

# 掩膜电解电源频率分析及整流建模仿真

陈朝大<sup>1,2</sup>, 郭钟宇<sup>1</sup>, 温亮<sup>1</sup>, 陈晓磊<sup>1</sup>, 邓宇<sup>1</sup>

(1. 广东工业大学 机电工程学院, 广州 510006;

2. 广东农工商职业技术学院 智能工程学院, 广州 510507)

**摘要:** 通过掩膜电解加工方法对生物表面微织构进行研究, 针对特殊工艺的需要, 设计了一种高频高压脉冲电源; 分析了开关器件的特点, 在综合考虑功率、开关速度等因素情况下, 对工作频率及波形失真进行了推导; 采用 IGBT 作为开关器件, 利用三相桥式全控整流电路, 把工频交流电整形为波动平滑的直流电; 在 Matlab/SimPowerSystems 环境中构建了电源模型并进行了仿真, 仿真结果表明, 各节点的实验波形符合预期。

**关键词:** 掩膜电解加工; 频率分析; 整流仿真

## Frequency Analysis and Rectifier Modeling Simulation of Mask Electrolysis Power Supply

Chen Chaoda<sup>1,2</sup>, Guo Zhongning<sup>1</sup>, Wen Liang<sup>1</sup>, Chen Xiaolei<sup>1</sup>, Deng Yu<sup>1</sup>

(1. School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. College of Intelligent Engineering, Guangdong AIB Polytechnic College, Guangzhou 510507, China)

**Abstract:** The micro texture of the surface was studied by the mask electrolysis process. A high frequency and high voltage pulse power supply was designed for the special process. In this paper, the characteristics of the switching device are analyzed, and the working frequency and waveform distortion are deduced by considering the power, switching speed and other factors. IGBT is used as the switching device, and the three-phase AC bridge rectifier circuit is used to convert the AC current into a smooth DC current. In the Matlab/SimPowerSystems environment, the power model is built and simulated. The simulation results show that the experimental waveform of each node is in line with expectations.

**Keywords:** mask electrochemical machining; frequency analysis; rectifier simulation

## 0 引言

表面织构是指在物体表面具有一定尺寸和分布的凹坑、凹痕或凸包等图案的点阵, 具有微纳米尺度表面织构的非光滑表面在表面能、密封特性、机械特性、热学特性、流体动力学特性等方面与具有光滑表面表现出截然不同的特点, 在生物、工业、医学、航空、军事等领域具有广阔的前景。掩膜电解加工技术, 一次可加工多个微小凹坑凹痕或凸包, 加工过程工具基本没有损耗, 而且避开了微细喷嘴难制造难定位, 是表面微织构加工的新思路新方法。加工效果与电源的电压、电流、频率、占空比等参数密切相关, 鉴于工艺的特殊性, 需要设计一款高压脉冲电源来满足加工的要求<sup>[1-3]</sup>。

本课题来源于国家自然科学基金项目, 分析开关器件的特点并对工作频率进行推导, 通过 Matlab/SimPowerSystems 环境构建了三相桥式全控整流电路模型, 并进行了仿真分析。

收稿日期: 2018-03-22; 修回日期: 2018-04-25。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51575113)。

作者简介: 陈朝大(1979-), 男, 广东东莞人, 博士生, 副教授, 主要从事精密装备制造与测控技术、脉冲电源与运动控制方向的研究。

## 1 开关器件及频率分析

### 1.1 开关器件的分析

可以直接用于处理电能、实现电能转换或控制的电子设备称为电力电子设备。电力电子设备通常工作在开关状态。当设备开时阻抗非常小, 管的压降接近于零, 接近短路, 电流由外部电路决定。当设备关时阻抗非常大, 电流几乎为零, 接近断路, 设备两端的电压由外部电路决定。

按照电力电子器件能够被控制电路信号所控制的程度, 可分为三种类型: 不可控器件(整流二极管、电力二极管); 半控型器件(晶闸管及其大部分派生器件); 全控型器件(GTO、GTR、MOSFET、IGBT)。主要电力电子器件的特性及其应用领域如表 1 所示。

从表 1 可知: 晶闸管所能承受的电压和电流是所有器件中最高的, 工作可靠, 价格便宜, 但开关频率较低; MOSFET 的开关速度是所有器件中最高的, 可达 200 kHz, 可高频工作, 而且不存在二次击穿问题; IGBT 的开关频率可达到 100 kHz, 高电压大电流, 成为中、大功率电力电子设备的主导器件。

