

第3章

电力电子有源逆变仿真



在电力电子技术中,把交流电转换成直流电称为整流,而把直流电转换成交流电称为逆变。逆变又分为有源逆变和无源逆变两类。所谓有源逆变,交流侧是供电电源,供电电源与交流电网相连,将直流电逆变成与交流电网同频率的交流电输送给电网,例如可控整流电路供给直流电动机负载,当电动机处于制动或发电状态,则这种逆变称为有源逆变。而无源逆变是指交流侧是具体的用电设备,逆变输出的交流电与电网无联系,交流电仅供给具体用电设备,则这种逆变称为无源逆变。全控整流电路既能工作在整流方式,又能工作在有源逆变方式,即电路在一定条件下,电能从交流转换成直流,在另外条件下,电能又可以从直流转换成交流,本章讨论有源逆变的仿真。

由于晶闸管只能单向导电,无论变流器运行在整流状态还是逆变状态,其电路的电流方向是不可能改变的,要使负载侧反过来通过变流器向交流电源供电而且电流流向保持不变,则在负载侧必须存在一个直流电源,这个电源可以是电池,也可以是直流发电机或直流电动机工作在发电机状态或制动状态,这个电源的极性与整流电压极性相反,这样,欲使负载中直流电源的能量返回到交流电源中,就要求变流器能产生一个与原整流电压极性相反的电压,称为逆变电压,且

$$U_{d\beta} < E \quad (3-1)$$

$U_{d\beta}$ 为逆变电压的平均值,由于希望在能量交换中能量损失尽可能小,因此回路的电阻 R 均较小,这样 $U_{d\beta}$ 较接近于 E 。

通过以上分析,可知有源逆变产生的条件为负载存在一个直流电源 E ,由它提供能量,其电动势与变流器的整流电压相反,对晶闸管为正向偏置电压;变流器在其直流侧输出应有一个与原整流电压极性相反的逆变电压 $U_{d\beta}$,其平均值 $U_{d\beta} < E$,以吸收能量,并将其能量返回给交流电源。

3.1 三相半波可控整流电路接电动势负载仿真

三相半波可控整流电路接电动势负载的仿真模型如图 3-1 所示。

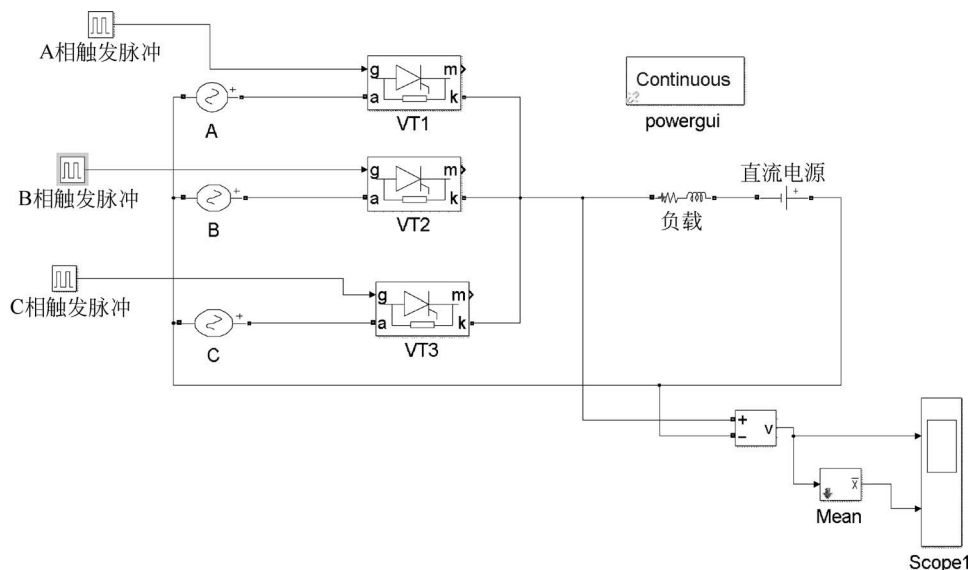


图 3-1 半波可控整流电路接电动势负载仿真模型

1. 主电路建模和参数设置

主电路主要由交流电源、3个单独晶闸管、阻感性负载和直流电源组成,交流电源 A 参数设置为:峰值电压为 220V,相位为 0° ,频率为 50Hz。其他两相 B、C 除了相位相差 120° 外,其余参数设置与 A 相相同。晶闸管的参数为默认值。

阻感性负载参数设置:电阻为 10Ω ,电感为 1H,直流电源模块为 DC Voltage Source,其参数设置为 150V,注意其电源极性是左负右正。

2. 三相半波可控整流电路控制电路的仿真模型

三相半波可控整流电路控制电路的仿真模型主要由 3 个脉冲触发器组成,Pulse Generator 分别通向 VT1、VT2、VT3 三只晶闸管,参数设置:峰值为 1,周期为 0.02s,脉冲宽度为 10,相位延迟时间由触发延迟角决定,如表 2-3 所示。

仿真算法采用 ode15s,仿真时间为 5s。

仿真结果如图 3-2 所示。

从仿真结果可以看出,当触发延迟角为 $\alpha = 30^\circ$ 时,晶闸管输出电压与式(2-32)相同,其平均电压值为 157.64V,整流电路输出电压为

