项目 3　有源逆变器

知识目标

（1）了解逆变的概念、分类及其应用。
（2）了解变流装置与外接直流电势源之间的能量传递过程。
（3）掌握有源逆变的工作原理。
（4）掌握有源逆变的条件。
（5）掌握有源逆变电路的分析及参量计算方法。
（6）掌握有源逆变失败的原因及最小逆变角的确定方法。
（7）了解绕线转子异步电动机串级调速的控制过程。
（8）了解有源逆变在直流高压输电方面的应用。

能力目标

（1）能够阐述有源逆变电路的典型应用。
（2）能够详细分析至少一例有源逆变电路的工作过程。

电子工业出版社
版权所有 盗版必究

项目情境：高压直流输电的视频播放

【任务描述】

以长江三峡水利工程为背景，介绍超远距离、超高压直流输电技术，进而引入有源逆变技术的应用。

【实验条件】

多媒体教室（包含计算机、投影仪）、控制台。

【活动提示】

超高压直流输电技术是电力领域近年来发展起来的一门新技术，把以前不可实现的直流电能传输变为可行。请学生把现代直流输电和传统交流输电这两种方式进行对比，从中发现电力电子技术的优势，提高专业学习的兴趣。

电子工业出版社 版权所有 盗版必究

项目资讯　有源逆变及其应用

在工业生产中，不但要将固定频率、固定电压的交流电变换为可调电压的直流电，即可控整流，还要将直流电变换为交流电，这一过程称为逆变。逆变与整流互为可逆过程，能够实现可控整流的晶闸管装置称为可控整流器；能够实现逆变的晶闸管装置称为逆变器。如果同一晶闸管装置既可以实现可控整流，又可以实现逆变，这种装置则称为变流器。

逆变可分为有源逆变和无源逆变两类。

有源逆变的过程：直流电→逆变器→交流电→交流电网，这种将直流电变换成和电网同频率的交流电并将能量回馈给电网的过程称为有源逆变。有源逆变的主要应用有：直流电动机的可逆调速、绕线转子异步电动机的串级调速、高压直流输电等。

无源逆变的过程：直流电→逆变器→交流电→用电器，这种将直流电变换成某一频率或频率可调的交流电并供给用电器使用的过程称为无源逆变。无源逆变的主要应用有：交流电动机变频调速、不间断电源 UPS、开关电源、中频加热炉等。

3.1　晶闸管装置与直流电机间的能量传递

如图 3.1 所示是交流电经变流器接直流电机的系统原理图。图 3.1 中变流器的状态可逆是指整流与逆变，直流电机的状态可逆是指电动与发电。

微课：晶闸管装置与直流电机间的能量传递

1. 晶闸管装置整流状态、直流电机电动运行状态

条件：如图 3.1（a）所示，晶闸管装置工作在整流状态，

装置直流侧极性是上正下负；直流电机工作在电动运行状态，其电枢电势 E 的极性也是上正下负，且 $|U_d|>|E|$。

结论：系统回路产生顺时针方向电流 I_d，电流 I_d 从晶闸管装置正极性端流出，装置提供能量输出，处于整流状态；电流 I_d 从直流电机正极性端流进，直流电机吸收能量，处于电动状态。电流 I_d 的大小为

$$I_d=\frac{U_d-E}{R}$$

2. 晶闸管装置逆变状态、直流电机发电运行状态

条件：如图 3.1（b）所示，晶闸管装置工作在逆变状态，装置直流侧极性是上负下正；直流电机工作在发电运行状态，其电枢电势 E 的极性也是上负下正，且 $|E|>|U_d|$。

结论：系统回路产生顺时针方向电流 I_d，电流 I_d 从晶闸管装置正极性端流进，装置吸收能量，处于逆变状态；电流 I_d 从直流电机正极性端流出，直流电机提供能量输出，处于发电状态。电流 I_d 的大小为

$$I_d=\frac{E-U_d}{R}$$

3. 晶闸管装置整流状态、直流电机发电运行状态

条件：如图 3.1（c）所示，晶闸管装置工作在整流状态，装置直流侧极性是上正下负；直流电机工作在发电运行状态，其电枢电势 E 的极性是上负下正。

结论：系统回路产生顺时针方向电流 I_d，电流 I_d 从晶闸管装置正极性端流出，装置提供能量输出，处于整流状态；电流 I_d 从直流电机正极性端流出，直流电机提供能量输出，处于发电状态。电流 I_d 的大小为