### 1.2 工作频率及波形失真

绝缘栅双极型晶体管 IGBT 是三端器件, 具有门(栅)

表 1 器件特性及应用领域

器件种类	器件特性	应用领域
电力二极管	5kV/3kA—400Hz	各种整流装置
晶闸管	6kV/6kA—400Hz 8kV/3.5kA—光控 SCR	炼钢厂、直流输电、电解用整流器
MOSFET	600V/70A 工作频率 200kHz	开关电源、小功率逆变器、小功率 UPS
IGBT	1200V/200A 工作频率 100kHz	开关电源、各种整流/逆变器、中压变频器

极 G、集电极 C 和发射极 E, 电气符号及等效电路如图 1 所示。

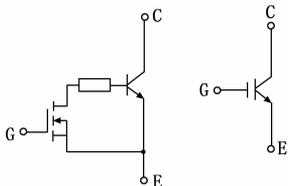


图 1 IGBT 等效电路和电气符号图

IGBT 是场控器件, 其开通和关断由门射极电压  $U_{GE}$  决定。当  $U_{GE} > U_T$  (开启电压) 时, Power MOSFET 内部形成沟道, 并为晶体管提供基极电流, 使 IGBT 导通; 当门射极间施加反压或不加信号时, Power MOSFET 内的沟道消失, 晶体管的基极电流被切断, 使得 IGBT 关断; 当  $U_{GE} < 0$  时, J1 结反向偏置, 器件呈反向关断状态。IGBT 的动态特性包括开通过程和关断过程两个方面<sup>[4-5]</sup>。

IGBT 的开通时间  $t_{on}$  为开通延迟时间  $t_{d(on)}$  与电流上升时间  $t_r$  之和, 即:

$$t_{on} = t_{d(on)} + t_r \quad (1)$$

IGBT 的关断时间为关断延迟时间与电流下降时间之和, 即:

$$t_{off} = t_{d(off)} + t_{f1} + t_{f2} \quad (2)$$

可以看出, 由于 IGBT 中双极型 PNP 晶体管的存在, 虽然带来了电导调制效应的好处, 但也引入了少子储存现象, 因而 IGBT 的开关速度要低于 MOSFET。IGBT 开关损耗和频率成正比, 随着频率的升高, IGBT 的开关损耗会骤增。IGBT 开关频率大小的确定需要考虑工作电路噪声大小、IGBT 的功耗包括开通和关断、温升情况、开关管的电压电流尖峰、驱动波形的干扰情况 (主要由于米勒效应引起) 等。IGBT 的工作频率是 100 kHz, 实际上只用到 65 kHz 左右, 再考虑控制器触发 IGBT 的开通关断延时、高频发热等因素, 实际工作频率是 40 kHz 左右, 频率和占空比的分析过程如下:

IGBT 开通时间约为 100 ns, 关断时间约为 200 ns。

$$t_{on} = 110 \text{ ns} = 0.1 \mu\text{s}$$

$$t_{off} = 200 \text{ ns} = 0.2 \mu\text{s}$$

工作频率  $f=40 \text{ kHz}$ , 周期  $T=1/f=25 \mu\text{s}$ 。

占空比为 10%: 脉冲宽度  $t$  为 2.5  $\mu\text{s}$ , 周期  $T$  为 25  $\mu\text{s}$ 。

$$\frac{t_{on} + t_{off}}{t} \times 100\% = \frac{0.1 + 0.2}{2.5} \times 100\% = 12\% > 5\%$$

