

东南大学

电力电子技术

第 29 讲

主讲教师：王念春

380419124@qq.com





直流—直流 (DC-DC) 变换电路

直流变换电路:

将直流电变为另一固定电压或可调电压的直流电（不包括直流—交流—直流）的变换电路板。

基本用途: 降压、升压、降压+升压、调阻等。

被广泛应用于直流电动机调速，蓄电池充电，开关电源等方面，特别是在电力牵引上，如地铁、城市轻轨、电气机车、无轨电车、电瓶车、电铲车等。

近些年来，在高压直流输电、海上风力发电等方面也得应用研究与重视。

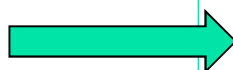
直流变换电路的分类

按是否有高频变压器隔离

无变压器隔离DC变换电路

有变压器隔离DC变换电路

教材内容



无变压器隔离DC变换电路

BUCK降压型
BOOST升压型
BOOST-BUCK升降压型
Cuk变换器
Sepic变换器
Zeta变换器
双向DC变换器
桥式可逆斩波器
等



直流变换电路的分类

按是否有高频变压器隔离

无变压器隔离DC变换电路

有变压器隔离DC变换电路

有变压器隔离DC变换电路

正激式变换器
反激式变换器
半桥变换器
全桥变换器
推挽变换器
等



直流变换电路的分类

按电平数来分类

两电平DC变换电路

多电平DC变换电路

按软开关来划分

硬开关DC变换电路

ZCS

ZVS

准谐振电路

零开关PWM

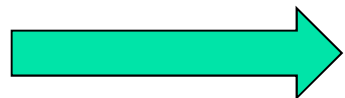
零转换PWM

等



直流变换电路的分类

发展方向



复合斩波电路
双向DC—DC变换电路
多相多重斩波电路
多电平斩波电路

直流变换电路基本控制方式

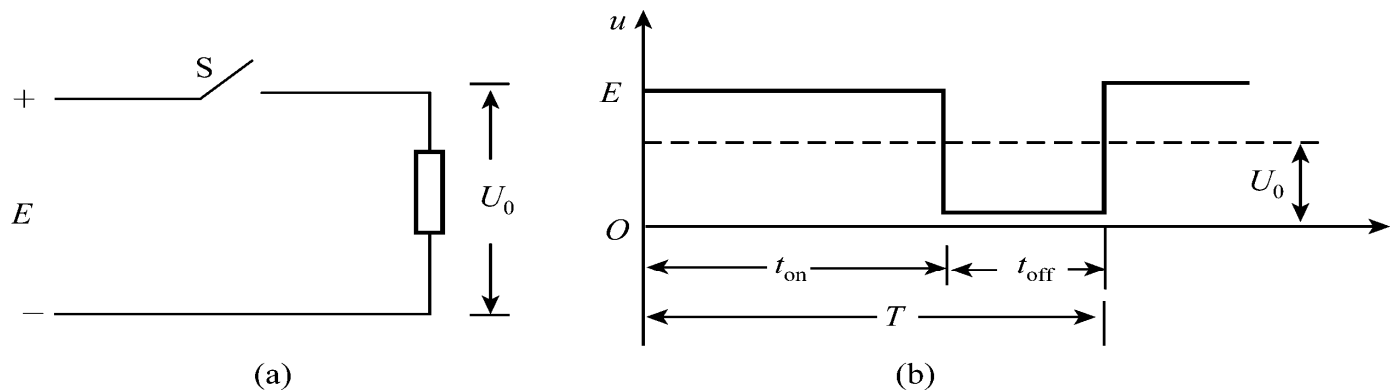
1、时间比控制

时间比控制是DC-DC变换电路中采用最多的控制方式。它通过改变变换器的通、断时间来连续控制输出电压平均值的大小。

脉宽控制——斩波频率因定，改变导通时间实现；优点：滤波器设计方便

频率控制——固定斩波器导通时间，改变斩波周期来实现；

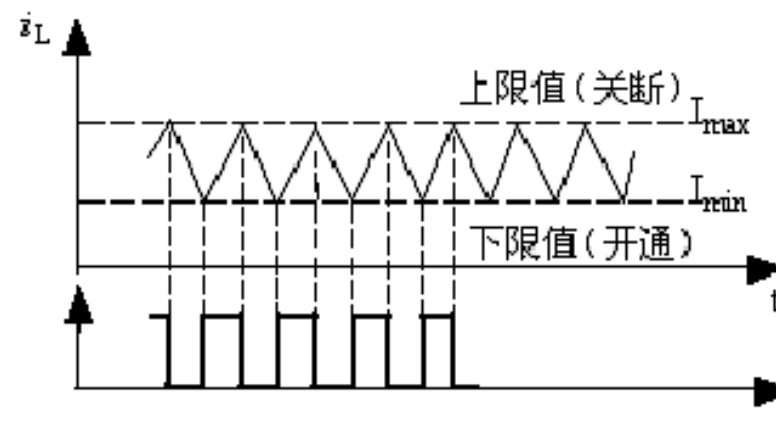
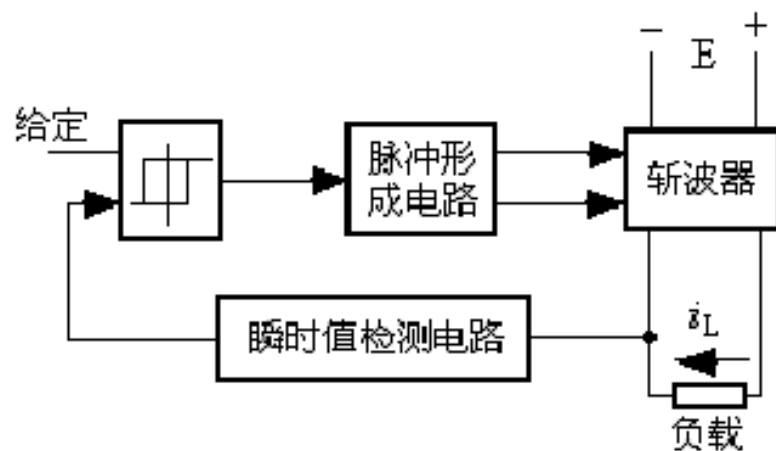
混合控制——脉宽控制+频率控制



$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u dt = \frac{t_{on}}{T} E = a E$$