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha = E + I_d R \quad (3-2)$$

U_{d0} 为 $\alpha = 0^\circ$ 电路的最大输出平均值。为了求出 U_{d0} ,对 $\alpha = 0^\circ$ 进行仿真,得到 $U_{d0} = 181\text{V}$,又 $\alpha = 30^\circ$,根据式(3-2)得到 $U_d = 156\text{V}$,与图 3-2(a)仿真结果相同。

当触发延迟角分别为 $\alpha = 120^\circ$ 、 $\alpha = 150^\circ$ 时,晶闸管输出电压为电源负半周,由于存在一个与原来整流电压极性相反电源 E ,逆变将产生,平均电压值为

$$U_{d\beta} = U_{d0} \cos \alpha, \quad (90^\circ < \alpha < 180^\circ) \quad (3-3)$$

将 $U_{d0} = 181\text{V}$, $\alpha = 120^\circ$ 、 $\alpha = 150^\circ$ 代入式(3-3)分别得 $U_{d\beta} = -90.5\text{V}$ 、 $U_{d\beta} = -156.75\text{V}$ 。而从仿真结果[图 3-2(b)、图 3-2(c)]可以看出,当 $\alpha = 120^\circ$ 、 $\alpha = 150^\circ$ 时,逆变平均电压分别为 -92.1V 、 -156.5V ,二者基本吻合。



