.8.10 所示实验八上位机界面（Boost_GRID.sp1000）搭建如下：

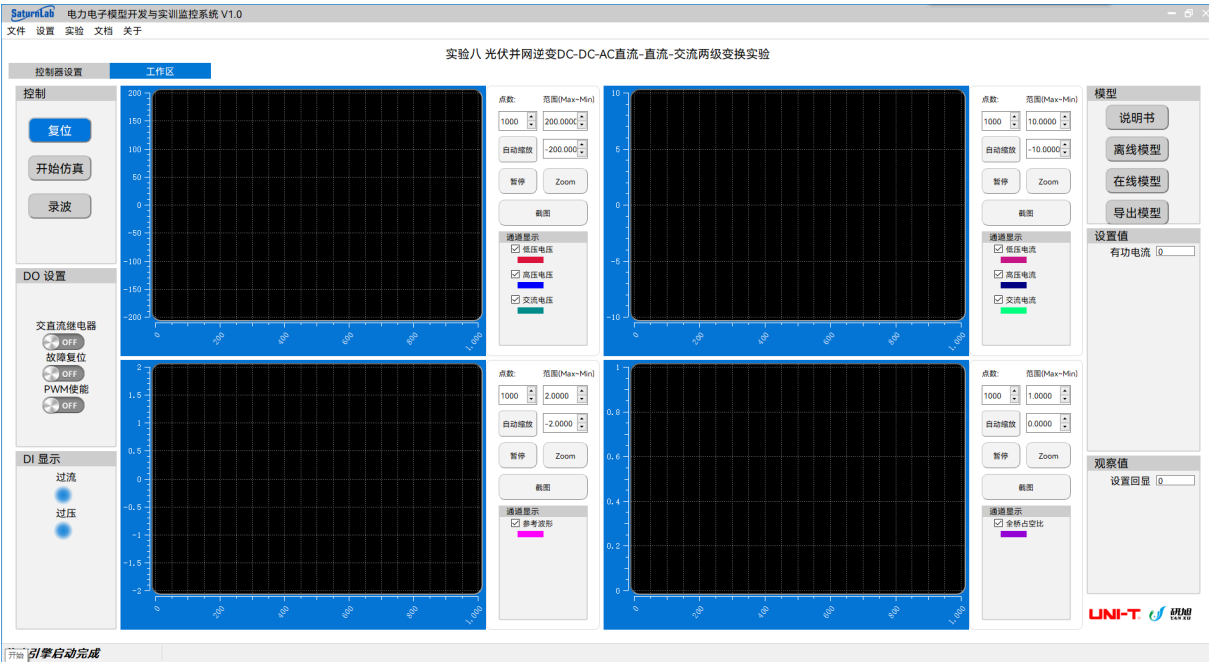


图 4.8.10 DC-DC+DC-AC 光伏并网逆变上位机软件界面

第三步：在“工作区”界面的右上角“模型”框中点击“在线模型”，然后等待 Matlab 软件打开，并打开已搭建好模型“Boost_GRID.slx”，操作如下图 4.8.11 所示；