$$I_d=\frac{U_d+E}{R}$$

由于 R 的阻值可能很小，电流 I_d 将很大，相当于短路，这在实际工作中是不允许的。

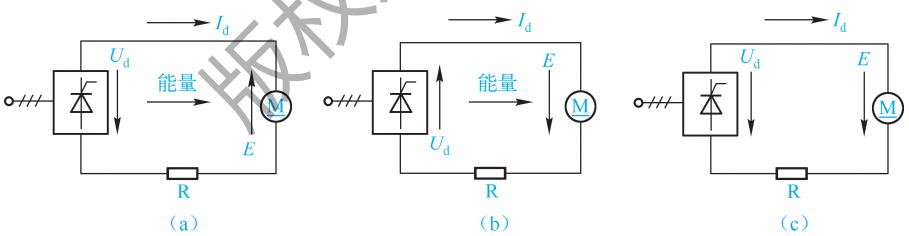


图 3.1　晶闸管装置与直流电机间的能量传递

3.2　有源逆变的工作原理

现以卷扬机为例，由单相全波变流器供电，直流电动机作为动力，分析重物提升与下降两种工作情况。

微课：有源逆变的工作原理

1. 重物提升过程

在重物提升过程中，如图 3.2（a）所示，变流器直流侧 U_d 波形正面积大于负面积，$U_d>0$，极性是上正下负；直流

电子工业出版社
版权所有 盗版必究

电机电枢电势 E 的极性也是上正下负，且 $|U_d|>|E|$。变流器处于整流状态，提供给直流电机能量，直流电机处于电动运行状态，提升重物。此过程与图 3.1（a）所示的情形一致。

2. 重物下降过程

在重物下降过程中，如图 3.2（b）所示，变流器直流侧 U_d 波形负面积大于正面积，$U_d<0$，极性是上负下正；直流电机电枢电势 E 的极性也是上负下正，且 $|E|>|U_d|$。变流器处于逆变状态，吸收直流电机能量，直流电机处于发电运行状态，下降重物。此过程与图 3.1（b）所示的情形一致。

因此，可得出实现有源逆变的条件如下。

（1）控制角 $\alpha>90°$，保证晶闸管大部分时间在电压负半周期导通，使输出电压 $U_d<0$。

（2）直流侧要有直流电源 E，且 $|E|>|U_d|$，其方向与电流方向相同，使晶闸管承受正向阳极电压。

（3）回路中要有足够大的电感 L_d。

上述（1）、（2）是实现有源逆变的必要条件，（3）是实现有源逆变的充分条件。

【课堂讨论】

问题 1：实现有源逆变时，为什么要求控制角 $\alpha>90°$？

答案：晶闸管装置在可控整流时其直流侧的共阴极端是正极性端，电流从正极性端流出；由于晶闸管具有单向导电特性，所以在有源逆变时，回路电流方向也必须与可控整流时保持一致。为保证有源逆变时晶闸管装置直流侧的极性与外接电动势同极性相接，装置直流侧的极性必须是下正上负，u_d 波形就必须是负面积大于正面积，晶闸管在电压负半周期导通时间比正半周期导通时间长，因此要求控制角 $\alpha>90°$。

问题 2：为什么半控桥式晶闸管电路和接有续流二极管的电路不能实现有源逆变？

答案：由于半控桥式晶闸管电路和接有续流二极管的电路不可能输出负电压，也不允许在直流侧接上反极性的直流电源，因而这些电路不能实现有源逆变。

电子工业出版社
版权所有 盗版必究

3.3　逆变角的确定

当变流器工作在逆变状态时，控制角 $\alpha>90°$，平均电压 $U_d=U_{d0}\cos\alpha$。为方便计算，人们引入了逆变角 β，它和控制角 α 的关系为 $\beta=\pi-\alpha$，则 $U_d=U_{d0}\cos(\pi-\beta)=-U_{d0}\cos\beta$。逆变角为 β 的触发脉冲位置可从 $\alpha=\pi$ 时刻开始前移（左移）β 角度来确定。