视频



上述仿真采用分立式脉冲,下面也可以用现成的模块 Universal Bridge 进行三相半波可控整流电路有源逆变仿真。仿真模型如图 3-3 所示。



负载参数保持不变,整流桥参数为默认值。仿真结果如图 3-4 所示。可以看出仿真结果和前面相同。

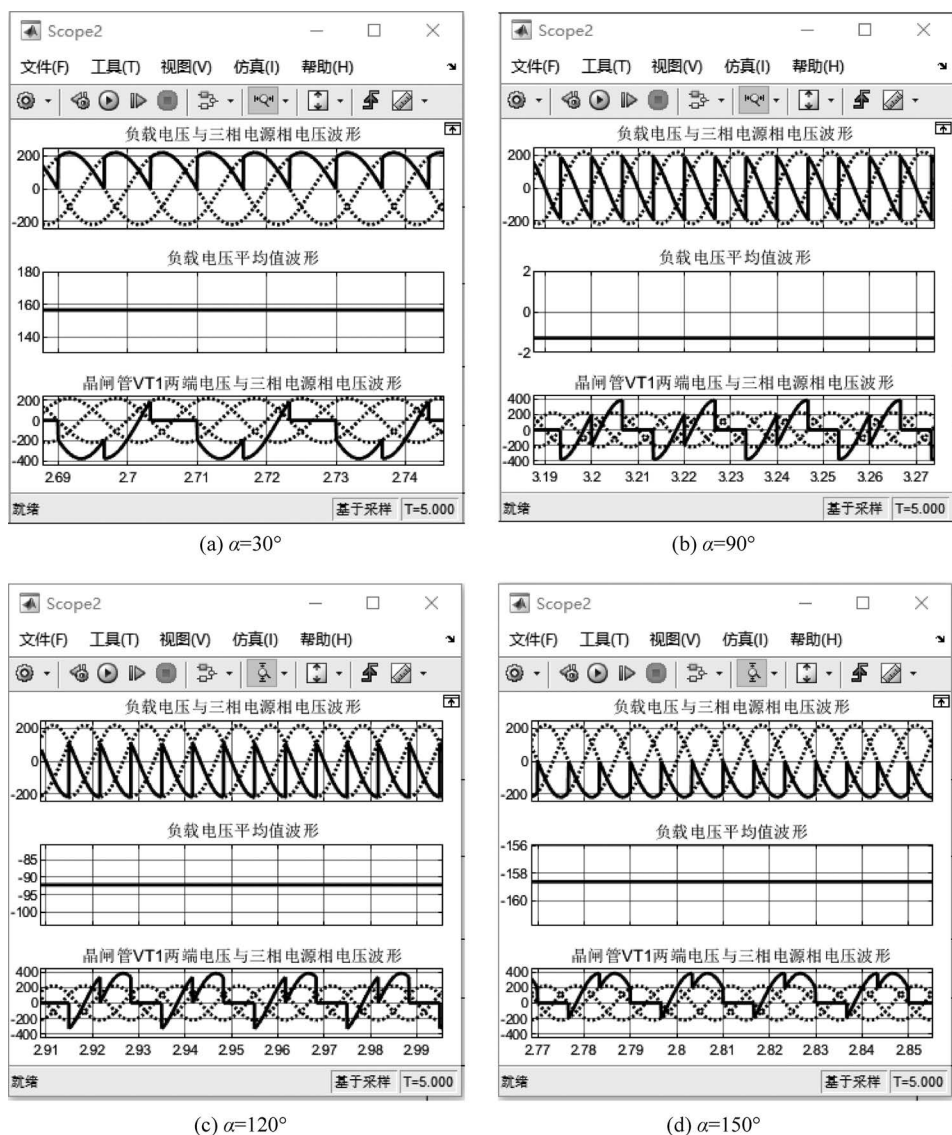


图 3-4 三相半波可控整流电路有源逆变仿真结果

3.2 考虑交流电源存在电感的有源逆变仿真

在前面分析整流电路时,没有考虑电源侧电感的影响,认为换相是瞬时完成的。实际的交流供电电源总存在电源阻抗,如电源变压器的漏电感、导线铜电阻以及为了限制短路电流加上交流进线电抗等,当存在电抗时,在电源相线中的电流不可能突变,换流时原来导通相电流衰减到零需要一段时间,而导通相电流的上升时间也需要一段时间,即电路的换流需要一段换流时间。由于交流侧的感抗比它的电阻大很多,为了突出感抗的影响,把电阻忽略。考虑交流电源存在时电感三相半波可控整流电路逆变仿真模型如

图 3-5 所示。



视频

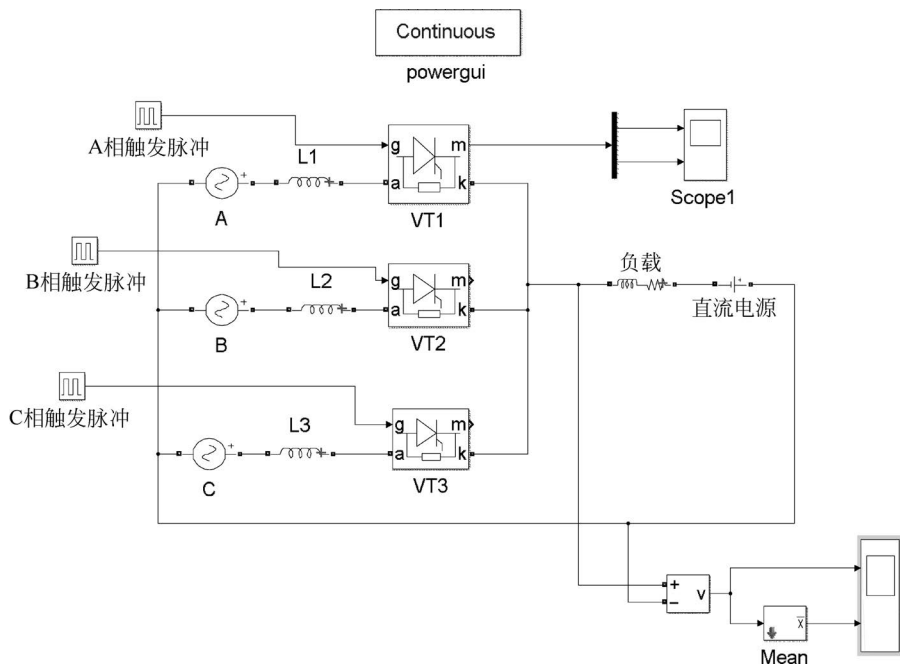


图 3-5 考虑交流电源存在时电感三相半波可控整流电路有源逆变仿真模型(1)

从图 3-5 可以看出,其仿真模型与图 3-1 基本相同,只不过在电源侧加了电感,电源侧电感取值为 0.01H ,阻感性负载电阻为 10Ω ,电感为 1H , $\alpha=120^\circ$,仿真算法采用 ode15s ,仿真时间为 1s 。

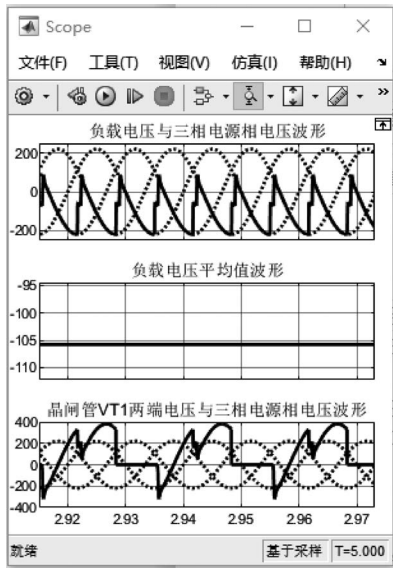


图 3-6 考虑交流电源存在时电感三相半波可控整流电路有源逆变仿真结果(1)

仿真结果如图 3-6 所示。

通过图 3-6 可以看出,当考虑电源侧存在电感时,其输出的瞬时电压存在换流重叠角现象。

现把 X 轴放大,可以看出换流重叠角为 $\lambda = 0.0006\text{s}$,转换为 $\gamma = 10.8^\circ$,将 $\alpha = 120^\circ$ 、即 $\beta = 60^\circ$ 代入式(3-4),即

$$U_{d\beta\gamma} = \frac{-3\sqrt{6}}{4\pi} U_2 [\cos\beta + \cos(\beta - \gamma)] \quad (3-4)$$

可得 $U_{d\beta\gamma} = -105\text{V}$,而仿真结果为 $U_{d\beta\gamma} = -105\text{V}$,二者吻合。

