

东南大学自动化学院

《电机与电力电子》仿真作业

作业名称：晶闸管整流电路仿真分析

作业次数：第8次

姓 名： 张韫译萱 学 号：08023214

作业完成时间： 2025 年 11 月 6 日

一、作业目的（要求）

1. 结合第一个 demo (ThyristorRectifiers) 的仿真程序，说明 12 脉冲整流电路的设计思路；改变触发延迟角，给出结果；给出触发脉冲信号波形，并分析；尝试改变负载大小，并分析结果。
2. 结合第二个 demo (power_RegulatedThyristorRectifier) 的仿真程序，说明电路的基本工作原理和实现功能；尝试改变控制器参数，并分析结果。

二、完成情况

本次实验完成了以下内容：

1. 对 demo ThyristorRectifiers 进行了深入分析，系统阐述了六脉冲和十二脉冲整流电路的设计思路，明确了两种电路在结构、性能和应用场景上的差异。
2. 通过改变触发延迟角 ($\alpha = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$) 进行了系列仿真实验，获得了不同触发角下六脉冲和十二脉冲整流电路的输出波形，并对比分析了两种电路的电压脉动、平均输出电压、谐波特性等关键性能指标。
3. 测量并分析了两组桥路的触发脉冲信号波形，验证了触发脉冲的时序关系和相位差配置对实现十二脉冲整流的重要性。
4. 通过改变负载电阻 (10Ω 和 1000Ω) 研究了负载大小对整流电路性能的影响，分析了重载和轻载条件下的电压、电流特性以及换相过程的差异。
5. 对 demo power_RegulatedThyristorRectifier 仿真程序进行了分析，阐明了带 PI 调节器的可调式晶闸管整流电路的闭环控制原理和实现功能。
6. 通过改变电流参考值研究了控制器参数对系统性能的影响，分析了系统的动态响应特性、跟踪性能和稳定性。

三、具体情况

- 1 结合第一个 demo (ThyristorRectifiers) 的仿真程序，说明 12 脉冲整流电路的设计思路；改变触发延迟角，给出结果；给出触发脉冲信号波形，并分析；尝试改变负载大小，并分析结果。

1.1 电路设计思路

1. 六脉冲整流电路

六脉冲整流电路采用三相桥式整流结构，包括共阴极的上面一组 (VT1、VT3、VT5) 和共阳极的下面一组 (VT4、VT6、VT2)，两组连接到直流侧的正负极。六个晶闸管按照一定的顺序依次导通，每隔 60° 电角度换相一次，在任一时刻共阴极组和共阳极组各有一个晶闸管导通形成电流通路。由于三相全桥整流电路在一个工频周期 (360°) 内换相 6 次，因此输出电压呈现 6 个脉动波头，称为六脉波整流，脉动频率为电源频率的 6 倍 ($50\text{Hz} \times 6 = 300\text{Hz}$)。六脉冲整流的输出电压为线电压包络线，理想空载时平均输出电压为 $U_{d0} = 2.34U_2$ (U_2 为变压器二次侧相电压有效值)。通过调节晶

闸管的触发延迟角 α ，可以改变输出电压大小。相比于十二脉冲整流电路，该电路的主要缺点是输出电压脉动较大，包含较多的 5 次、7 次等低次谐波分量。

2. 十二脉冲整流电路设计思路

十二脉冲整流电路采用两组三相桥式整流电路并联工作，每组构成一个六脉冲整流单元，通过两组桥路的相位差配置可以获得十二脉冲的整流输出。一组桥式整流电路采用 Y/Y 接法，另一组采用 Y/D 接法，使得两组二次侧电压相位差 30° 。由于两组桥路输出的电压波形相位差 30° ，当它们并联时，部分谐波分量（特别是 5 次、7 次谐波）相互抵消，显著降低了输出电压的谐波含量。十二脉冲整流在一个工频周期内产生 12 个脉动波头，脉动频率为电源频率的 12 倍 ($50\text{Hz} \times 12 = 600\text{Hz}$)。相比六脉冲整流电路，十二脉冲整流电路的输出电压纹波更小（约为六脉冲的 $1/3$ ），脉动频率更高，谐波含量更低。两组桥路需要采用同步且精确的触发控制，保持 30° 的相位差，通过调节触发延迟角 α ，可以实现输出电压的连续调节。