图 4.8.11 打开在线模型

模型打开后如图 4.8.12 所示；

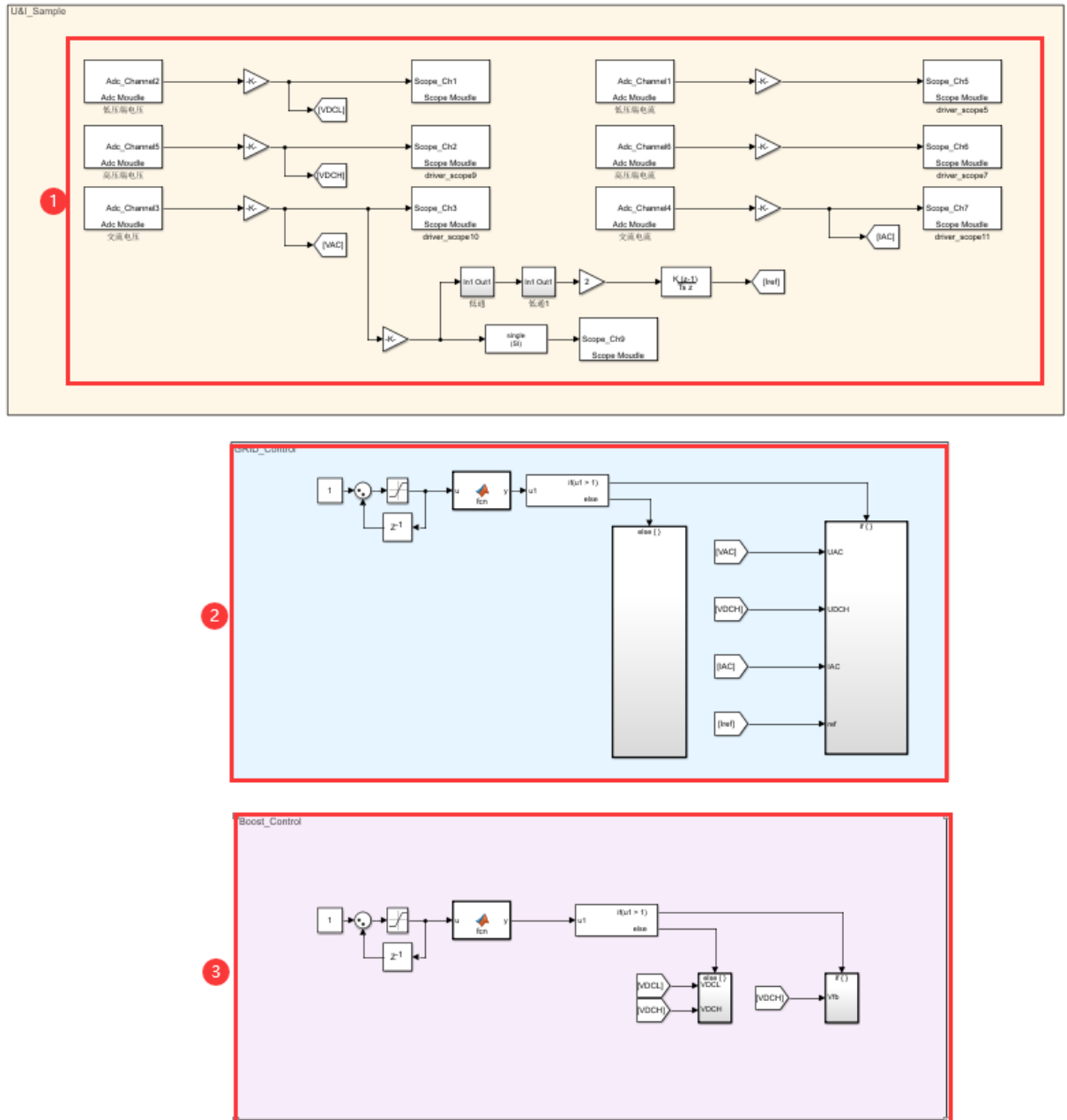


图 4.8.12 DC-DC+DC-AC 快速原型控制模型

图中红色标注：

1、ADC 采集模块：通过 ADC 采集模块采集直流高压侧及交流侧电压电流信号，并通过 SCOPE 模块在上位机上显示成电压电流波形；其中 Adc_Channel3 采集交流侧电压，Gain 模块的值为 $3.0518e-4 \times 30$ ，即转换变比为 $3.0518e-4 \times 30$ ，计算原理如下图 4.8.13 所示，Adc_Channel5 采集高压侧电压，转换变比为 $3.0518e-4 \times 30$ ，Adc_Channel4 采集交流电流，转换变比为 $3.0518e-4 \times 1.6667$ ，Adc_Channel6 采集高压侧电流，转换变比为 $3.0518e-4 \times 1.6667$ ；