用现成的模块 Universal Bridge 进行三相半波可控整流电路逆变仿真模型仿真。仿真模型如图 3-7 所示。整流桥参数为默认值,其他参数保持不变。

仿真结果如图 3-8 所示。

为了进一步观测交流电源存在时电感三相半波可控整流电路逆变仿真情况,现把负载换成直流电动机,观测晶闸管逆变时负载两端波形,电源侧电感

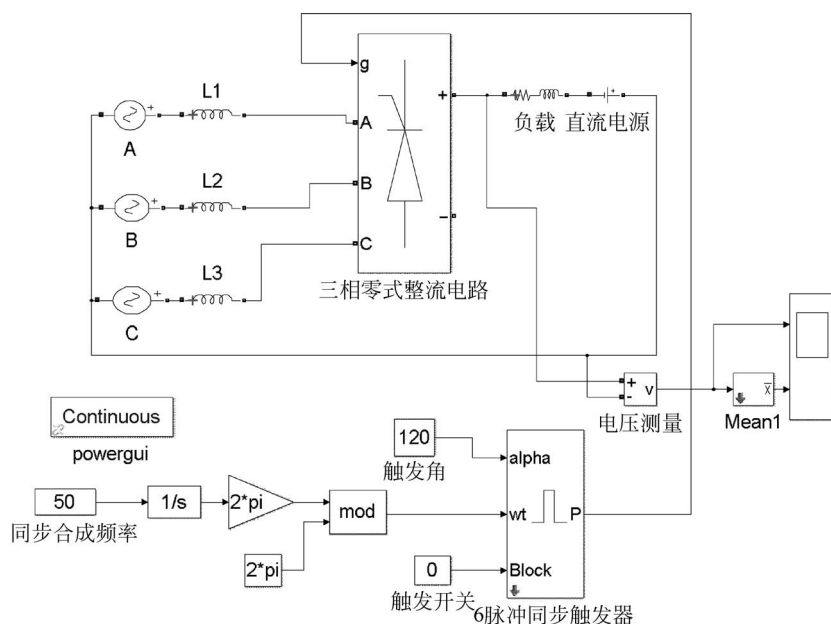


图 3-7 考虑交流电源存在时电感三相半波可控整流电路有源逆变仿真模型(2)

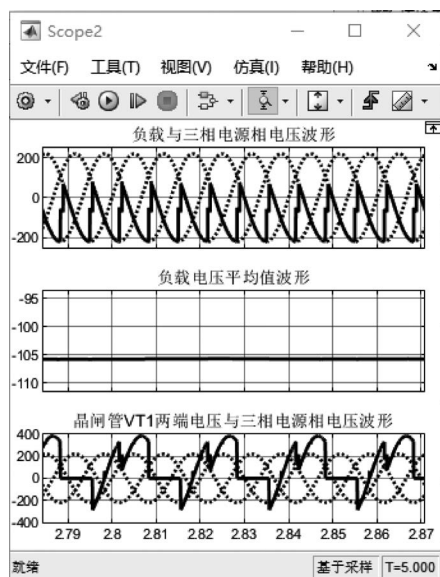


图 3-8 考虑交流电源存在时电感三相半波可控整流电路有源逆变仿真结果(2)

为 0.01H , 平波电抗器为 0.001H 。仿真模型如图 3-9 所示。

当 $\alpha=120^\circ$ 时, 为了模拟电动机处于制动状态, 把电动机参数中的 Initial speed 下面的文本框改为 -90 , 其他参数如图 3-10 所示。励磁直流电源为 220V 。仿真算法采用 ode15s, 仿真时间为 5s 。仿真结果如图 3-11 所示。

从仿真结果可以看出, 当电动机处于制动状态时, 电动机的转速由 -90 下降, 电动机的感应电动势 E 较大, 而且电源侧存在电感, 有换流重叠现象, 所以电流连续; 当转速较低时, 感应电动势较小, 只有在 E 大于电源电压时晶闸管才能导通, 从而电流断续。



