

浙江大学实验报告

专业：电子信息工程
姓名：_____
学号：_____
日期：2022.10.29
地点：教二 125

课程名称：电力电子技术 I 指导老师：马皓 成绩：_____
实验名称：单相正弦波(SPWM)逆变电路 同组人：郭涛

一、实验目的

1. 熟悉单相桥式 SPWM 逆变电路的工作原理，对工作情况及其波形作全面分析。
2. 研究正弦波的幅值和频率和三角波的频率对输出电压波形参数的影响。

二、实验内容

1. 测量 SPWM 波形产生过程中的各点波形。
2. 测量逻辑延时电路的延时时间。
3. 观察不同负载时变频电路的输出波形。

三、实验步骤

1. SPWM 波形的观察

(1) 观察“SPWM 波形发生”电路输出的正弦波波形(“2”端与“4”端)，改变正弦波频率调节电位器，测试其频率可调范围；改变正弦波幅值调节电位器，测试其幅值变化范围。

(2) 观察“SPWM 波形发生”电路输出的三角形载波的波形(“1”端与“4”端)，改变三角波频率调节电位器，测出其频率变化范围，并观察三角形与正弦波波形的对应关系。

(3) 观察“SPWM 波形发生”电路经过三角波和正弦波比较后得到的 SPWM 波形(“3”“4”端)。

2. 逻辑延时时间测试

将 SPWM 波形发生电路的“3”端与 DLD 逻辑延时的“1”端相连，用双波失踪器同时观察 DLD 逻辑延时的“2”“3”端与 SPWM 波形发生器“4”端之间的波形，并记录延时时间 T_d 。

3. 同一桥臂上下管子驱动信号死区时间测试

分别将 IGBT 驱动芯片 IR2110 输出 E1 和 E2，E3 和 B4 相连，用双踪示波器分别测量 G1、E1 和 G2、E2，G3、E3 和 G4、E4 两端的波形，并测出死区时间。注意死区时间是指双管都不导通时的时间，要注意准确判断波形位置，并思考死区时间和逻辑延迟时间之间的关系。

(测量结束后，应及时拆除观察线，避免短路)

4. 不同负载时波形的观察

拆除 IGBT 驱动芯片 IR2110 输出 E1 和 E2，B3 和 E4 的连接。按下 NMCL-32E 面板上的“绿色”按

钮，调节三相调压器旋钮至电压表显示的线电压达到 200V。按下 NMCL-32E 面板上的“红色”按钮断开主电源，将 NMCL-10B 挂箱的“U”、“V”、“W”分别接到 NMCL-32E 面板上的三相交流主电源输出。

(1) 当负载为电阻负载时

将主电路的“6”和“9”端接电阻负载(两个 NMCL-03D 上的可调电阻串联，电阻值调到最大)，连接主电路“1”和“3”端。注意普通示波器探头不能直接同时观察主电路和控制电路波形，可以先测量控制电路的波形，确定控制电路后将示波器探头接回主电路，探头换为 10 倍衰减。按下 NMCL325 面板上的“绿色”按钮闭合主电源(可用万用表测量一下，主电路“1”和“2”端应有约 280V 的直流电压)，分别调节 SPWM 的正弦波幅值、频率和三角波的频率，观察主电路“7”、“9”电容两端的波形，记录其幅值、频率、纹波的变化，可多记录几组作比较，研究其变化因素与规律。

(2) 当负载为阻感负载时

按下 NMCL-32E 面板上的“红色”按钮断开主电源，将主电路“6”和“9”端接线去掉，再将主电路的“8”、“9”分别接到位于 NMCL-331 面板上的电感 L(700mH)，将主电路的“6”、“8”端接电阻(两个 NMCL-03D 上的可调电阻串联，电阻值调到最大)。

按下 NMCL-32E 面板上的“绿色”按钮闭合主电源，分别调节正弦波幅值、频率和三角波的频率，观察主电路“7”、“9”电容两端的波形，记录其幅值、频率、纹波的变化，可多记录几组作比较。对参数的变化趋势和规律，作定性分析，并按实验报告要求测试和记录波形。