同理, 可得占空比和波形失真度的关系 ( $f=40 \text{ kHz}$ ) 如表 2 所表示。

表 2 占空比和波形失真度的关系 ( $f=40 \text{ kHz}$ ) %

占空比	5	10	20	30	40	50
波形失真度	24	12	6	4	3	2.4

同理, 可得占空比和波形失真度的关系 ( $f=30 \text{ kHz}$ ) 如表 3 所表示。

表 3 占空比和波形失真度的关系 ( $f=30 \text{ kHz}$ ) %

占空比	5	10	20	30	40	50
波形失真度	18	9	4.5	3	2.25	1.8

同理, 可得占空比和波形失真度的关系 ( $f=20 \text{ kHz}$ ) 如表 4 所表示。

表 4 占空比和波形失真度的关系 ( $f=20 \text{ kHz}$ ) %

占空比	5	10	20	30	40	50
波形失真度	12	6	3	2	1.5	1.2

由表 2、表 3、表 4 可得占空比和波形失真度关系图如图 2 所示。

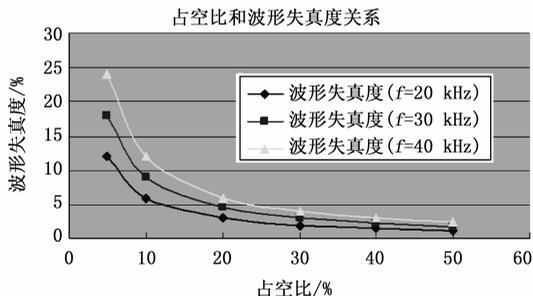


图 2 占空比和波形失真度关系图

从图 2 可知: 工作频率越高, 波形失真度越大, 输出方波变形越严重; 占空比越大, 波形失真度越小, 输出方波更规整。另外, 输出方波的高电平持续时间需要是开通时间和关断时间的和的 20~50 倍 (6~15  $\mu\text{s}$ ), 波形才得稳定。

## 2 电源整流 SimPowerSystems 建模仿真

### 2.1 单相桥式整流仿真

单相桥式全控整流电路的工作原理: 晶闸管  $T_1$  和  $T_2$  组成一对桥臂,  $T_3$  和  $T_4$  组成另一对桥臂。当交流电压  $u_2$  进入正半周期时, a 端电位高于 b 端电位, 两个晶闸管  $T_1$  和  $T_2$  同时承受正向电压, 如果此时门极无触发信号  $u_g$ , 则两个晶闸管处于正相阻断状态, 电源电压  $u_2$  将全部加在  $T_1$  和  $T_2$  上。在  $\omega t = \alpha$  时刻, 给  $T_1$  和  $T_2$  同时加触发脉冲, 则两个晶闸管立即触发导通。当电流过零时,  $T_1$  和  $T_2$  关断。在交流电源的正、负半周里,  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$ 、 $T_4$  两组晶闸管轮流触发导通, 触发脉冲在相位上应相差  $180^\circ$ , 可将交流电变成脉动直流电。改变触发脉冲出现的时刻, 即改变  $\alpha$  的大小,  $u_d$ 、 $i_d$  的波形和平均值随之改变<sup>[6-8]</sup>。

由于负载在两个半波中都有电流流过，形成全波整流。从整流变压器副边绕组来看，两个半波电流方向相反，大小相等；因而变压器副边没有直流磁化问题，变压器的利用率比较高。单相桥式全控整流电路带电阻性负载时，晶闸管承受的最高正向阳极电压为  $\frac{\sqrt{2}U_2}{2}$ ，最高反向阳极电压为  $\sqrt{2}U_2$ 。

整流输出电压的平均值如式 (3) 所示：

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2} = 0.9U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (3)$$

即  $\cos \alpha = 180^\circ$  时， $U_{d-\min} = 0.45U_2$ ；当  $\cos \alpha = 0^\circ$  时， $U_{d-\max} = 0.9U_2$

单相桥式全控整流电路带电阻性负载时，移相范围  $\alpha = 0^\circ \sim 180^\circ$ 。由式 (3) 可得，当  $\alpha = 0^\circ$  时，晶闸管全部导通，相当于不可控整流，此时输出电压为最大值  $U_{d-\max}$ 。

整流输出电压的有效值如公式 (4) 所示：

$$U = U_2 \sqrt{\frac{\sin 2\alpha}{2\pi} + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} \quad (4)$$

把  $U_2 = 220 \text{ V}$ ， $\alpha = 0^\circ$  代入公式 (3)、(4)，可得输出电压最大值  $U_{d-\max} = 198 \text{ V}$ ，整流输出电压的有效值  $U = 220 \text{ V}$ 。

根据以上分析，构建单相桥式全控仿真电路。交流电压源模块设置为幅值  $220 \times \sqrt{2}$ ，频率为  $50 \text{ Hz}$ 。在 Elements 元件库中选择 RLC 串联支路模块，在 PowerElectronics 元件库中选择 UniversalBridge 模块，设置桥臂数为 2，器件类型为晶闸管，构成主电路设计部分。