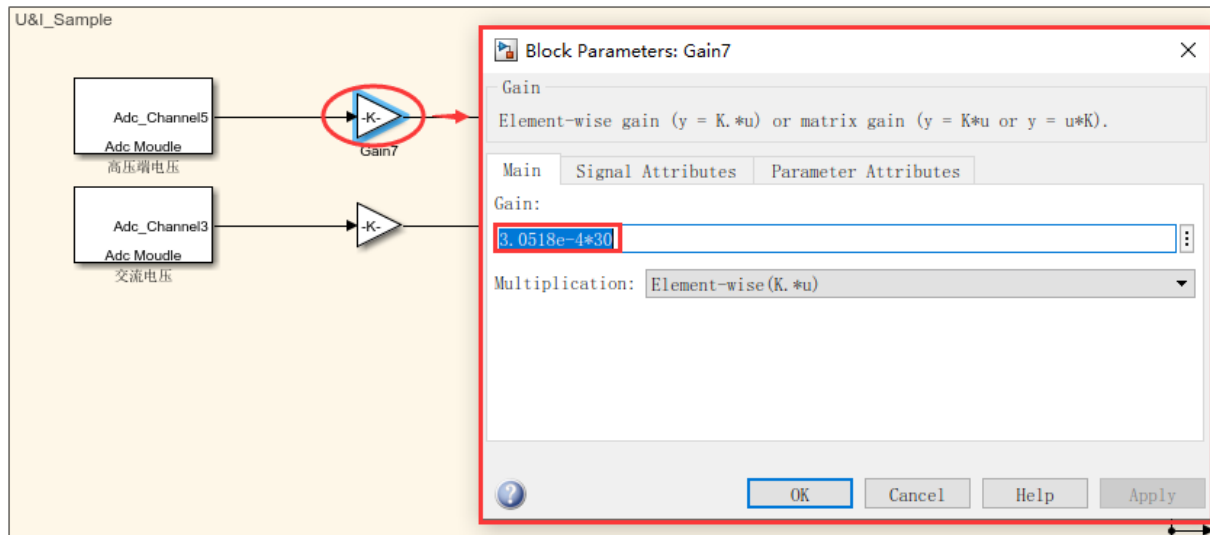


图 4.8.13 增益系数计算

2、光伏并网逆变控制模块：实验六已有详细介绍；

3、Boost 升压控制模块：实验一已有详细介绍。

第四步：将主拓扑图中的 1 与 3 连接，2 与 4 连接，7 和 11 连接，8 和 12 连接，如下图 4.8.14 所示；

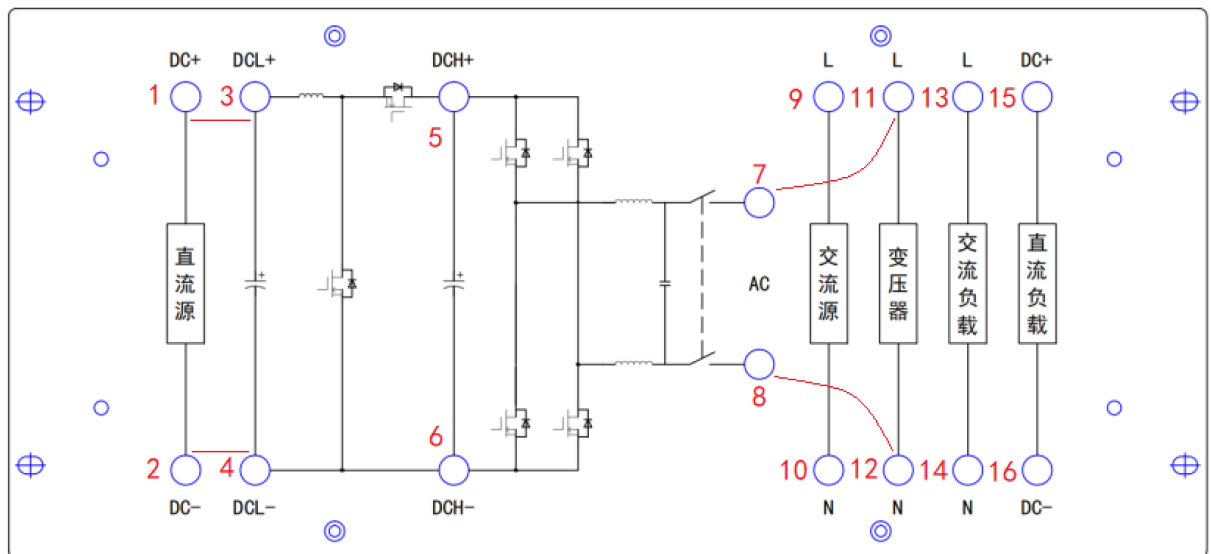


图 4.8.14 DC-DC+DC-AC 两级并网逆变拓扑连线

第五步：将柜体总电源开启，为系统供电；

第六步：待直流源启动后，设置输出电压为 70V，输出电流为 3A，点击“ON”按钮；

第七步：切换到模型界面，下载模型到控制器，操作如下图 4.8.15 所示；

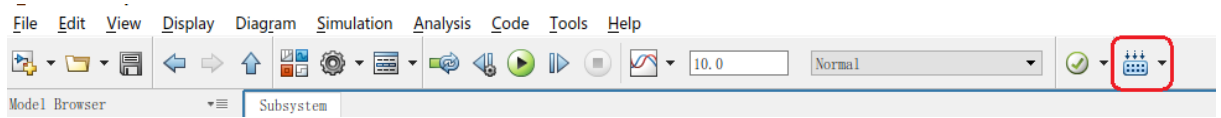


图 4.8.15 下载模型