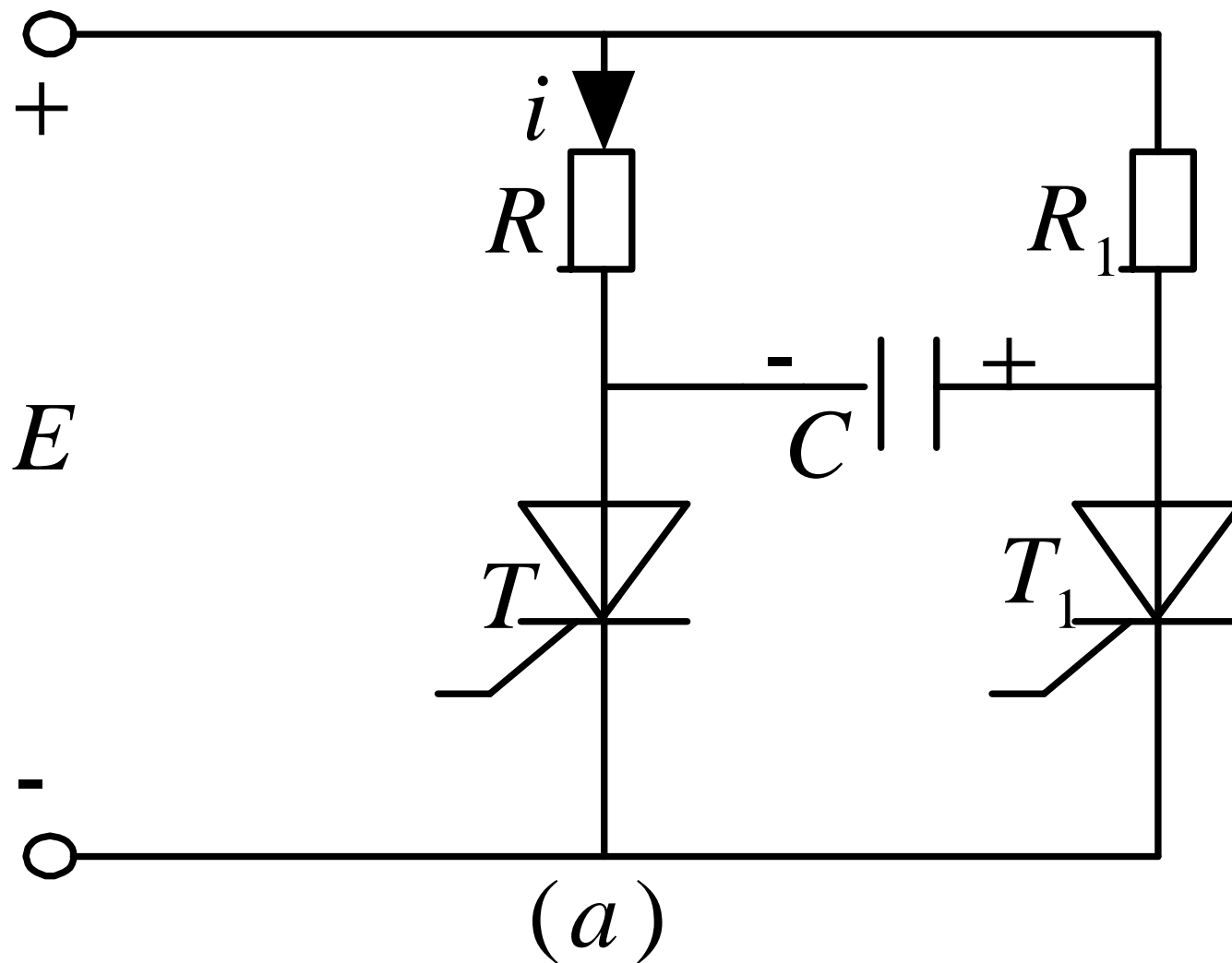
2、瞬时值控制

在恒值（恒压或恒流）控制或波形控制中，常采用瞬时值控制的斩波方式。类似于滞环控制。

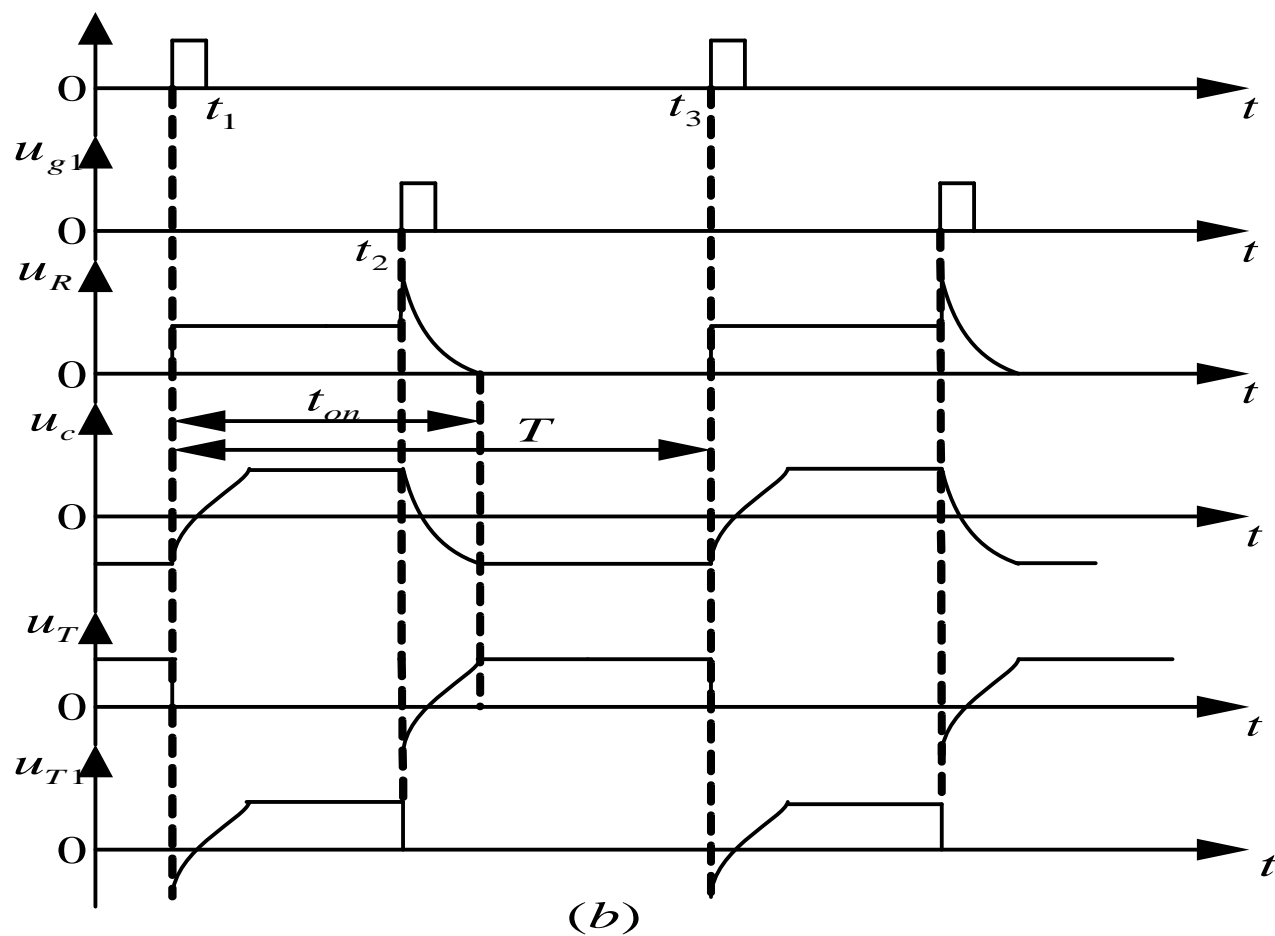


晶闸管原理型斩波电路 P42页第9题

基本
工作
过程
分析



晶闸管原理型斩波电路波形



晶闸管原理型斩波电路

$$U_R = DE \longleftarrow \text{输入输出基本量值关系}$$

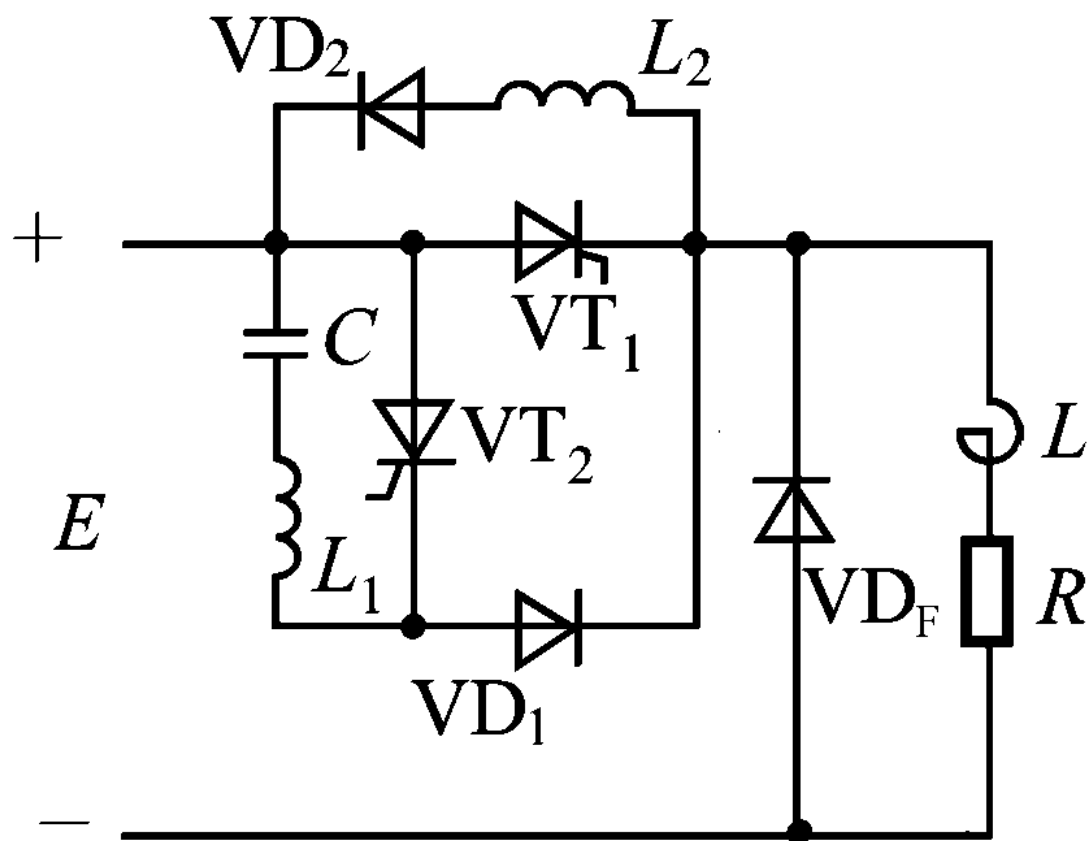
$$\left[\begin{array}{l} CE^3 I_m t_{OF} \\ C^3 \frac{I_m t_{OF}}{E} \end{array} \right]$$

导通时最大电流为 I_m ，则关断T要求C提供的最大电荷量为 $I_m t_{OF}$ 。而电容C充电到E，所存储电荷量为 $q=CE$ ，为使T可靠关断，应有

电路存在的问题，如何改进？



改进的晶闸管DC-DC变换器

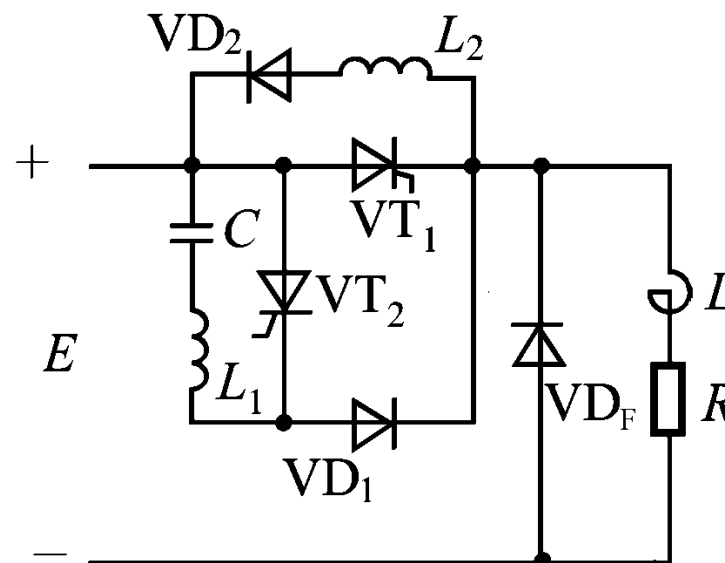


二、基本DC-DC变换器

1、晶闸管降压斩波器

工作过程:

- (1) VT_1 , VT_2 均不通, E 经 L_1 、 VD_1 , L_1 , R 、 L 对 C 充电;
- (2) 触通 VT_1 , 负载上有电压,
 VD_1 截止, C 无放电回路;
- (3) 触通 VT_2 , C 经 VT_2 与 L_1 形成
谐振, C 放电并反向充电, 上(-)下(+), 负载仍有电压;
- (4) $u_c = -E$ 时, $i_c = 0$, VT_2 断, u_c 经 VD_1 反压加至 VT_1 , VT_1 关断;
- (5) VT_1 断后, VD_2 通, C 经 L_1 、 VD_1 、 L_2 、 VD_2 回路谐振, u_c 由
 $-E$ 上升到 E , $u_c = E$ 时, $i_c = 0$, 停止向负载输出;
- (6) 负载电流经 VD_F 续流。



重点：晶闸导通与关断



东南大学

电力电子技术

第 30 讲

主讲教师：王念春

380419124@qq.com



无隔离的基本直流变换电路

直流变换器的种类繁多，有隔离的电路涉及到磁性元器件的设计与分析，无隔离的直流变换电路是分析复杂直流变换电路的基本。

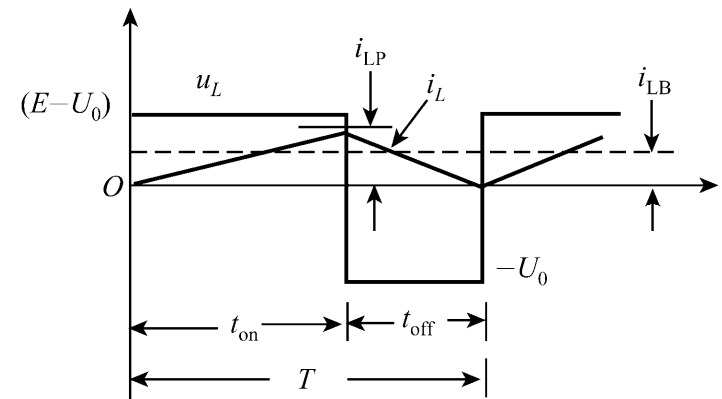
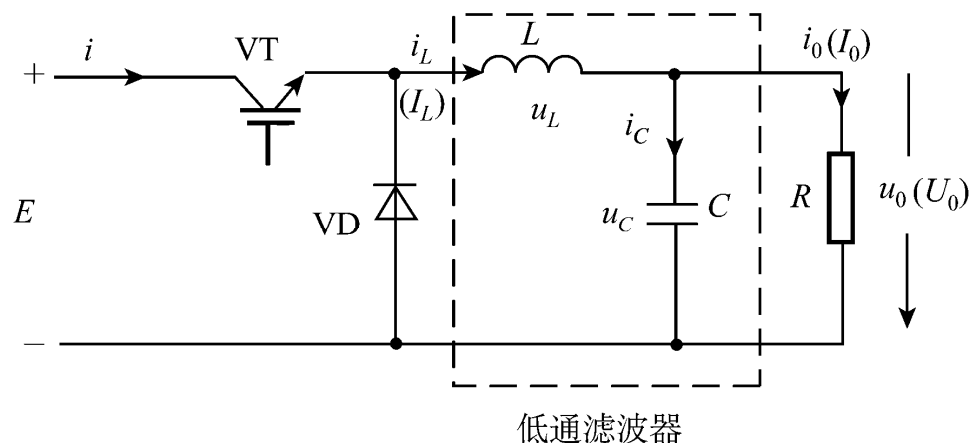
下面介绍基本的无隔离直流变换电路。

无隔离的直流变换电路中，按电感电流连续与断续情况，分成两种工作状态：**电流连续**、**电流断续**，还有一种处于连续与断续的交界状态——**电流临界状态**。