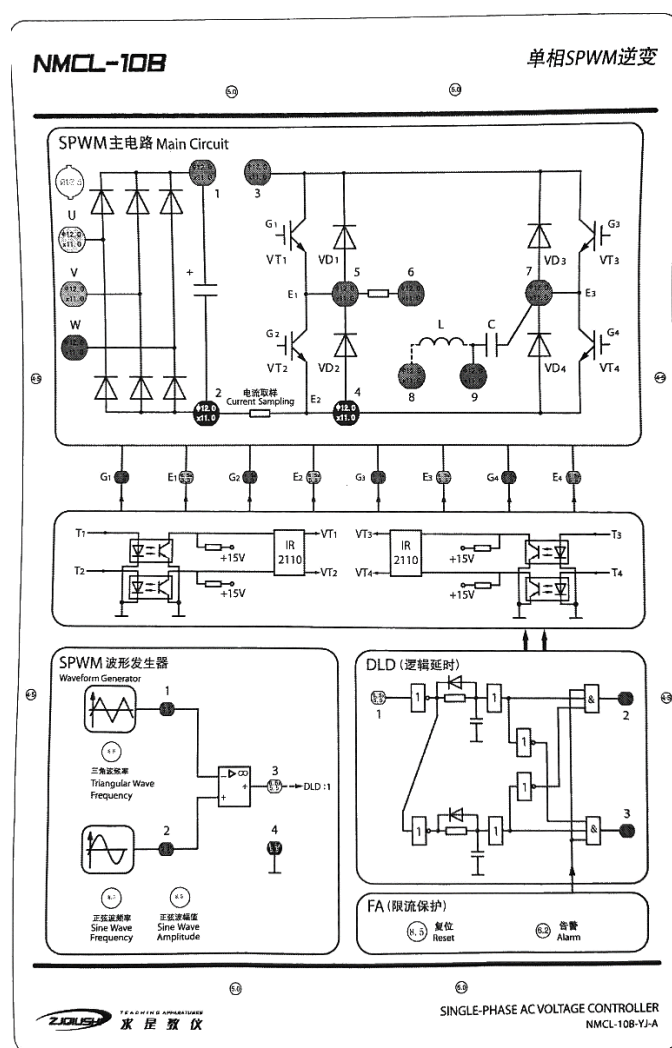


图 1. 单相 SPWM 逆变主电路接线图

四、实验数据记录、处理和分析

数据记录与处理:

1. SPWM 波形的观察:

1. 改变正弦波频率调节电位器，测得频率调节范围是 2.84Hz~53Hz;
2. 改变正弦波幅值调节电位器，发现幅值过小时，正弦波会严重失真，因此我们组设定正弦波最小幅值的情况为保持正弦波形的最小电压，测得示波器上显示的幅值变化范围是 0.9V~7.34V
3. 改变三角波频率调节电位器，测得其频率变化范围是 1.89kHz~10.7kHz，示波器上显示的幅值为 12.1V。

输出的 SPWM 波形如下图所示:

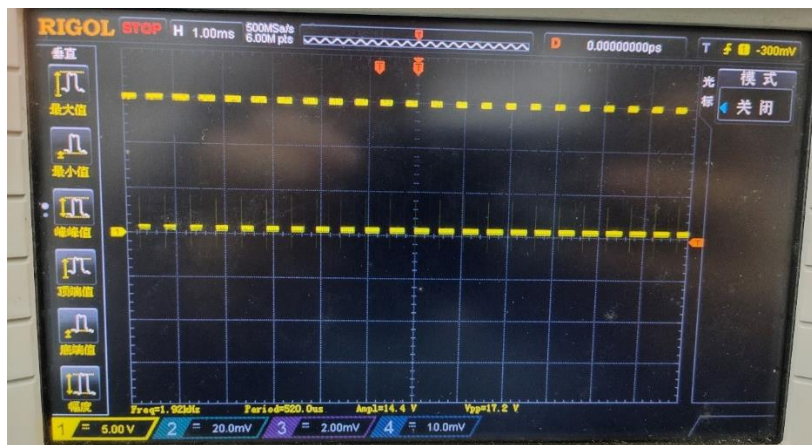


图 2. SPWM 波形

2. 逻辑延时时间测试:



图 3. 逻辑延迟时间

如图 3 所示，通过光标可测得逻辑延迟时间为 2.98us。

3. 死区时间测试:



图 4. E1 和 E2 桥臂开关管的死区时间



图 4. E3 和 E4 桥臂开关管的死区时间

通过光标测量可得到同一桥臂上下管的死区时间，E1 和 E2 之间死区时间为 3.4us，E3 和 E4 之间死区时间为 2.96us

4. 不同负载时的波形测量：

	幅值	频率	纹波峰峰值
fc 最小	377V	50.5Hz	104V
fc 最大	337V	50.1Hz	18V

表 1. 电阻负载时三角波频率最大、最小时的电容波形参数

	幅值	频率	纹波峰峰值
fc 最小	345V	50.2Hz	6V
fc 最大	360V	50.5Hz	趋近于 0V

表 2. 组感负载时三角波频率最大、最小时的电容波形参数

用万用表直流电压挡测量主电路“1”和“2”端的电压，测得结果为 273V。

实验现象：

当负载为电阻负载时：保持正弦波幅值 V_s 、正弦波频率 f_s 不变，三角波频率 f_c 增大时，电容两端电压 U_c 幅值和频率不变，纹波逐渐减小；保持 V_s 、 f_c 不变时， f_s 逐渐减小时， U_c 纹波就示波器观测来看变化不大， U_c 幅值不变，频率跟随 f_s 变化，且基本与 f_s 大小保持一致；保持 f_c 、 f_s 不变，逐渐减小 V_s ， U_c 幅值逐渐减小，频率和纹波基本保持不变，但是纹波大小相对于 U_c 的幅值变大许多，所以输出波形中有很大大一部分都是纹波的波形。