查看编译过程及下载结果，如下图 4.8.16 所示：

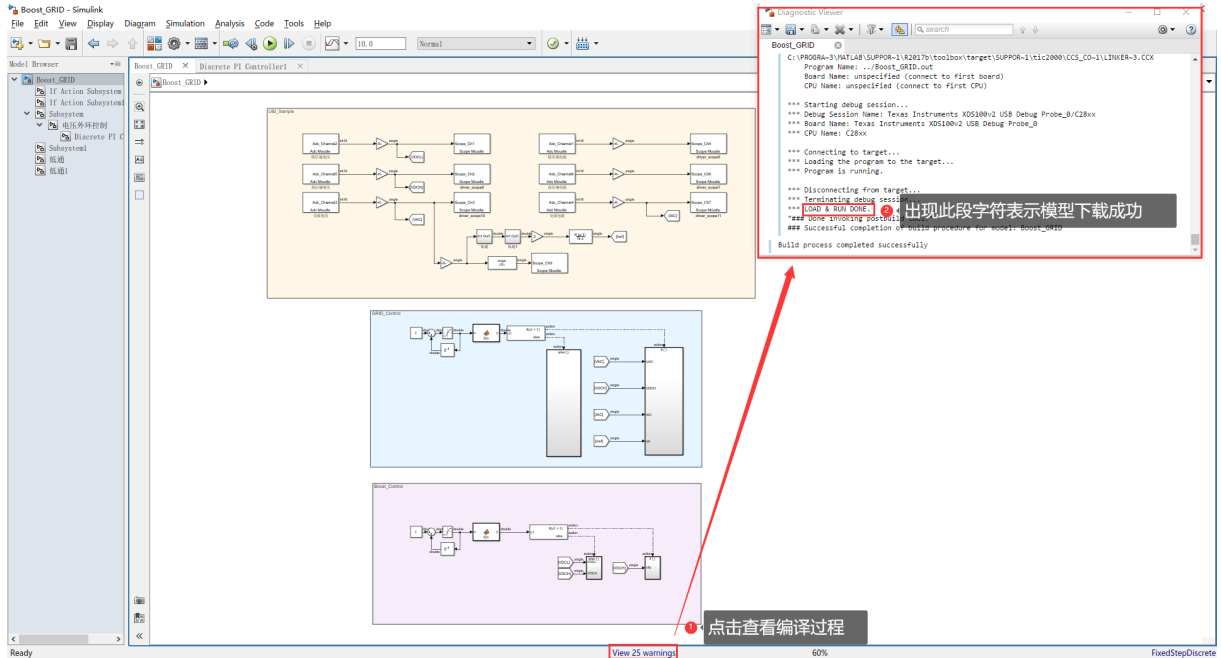


图 4.8.16 模型下载成功

第八步：上位机与计算机建立通信，首先切换到“控制器设置”界面，点击“建立通信”按钮，等连接上之后点击“设置”按钮，具体操作如下图 4.8.17 所示；

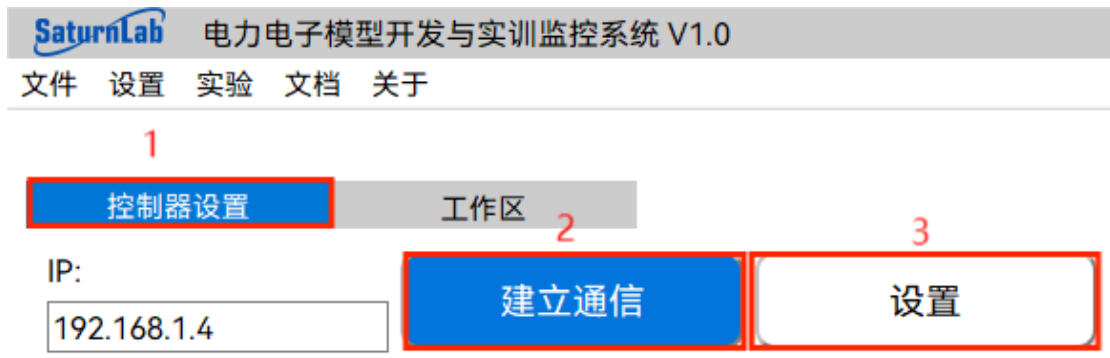


图 4.8.17 建立通信

第九步：运行模型，先切换到“工作区”界面，再将“有功电流”（即并网电流）设置为 0A，并点击计算机键盘“Enter”确认输入（先点击“开始仿真”，“参考回显”框会显示设定值是否生效，如回显值与设定值一样，表示设置生效，否则设置无效，需重新进行第九步操作），然后将“PWM 使能”置“ON”，“故障复位”先置“ON”，再置“OFF”，再将“交直流继电器”置“ON”。先点击“复位”，然后立即点击“开