多数都是分析电流连续状态。



2、Buck（降压型）变换器



(1) 电流连续时

电感电压一周期内积分平均为零 $(E - U_0)t_{on} + (-U_0)t_{off} = 0$

$$\frac{U_0}{E} = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} = a$$

输入、输出功率相等

$$EI = U_0 I_0$$

$$\frac{I_0}{I} = \frac{E}{U_0} = \frac{1}{a}$$

注意符号大小写的意义！

电感伏秒平衡原理，也可用基本的方程来推导

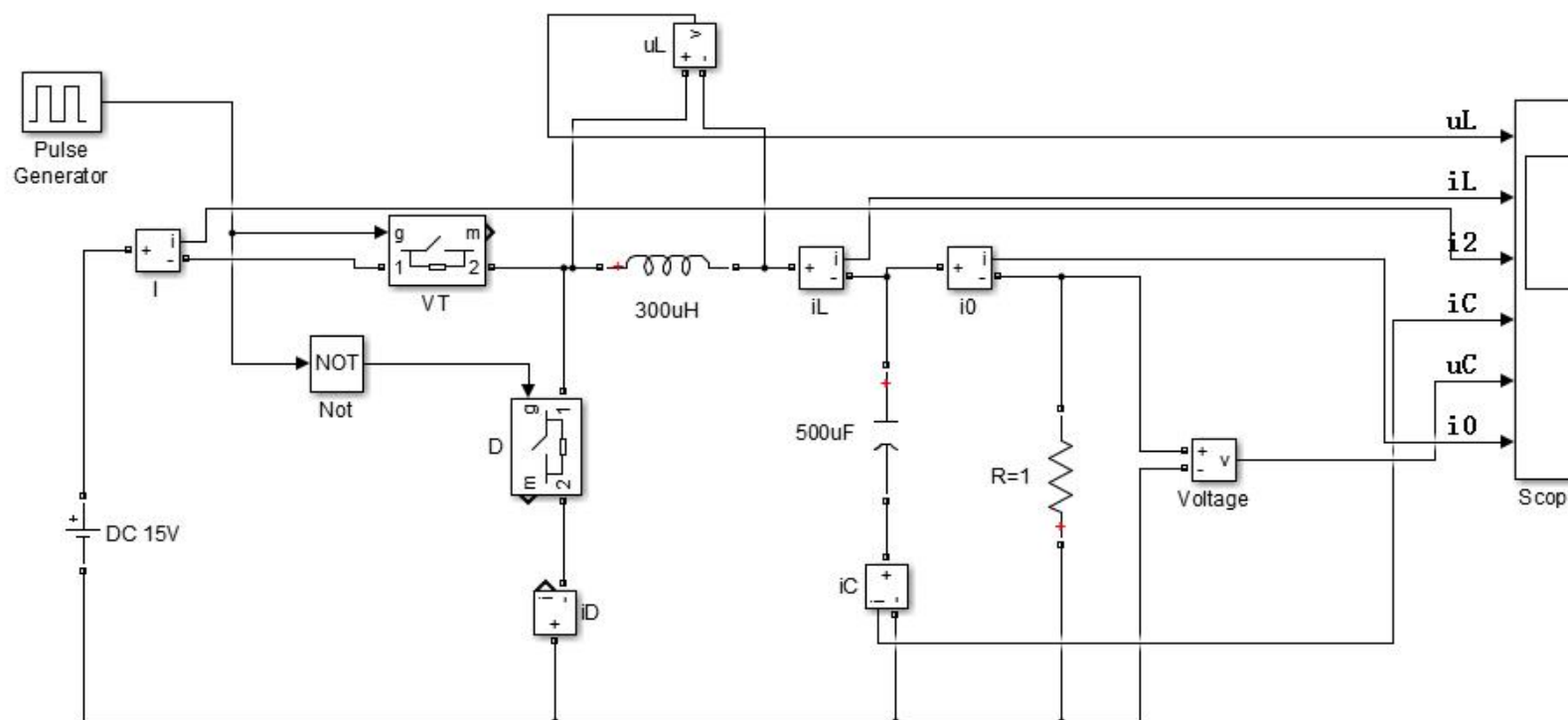
降压 “直流” 变压器

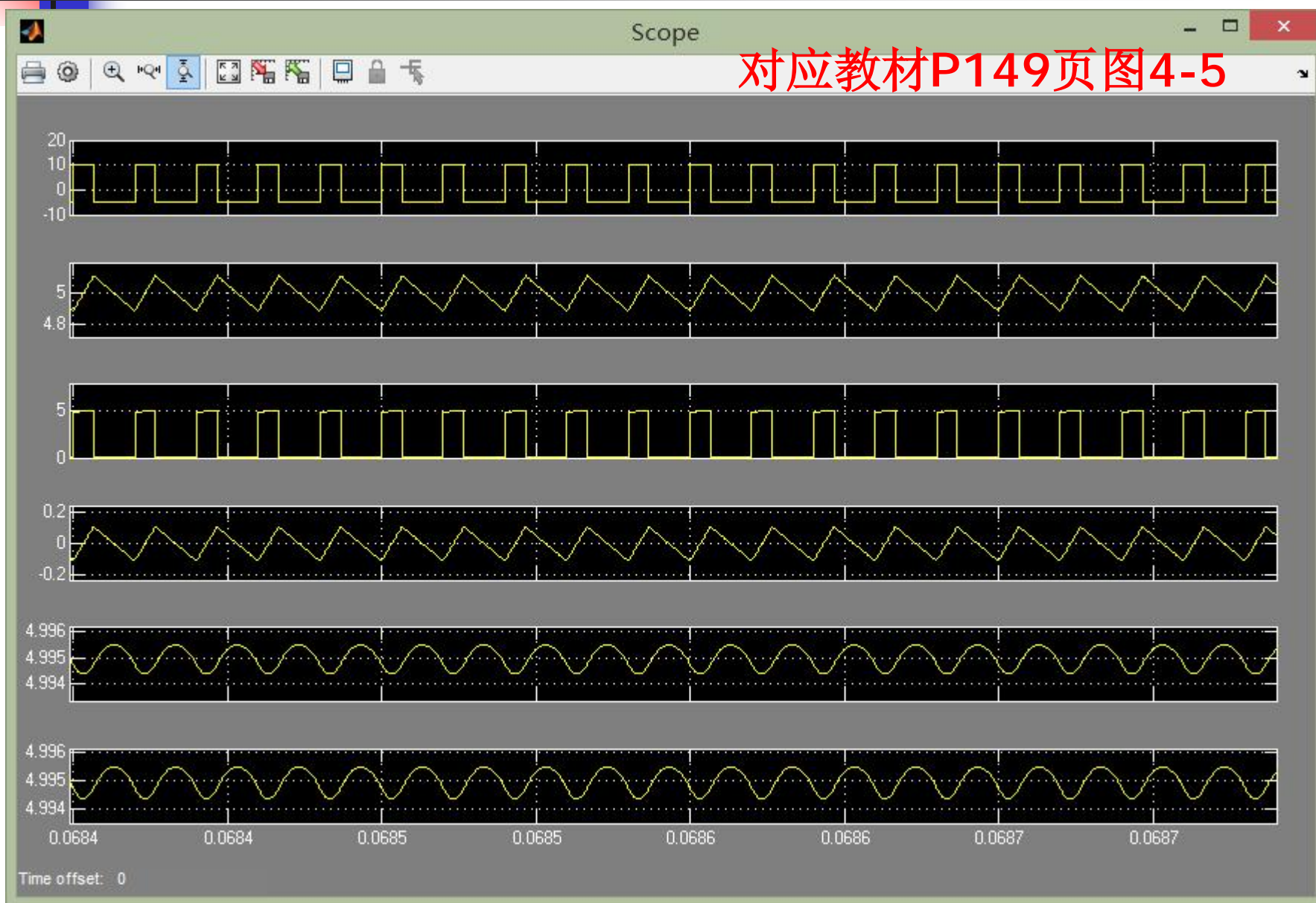


直流变换电路的仿真

Continuous
powergui

BUCK降压变换器仿真——适用于matlab2014A





(2) 电流临界时

满足连续条件，电感电流平均值：

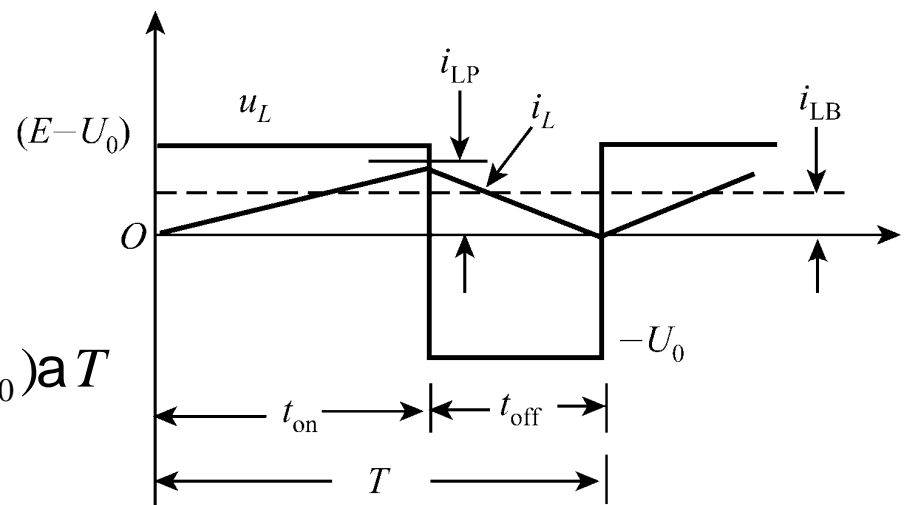
$$I_{LB} = \frac{1}{2} i_{LP} = \frac{1}{2} \frac{(E - U_0) T_{on}}{L} = \frac{1}{2L} (E - U_0) a T$$

$$I_{LB} = \frac{1}{2L} (E - U_0) a T \stackrel{U_0 = aE}{=} \frac{ET}{2L} a (1 - a)$$

$\alpha = 0.5$ 时，上式有极值：

$$I_{LB\max} = \frac{ET}{8L}$$

$$I_{LB} = 4 I_{LB\max} a (1 - a)$$



(3) 电流断续时

一个周期内电感电压积分为零

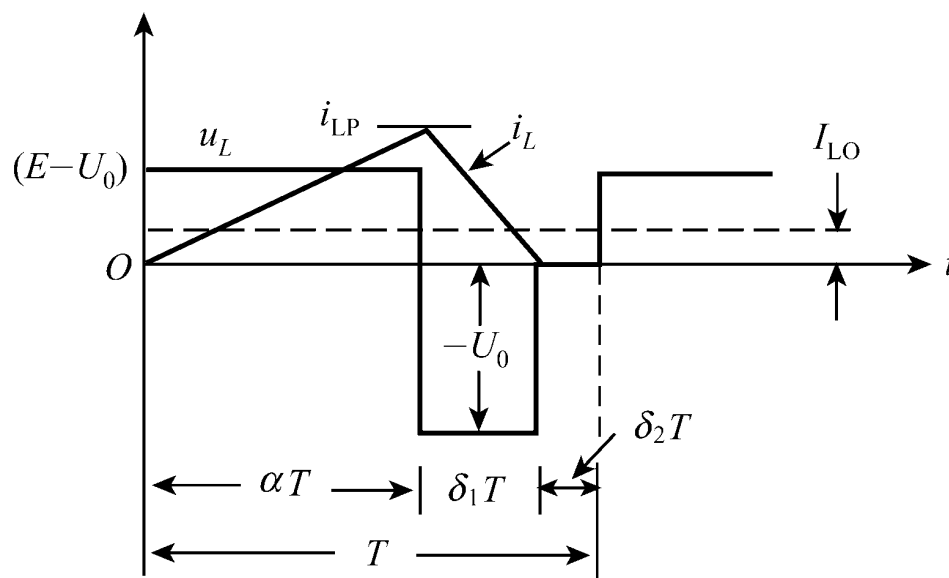
$$(E - U_0)aT + (-U_0)d_1T = 0$$

$$\frac{U_0}{E} = \frac{a}{a + d_1}$$

$$i_{Lp} = \frac{U_0}{L}d_1T$$

$$I_{L0} = i_{Lp} \frac{a + d_1}{2} = \frac{U_0 T}{2L} (a + d_1) d_1 = \frac{ET}{2L} a d_1 = 4I_{LB\max} a d_1$$

$$d_1 = \frac{I_{L0}}{4I_{LB\max} a}$$



$$\frac{U_0}{E} = \frac{a^2}{a^2 + \frac{1}{4} \frac{I_{L0}}{I_{LB\max}}}$$



(4) 滤波器设计

低通滤波器对直流输出电压非常重要。通常用电容电压 u_c 的纹波来计算滤波电感与电容 C 的大小。按电路拓扑结构有：

$$i_L = i_0 + i_c$$

假定滤波后负载直流电流平直为直线， $i_0 = I_0$ ，则电感电流的脉动分量 Δi_L 全部注入电容，即有： $\Delta i_L = \Delta i_c$ 。稳定状态下，流经电容电流的平均值为零，半周期内电容电量的变化为：（注意P149页图4-5（C）第2图）

$$Q_c = \frac{1}{2} \left(\frac{V_{i_L}}{2} \cdot \frac{T}{2} \right)$$

得到由此引起的电容电压纹波峰值 ΔU_c 为：

$$\Delta U_c = \frac{Q_c}{C} = \frac{1}{8C} V_{I_L} T$$



(4) 滤波器设计

$$\mathbf{V}U_c = \frac{\mathbf{V}Q_c}{C} = \frac{1}{8C} \mathbf{V}I_L T$$

电流连续模式下，可得出 ΔI_L ：

$$\mathbf{V}I_L = \frac{U_0}{L} (1 - a) T$$

代入后有：

$$\mathbf{V}U_c = \frac{1}{8C} \cdot \frac{U_0}{L} (1 - a) T^2$$

$$\frac{\mathbf{V}U_c}{U_0} = \frac{1}{8LC} (1 - a) T^2$$



P152页例题

有一理想Buck变换电路，斩波频率20kHz，滤波元件参数为 $L=2\text{mH}$ ， $C=220\mu\text{F}$ 。若电源电压 $E=12\text{V}$ ，希望输出电压 $U_0=5\text{V}$ ，输出平均电流 $I_0=200\text{mA}$ ，试计算：