图 3.3（a）画出了四种不同的控制角 α，如果分别在 ωt_1、ωt_2、ωt_3、ωt_4 时刻触发晶闸管，则对应的 $\alpha_1=60°$、$\alpha_2=90°$、$\alpha_3=120°$、$\alpha_4=180°$。根据前面内容可知，$\beta=\pi-\alpha$，因此，和 α_1、α_2、α_3、α_4 对应的是 $\beta_1=120°$、$\beta_2=90°$、$\beta_3=60°$、$\beta_4=0°$。在波形图中把 $\alpha=180°$ 处作为计算 β 的起点，即图 3.3（a）中的 B 点，然后顺着电位上升的电压波形（如 u_U）向左计算，算出 β 的大小。例如，在 ωt_1 处触发晶闸管 VT_1，这时 $\alpha_1=60°$，同时也相当于 $\beta_1=120°$。

而在 ωt_3 处触发晶闸管 VT_1 时，$\alpha_3=120°$，而此时 $\beta_3=60°$。从上述讨论可知，α 和 β 从两个方向表示晶闸管 VT 的触发时刻，从图 3.3（a）中的 A 点算到 ωt_1 的角度是 α_1，从 B 点算到 ωt_1 的角度就是 β_1。不论是用 α_1 表示还是用 β_1 表示，晶闸管 VT 的触发时刻是相同的。图 3.3（b）画出了单相电路中 $\alpha_1=60°$、$\alpha_2=120°$、$\alpha_3=180°$ 与 $\beta_1=120°$、$\beta_2=60°$、$\beta_3=0°$ 的对应关系。