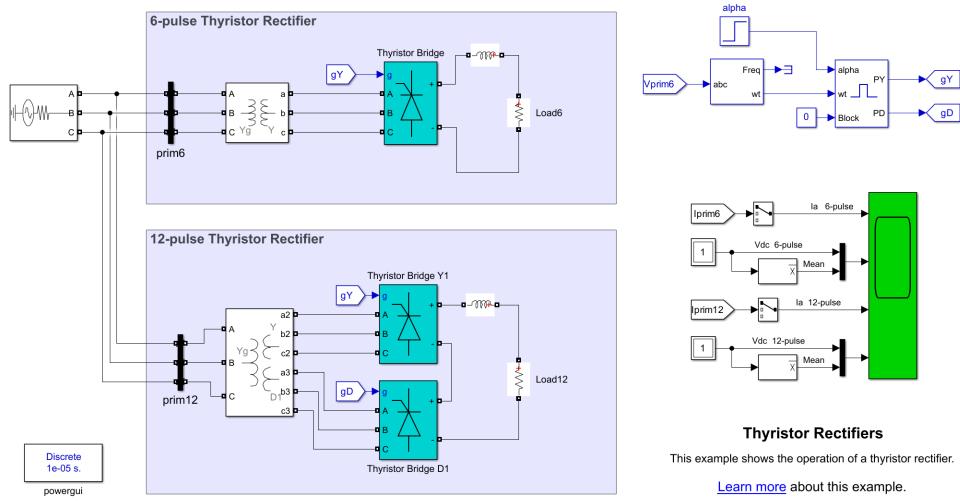


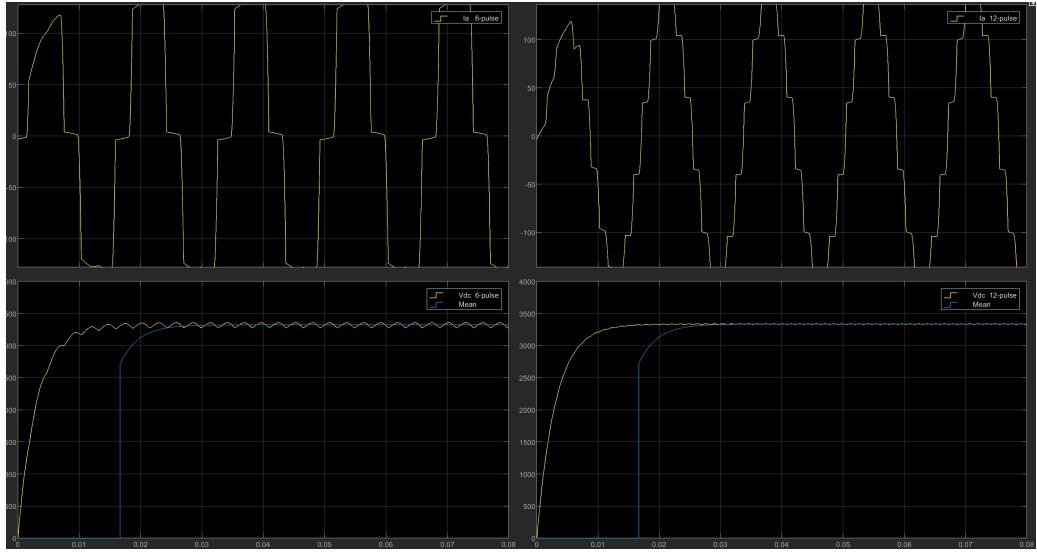
图 1: 12 脉冲晶闸管整流电路仿真模型

从电路结构可以看出，整流系统由三相交流电源、整流变压器、晶闸管桥式整流电路和阻感负载等部分组成。通过合理的触发控制，可以实现对输出直流电压的有效调节。

1.2 触发延迟角对输出特性的影响

触发延迟角 α 是晶闸管整流电路中最重要的控制参数之一。可以通过改变触发延迟角调节输出的平均整流电压大小。分别设置 $\alpha = 30^\circ$ 、 60° 和 90° ，观察输出电压和电流的变化规律。

1. 触发延迟角 $\alpha = 30^\circ$ 时的输出特性

图 2: 触发延迟角 $\alpha = 30^\circ$ 时的输出波形**六脉冲整流电路特性（左侧波形）：**

从交流侧电流波形看，上图显示的交流侧电流 I_a 呈现典型的六脉冲整流特征，电流波形为近似矩形波，每个周期内有明显的正负脉冲交替，脉冲宽度约为 120° 。从直流侧电压波形看，下图显示的直流输出电压 V_{dc} 具有明显的六波头特征，即在一个工频周期内出现 6 个脉动波头，这是因为三相全桥整流电路中六个晶闸管依次导通换相，形成六脉波输出。当 $\alpha = 30^\circ$ 时，六脉冲整流的输出电压脉动较为明显，从波形可以看出电压在每个脉动周期内有较大的起伏，峰峰值约占平均值的 15-20% 左右。在该触发角下，六脉冲整流电路的平均输出电压约为 2800V 左右（蓝色平均值线），输出电压较高，整流效果良好。

十二脉冲整流电路特性（右侧波形）：

相比六脉冲，十二脉冲电路的交流侧电流波形更加复杂，呈现出多级台阶状特征，这是两组桥路电流叠加的结果。十二脉冲整流的电压脉动显著减小，脉动频率是六脉冲的两倍，波形更加平滑，峰峰值仅为平均值的约 5-8%，远小于六脉冲电路。在相同触发延迟角下，十二脉冲的平均输出电压与六脉冲基本相同（约 3200V），但输出质量明显优于六脉冲。

2. 触发延迟角 $\alpha = 60^\circ$ 时的输出特性

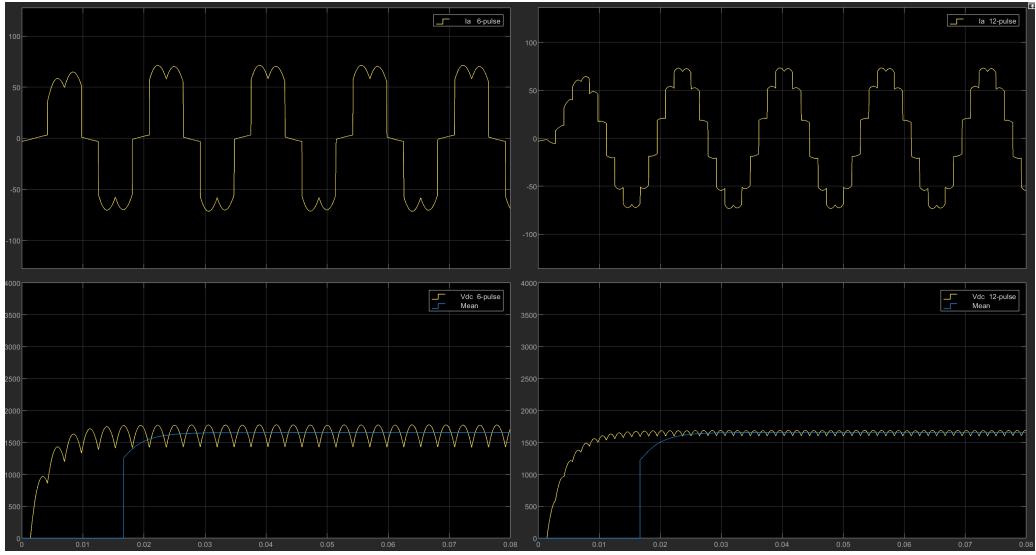


图 3: 触发延迟角 $\alpha = 60^\circ$ 时的输出波形

当触发延迟角增大到 $\alpha = 60^\circ$ 时, 两种整流电路的输出特性发生显著变化:

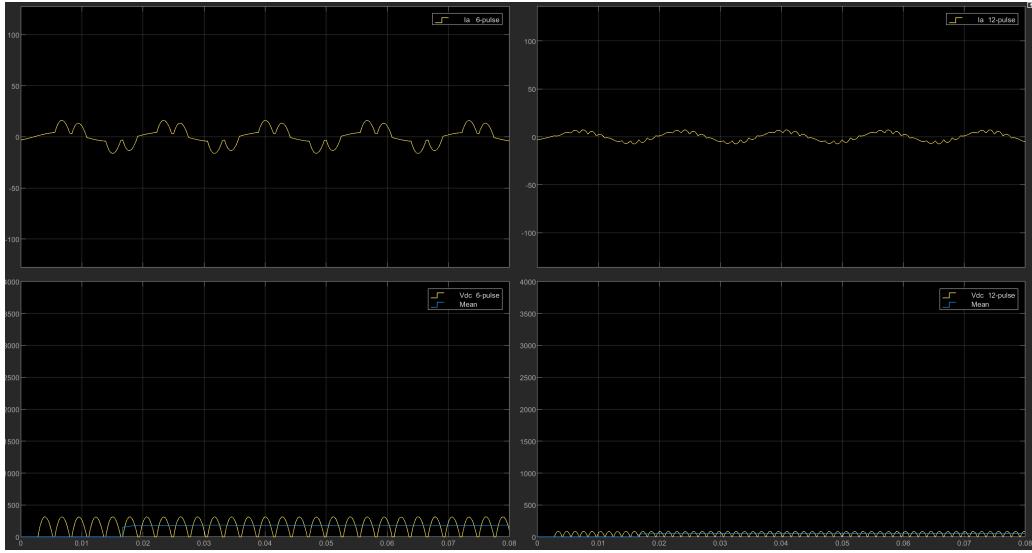
六脉冲整流电路特性（左侧波形）:

I_a 波形仍保持六脉冲特征, 但脉冲形状发生明显变化, 由于导通延迟增加, 电流脉冲的正负交替更加频繁, 波形呈现出明显的双峰特征。输出电压 V_{dc} 仍为六波头形式, 但波形的脉动幅度显著增大, 可以观察到每个脉动波头的峰值明显降低, 谷值也随之下降, 整体电压水平下降。相比 $\alpha = 30^\circ$ 时, 电压脉动的相对幅度增大, 峰峰值约占平均值的 25-30%, 这是因为触发延迟角增大, 晶闸管在线电压较低时才导通, 导致输出电压波形失真加剧。六脉冲整流电路的平均输出电压降至约 1600V, 符合 $U_d = U_{d0} \cos \alpha$ 的理论关系, 约为 $\alpha = 30^\circ$ 时的 55-60% ($\cos 60^\circ / \cos 30^\circ \approx 0.577$)。

十二脉冲整流电路特性（右侧波形）:

十二脉冲电路的交流侧电流呈现更加复杂的多峰结构, 反映出两组桥路在不同相位下的叠加效应。输出电压保持十二波头特征, 脉动频率仍为六脉冲的两倍, 虽然平均电压下降, 但波形的平滑性仍优于六脉冲电路。十二脉冲的电压脉动相对幅度约为 15-18%, 虽然比 $\alpha = 30^\circ$ 时有所增大, 但仍明显小于同角度下六脉冲电路的脉动。十二脉冲电路的平均输出电压同样降至约 1500V 左右, 与六脉冲电路基本一致, 符合理论预期。

3. 触发延迟角 $\alpha = 90^\circ$ 时的输出特性

图 4: 触发延迟角 $\alpha = 90^\circ$ 时的输出波形

当触发延迟角增大到 $\alpha = 90^\circ$ 时，两种整流电路进入临界工作状态：

六脉冲整流电路特性（左侧波形）：

I_a 波形在 $\alpha = 90^\circ$ 时呈现显著的波动特征，电流脉冲的幅值较小，且正负脉冲之间的过渡更加频繁，波形几乎接近正弦波，但仍能观察到脉冲整流的特征。输出电压 V_{dc} 的六波头特征依然存在，但脉动幅度极大，可以明显看到电压波形在每个脉动周期内的起伏非常剧烈，波形的峰值和谷值差异显著。此时的电压脉动达到最大，峰峰值可达平均值的 40-50% 甚至更高，这是因为晶闸管在线电压过零点附近才开始导通，输出电压的有效利用率大幅降低。六脉冲整流电路的平均输出电压进一步下降至约 200V 左右，接近理论上的零输出状态 ($\cos 90^\circ = 0$)，从波形可以看出电压平均值接近零线，系统基本丧失整流功能。 $\alpha = 90^\circ$ 被称为整流与逆变的临界点，此时晶闸管导通时刻正好在相电压或线电压的自然过零点附近，输出电压的正负脉冲几乎相互抵消，实际输出接近于零。

