

参赛队代码: _____

.....装.....订.....线.....

能量回馈的变流器负载试验装置

设计论文

摘要

本方案电路由基于 STM32H723ZGT6 的控制回路、基于 INN650TA030AH 的宽禁带器件功率回路及相关外围电路组成，实现了可以能量回馈的、具备电压闭环、电流闭环和零序环流抑制功能的低功耗三相变流器负载试验装置。系统首先通过线电压采样和坐标变换，并调节变流器 1 输出实现了电压闭环。随后，本系统通过电流反馈，并利用变流器 2 输出对基波电流进行闭环控制，对零序环流进行抑制。本系统可稳定输出线电压 32.0V、频率 50.0Hz 的三相交流电，实测总谐波失真为 0.3%，远小于 2% 的设计要求，负载调整率为 0.189%，同时具备 $\pm 1.0\text{Hz}$ 步进的调频能力。本系统各项技术指标均达到赛题要求，实现了高效能量回馈，具有控制精度高、谐波少、稳定性高的特点。

关键词： 坐标变化；闭环控制；零序环流抑制；能量回馈

目 录

一、 总体方案设计	1
1. 电路总体设计	1
2. 技术方案比较	1
(1) 软控模块 - 信号坐标系设立	1
(2) 软控模块 - 跟踪算法选择	2
(3) 综合模块 - 电压合成算法选择	2
二、 理论分析与计算	3
1. 能量回馈原理	3
2. LCL 电路参数计算	3
三、 核心电路与程序设计	4
1. 系统原理框图.....	4
2. 核心电路.....	4
(1) 功率半桥模块	4
(2) 电压采样模块	5
(3) 电流采样模块	5
3. 程序设计	6
(1) 三相 SPWM 脉冲调制	6
(2) 坐标变换	6
(3) 基波控制与零序环流抑制	6
(4) 软件程序流程图	6
四、 测试结果与分析	7
1. 基础要求的测试	7
(1) 输出特性测试	7
(2) 总谐波失真(THD)测试	7
(3) 负载调整率测试	8
(4) 调频功能测试	8
2. 发挥部分的测试	8
(1) 能量回馈测试	8
(2) 附加功能.....	8
3. 成效总体对比	8

一、总体方案设计

1. 电路总体设计

系统总体设计框图如图 1-1 所示：

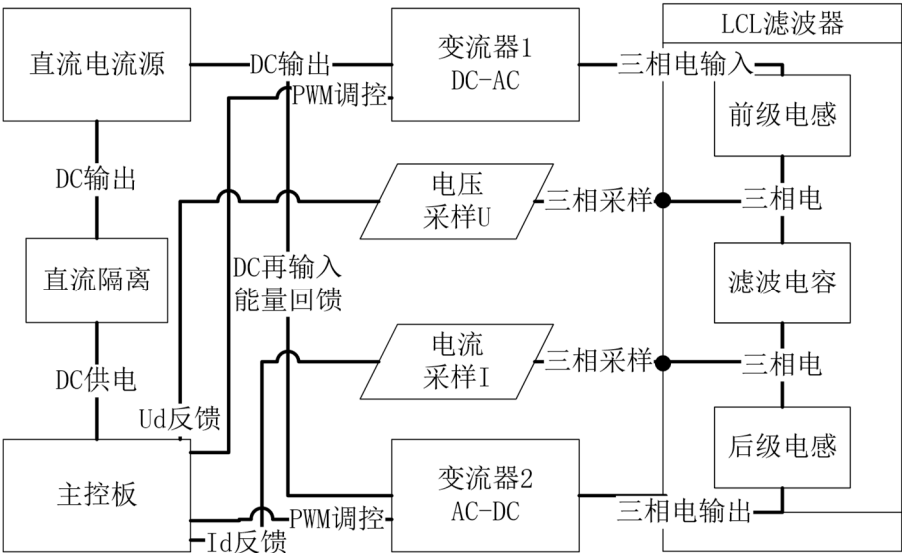


图 1-1 系统总体设计框图

电路整体分为软件主控与硬件受控部分组成。软件主控基于 STM32H723ZGT6 作为核心板。硬件受控部分则是由 INN650TA030AH 晶体管所构成的半桥与电压/电流采样板所组成。