- (1) 电感上电流纹波 ΔI_L ；
- (2) 输出电压纹波比 $\Delta U_C/U_0$ 。

【答】：这种模式应该是电感电流连续模式下。如何判断是否电感电流连续模式？
斩波周期与导通比可计算得出：

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{20 \times 10^3} = 5 \times 10^{-5} (\text{s}) \quad a = \frac{U_0}{E} = \frac{5}{12} = 0.417$$

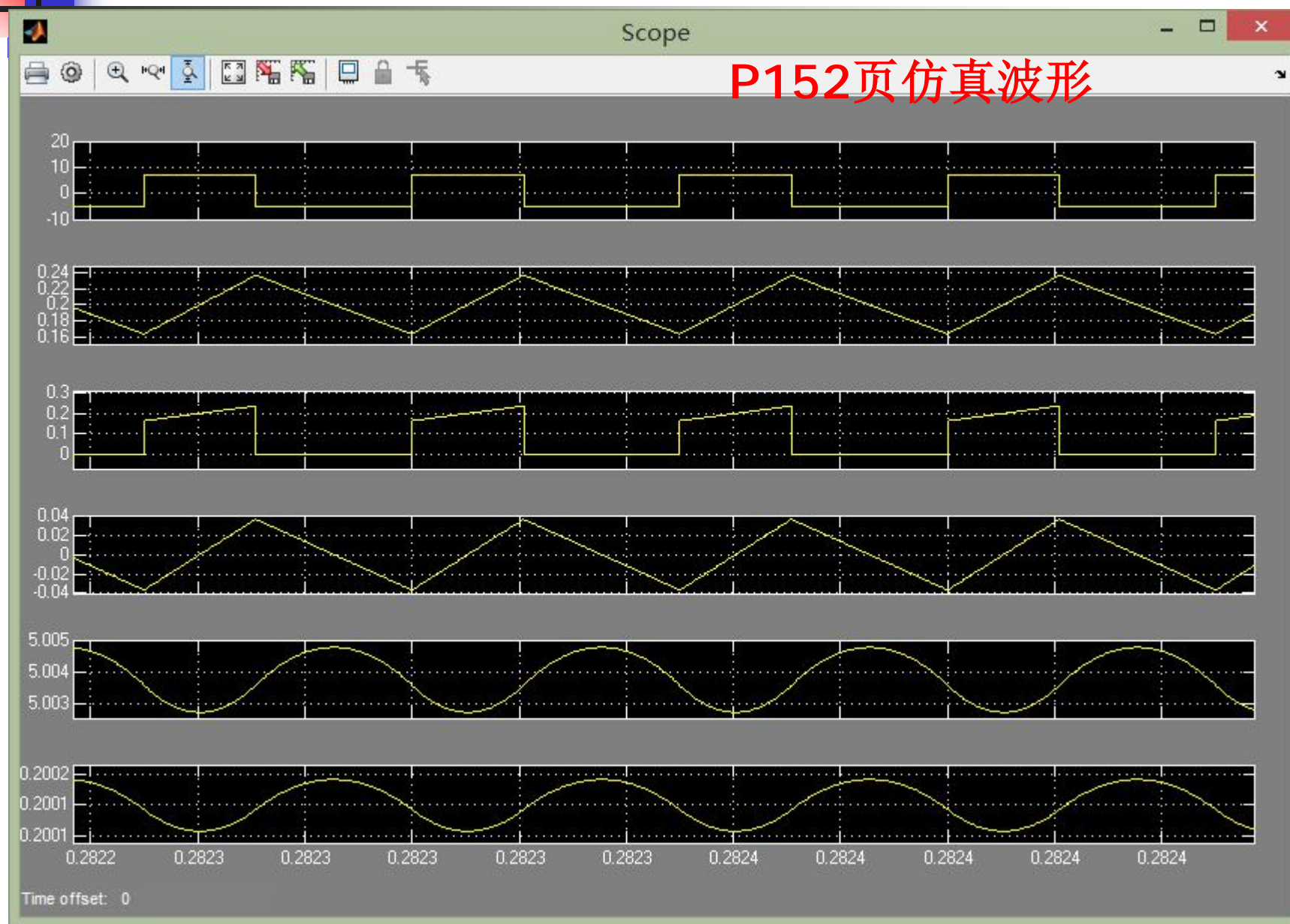
(1)

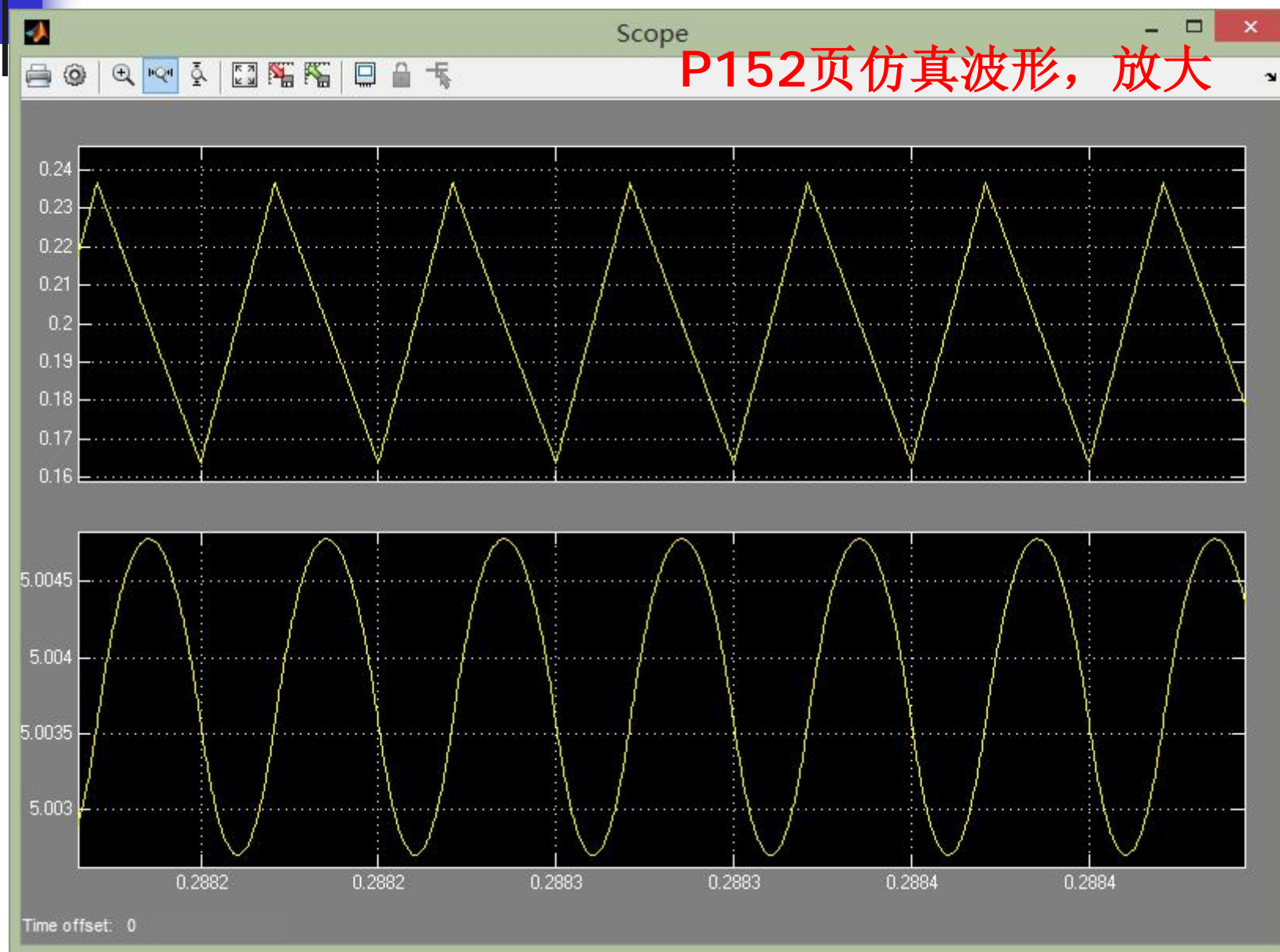
$$\Delta I_L = \frac{U_0}{L} (1 - a) T = \frac{5}{2 \times 10^{-3}} \times (1 - 0.417) \times 5 \times 10^{-5} = 0.0729 (\text{A})$$

(2)

$$\begin{aligned} \frac{\Delta U_C}{U_0} &= \frac{1}{8LC} (1 - a) T^2 = \frac{1}{8 \times 2 \times 10^{-3} \times 220 \times 10^{-6}} (1 - 0.417) \times (5 \times 10^{-5})^2 \\ &= 4 \times 10^{-4} = 0.04\% \end{aligned}$$