始仿真”按钮，具体操作如下图 4.8.18 所示；

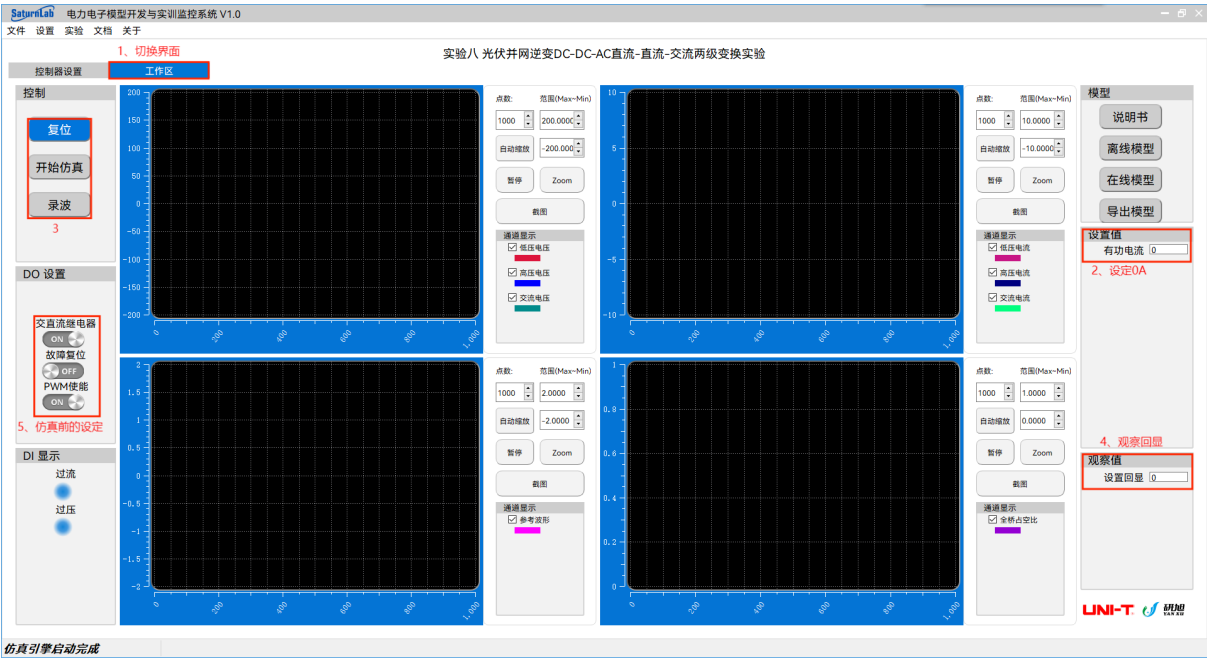


图 4.8.18 具体操作

注意：若系统运行故障，“DI 显示”界面中的两个蓝灯会变成红色，指示其中的一种或两种故障，此时点击“停止仿真”，将“故障复位”重新置“ON”，再置“OFF”，同时点击“复位”按钮，继续点击“开始仿真”即可。

第十步：等交流电流稳定后，再设置“有功电流”为 1A，等电压稳定后再继续设置为 2A，直至 4A，最小设置 0A，最大设置到 4A，然后再降到 2A，最后停止仿真。模型运行过程中可通过上位机界面查看控制效果，运行结果如下图 4.8.19 所示，同时可以点击“录波”按钮，以备后期分析数据；