软件主控实现 SPWM 控制。PI 调节功能。半桥实现 SPWM，提供其所需的电压向量以合成所需电压。电压，流采样板对应进行采样，实现反馈数据的收集。

软件通过 SPWM 作用于半桥，电压，电流采样通过 ADC 将数据输入至主控板之中

2. 技术方案比较

(1) 软控模块-信号坐标系设立

方案一：ABC 三项建立自然坐标系。在这种情况下，直接以 ABC 三项进行合成分解。该坐标系建立简单。但在这种坐标系下，ABC 三项会随时间变化，呈 z 正弦波形式，计算量大。不利于参数调试。

方案二：clarck 变换，clarck 变换后将自然 ABC 三项坐标系转换为 α, β 两轴坐标，减少了控制器数目，但该情况下。 α, β 两坐标轴仍保持静止。所监测的电压在 α, β 上的分量仍保持为正弦波形式，随时间变化，不利于参数调试。

方案三：clarck-park 变换。在 clarck 变换的基础之上，我们将得到的 α, β 两坐标轴进行更进一步的变换，令我们得到的 α, β 两坐标轴以与所检测的电压相同的角速度进行旋转得到动态的 d, q 坐标轴，这种情况之下。我们所检测的电压与 d, q 坐标轴保持相对静止。其在 d, q 坐标轴上的投影量为直流量，不随时间变化。因此问题转换为在一旋转坐标系下直流信号跟踪问题

综上所述，方案一与方案二涉及到交流信号跟踪问题，交流信号跟踪所使用的 PR 算法复杂且难以调控，因此采用方案三，将问题转换为直流信号跟踪问题，可以使用 PI 算法，使得调节相对简单且常用。综合考虑后选择**方案三**。

(2) 软控模块-跟踪算法选择

方案一：比例-积分(PI)控制，PI 控制包括比例项(P)和积分项(I)，比例项反应当前误差，积分项反应历史误差。通过动态修正使得输出稳定值预定值。其具有操作简单且速率较快的优点。但与此同时，当我们使用 PI 控制器跟踪正弦信号时，由于 PI 算法的基本原理，会导致产生无法消除的正弦稳态误差。影响跟踪效果。

方案二：比例谐振(PR)控制。PR 控制的特性为，在所设定的频率处增益非常大。其他频段的增益为固定增益。因此相对于 PI 控制，PR 可以很好的处理交流信号。并且不会有无法消除的正弦稳态误差影响。但其调节参数相对 PI 控制多，且调节难度高。

综上所述，鉴于我们已使用 clarck-park 变换，将问题转化为直流信号跟踪问题，在这个前提之下，PI 控制更适用于我们的需求，PR 控制调节难度相对较高。综合考虑后采用**方案一**。

(3) 综合模块-电压合成算法选择

方案一：SPWM：以输入一端幅值等效的方波从而来等效正弦波，这里使用自然采样法，即使用三角波与正弦波进行对比。根据三角波当前时刻超过/低于正弦波从而改变方波高\低电平。从而进行模拟，其操作相对简单，但是其峰值不可超过供电峰值 $1/2$ ，易发生超调现象。

方案二：SVPWM：空间矢量脉宽调制算法，借助半桥结构，通过三组板桥的开关 从而形成 2^3 个不同方向的电压向量。再通过不同的电流向量不同时间的搭配，从而以多个向量构成我们所需要的电压向量。其操作相对复杂且会引入零序分量(三次谐波)，但其相对于 SPWM 需要更小的电压峰值 $\sqrt{3}/3$ 利用率提高了 15.47%。

综上所述，因为 SVPWM 会引入零序分量导致环流，效率降低，且在本设计当中，所拥有的直流电源电压范围大。可满足我们的实际需求(60.0V)合理选择电压后。可避免发生超调，则采用 SPWM 方式进行模拟。

二、理论分析与计算

1. 能量回馈原理

电流通过连接单元后，通过变流器 2(AC-DC)将原本的交流电整流升压，并将产生的直流电源端输入的 DC 电压幅值，再重新传输至变流器 1(DC-AC)的输入极。通过这种方式实现“变流器 1-连接单元-变流器 2-变流器 1”的能量回馈。