在 Sources 库中选择两个 Pulse Generator 模块。幅值设为 1，周期设为  $0.02 \text{ s}$ ，即频率为  $50 \text{ Hz}$ ，占空比设置为  $10\%$ 。若触发角为  $\alpha$ ，则两个模块分别设置为  $\alpha \times 0.02/360$  和  $(\alpha + 180) \times 0.02/360$ 。第 1 个 Pulse Generator 模块的输出为晶闸管  $T_1$  和  $T_2$  的门极驱动脉冲，第 2 个 Pulse Generator 模块的输出为晶闸管  $T_3$  和  $T_4$  的门极驱动脉冲，第 2 个比第 1 个滞后  $\pi$ ，即相位相差  $180^\circ$ ，完成控制电路设计部分。

串联 RLC 支路 (Branch) 中的电阻设置为  $R = 10 \ \Omega$ ，去掉电感和电容，即  $H$  设置为 0， $F$  设置为 inf (无穷大)。仿真时间设为  $0.1 \text{ s}$ ，选择 ode23tb 仿真算法，最大步长设为  $1e-5$ 。使用 MeanValue 模块，把基波频率设为  $50 \text{ Hz}$ ，完成波形观察及分析，测量输出的平均值。设触发角为  $\alpha = 0^\circ$ ； $\alpha = 03^\circ$ ； $\alpha = 60^\circ$ ； $\alpha = 90^\circ$ ，用 SimPowerSystems 仿真如图 3 所示。

由图 3 (a) 可知，触发角为 0 时电压平均值  $195 \text{ V}$ ，而公式 (3) 计算值为  $198 \text{ V}$ ，仿真符合理论预期。由图 3 可得：峰值电压均为  $311 \text{ V}$ 。直流电压平均值和触发角有关，触发角越小，平均值越大。阻性负载，电压和电流成比例，波形一致。

### 2.2 三相桥式整流的计算及仿真

三相桥式整流电路由两组三相半波整流电路组成，其

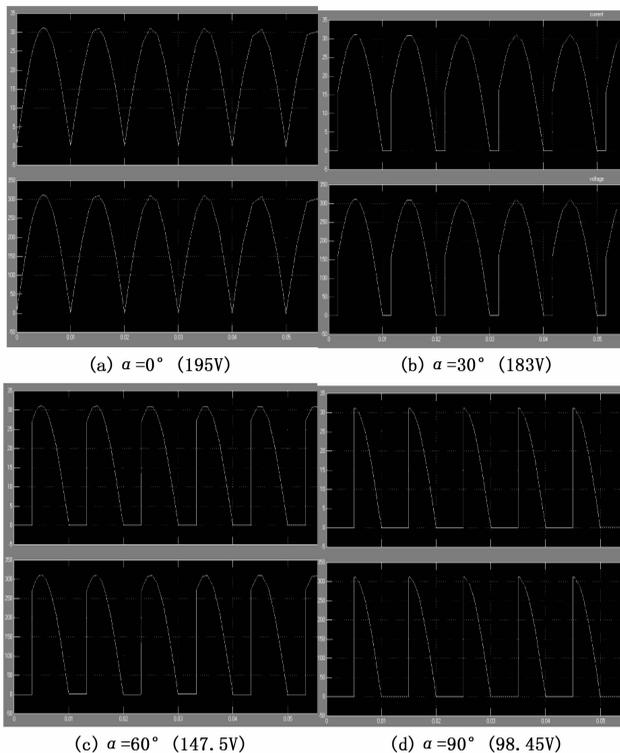


图 3 单相整流仿真图

中一个为共阴极连接，另一个为共用阳极连接。如果工作条件相同，则负载电流为  $I_{d1} = I_{d2}$ 。电流通过零点的平均值为  $I_0 = I_{d1} - I_{d2} = 0$ 。如果在不影响线路运行的情况下切断零线，则成为三相桥全控制整流电路。

三相全波整流桥由 6 个连接到桥整流电路的整流二极管封装，形成一个桥式全波整流电路。在输出波形中， $N$  相直线虚线是经过整流和滤波后的平均输出电压。点线以上的小脉动波和每个正弦波的交点是经过整流后未滤波的输出电压波形。