视频

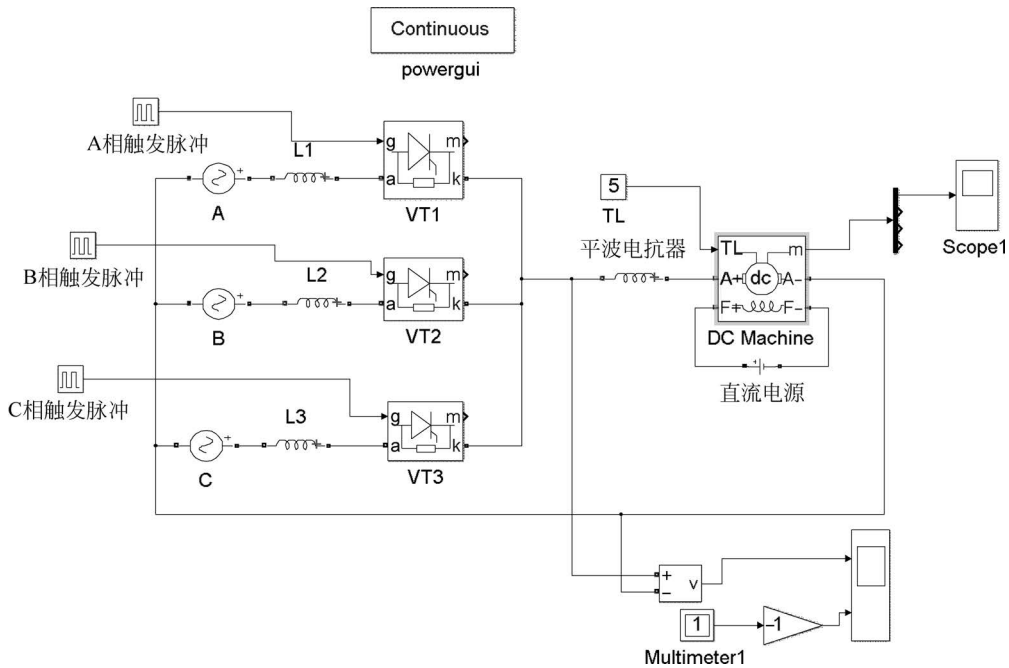


图 3-9 考虑交流电源存在时电感三相半波可控整流电路带电动机逆变仿真模型

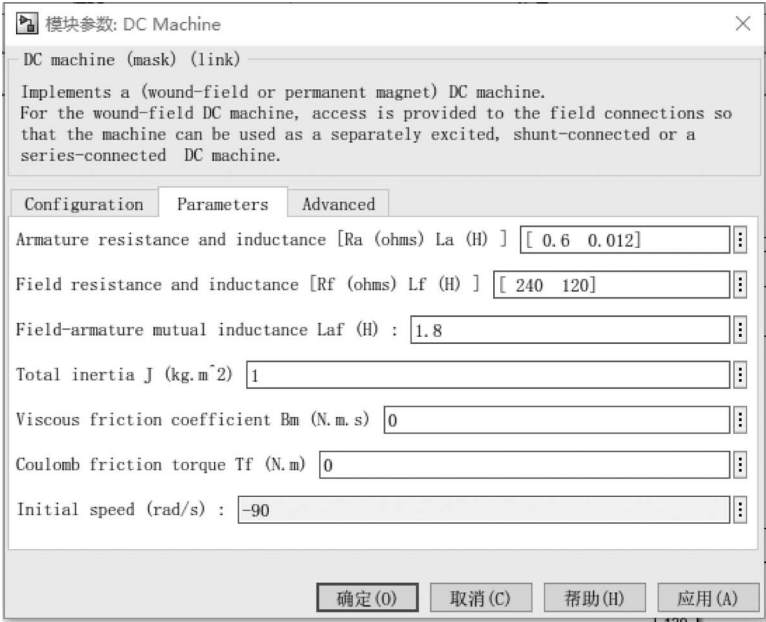


图 3-10 直流电动机模块参数

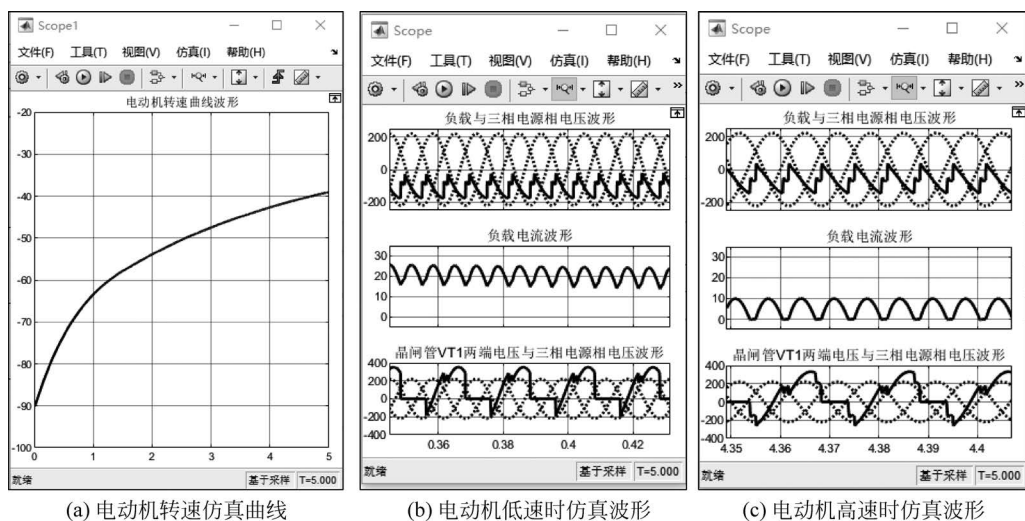


图 3-11 考虑交流电源存在时电感三相半波可控整流电路带电动机逆变仿真结果

3.3 三相全控桥式电路有源逆变工作状态仿真

前面已经说过,三相全控桥式整流电路,对于阻感性负载,当触发延迟角 $\alpha > 90^\circ$ 时,如果外接有感应电动势,整流电路就处于逆变状态。图 3-12 为三相全控桥式电路逆变工作状态的仿真模型。