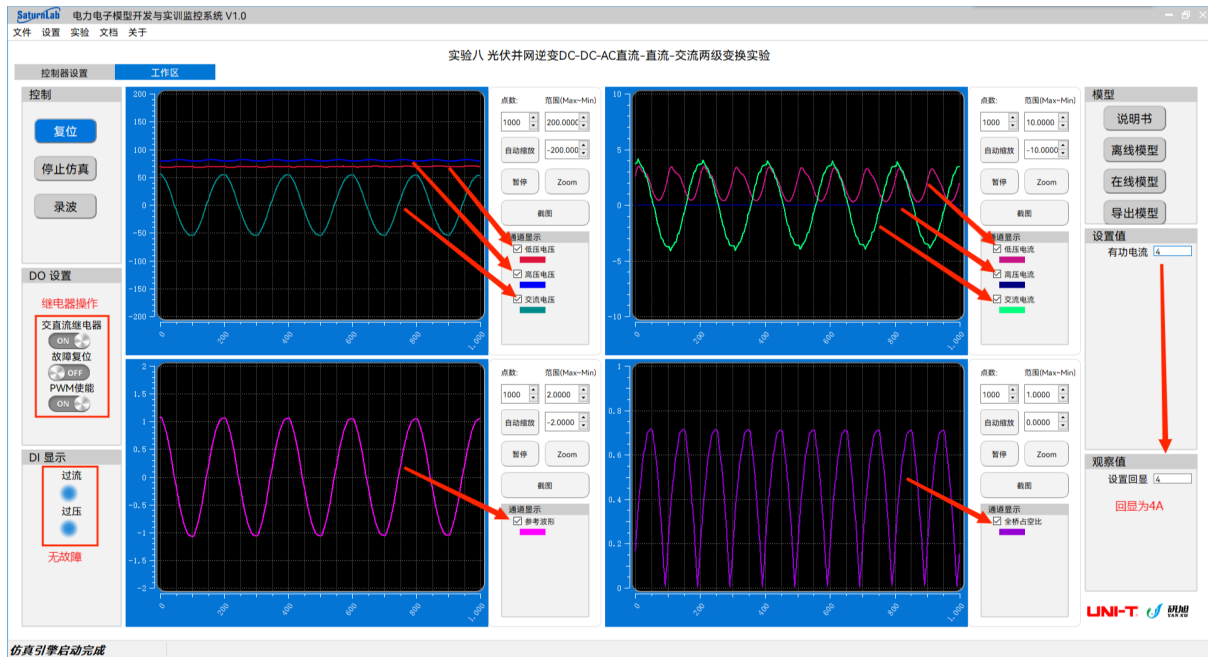
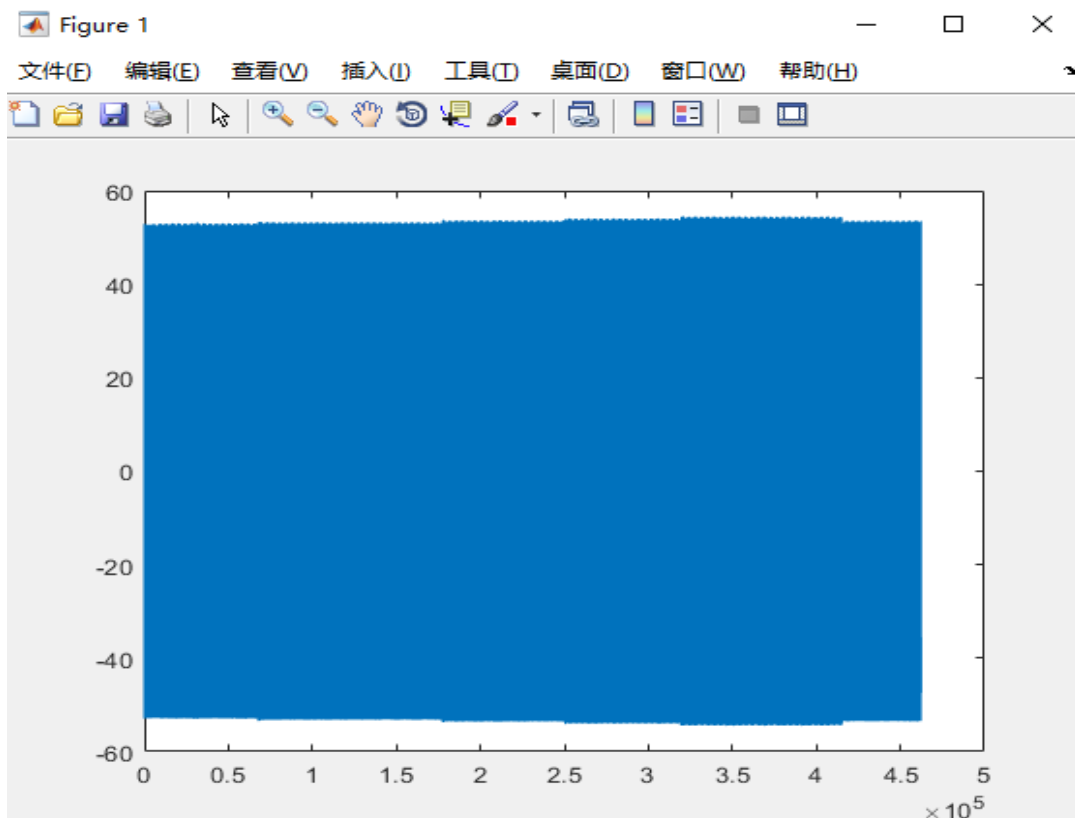


图 4.8.19 运行结果

第十一步：仿真停止，先点击“停止仿真”按钮，然后将“PWM 使能”、“交直流继电器”置“OFF”即可停止仿真。如已录播，可将保存的数据 xx.mat 放入 MATLAB 查看，采用 Matlab 的绘图工具对波形进行分析（录播操作在实验二中已有详细介绍）。