东南大学

电力电子技术

第 31 讲

主讲教师：王念春

380419124@qq.com



P172页第1题

一个理想的Buck变换电路，欲通过导通比 α 控制保持输出电压 $u_0=U_0=5V$ 恒定，并希望输出功率 $P_0 \geq 5W$ ，斩波频率 $50kHz$ ，试计算电源电压 E 从 $10 \sim 40V$ 范围内，为保持变换器工作在电感电流连续导通模式下所需要的最小电感 L 。

【答】：根据输出电压与最小输出功率，可计算出最小负载电流为 $1A$ 。

(1) 输入电压为 $10V$ 时的计算：

$$a = \frac{U_0}{E} = \frac{5}{10} = 0.5$$

根据电路结构，负载电流平均值与电感电流平均值相等，最小为 $1A$ 。

$$I_{LB} = \frac{1}{2} i_{LP} = \frac{1}{2} \frac{(E - U_0) T_{on}}{L} = \frac{1}{2L} (E - U_0) a T$$

$$1 = \frac{1}{2L} (10 - 5) \cdot 0.5 \frac{1}{50 \cdot 10^3} \Rightarrow L = \frac{1}{2} (10 - 5) \cdot 0.5 \frac{1}{50 \cdot 10^3} = 25(mH)$$



P172页第1题

一个理想的Buck变换电路，欲通过导通比 α 控制保持输出电压 $u_0=U_0=5V$ 恒定，并希望输出功率 $P_0 \geq 5W$ ，斩波频率 $50kHz$ ，试计算电源电压 E 从 $10 \sim 40V$ 范围内，为保持变换器工作在电感电流连续导通模式下所需要的最小电感 L 。

【答】：根据输出电压与最小输出功率，可计算出最小负载电流为 $1A$ 。

(2) 输入电压为 $40V$ 时的计算：

$$a = \frac{U_0}{E} = \frac{5}{40} = 0.125$$

根据电路结构，负载电流平均值与电感电流平均值相等，最小为 $1A$ 。

$$I_{LB} = \frac{1}{2} i_{LP} = \frac{1}{2} \frac{(E - U_0) T_{on}}{L} = \frac{1}{2L} (E - U_0) a T$$

$$1 = \frac{1}{2L} (40 - 5) \cdot 0.125 \frac{1}{50 \cdot 10^3} \Rightarrow L = \frac{1}{2} (40 - 5) \cdot 0.125 \frac{1}{50 \cdot 10^3} = 43.75(mH)$$



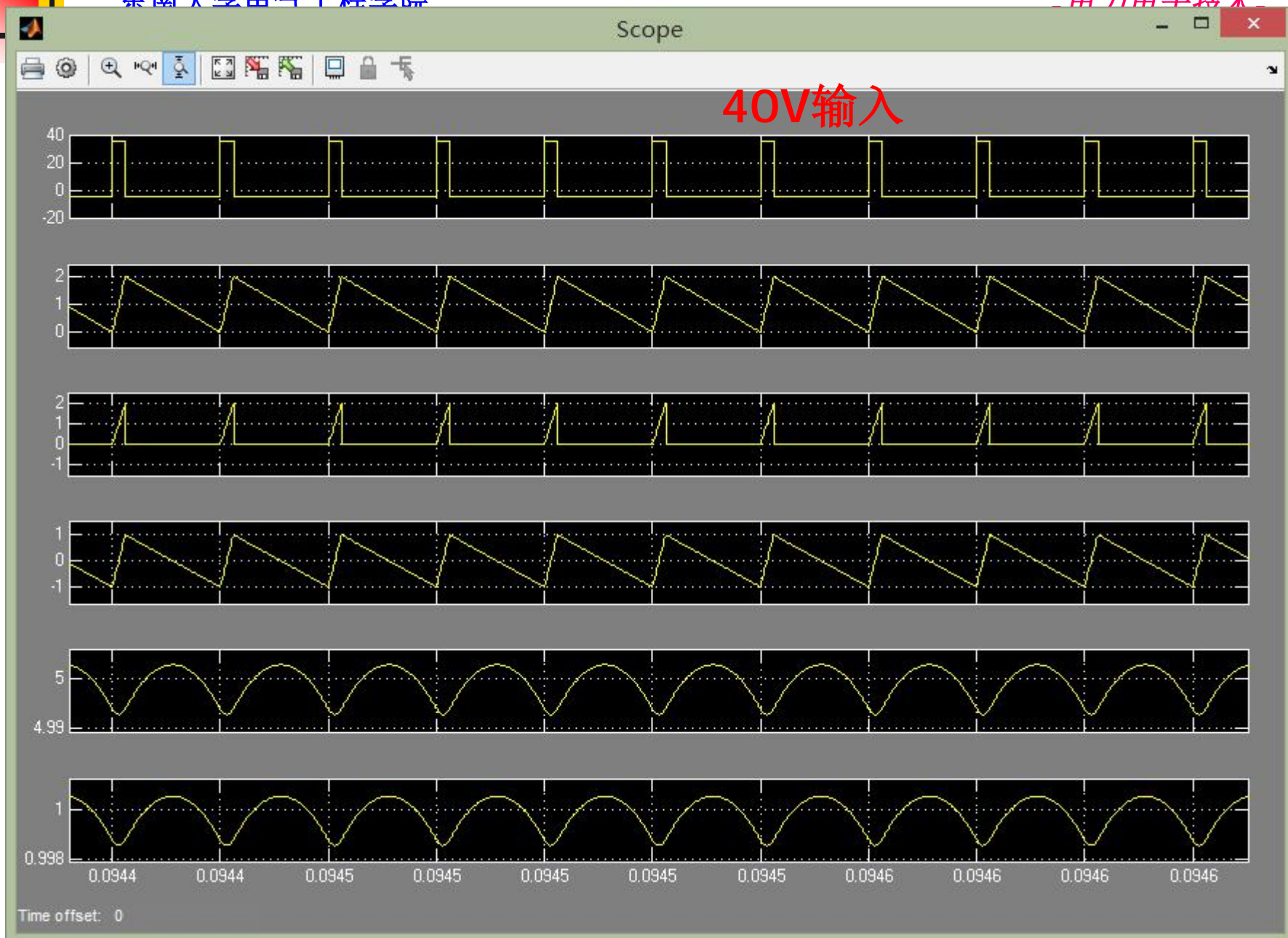
P172页第1题

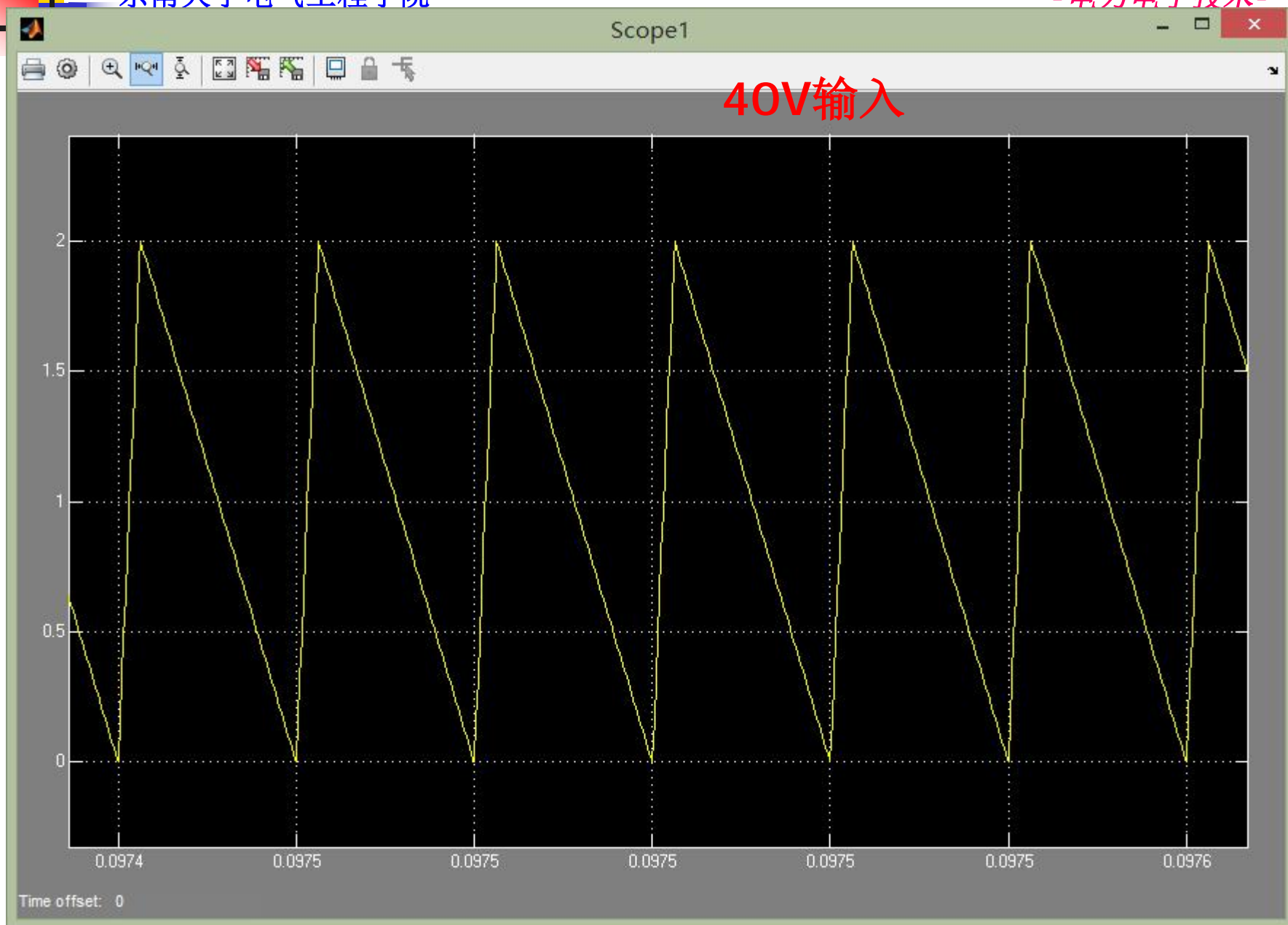
一个理想的Buck变换电路，欲通过导通比 α 控制保持输出电压 $u_0=U_0=5V$ 恒定，并希望输出功率 $P_0 \geq 5W$ ，斩波频率 $50kHz$ ，试计算电源电压 E 从 $10 \sim 40V$ 范围内，为保持变换器工作在电感电流连续导通模式下所需要的最小电感 L 。