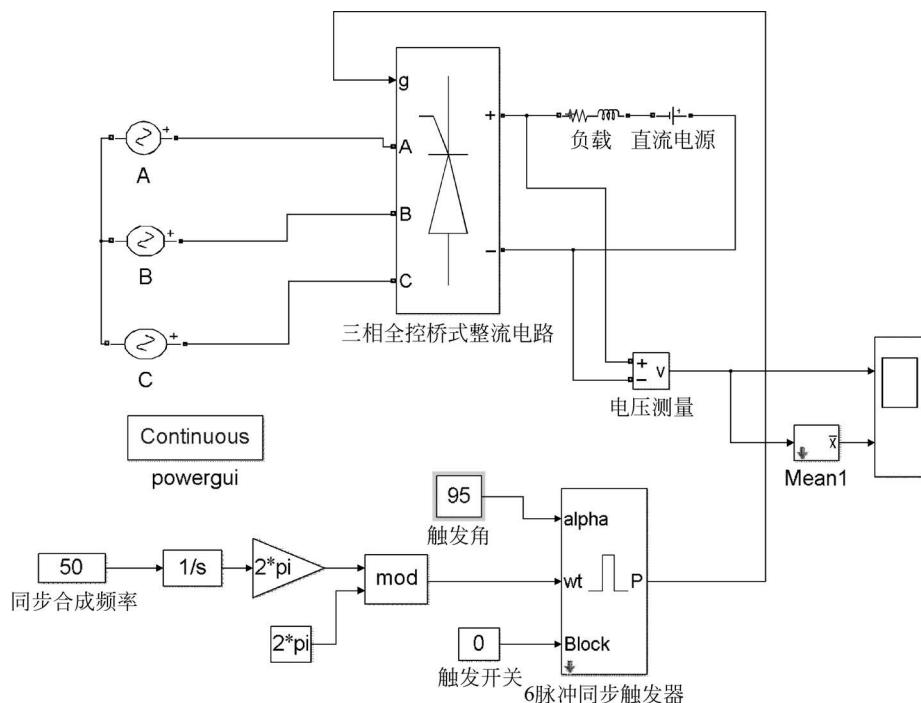


图 3-12 三相全控桥式电路逆变工作状态的仿真模型



视频

阻感性负载参数为: $R=10\Omega$, $L=1\text{H}$, 电动势为 500V , 注意电动势电源极性左负右正。
6 脉冲同步触发器采用双脉冲, 合成频率为 50Hz 。仿真结果如图 3-13 所示。

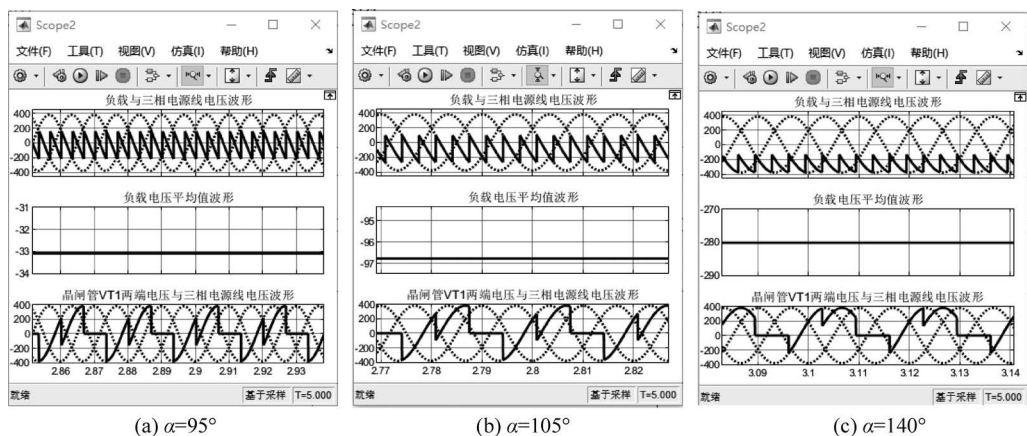


图 3-13 三相全控桥式电路逆变工作状态的仿真结果(1)

由于三相桥式电路是两个三相半波电路的组合, 当触发延迟角大于 90° , 且电动机从高速转向低速制动状态(或者直流电动机处于发电状态), 就会产生有源逆变。从仿真结果可以看出, 这时共阴组导通在负半周, 共阳组导通在正半波, 这是因为共阳组在整流工作时在交流电压的负半波工作, 整流输出的平均电压为负, 这样当它逆变时, 应产生一个与原整流电压极性相反的逆变电压, 故它的逆变电压应是正值; 另外, 由于共阳组在换流时最负相晶闸管导通, 所以它在正半波换流时由高电位向低电位换流。

对于三相全控桥式电路, 工作在逆变状态, 不考虑电源侧存在漏感情况下, 逆变平均电压为

$$U_{d\beta} = \frac{-3\sqrt{6}}{\pi} U_2 \cos\beta \quad (3-5)$$

现把 $\alpha = 95^\circ$, $\alpha = 105^\circ$, $\alpha = 140^\circ$, $U_2 = 155.587\text{V}$ 代入式(3-5)得 $U_d = -31.7\text{V}$ 、 $U_d = -94.2\text{V}$ 、 $U_d = -278.92\text{V}$ 。而仿真结果为 $U_d = -31.4\text{V}$ 、 $U_d = -95.1\text{V}$ 、 $U_d = -279\text{V}$, 二者基本吻合。