在具体的变流器 2: AC-DC 当中。逆向使用变流器 1: DC-AC 的方式，从而实现 AC-DC 且前后电压变化近似一致。减少能量在回馈过程中的劣化。

2. LCL 电路参数

在逆变器 LCL 滤波电路之中，参考标准 LCL 滤波电路构型，相关参数如表 2-1

表 2-1 LCL 滤波电路相关参数

V_{in} 输入电压	T_{sw} 载波周期	λ_{L1} 纹波系数	I_L 额定电流	P_o 单相有功功率	U_g 输出电压
32.0	$5 \times 10^{-5} \text{ s}$	0.1	2.0A	64.0W	32.0V

且要求谐振频率频率约为 1.0KHZ 可、避开由 SPWM 所产生的 3, 5 倍谐波干扰，且在电流环控制范围内。

1) 高频电感 L_1 :

$$\text{其需满足 } \Delta i_{in} = \frac{V_{in} - V_c}{L_1} T_{on}, L_1 \text{ 代入公式 } L_{min} = \frac{V_{in} T_{sw}}{4 \lambda_{L1} I_L} \approx 2.0 \text{ mH}$$

2) 低频电感 L_2 :

$$\text{由谐振角频率 } \omega_r = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}}, \text{ 考虑 } LC \text{ 并联影响后, } L_2 = \frac{9 L_1}{4 \pi^2 * f_{sw}^2 L_1 C - 9} = 2.0 \text{ mH}$$

滤波电容 C : 一般滤波电容所引入的无功功率为理论上单项额定有功的 5.0%。但在实际实践当中为了稳定取 10.0%-20.0%。代入公式求得

$$C_{max} = \frac{P_o}{\omega * U_g^2} * 12.5\% = 25.0 \text{ uF}$$

在此参数之下幅频特性如下，其谐振频率为 $f = 1005\text{Hz}$ ，可实现避开 3，5 次谐波的设计要求。满足设计需求

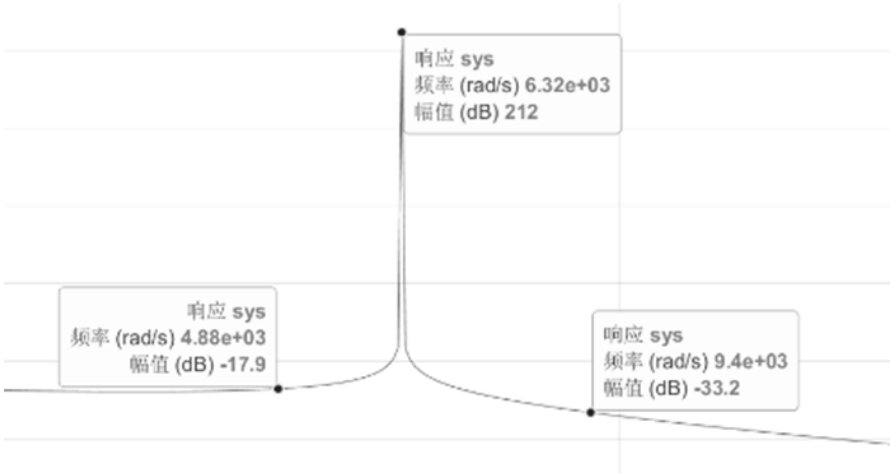


图 2-2 LCL 电路幅频特性图

三、核心电路与程序设计

1. 系统原理框图

系统原理框图如图 3-1 所示。该框图核心由变流器 1 和变流器 2 两个功能单元构成。变流器 1 工作在逆变工况，并通过采集线电压，然后利用坐标变换和 PI 控制器实现电压闭环控制。变流器 2 工作在整流工况，通过反馈采样电流实现了电流闭环控制。同时由于系统中存在零序环流通路，故设计了零序环流抑制算法，对系统中的零序电流进行抑制，使得系统具备更高的效率。