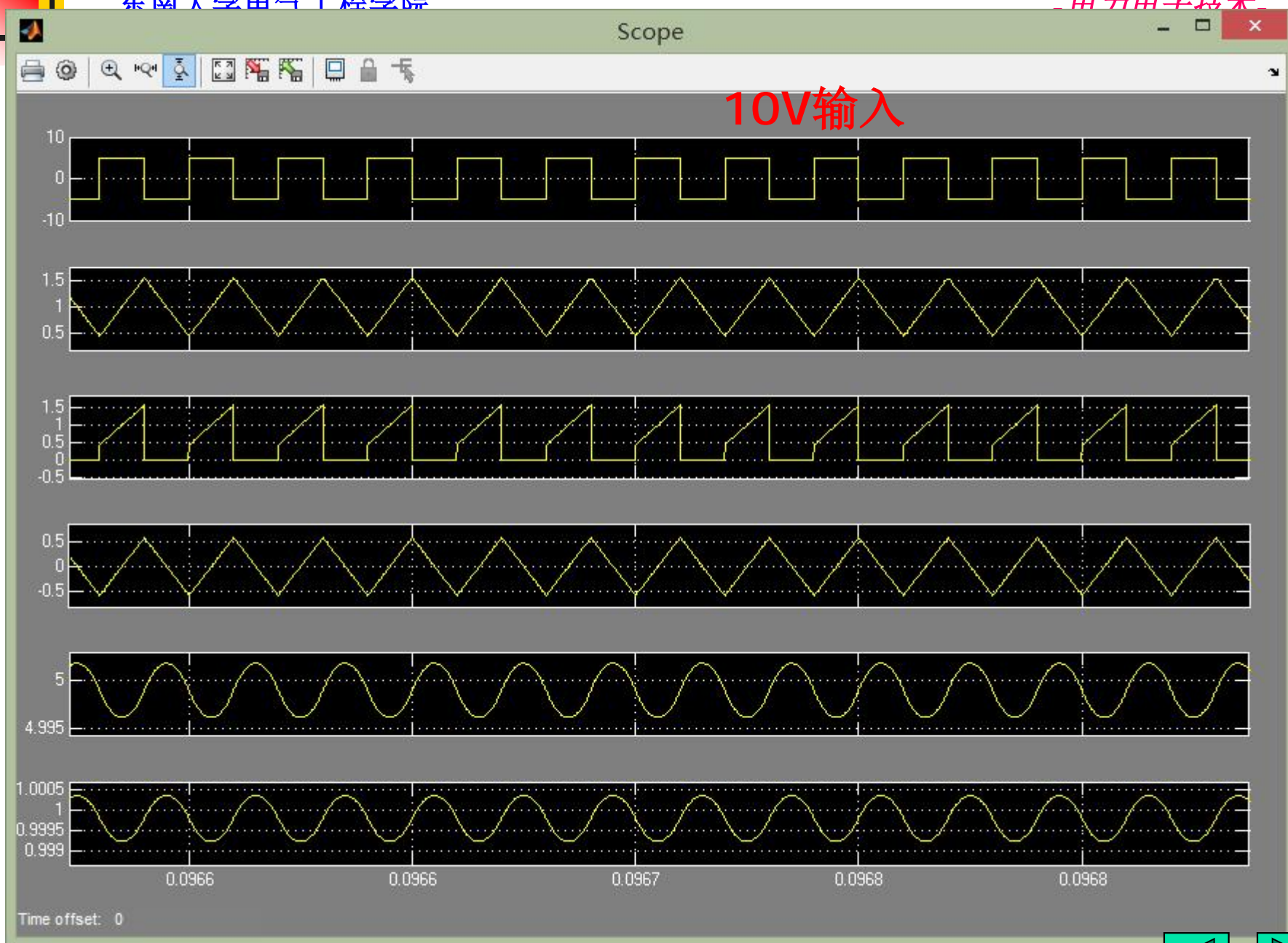
【答】：

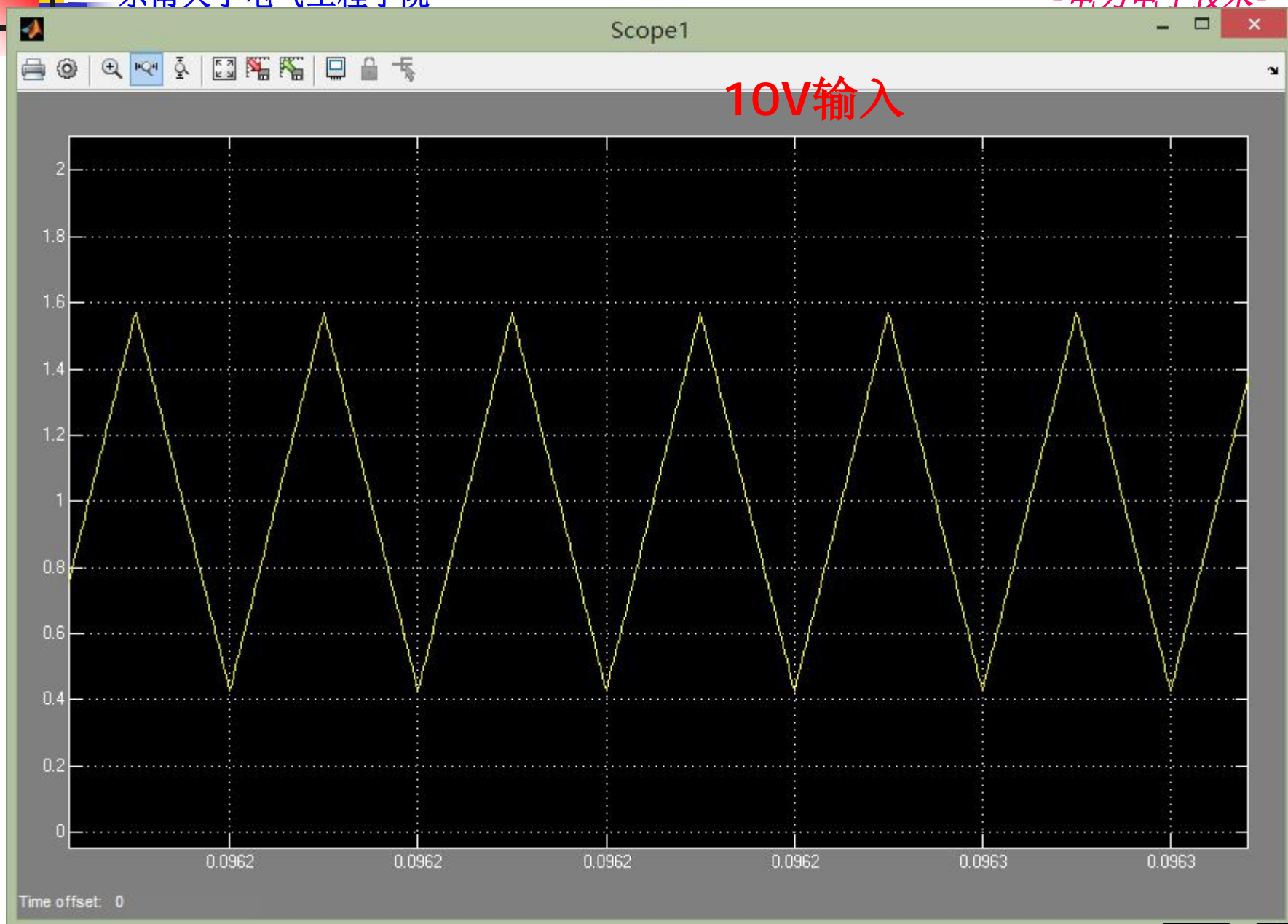
要在输入电压 10 到 $40V$ 的范围内保持电感电流连续，则应该选择 $10V$ 与 $40V$ 两种情况下计算得出的最大电感值，因此，最小电感为 $43.75\mu H$ 。