选择整流桥的关键依据是整流桥二极管的最大耐压值和最大额定电流值。结合工程需要实际设计计算如下：

#### (1) 三相整流桥的耐压值

整流桥的峰值电压按照下列公式计算：

$$U_{\max} = \sqrt{2}(1 + \alpha)U_i = 591 \text{ V}$$

$$U_{\min} = \sqrt{2}(1 - \alpha)U_i = 483 \text{ V}$$

式中， $\alpha$  为电网电压波动，取  $10\%$ ； $U_i$  为三相交流电压输入值，即  $380 \text{ V}$  代入公式计算可得， $U_{\max} = 591 \text{ V}$ ， $U_{\min} = 483 \text{ V}$ 。取最大值电压的 2.5 倍裕量，则耐压值为  $1478 \text{ V}$ ，取  $1600 \text{ V}$ 。

#### (2) 三相整流桥的额定电流值

整流桥流经的最大电流计算如下：

$$I_{\max} = \frac{(1 + a)P_{\text{omax}}}{\sqrt{3}\eta U_i}$$

本次工程设计要求输出电压为  $500 \text{ V}$ ，输出电流为  $20 \text{ A}$ ，则输出功率为：

$$P_o = U_{o-max} \times I_{o-max} = 500 \text{ V} \times 20 \text{ A} = 10000 \text{ W} = 10 \text{ kW}$$

式中,  $P_{o-max}$  为最大输出功率, 取 1.2 倍额定功率, 为 12 kW;  $\eta$  为电源效率, 取 0.9; 代入公式计算可得:

$$I_{max} = \frac{(1+a)P_{o-max}}{\sqrt{3}\eta U_i} = \frac{(1+10\%) \times 1.2 \times 10 \text{ kW}}{\sqrt{3} \times 0.9 \times 380} = 22.28 \text{ A}$$

取最大电流的 3 倍裕量, 则最大额定电流值为 67 A, 取 100 A。

综合最高耐压值和最大额定电流, 选择 100 A/1600 V 的三相整流桥, 选择 ASEMI 公司的三相整流模块 MDS100-16, 实物和原理如图 4 所示。

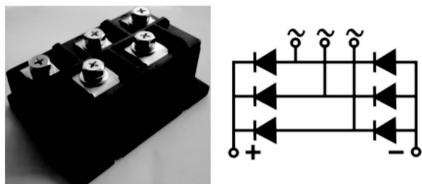


图 4 三相整流模块实物和原理图

MDS100-16 模块由 6 种超高速回收二极管芯片和一种高功率高压晶闸管芯片组成, 该芯片在某一电路中连接后封装在 PPS 外壳中。由于电路的连接已在模块内完成, 所以元件之间的连接被缩短, 优化布线和对称结构的设计实现。<sup>[9]</sup> 结合整流桥堆参数及结构特点, 根据以上理论计算选择的 MDS100-16 模块, 满足工程实际。

3 个由阴极连接的晶闸管叫共阴极管, 3 个由阳极连接的晶闸管叫共阳极管。传导序列为 VT1-VT2-VT3-VT4-VT5-VT6。在自然换向过程中, 每个时刻的两个晶闸管对应于阳极上的最高交流电压值和阴极的最低交流电压。<sup>[10]</sup>

整流输出  $i_d$  连续情况 (即电阻性负载  $\alpha \leq 60^\circ$ ), 整流输出电压  $u_d$  的平均值为:

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\pi+\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{6}U_2 \sin\omega t d(\omega t) = 2.34U_2 \cos\alpha \quad (5)$$

当  $\cos\alpha = 60^\circ$  时,  $U_{d-min} = 1.17 U_2 = 1.17 \times 220 = 257 \text{ V}$

当  $\cos\alpha = 0^\circ$  时,  $U_{d-max} = 2.34 U_2 = 2.34 \times 220 = 514 \text{ V}$

整流输出  $i_d$  断续情况 (即电阻性负载  $60^\circ < \alpha < 120^\circ$ ), 整流输出电压  $u_d$  的平均值为:

$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_{\pi+\alpha}^{\pi} \sqrt{6}U_2 \sin\omega t d(\omega t) = 2.34U_2 [1 + \cos(\frac{\pi}{3} + \alpha)] \quad (6)$$