下图 4.8.20 为交流电压波形图；



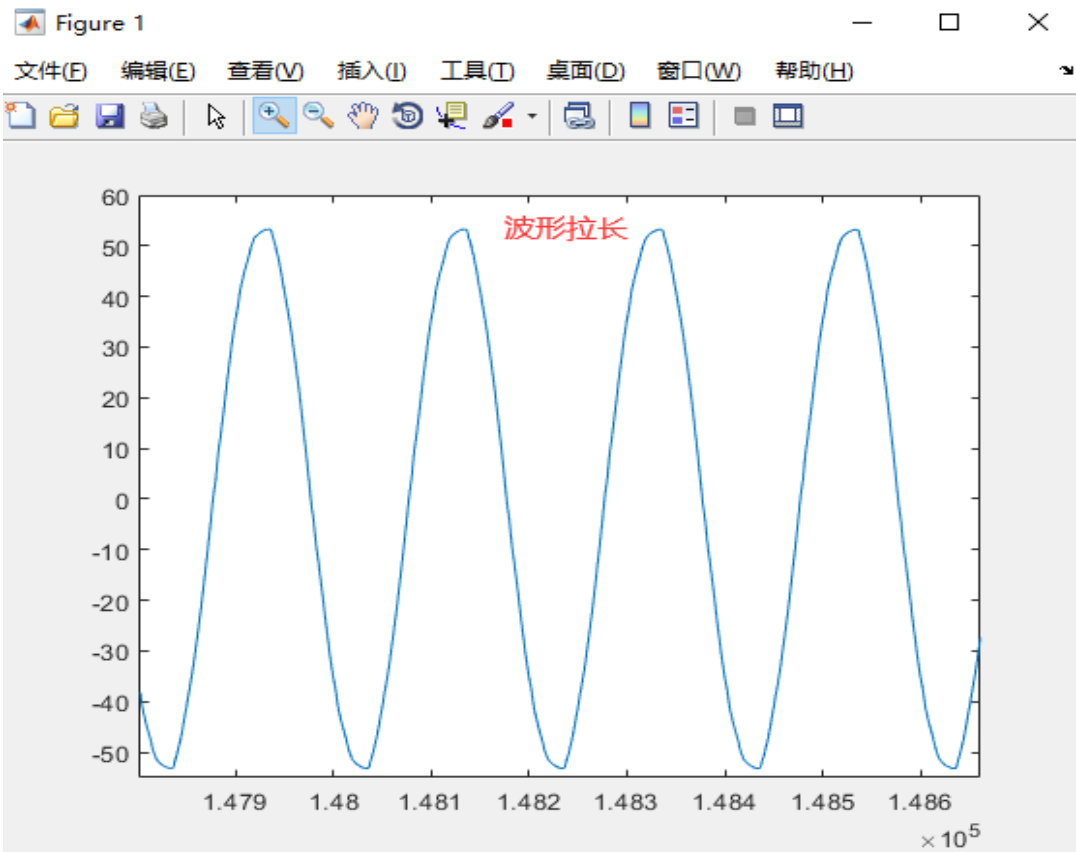
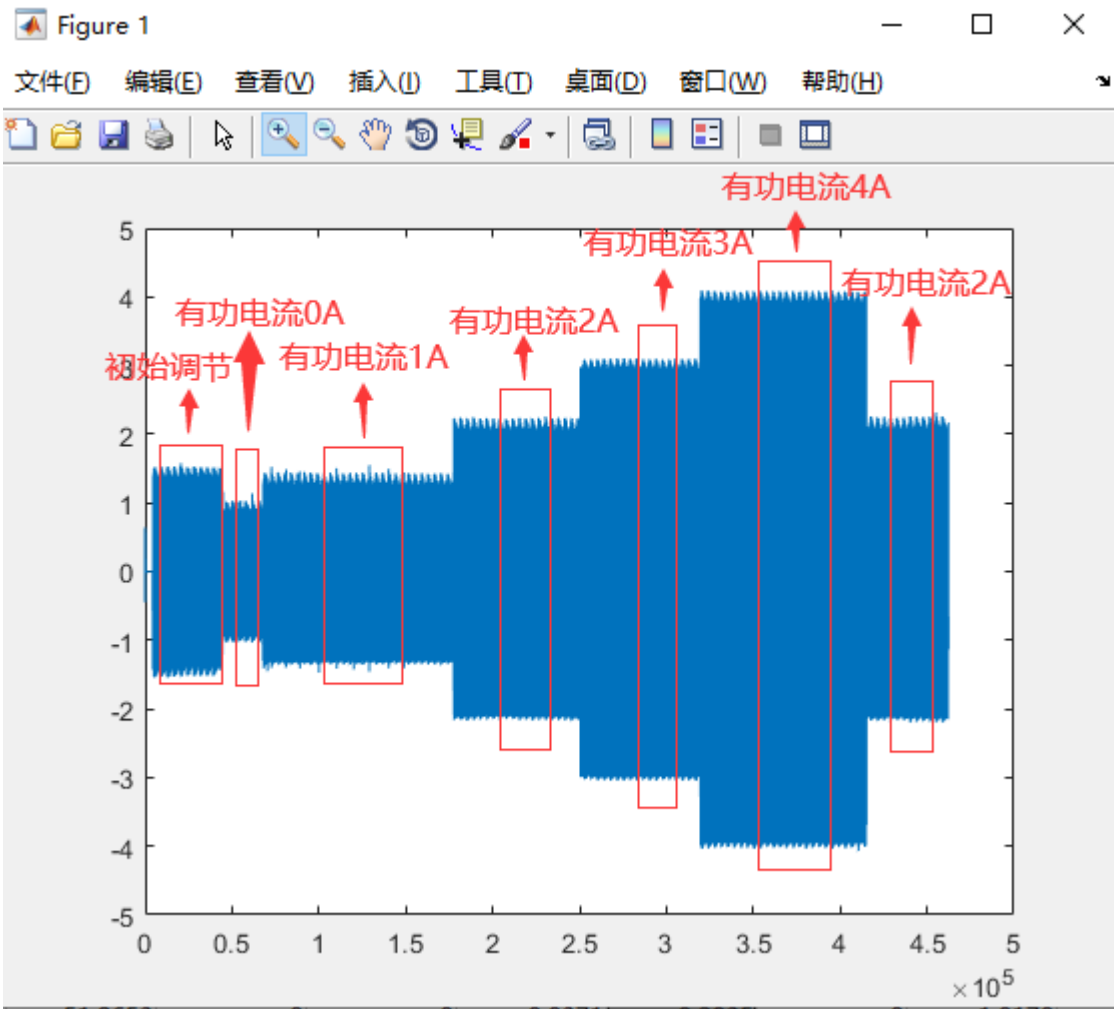