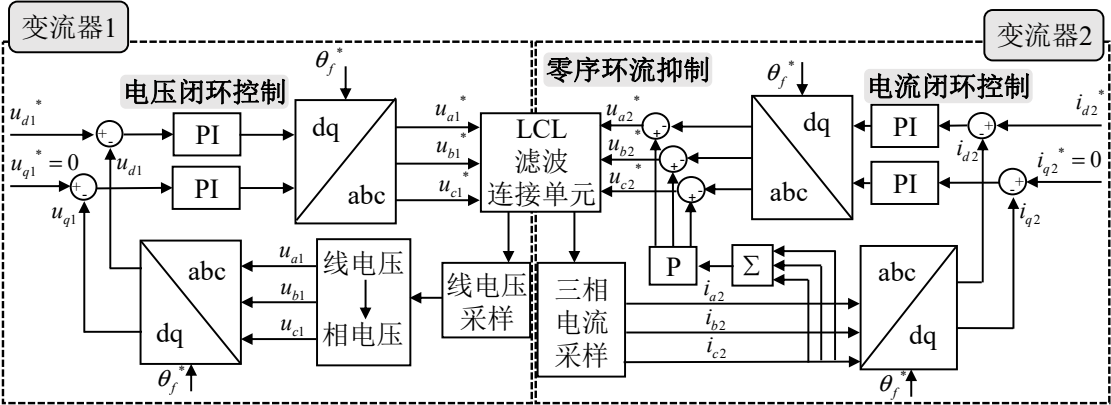


图 3-1 系统原理框图

2. 核心电路

(1) 功率半桥模块

功率半桥模块由滤波前端，驱动电路，GaN 半桥所组成。驱动电路使用 UCC21220ADR 驱动芯片增强驱动能力以精准控制 GaN 开关管。半桥结构采用 INN650TA030AH 功率晶体管,以实现响应 PWM,实现半桥开关。