十二脉冲整流电路特性（右侧波形）：

十二脉冲电路的交流侧电流波形在大触发角下变得更加复杂，多峰特征更加明显，但整体幅值显著减小。输出电压仍保持十二波头形式，脉动频率为六脉冲的两倍，虽然平均电压同样接近零，但由于脉动频率高，瞬时电压的波动相对较小。十二脉冲电路的相对脉动幅度约为 30-35%，仍小于六脉冲电路的 40-50%，即使在如此极端的工作条件下，十二脉冲电路的输出质量仍优于六脉冲。十二脉冲电路的平均输出电压同样降至接近零的水平（约 150V），进入临界工作状态。在大触发角下，十二脉冲电路的低次谐波抑制效果仍然存在，但由于输出电压本身很小，谐波的绝对值也相应减小。

1.3 触发脉冲信号波形分析

在 gY, gD 信号输出端添加示波器，可以对两组晶闸管桥路的触发脉冲信号进行测量。

1. 第一组桥路触发脉冲信号（Pulses gD）

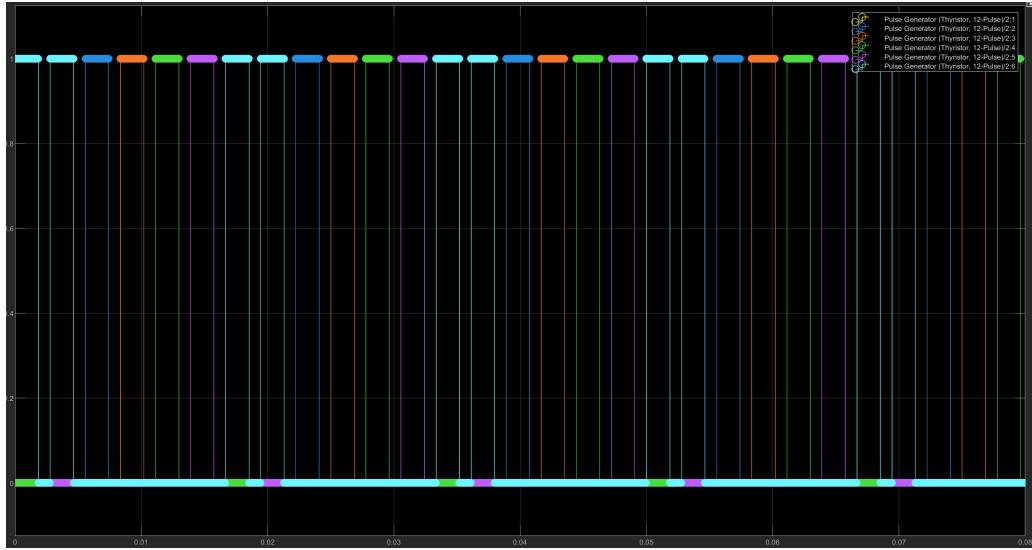


图 5: 第一组桥路 (Y/D 接法) 触发脉冲信号

上图显示了第一组三相桥式整流电路中六个晶闸管的触发脉冲序列。从波形可以观察到以下特点：六个脉冲信号依次相差 60° 电角度，确保三相桥式整流电路的正常换相；每个脉冲足够宽，保证电路能够正常启动，并可靠触发导通。

2. 第二组桥路触发脉冲信号 (Pulses gY)

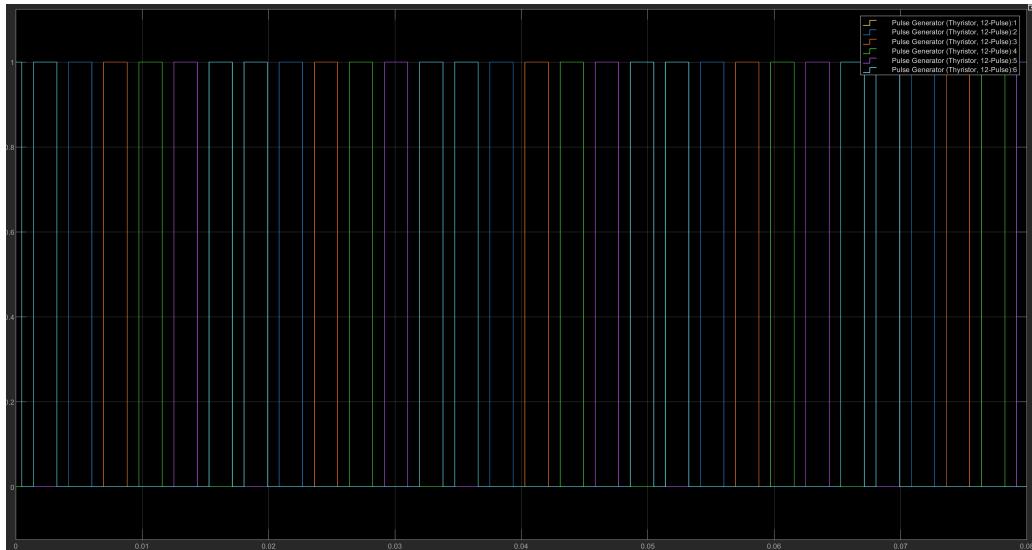
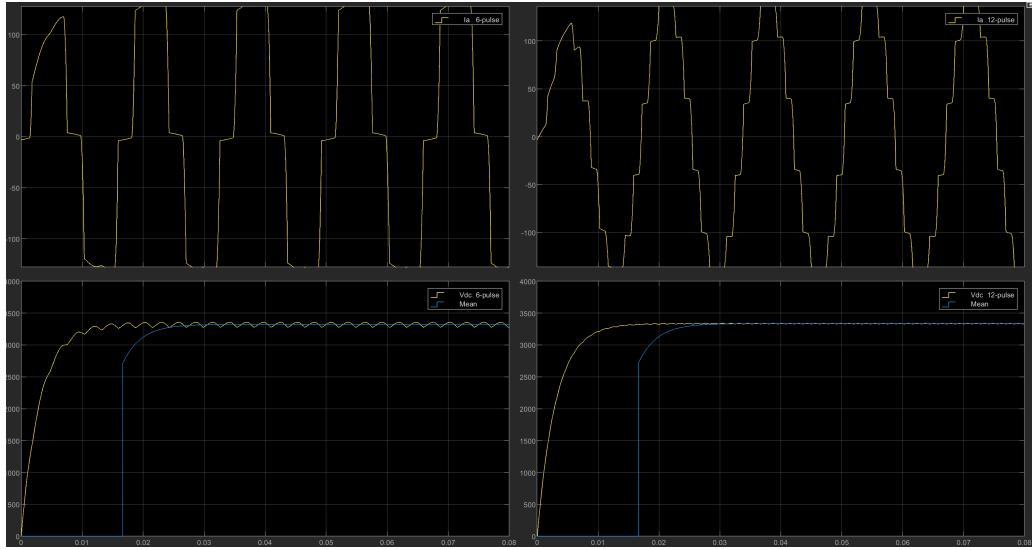