当 $\alpha > 180^\circ$ 以后, 从有源逆变电路看, 超前角为负值, 电路不能换流, 这就意味着交流电源将继续导通而进入正半波整流状态, 交流电源与负载侧直流电源同时提供电能, 相当于两个电源短路情况, 这种现象称为逆变颠覆。

现取 $\alpha = 200^\circ$, 负载参数保持不变。仿真结果如图 3-14 所示。

从仿真结果可以看出, 当 $\alpha > 180^\circ$ 时, 负载两端电压出现正值, 负载平均电压接近为零, 相当于两个电源短路。这是有源逆变状态的一种危险故障。

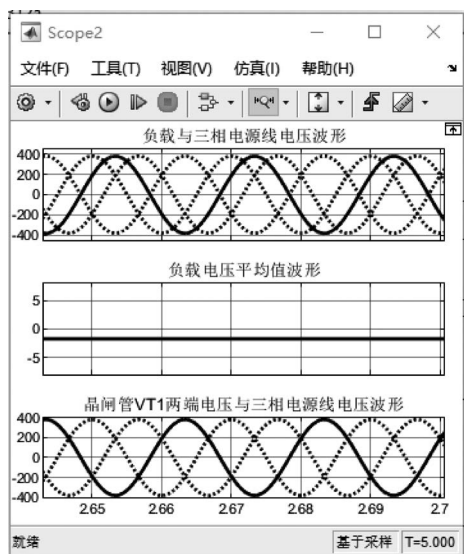


图 3-14 逆变颠覆

3.4 整流电路的电流畸变系数和有功功率测量的仿真

在可控整流电路中,送到整流电路的是正弦波交流电压,但流过负载的交流电流却不是正弦波,而且触发延迟角还影响其电流相对于电压的相位,因此在可控整流电路中,电流相对于电压的相位差,不仅与负载的性质有关,还与触发延迟角有关。由于电流波形不是正弦波,它除了基波分量外,还包含各次谐波,而有功功率只能由与电源电压同频率的正弦电流,即基波电流来产生,电流的高次谐波与电压不产生有功功率,当电流中含有谐波分量时,它的有效值就要比基波分量的有效值大。因此,在计算功率因数时,不能用含有谐波分量的电流有效值,必须用它的基波分量有效值。

电流的畸变系数与电流波形有关,而可控整流电路的电流波形又与负载的性质有关,现在以单相全控桥式整流电路来说明电流畸变系数和有功功率的仿真方法。仿真模型如图 3-15 所示。

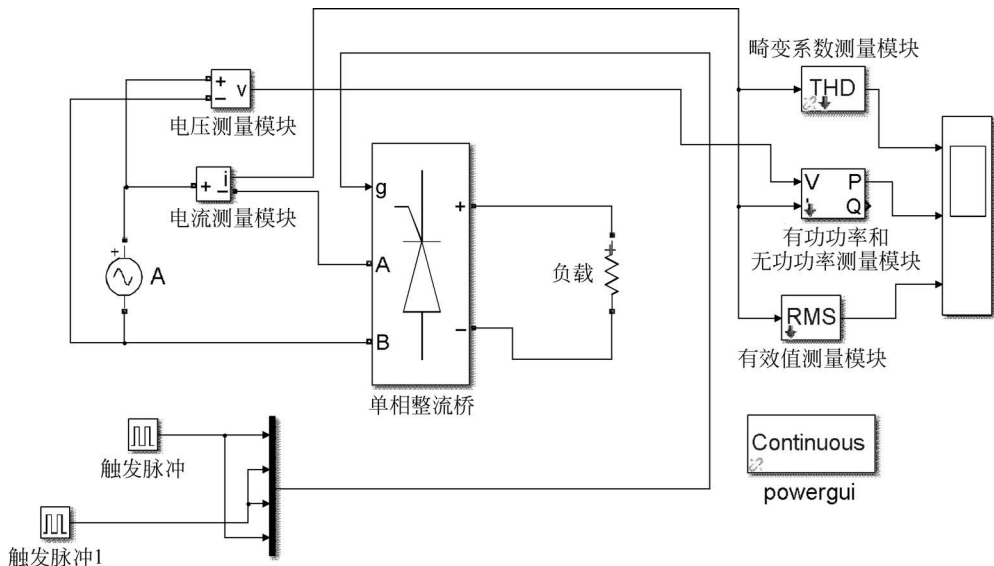


图 3-15 单相桥式整流电路仿真模型

本次仿真采用的电流畸变系数模块是经过改造的,前面已经详细讨论了畸变系数模块的改变的原因和方法,见图 1-40,有功功率的测量模块、畸变系数测量模块和有效值测量模块的参数设置:基频均为 50Hz。电阻为 100Ω。

对于单相全控桥式电阻负载, i_2 电流基波分量 i_{21} 的表达式为

$$i_{21}(\omega t) = \sqrt{\left(\frac{\sin^2 \alpha}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{2\pi}\right)^2} I_m \sin\left(\omega t + \arctan \frac{-2\sin^2 \alpha}{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}\right) \quad (3-6)$$

i_2 电流的有效值为

$$I_2 = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\sin 2\alpha}{2\pi} + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} \quad (3-7)$$