图 4.8.20 交流电压波形

交流电流在不同的有功电流限制下的波形如下图 4.8.21 所示；



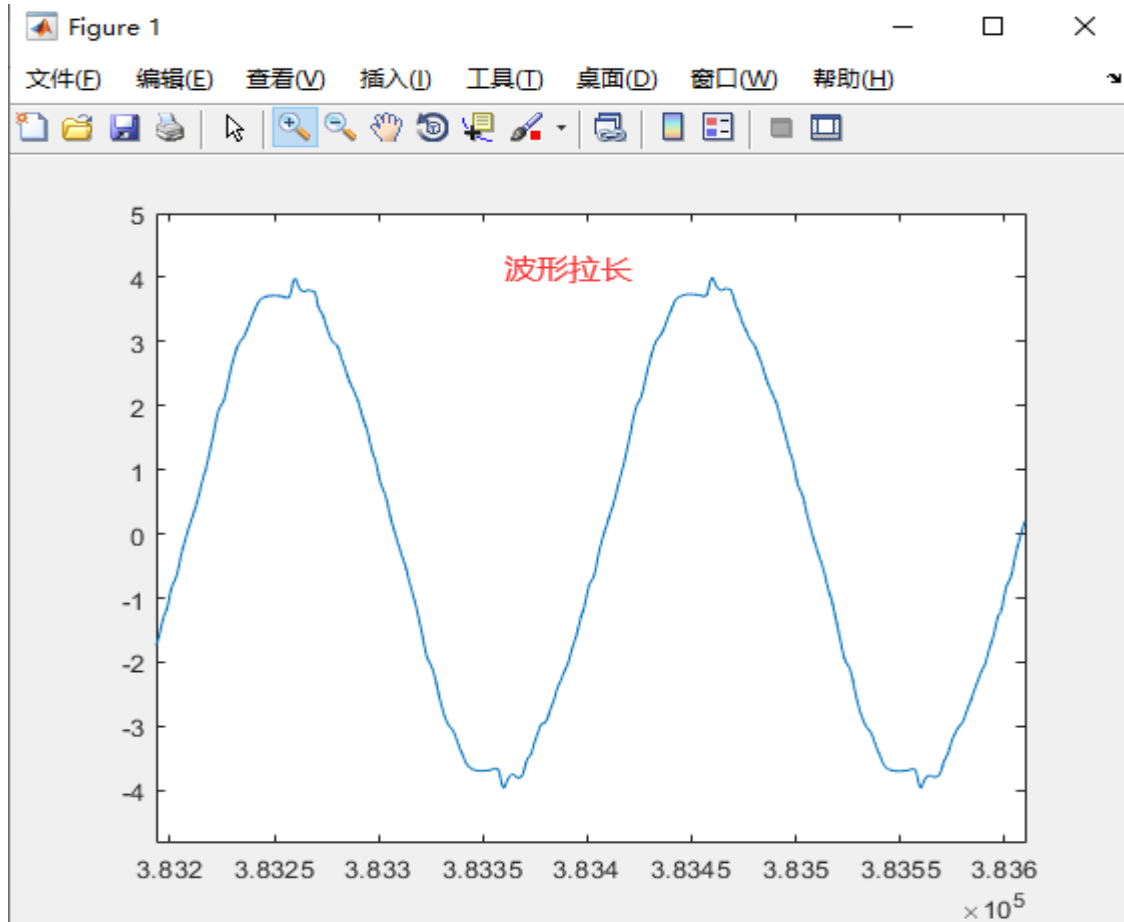


图 4.8.21 交流电流波形

可以看出，随着有功电流的增加，交流电流也随着变大。

注：如需修改模型自行验证，可选择“导出模型”到任意英文目录下，然后重新修改并下载验证，具体操作如下图 4.8.22 所示；



图 4.8.22 导出模型