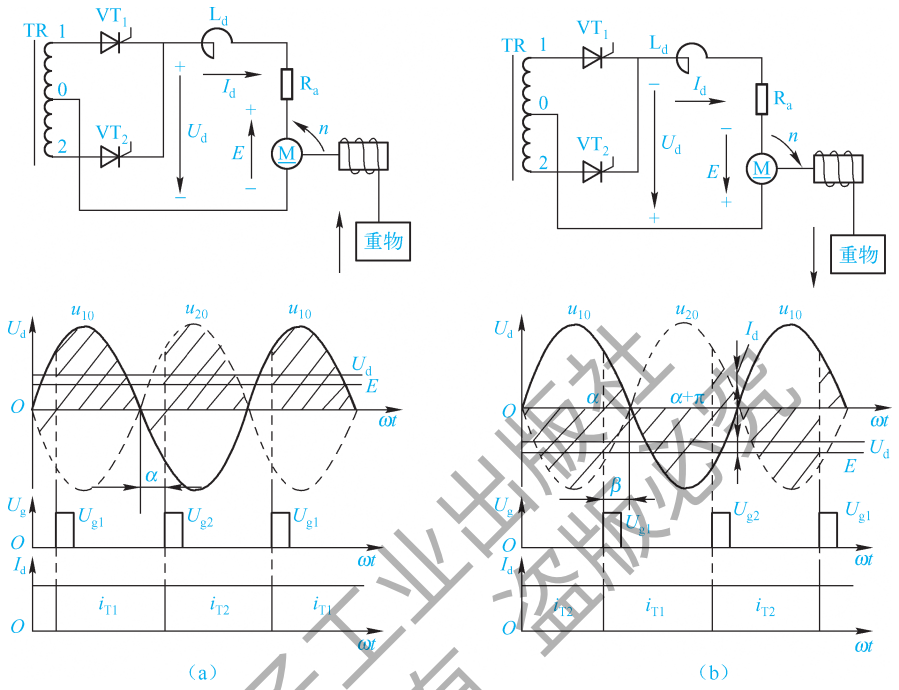


图 3.2　全波可控整流与有源逆变

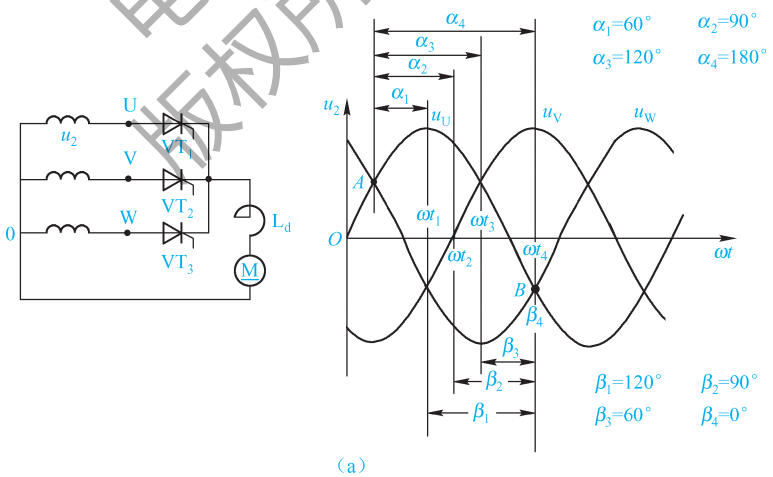
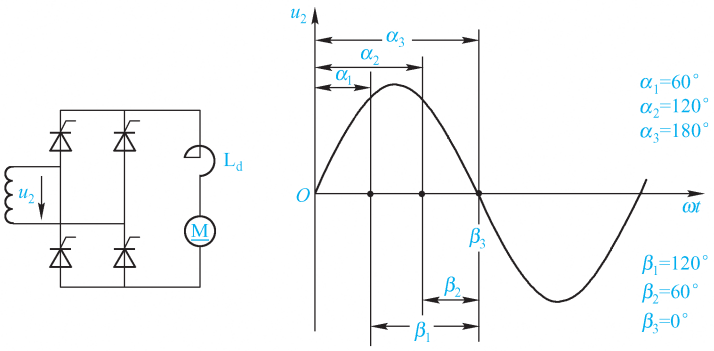


图 3.3　逆变角 β 的表示法

电子工业出版社
版权所有 盗版必究



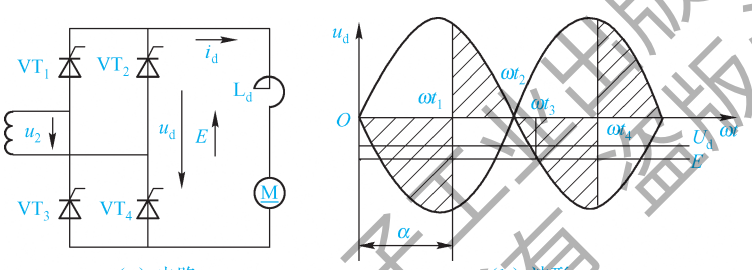
（b）

图 3.3　逆变角 β 的表示法（续）

3.4　常用的有源逆变电路

3.4.1　单相全控桥式有源逆变电路

单相全控桥式有源逆变电路如图 3.4（a）所示，该电路的波形分析如图 3.4（b）所示。在交流电 u_2 半个周期内，用 ωt 坐标点将波形分为三段，下面对波形逐段进行分析。



（a）电路　　（b）波形

图 3.4　单相全控桥式有源逆变电路及其波形

微课：单相全控桥式有源逆变电路波形分析 α=135°

1）当 $\omega t_1 \leqslant \omega t < \omega t_2$ 时

条件：交流侧输入电压瞬时值 $u_2>0$，电源电压 u_2 处于正半周期；晶闸管 VT_1、VT_4 承受正向阳极电压；在 $\omega t=\omega t_1$ 时刻，给晶闸管 VT_1、VT_4 门极施加触发电压 u_{g1}、u_{g4}，即 $u_{g1}>0$、$u_{g4}>0$。

结论：晶闸管 VT_1、VT_4 导通，即 $i_{T1}=i_{T4}=i_d>0$ ；直流侧负载的电压 $u_d= u_2>0$。

2）当 $\omega t_2 \leqslant \omega t < \omega t_3$ 时

条件：交流侧输入电压瞬时值 $u_2 \leqslant 0$，电源电压 u_2 处于负半周期；在此期间外接感生电动势 E 极性是下正上负，且 $u_{T1}+ u_{T4}=|E|-|u_2|>0$，使晶闸管 VT_1、VT_4 继续承受正向阳极电压。

结论：晶闸管 VT_1、VT_4 导通，即 $i_{T1}=i_{T4}=i_d>0$；直流侧负载的电压 $u_d= u_2 \leqslant 0$。

3）当 $\omega t_3 \leqslant \omega t < \omega t_4$ 时

条件：交流侧输入电压瞬时值 $u_2 \leqslant 0$，电源电压 u_2 处于负半周期，在此期间电感 L_d 产生的感生电动势 u_L 极性是下正上负，且 $u_{T1}+u_{T4}=|E|+|u_L|-|u_2|>0$，使晶闸管 VT_1、VT_4 继续承受正向阳极电压。