有功功率为



视频

$$P = U_2 I_{21} \cos \varphi_2 = S \lambda = U_2 I_2 \lambda = U_2 I_2 \frac{I_{21}}{I_2} \cos \varphi_2 \quad (3-8)$$

式中, $\frac{I_{21}}{I_2}$ 称为电流畸变系数。

利用式(3-6)、式(3-7), 可以计算出 $\alpha = 45^\circ$ 、 $\alpha = 90^\circ$ 、 $\alpha = 150^\circ$ 时的电流畸变系数 $\frac{I_{21}}{I_2}$ 分别为 0.97、0.84、0.50, 基波电流 i_{21} 滞后电源电压 u_2 的相位 φ_2 相应为 9.9° 、 32.5° 、 70° 。

根据式(2-16)可计算出对应的交流侧电流有效值 I_2 的大小, 分别为 1.47A、1.1A 和 0.264A。

则对应的有功功率分别为 $0.97 \times \cos 9.9 \times 155.587 \times I_2 = 218\text{W}$, $0.84 \times \cos 32.5 \times 155.587 \times I_2 = 121\text{W}$, $0.5 \times \cos 70 \times 155.587 \times I_2 = 7\text{W}$, 而仿真结果如图 3-16 所示, 可以看出仿真的正确性。

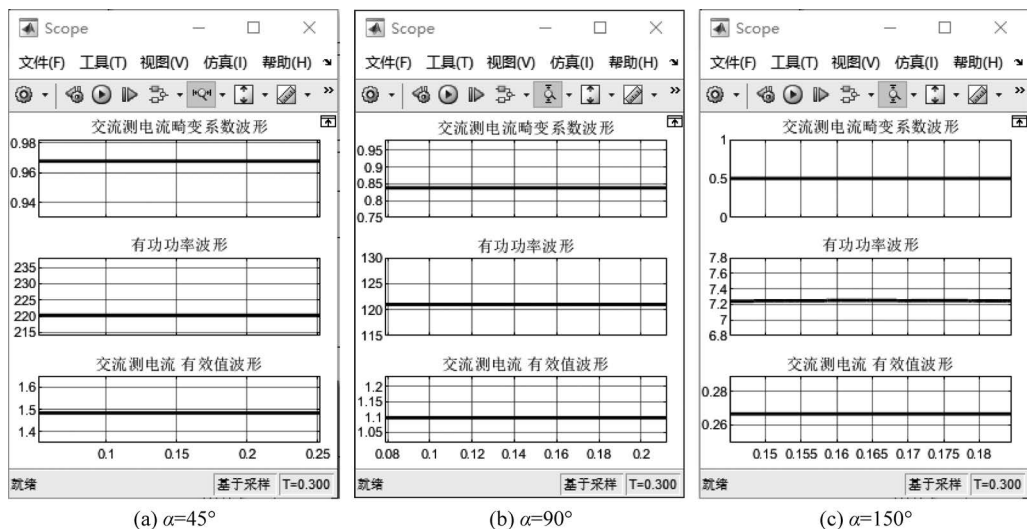


图 3-16 单相桥式整流电路仿真结果(1)

现把电阻负载改为阻感性负载, $R = 10\Omega$, $L = 10\text{H}$, 表现为大电感负载, 分别取 $\alpha = 30^\circ$ 、 $\alpha = 45^\circ$ 仿真时得到电流畸变系数的仿真结果如图 3-17 所示, 均为 0.9。

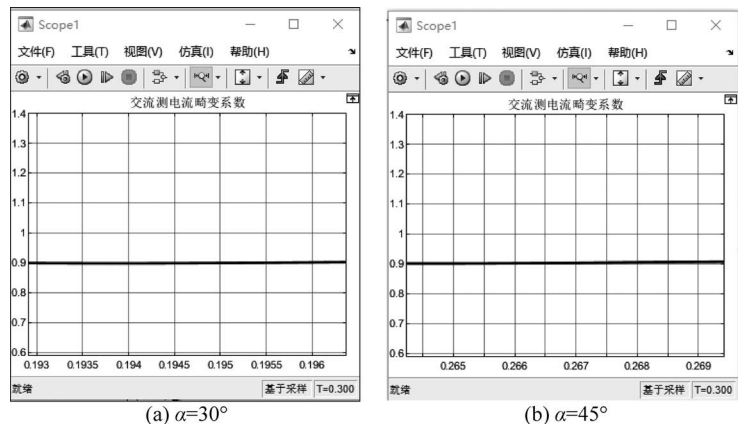


图 3-17 单相桥式整流电路仿真结果(2)

复习思考题

1. 在三相半波可控整流电路的仿真模型中,接电动势性负载时,电动势极性如何连接?
2. 在三相半波可控整流电路带电动机逆变仿真模型中,如何将直流电动机设置为制动状态?
3. 试观测逆变颠覆仿真结果。逆变颠覆会造成什么后果?
4. 为什么 MATLAB 中的畸变系数模块要进行改造?