当负载为阻感负载时，相较于相同前提下 V_s ， f_s ， f_c 均保持一致，电容两端的纹波量均小很多。保持正弦波幅值 V_s 、正弦波频率 f_s 不变，三角波频率 f_c 增大时，电容两端电压 U_c 幅值和频率不变，纹波逐

渐减小，当达到最大时，可以观察到一条正弦性质极佳的输出波形；保持 V_s 、 f_c 不变时， f_s 逐渐减小时， U_c 纹波就观察层面来说，变化不大， U_c 幅值基本不变，但频率跟随着 f_s 的变小而变小；保持 f_c 、 f_s 不变，逐渐减小 V_s ， U_c 幅值逐渐减小，频率和纹波基本保持不变，但是纹波量相较于正弦量变大，所以波形的正弦性有所下降。

（1）电阻负载时，正弦波频率 50Hz、峰峰值最大，三角波频率最大和最小时的 SPWM 和电容两端的波形：

(2) 阻感负载时，正弦波频率 50Hz、峰峰值最大，三角波频率最大和最小时的 SPWM 和电容两端的波形：

实验结果分析：

(1) 根据实验结果可得，逻辑延迟时间和桥臂死区时间基本相等，但两个桥臂的死区时间有所差异，原因可能是驱动电路电子元器件在使用一段时间后，存在性质上的差异。由示波器波形可知在死区时间内 IGBT 的门极电压延时一段时间，死区时间结束后又快速改变至稳定值。

(2) 由理论推导可知输出电压基波的幅值位

$$U_{o1m} = \frac{U_d}{U_{cm}} U_{sm} = m_a U_d$$

带入数据，计算得到

$$U_{o1m} = \frac{273}{12.1} \times 7.34 = 165.6V$$

百分误差如下表所示：

	电阻负载		阻感负载	
	Fc 最小	Fc 最大	Fc 最小	Fc 最大
测量峰峰值/V	377	337	360	345
理论峰峰值/V	331.2	331.2	331.2	331.2
百分误差	13.8%	1.8%	8.7%	4.2%

发现在其他参数一致的前提下，fc 最小的组误差均远大于 fc 最大的组，原因可能是 fc 最小，无法做到理论推导中的 $fc \gg fs$ ，因此引入了误差。

(3) 由不同负载时的实验现象可知，输入直流电压一定时，输出电压的幅值仅与幅度调制比

$m_a = \frac{U_{sm}}{U_{cm}}$ 有关， U_{cm} 一定时， U_{sm} 越大，输出电压幅值越大。在满足 $fc \gg fs$ 的前提下，输出电压的纹波

大小则与 fc 有关，fc 越大，输出电压的纹波系数越小，波形的正弦性质也越好，fc 越小，纹波相对于基波峰峰的比重越大，正弦性也越差。而输出正弦波的频率仅与 Fs 有关，当 Fs 改变时，输出电压频率也会改变，但基本与调制波频率保持一致。 宝贝

五、 思考题

1. $M > 1$ 时系统可以正常工作，但会带来直流电压利用率的有限增加和输出电压低次谐波的大量出现。 $M < 1$ 时直流电压利用率为 $0.7071m_a$ ，与 M 成线性增长关系，且输出波形的低次谐波分量较少，输出波形性质好。但随着 $M > 1$ ，发生过调制，低次谐波含量快速增加，同时直流电压利用率与 M 不再是线性关系，增长速度降低，直流电压利用率有限增加，逐渐逼近上限，当达到无穷大时，输出的 SPWM 波形趋近于方波，直流电压利用率逼近于方波的直流电压利用率。因此，过调制在强调直流电压利用率而对谐波要求不是很高的 VVVF 交流传动场合有所应用，而在对谐波要求高的 CVCT 逆变器上应用较少。

2. 死区时间是为了防止上下桥臂同时导通，电路发生短路，电流骤增，烧毁电路的情况，因此需要在同一

桥臂上两根开关管交换状态的瞬间加一两管都截止的时间，保证两根开关管不会同时导通。可以通过改变最大关断延迟时间、最小开通延迟时间、驱动器最大传输延迟时间和驱动器最小传输延迟时间来设置死区时间的大小。

3. 逻辑延时主要是对互补的 PWM 方波进行微小的延时，防止 H 桥桥臂直通现象的出现。