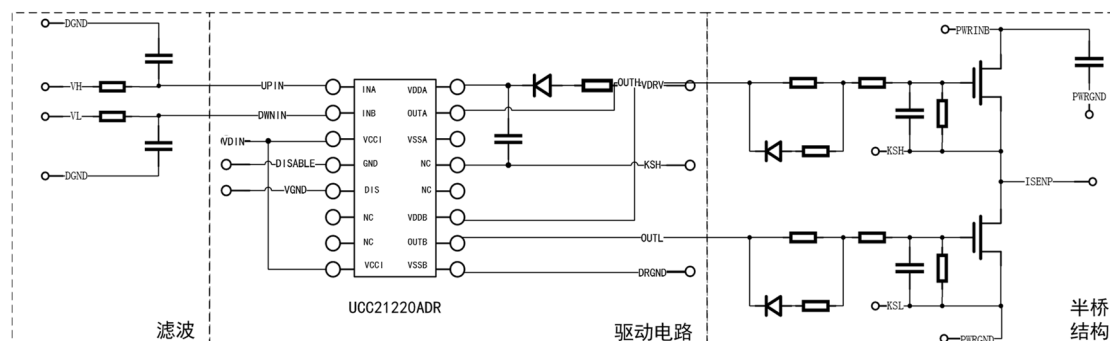


图 3-2 功率半桥及其驱动模块电路

2. 电压采样模块

电压采样模块前端使用 AMC1311BDWVR 隔离放大器实现电气隔离放大并在后侧采用运放放大器实现放大，从而实现精准线性采集电路电压效果。

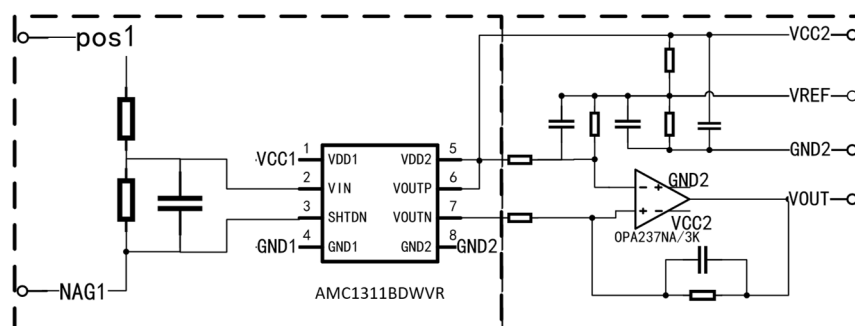


图 3-3 电压采样模块电路

3. 电流采样模块

利用 TMCS1107A3BQDR 隔离霍尔电流传感器进行电流采样，实现工作范围内精确线性采样。

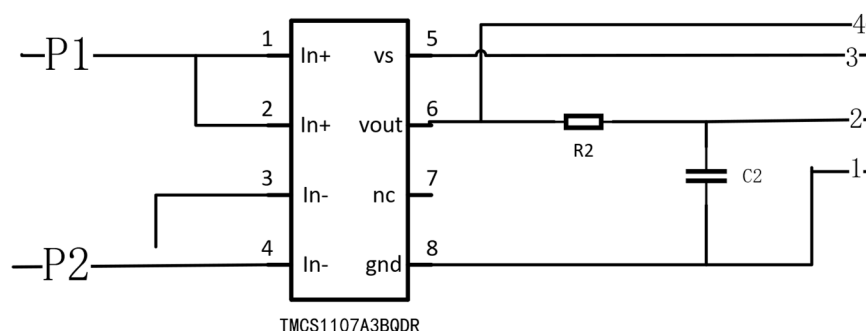


图 3-4 电路采样模块电路

4. 程序设计

(1) 三相 SPWM 脉冲调制:

SPWM 即为将一标准三角波与调制正弦波进行对比.当三角波低于正弦波时输出高电平,当三角波高于正弦波时输出低电平,以此通过电压均值来模拟我们所需要的正弦电压.在实际交互环节当中通过生成的 PWM 注入半桥,板桥内部的驱动器接受 PWM 从而调节 GaN 开关管的开关,进而实现高电压幅度下的电压调制,从而在电路中实现 AC-DC 与 DC-AC 的变流器作用。通过三相的互差 120 度的 SPWM 调制即可产生三相 SPWM 的脉冲调制,进而实现三相 AC-DC 与 DC-AC 的变流。

(2) 坐标变化:

通过 clark-park 变换,将 ABC 三相静止的坐标系下的交流分量转为 dq 坐标系下的直流分量。因静止坐标系获取电压会得到变化的交流值,如果坐标系实现同角速度动态变化,则得到的电压值为静态的直流值,直流分量的幅值可以直接反映交流分量的幅值,也可用通过 PI 控制器对直流分量进行控制。

(3) 基波控制与零序环流抑制:

基波控制采用双变流器协同策略:变流器 1 通过电压闭环控制实现直流母线稳压,其 d 轴电压环采用 PI 调节器跟踪指令电压,q 轴电压置零以实现单位功率因数运行;变流器 2 则通过电流闭环控制精确跟踪指令电流,采用电流环 PI 调节器结合 P 控制器实现快速动态响应。由于该电路存在零序环流通路,故两变流器通过中央零序环流抑制模块动态耦合,该模块实时检测并联支路的零序电流分量,通过闭环补偿算法生成反相抑制信号,有效消除因参数不对称或开关动作引起的环流扰动。

(4) 程序软件流程图:

程序流程框图如图 3-5 所示,程序启动后,首先通过按键选择题目确定运行模式,随后执行 ADC 校正确保采样精度。系统核心采用中断响应机制:由启动/停止按键和过流保护触发中断。过流时强制打开三相桥下桥臂紧急停机;正常启动后则进入运行状态。在启动运行阶段,流程分为并行两路:基础部分:进行电压电流采样。扩展部分:实现能量反馈。