图 6: 第二组桥路 (Y/Y 接法) 触发脉冲信号

与第一组相比，第二组三相桥式整流电路的脉冲信号具有相同的时序特征，但存在 30° 的相位差。

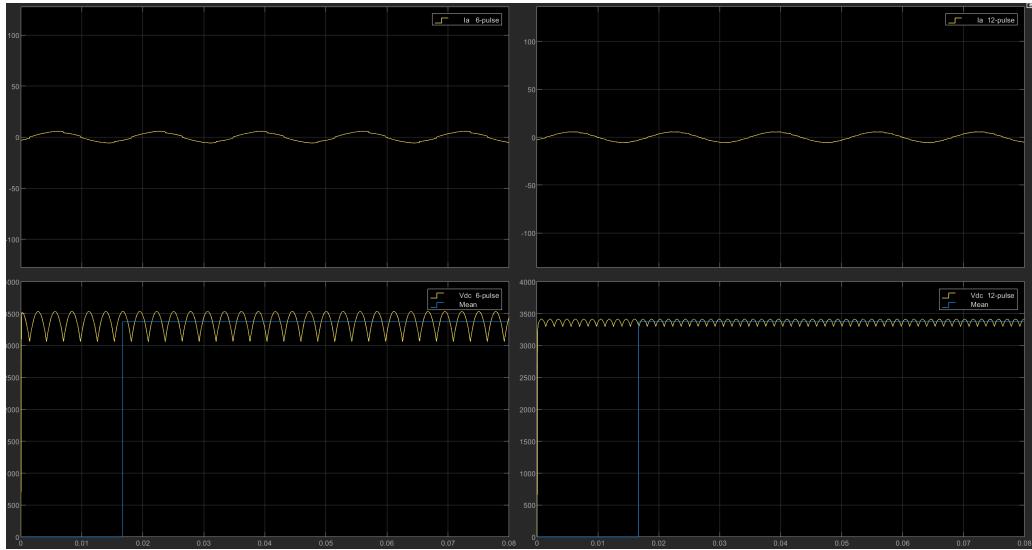
1.4 负载大小对整流特性的影响

1. 小负载 (10Ω) 条件下的运行特性

图 7: 负载电阻为 10Ω 时的输出波形

由于负载电阻较小，在相同输出电压下负载电流显著增大，达到较高水平；大电流工况下，换相过程中的换相重叠角增大，导致输出电压平均值有所降低；电压波形的脉动相对较小，电流波形更加平滑，这是因为负载阻抗小、时间常数小的缘故；重载条件下，电路的功率因数相对较高，但谐波电流也相应增大。

2. 大负载 (1000Ω) 条件下的运行特性

图 8: 负载电阻为 1000Ω 时的输出波形

在大负载（轻载）条件下，整流电路的特性发生明显变化：负载电阻增大至 1000Ω ，负载电流大幅减小，进入轻载运行状态；轻载时负载电流小，滤波效果变差，输出电压的脉动相对增大；从波形可以看出，电压波形出现更明显的纹波，这是因为负载电流小、续流困难造成的；轻载时整流电路的损耗占比增大，整体效率有所降低。

通过对两种负载条件，可以得出以下结论：

1. 负载大小对整流电路的输出特性有显著影响。小负载时电流大、电压稳定；大负载时电流小、电压脉动增大。

2. 换相过程受负载电流影响明显。大电流时换相重叠角增大，导致输出电压降低；小电流时换相迅速，但续流问题突出。
3. 实际应用中应根据负载特性选择合适的滤波参数。对于轻载工况，需要增加输出滤波电容或电感，以改善电压质量。
4. 12 脉冲整流电路在宽负载范围内均能保持良好的工作状态，相比 6 脉冲电路具有更好的适应性。