电子工业出版社
版权所有 盗版必究

结论：晶闸管 VT_1、VT_4 导通，即 $i_{T1}=i_{T4}=i_d>0$ ；直流侧负载的电压 $u_d= u_2<0$。

4）当 $\omega t=\omega t_4$ 时

条件：交流侧输入电压瞬时值 $u_2<0$，电源电压 u_2 处于负半周期；晶闸管 VT_2、VT_3 承受正向阳极电压；给晶闸管 VT_2、VT_3 门极施加触发电压 u_{g2}、u_{g3}，即 $u_{g2}>0$、$u_{g3}>0$。

结论：晶闸管 VT_2、VT_3 导通，即 $i_{T2}=i_{T3}=i_d>0$；直流侧负载的电压 $u_d=u_2>0$。

其输出的直流电压平均值为

$$U_d=-0.9u_2\cos\beta$$

【课堂讨论】

问题：在有源逆变电路中，为什么回路中要串联足够大的电感 L_d？

答案：人们所说的电路工作在有源逆变状态，是就整个工作过程而言的。实际上，在每一瞬间电路不一定都工作在有源逆变状态。例如，图 3.4（b）在 $\omega t_1 \sim \omega t_2$ 这段时间里，电源电压 u_2 处于正半周期，输出电压的极性为下负上正，与 E 反极性相连，两电源均供出能量，只是这段时间较短，通过电感 L_d 作用限制电流不会上升很大。所以，回路中要有足够大的电感 L_d 是实现有源逆变的充分条件。

3.4.2 三相半波有源逆变电路

三相半波有源逆变电路如图 3.5（a）所示，该电路的波形如图 3.5（b）所示。在交流电一个周期的 120°范围内，用 ωt 坐标点将波形分为三段，下面对波形逐段进行分析。

1）当 $\omega t_1 \leqslant \omega t<\omega t_2$ 时

条件：交流侧输入电压瞬时值 $u_U>0$，电源电压 u_U 处于正半周期；晶闸管 VT_1 承受正向阳极电压；在 $\omega t=\omega t_1$ 时刻，给晶闸管 VT_1 门极施加触发电压 u_{g1}，即 $u_{g1}>0$。

结论：晶闸管 VT_1 导通，即 $i_{T1}=i_d>0$；直流侧负载的电压 $u_d= u_U>0$。

2）当 $\omega t_2 \leqslant \omega t<\omega t_3$ 时

条件：交流侧输入电压瞬时值 $u_U \leqslant 0$，电源电压 u_U 处于负半周期；在此期间外接感生电动势 E 极性是下正上负，且 $u_{T1}=|E|-|u_A|>0$，使晶闸管 VT_1 继续承受正向阳极电压。

结论：晶闸管 VT_1 导通，即 $i_{T1}=i_d>0$；直流侧负载的电压 $u_d=u_U<0$。

3）当 $\omega t_3 \leqslant \omega t<\omega t_4$ 时

条件：交流侧输入电压瞬时值 $u_U<0$，电源电压 u_U 处于负半周期，在此期间电感 L_d 产生的感生电动势 u_L 极性是下正上负，且 $u_{T1}=|E|+|u_L|-|u_U|>0$，使晶闸管 VT_1 继续承受正向阳极电压。

结论：晶闸管 VT_1 导通，即 $i_{T1}=i_d>0$；直流侧负载的电压 $u_d= u_U<0$。

4）当 $\omega t=\omega t_4$ 时

条件：交流侧输入电压瞬时值 $u_V>0$，电源电压 u_V 处于正半周期；晶闸管 VT_2 承受正向阳极电压；给晶闸管 VT_2 门极施加触发电压 u_{g2}，即 $u_{g2}>0$。