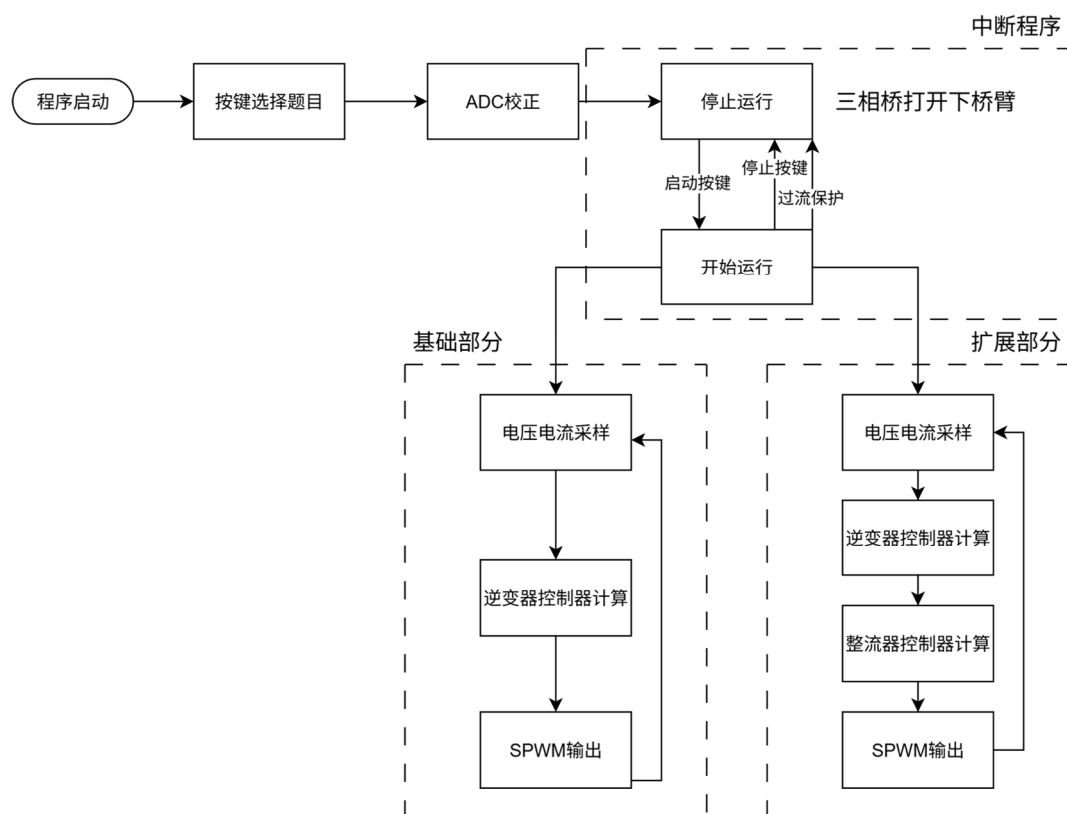


图 3-5 程序软件流程图

四、测试结果与分析

1. 基础要求的测试

表 5-1 测试条件

供电电源	RIGOL 普源 DP832A 直流电源
测量设备	tektronix MDO3024 示波器、fluke 434 series II 质量分析仪
供电条件	直流供电 55.0V

(1) 输出特性测试:

基础要求(1)测试如表 5-2, $U = 32 \pm 0.5V$, $I = 2A$, $f = 50Hz$ 满足题目要求。

表 5-2 基础要求 (1) 测试数据

线电压	线电压 U/V	线电流 I/A	频率 f Hz
U_1	32.09	2.032	50.0
U_2	32.11	1.968	50.0
U_3	32.12	1.885	50.0

(2) 总谐波失真(THD)测试:

基础要求(2)测试如表 5-3，总 THD 为 0.3%，小于要求 2.0%满足题目要求

表 5-3 基础要求（2）测试数据

	总 THD
谐波含量	0.3%

(3) 负载调整率测试：

基础要求(3)测试如表 5-4，负载调整率为 0.189%，满足题目要求

表 5-4 基础要求（3）测试数据

电流 I_1 /A	线电压 U_1 /V	负载调整率 S_{11} %
0.0	32.22	0.189%
2.0	32.16	

(4) 调频功能测试：

系统输出频率可在 20-100Hz 范围内 1Hz 步进变化，满足题目要求。

2. 发挥部分的测试

(1) 能量回馈测试：

能量回馈的数据如表 5-5 所示。在实现能量回馈的情况下，直流电源供电功率约 12.155W。

表 5-5 能量回馈测试数据

线电压 U_1	线电流 I_1	频率 f	直流电源电压 U_d	直流电源电流 I_d	直流电源功率 P_d
31.97V	2.04A	50.0Hz	55.0V	0.221A	12.155W

(2) 附加功能：

本作品在基本要求，发挥部分的基础上，元器件采型使用 GaN 晶体管，在整体上实现了低功耗，低散热等功效。降低了能量消耗。

3. 成效总体对比

本文设计了一个具有能量反馈的变流器负载电路，在直流电源为 56.0V 条件下，使得电路在实现输出频率 50 Hz，线电压 $U_1 = 32V \pm 0.25V$ ，额定线电流 $I_1 = 2A$ 的三相对称正弦交流电 THD 为 0.3%，负载调整率 $S_{11} = 0.189\%$ 并可以实现 20Hz ~ 100Hz 范围内 1.0Hz 为步进调频。同时实现了能量回馈，能量回馈过程当中，变流器 1 输出频率 50.0Hz，线电压 $U_1 = 32V \pm 0.25V$ ，额定线电流 $I_1 = 2A$ ，直流电源输出功率 $P_d = 12.155W$ 。