2 对 demo "power_RegulatedThyristorRectifier" 的分析

2.1 电路基本工作原理和实现功能

1. 电路结构组成

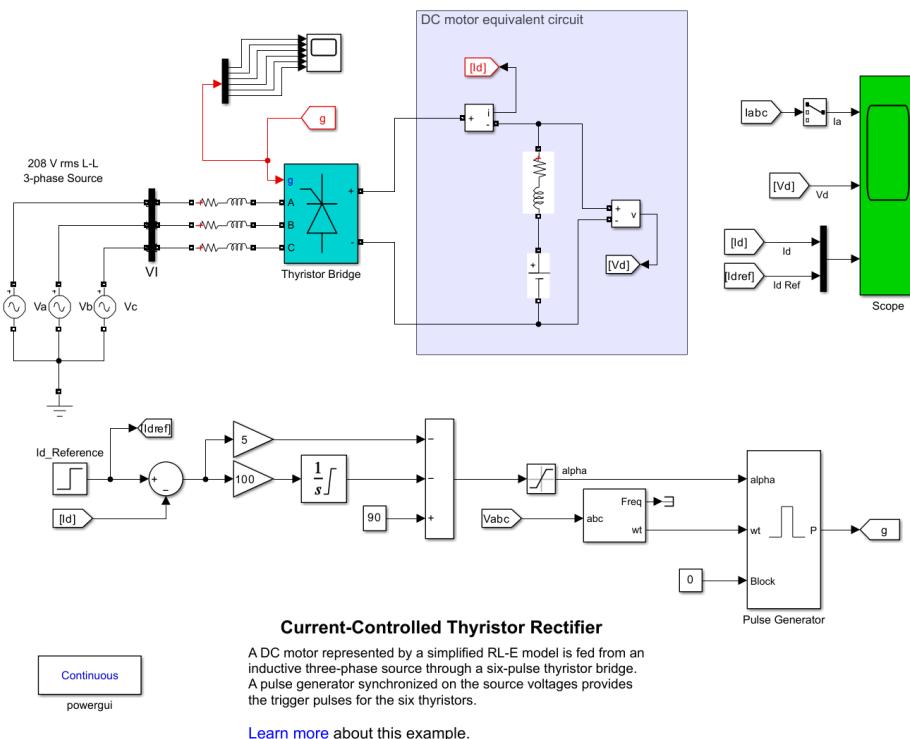


图 9: 可调式晶闸管整流电路仿真模型

从上图可看出：该整流系统主要由以下几个部分组成：三相交流电源提供工频交流电能，作为整流系统的输入；整流变压器实现电压等级变换和电气隔离，同时为整流电路提供合适的输入电压；晶闸管整流桥采用三相全控桥式整流电路，通过控制晶闸管的导通时刻实现可控整流；直流负载通常为阻感性负载，模拟实际应用中的电机、电解或电镀等负载；电流检测环节实时采集负载电流，为反馈控制提供依据；PI 调节器根据电流误差信号进行比例积分运算，输出控制角度指令；触发脉冲发生器根据控制指令生成精确的晶闸管触发脉冲。

2. 工作原理

该电路采用电流闭环控制策略，控制步骤如下：

1. 参考值设定：系统设定一个期望的输出电流参考值 I_{ref} ，作为控制目标；

2. 反馈采样：通过电流传感器实时检测负载实际电流 I_{actual} ；
3. 误差计算：比较参考电流与实际电流，得到偏差信号 $e = I_{ref} - I_{actual}$ ；
4. PI 调节：偏差信号经过 PI（比例积分）调节器处理，输出触发延迟角控制量 α 。PI 调节器的传递函数为：
$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$$

其中， K_p 为比例系数， K_i 为积分系数；

5. 触发控制：根据计算出的触发延迟角 α ，触发脉冲发生器产生相应的脉冲信号，控制晶闸管的导通时刻；
6. 输出调节：改变触发延迟角可以调节整流输出电压，进而控制负载电流，使其跟随参考值变化。

3. 正常工作状态下的输出特性

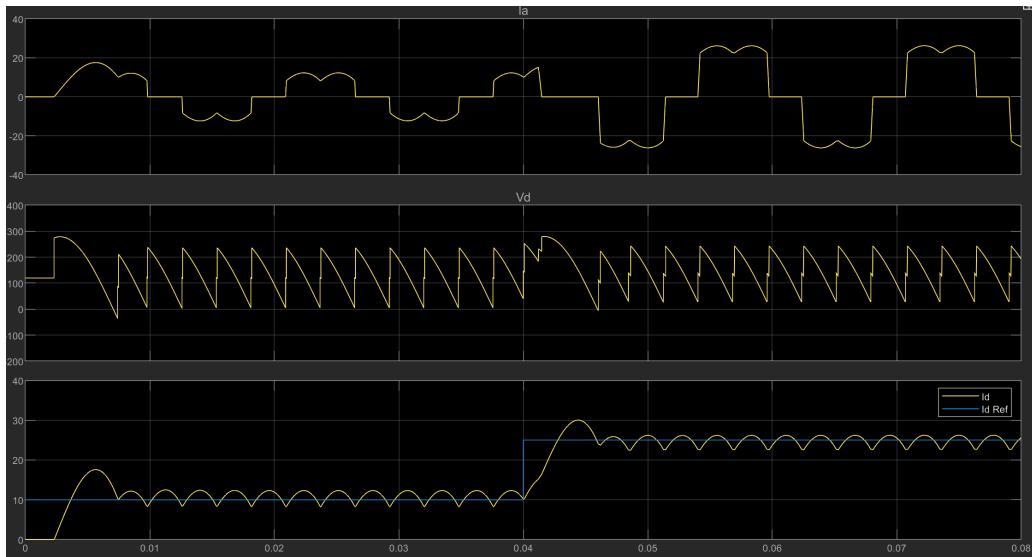


图 10: 可调式晶闸管整流电路正常工作时的输出波形

上图展示了系统在正常工作状态下的输出特性。从波形可以观察到：输出电流在启动阶段逐步上升，表现出良好的软启动特性；进入稳态后，电流基本稳定在参考值附近，波动很小；输出电压根据负载需求自动调节，保持电流恒定；系统响应速度快，调节过程平滑，无明显振荡。