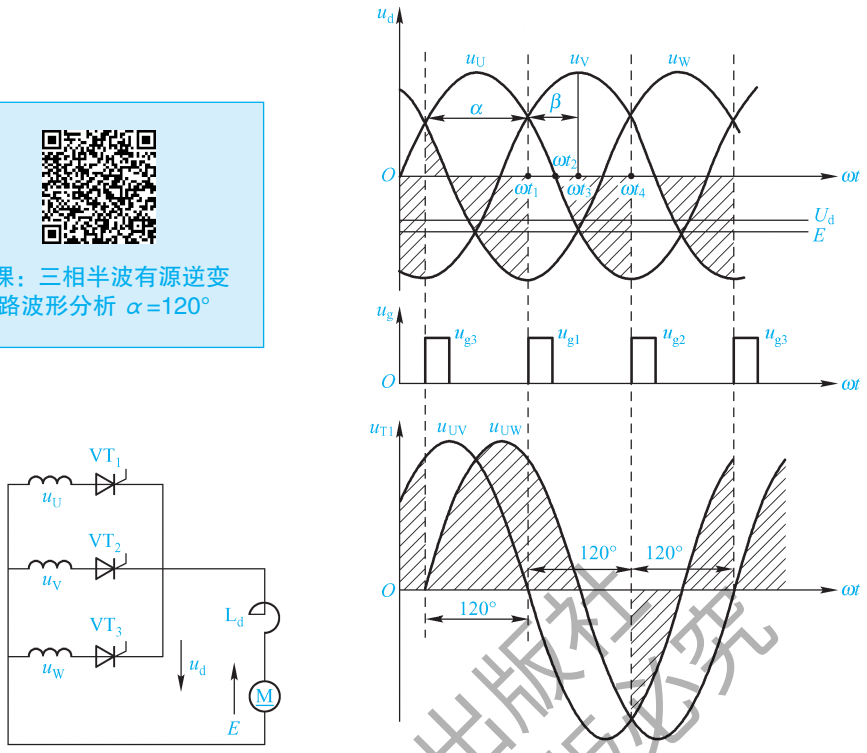
结论：晶闸管 VT_2 导通，即 $i_{T2}=i_d>0$；直流侧负载的电压 $u_d=u_V>0$。

其输出的直流电压平均值为

$$U_d= -1.17\, u_2\cos\beta$$

电子工业出版社
版权所有 盗版必究

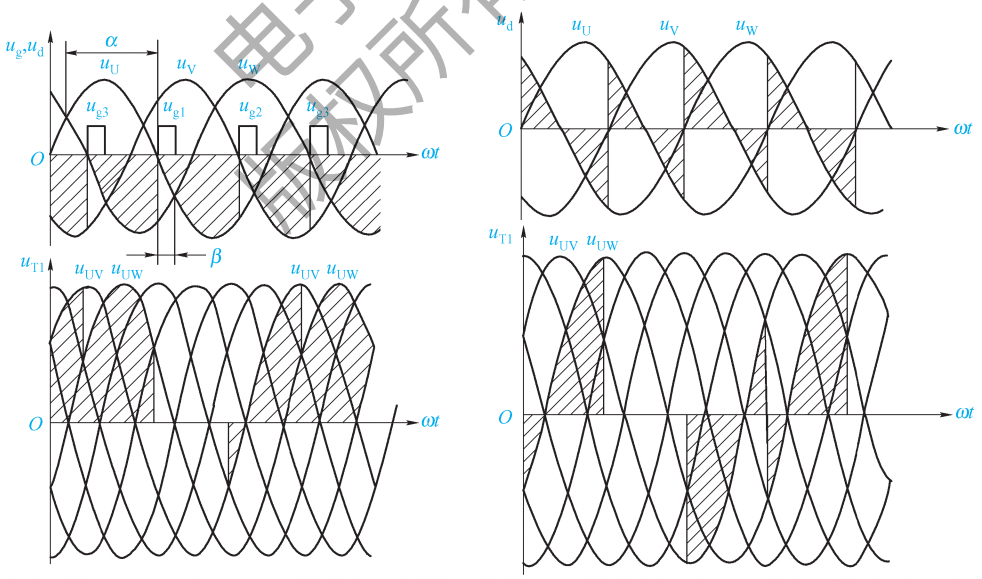
微课：三相半波有源逆变电路波形分析 $\alpha=120°$



（a）电路　　（b）波形

图 3.5　三相半波有源逆变电路及其波形

图 3.6（a）、（b）分别画出了 $\beta=30°$、$\beta=90°$ 时逆变电压波形和晶闸管 VT_1 承受的电压波形。



（a）β=30°　　（b）β=90°

图 3.6　三相半波有源逆变电路的波形图

电子工业出版社 版权所有 盗版必究