即三相桥式全控整流电路带电阻性负载时, 移相范围  $\alpha = 0^\circ \sim 120^\circ$ 。

三相桥式全控制整流器同时具有两个晶闸管, 同时形成电路, 其中共阴极管和共阳极管各为 1 个, 不可能是同一相位装置。触发脉冲的顺序为 T1-T2-T3-T4-T5-T6, 相位差为  $60^\circ$ 。上、下两桥臂脉冲的差值在相同相位下为  $180^\circ$ 。

根据以上分析, 构建三相桥式全控仿真电路。交流电压模块的 phase-rms 设置为 380 V, 频率为 50

Hz, 内部连接采用 Yg 结构。在 Elements 元件库中选择 RLC 串联支路模块, 在 PowerElectronics 元件库中选择 UniversalBridge 模块, 设置桥臂数为 3, 电力电子器件为晶闸管, 构成主电路设计部分。在 Extras 库中选择 Synchronized 6-Pulse Generator 模块产生六路触发脉冲, 频率设置为 50 Hz, 脉冲宽度为 10。alpha\_deg 是脉冲触发角度, 控制整流输出电压大小, 完成控制电路设计部分。

串联 RLC 支路 (Branch) 中的电阻设置为  $R = 20\Omega$ , 去掉电感和电容, 即 H 设置为 0, F 设置为 inf (无穷大)。仿真时间设为 0.1 S, 选择 ode23tb 仿真算法, 最大步长设为  $1e-5$ 。使用 MeanValue 模块, 把基波频率设为 50 Hz, 完成波形观察及分析, 测量输出的平均值。设置触发角为  $\alpha = 0^\circ$ ;  $\alpha = 30^\circ$ ;  $\alpha = 60^\circ$ ;  $\alpha = 90^\circ$ , 用 SimPowerSystems 仿真如图 5 所示。

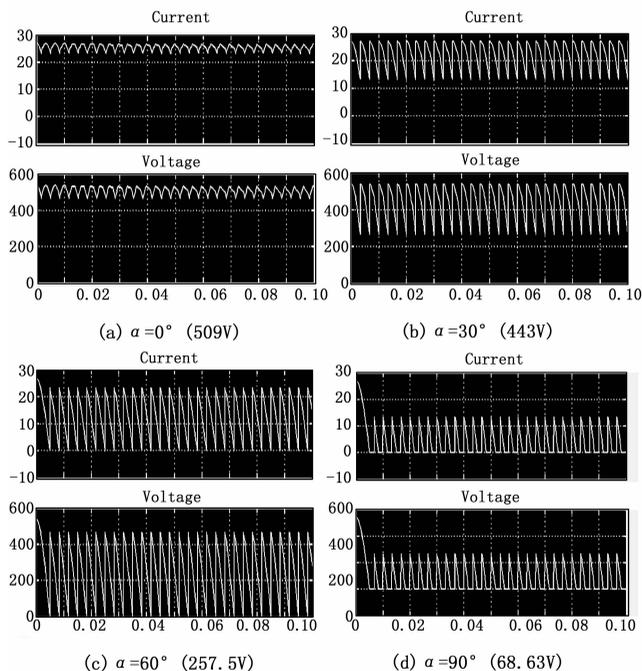


图 5 三相整流仿真图

由图 5 (a) 可知, 触发角为 0 时电压平均值 509 V, 而公式 (5) 计算值为 514 V; 由图 5 (b) 可知, 触发角为 30 时电压平均值 443 V, 而公式 (5) 计算值为 446 V; 由图 5 (c) 可知, 触发角为 60 时电压平均值 257.5 V, 而公式 (5) 计算值为 257 V; 由图 5 (d) 可知, 触发角为 90 时电压平均值 68.63 V, 而公式 (5) 计算值为 69 V; 仿真结果符合理论预期。

由图 5 可得: 当  $\alpha \leq 60^\circ$  时,  $u_d$  波形均为连续的; 对于电阻负载,  $i_d$  波形与  $u_d$  波形形状一样; 当  $\alpha > 60^\circ$  时,  $u_d$  波形每  $60^\circ$  中有一段为零; 一旦  $u_d$  为零, 则  $i_d$  也降为零, 流过晶闸管的电流即降为零, 晶闸管关断; 直流电压一周期 (0.02 s) 脉动 6 次, 每次脉动的波形都一样, 故该电路为 6 脉波整流电路。