2.2 控制器参数对系统性能的影响

可以通过改变电流参考值来观察系统的动态响应特性。将电流参考值从初始的 10A、终值 25A 调整为初始值 5A、终值 10A，进行实验：

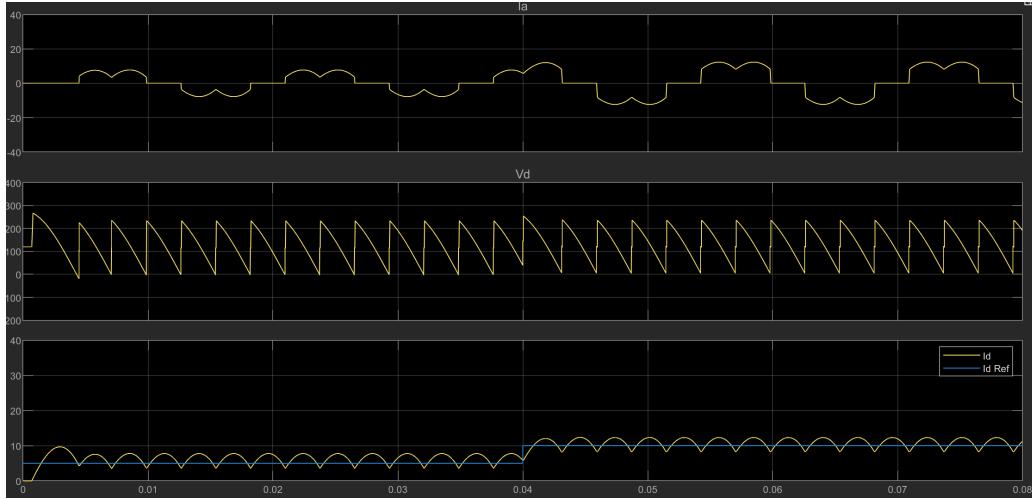


图 11: 改变电流参考值后的系统输出波形

从上图可以分析出以下特性:

1. 动态响应特性

当参考电流从 5A 阶跃变化到 10A 时, 实际输出电流能够快速跟随参考值变化, 表明系统具有良好的跟踪能力。从参考值改变到输出电流稳定在新的设定值, 系统经历了一个过渡过程, 响应时间取决于 PI 控制器的参数设置。观察电流波形可以看到系统在阶跃响应过程中的超调情况, 适当的 PI 参数可以在快速响应和小超调之间取得平衡。进入稳态后, 实际电流与参考电流之间的误差很小, 说明 PI 控制器的积分作用消除了稳态误差。

2. 参数影响分析

PI 控制器的两个关键参数对系统性能的影响如下: 增大比例系数 K_p 可以加快系统响应速度、减小稳态误差, 但过大会导致系统超调增加甚至振荡, 从实验结果看当前的 K_p 设置使系统具有较快的响应速度和适度的超调; 积分系数 K_i 主要影响系统消除稳态误差的能力和动态过程, 增大 K_i 可以更快地消除稳态误差但也可能引起振荡, 实验中的 K_i 设置保证了系统既能快速消除误差又不会产生明显振荡; K_p 和 K_i 需要合理匹配, 如果 K_p 较大而 K_i 较小, 系统响应快但可能存在稳态误差, 如果 K_i 较大而 K_p 较小, 则响应慢但稳态精度高。

3. 与初始参数设置的对比

将参考电流从(初始 10A, 终值 25A) 改为(初始 5A, 终值 10A) 后, 系统表现出以下变化: 整体电流水平下降, 系统工作在较小的电流范围, 这对应于轻载运行状态; 参考电流的变化幅度从 15A 减小到 5A, 阶跃响应的难度降低, 系统更容易实现平稳控制; 在较小电流下工作, 留给控制系统的调节余地更大, 触发角的可调范围更宽; 虽然工作点和阶跃幅度改变, 但系统的相对性能(如响应时间常数、超调百分比等)保持基本一致, 这说明 PI 控制器的参数设置对不同工作点具有良好的适应性。

4. 系统稳定性分析

从仿真波形可以看出, 无论参考值如何变化, 系统始终保持稳定运行, 没有出现持续振荡或发散现象。这表明: 闭环系统的稳定性良好, 控制器参数设置在稳定域内; PI 调节器能够有效补偿系统的非线性特性和延迟; 晶闸管的触发控制精确可靠, 为闭环控制提供了良好的执行机构。

四、问题与思考

1 多脉冲整流技术在工程上的应用

从电能质量角度分析，5次、7次谐波是低压配电系统的主要污染源。六脉冲整流电路产生的5次谐波含量约为基波的20%，7次谐波约为14%，这在大功率应用场合会严重污染电网。十二脉冲通过相位偏移实现5次、7次谐波的相互抵消，使得主要谐波降至11次、13次，幅值显著减小。因此，对于容量超过100kW的整流装置，或者对电网谐波有严格限制的场合（如医院、精密仪器供电等），十二脉冲技术的额外投资是合理且必要的。

那么是否存在更高脉冲数的整流方案？理论上可以通过增加桥路数量和变压器绕组配置实现18脉冲、24脉冲甚至更高。但随着脉冲数增加，边际效益递减，设备成本和控制复杂度急剧上升。因此，工程实践中十二脉冲是性价比的最佳平衡点，这也解释了为什么十二脉冲整流在大功率工业应用中成为事实标准。

2 触发延迟角 α 对系统功率因数的影响

从相位控制原理分析，增大触发延迟角不仅降低了输出直流电压，更重要的是改变了交流侧电流的相位。当 $\alpha = 0^\circ$ 时，电流与电压同相，功率因数接近1（理想情况下，不考虑谐波影响）。但当 α 增大时，基波电流相位滞后于电压，功率因数 $\cos\phi$ 随之下降。更严重的是，触发延迟角增大会导致谐波电流含量增加，总谐波畸变率（THD）上升，进一步恶化功率因数。

这带来一个矛盾：许多应用场合需要通过调节触发角实现电压调节（如直流电机调速），但大触发角又导致功率因数严重恶化，增加了电网的无功负担和线路损耗。解决这一矛盾的现代方案是采用PWM整流技术（如有源前端AFE），它能在宽调压范围内保持高功率因数和低谐波。然而，晶闸管整流凭借其简单可靠、成本低廉的优势，在对功率因数要求不严格的场合仍有广泛应用。

实际工程中的方案为：在需要宽范围调压的系统中，采用“晶闸管整流+DC-DC变换”的两级结构，晶闸管级工作在小触发角（保持高功率因数），调压功能由DC-DC级实现。这种方案综合了晶闸管的可靠性和DC-DC变换器的高性能，体现了电力电子系统设计的系统思维。

东南大学自动化学院

《电机与电力电子》非仿真作业

作业名称：晶闸管整流电路例题求解

作业次数：第8次

姓 名： 张韫译萱 学 号：08023214

作业完成时间： 2025 年 11 月 6 日

一、作业要求

结合课本上面的例 1.4，改变有关数据，照着例题重新计算一遍；结合结果，试着画出有关的电路图和波形。

二、回答或解答问题

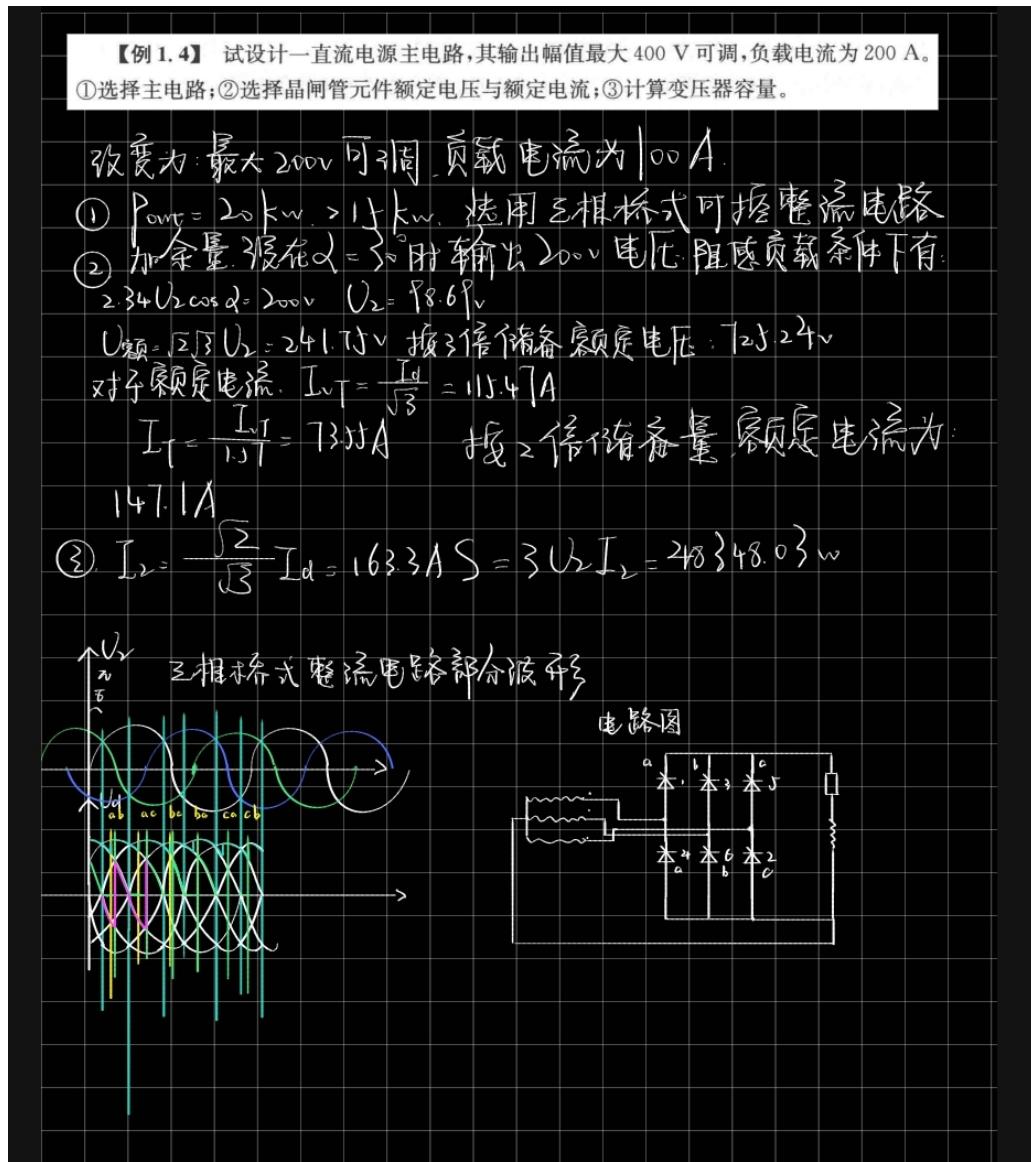


图 12: 修改数据后的解答过程和波形