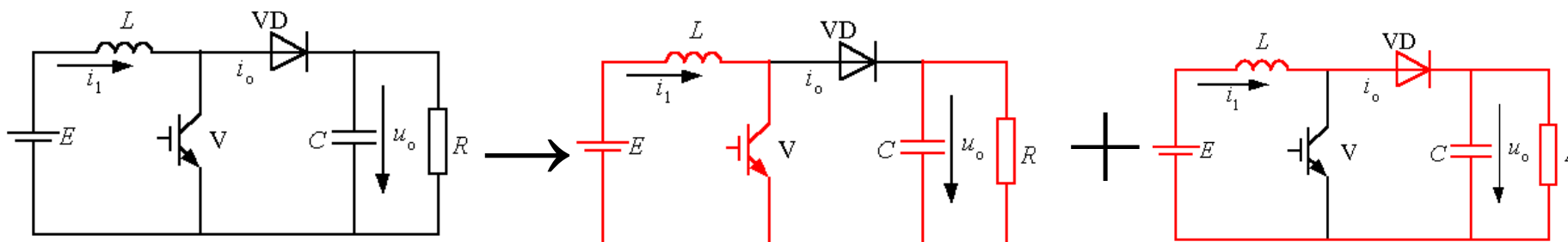






3、升压 (Boost) 斩波器

利用电感中的储能释放时产生的电压来提高输出电压



工作原理:

- (1) V 导通, E 加至 L , L 开始储能, i_L 上升, C 向负载放电, VD 关断。
- (2) V 关断, i_L 不变, 则感应电势, 和 E 叠加供给负载。 C 充电, u_c 上升, L 能量 $\rightarrow C$ 和负载

电感能量:

$$V \text{ 导通: } W_{in} = E \times I_L \times t_{on}$$

$$V \text{ 关断: } W_{out} = (U_o - E) \times I_L \times t_{off}$$

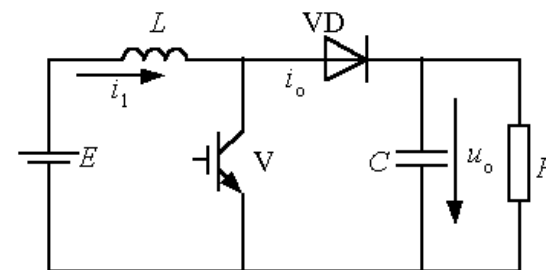
$$W_{in} = W_{out}$$

$$U_o = \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} E = \frac{T}{t_{off}} E = \frac{1}{1-a} E$$

输入、输出功率相等

$$EI = U_o I_o$$

$$\frac{I_o}{I} = \frac{E}{U_o} = 1-a$$



升压 “直流” 变压器



电流临界计算

电感电流

$$I_{LB} = \frac{1}{2} i_{LP} = \frac{1}{2} \frac{E T_{on}}{L} = \frac{1}{2L} (1-a) U_0 a T = \frac{U_0 T}{2L} a (1-a)$$

输出电流

$$I_{oB} = (1-a) i_{LB} = \frac{U_0 T}{2L} a (1-a)^2$$



P156页例题

有一理想Boost变换器，输出端电容很大，开关频率设为50kHz，输入电压在12~36V较宽范围内变化。要求通过调整导通比使输出电压等于48V，最大输出功率为120W。为满足稳定性要求，变换器工作在电感电流断续状态，试求可能使用的**最大电感**。

【答】：首先计算出输入电压变化时导通比的范围：

$$1 - a = \frac{E}{U_0} = \frac{12}{48} = 0.25 \quad \text{即} \quad a = 0.75$$

$$1 - a = \frac{E}{U_0} = \frac{36}{48} = 0.75 \quad \text{即} \quad a = 0.25$$

根据开关频率计算出周期时间T：

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50 \times 10^3} = 20 \times 10^{-6} (\text{ms})$$



P156页例题

有一理想Boost变换器，输出端电容很大，开关频率设为50kHz，输入电压在12~36V较宽范围内变化。要求通过调整导通比使输出电压等于48V，最大输出功率为120W。为满足稳定性要求，变换器工作在电感电流断续状态，试求可能使用的**最大电感**。

【答】：根据输出电压与功率求得负载电流平均值：

$$I_0 = \frac{P_0}{U_0} = \frac{120}{48} = 2.5(\text{A})$$

输入电压12V时电感值：

$$I_{oB} = (1 - a) i_{LB} = \frac{U_0 T}{2L} a (1 - a)^2$$

$$L = (1 - a) i_{LB} = \frac{U_0 T}{2 I_{oB}} a (1 - a)^2 = \frac{48 \times 20 \times 10^{-6}}{2 \times 2.5} \times 0.75 (1 - 0.75)^2 = 9(\text{mH})$$



P156页例题

有一理想Boost变换器，输出端电容很大，开关频率设为50kHz，输入电压在12~36V较宽范围内变化。要求通过调整导通比使输出电压等于48V，最大输出功率为120W。为满足稳定性要求，变换器工作在电感电流断续状态，试求可能使用的最大电感。

【答】： 输入电压36V时电感值：

$$I_{oB} = (1 - a) i_{LB} = \frac{U_0 T}{2L} a (1 - a)^2$$

$$L = (1 - a) i_{LB} = \frac{U_0 T}{2 I_{oB}} a (1 - a)^2 = \frac{48 \times 20 \times 10^{-6}}{2 \times 2.5} \times 0.25 (1 - 0.25)^2 = 27(\text{mH})$$

为保证Boost变换器在输入电压范围内都工作在电感电流断续模式下，应取电感值中的小者，即可能使用的最大电感为9μH。



东南大学

电力电子技术

第 32 讲

主讲教师：王念春

380419124@qq.com



P172页第3题

一个理想的Boost变换电路，滤波电容 $C=470\mu\text{F}$ ，希望输出电压 $U_0=24\text{V}$ ，输出功率 $P_0 \geq 5\text{W}$ ，试计算电源电压 E 为 $8 \sim 16\text{V}$ ，使变流器工作在连续导通模式下所需要的**最小电感** L_{\min} 。【注意：题目中缺少开关频率，这里取为**50kHz**】

【答】：通过开关频率计算出周期时间：

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50 \times 10^3} = 20 \times 10^{-6} (\text{ms})$$

输入电压为**8V**，**16V**时导通比：

$$1 - a = \frac{E}{U_0} = \frac{8}{24} = 0.33 \Rightarrow a = 0.67$$

$$1 - a = \frac{E}{U_0} = \frac{16}{24} = 0.67 \Rightarrow a = 0.33$$



P172页第3题

一个理想的Boost变换电路，滤波电容 $C=470\mu\text{F}$ ，希望输出电压 $U_0=24\text{V}$ ，输出功率 $P_0 \geq 5\text{W}$ ，试计算电源电压 E 为 $8 \sim 16\text{V}$ ，使变流器工作在连续导通模式下所需要的**最小电感** L_{\min} 。【注意：题目中缺少开关频率，这里取为**50kHz**】

【答】：通过输出功率计算出负载电流：

$$I_0 = \frac{P_0}{U_0} = \frac{5}{24} = 0.2083(\text{A})$$

$$I_{oB} = (1 - a) i_{LB} = \frac{U_0 T}{2L} a (1 - a)^2$$

输入电压为 8V ， 16V 时电感：

$$\begin{aligned} L_8 &= (1 - a) i_{LB} = \frac{U_0 T}{2I_{oB}} a (1 - a)^2 = \frac{24 \cdot 20 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 0.2083} \cdot 0.67 \cdot (1 - 0.67)^2 \\ &= 85.35(\text{mH}) \end{aligned}$$



P172页第3题

一个理想的Boost变换电路，滤波电容 $C=470\mu\text{F}$ ，希望输出电压 $U_0=24\text{V}$ ，输出功率 $P_0 \geq 5\text{W}$ ，试计算电源电压 E 为 $8 \sim 16\text{V}$ ，使变流器工作在连续导通模式下所需要的**最小电感** L_{\min} 。【注意：题目中缺少开关频率，这里取为**50kHz**】

【答】：通过输出功率计算出负载电流：

$$I_0 = \frac{P_0}{U_0} = \frac{5}{24} = 0.2083(\text{A})$$

$$I_{oB} = (1 - a) i_{LB} = \frac{U_0 T}{2L} a (1 - a)^2$$

输入电压为**8V**，**16V**时电感：

$$\begin{aligned} L_{16} &= (1 - a) i_{LB} = \frac{U_0 T}{2 I_{oB}} a (1 - a)^2 = \frac{24 \cdot 20 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 0.2083} \cdot 0.33 \cdot (1 - 0.33)^2 \\ &= 170.69(\text{mH}) \end{aligned}$$



P172页第3题

一个理想的Boost变换电路，滤波电容 $C=470\mu\text{F}$ ，希望输出电压 $U_0=24\text{V}$ ，输出功率 $P_0 \geq 5\text{W}$ ，试计算电源电压 E 为 $8 \sim 16\text{V}$ ，使变流器工作在连续导通模式下所需要的**最小电感** L_{\min} 。【注意：题目中缺少开关频率，这里取为**50kHz**】

【答】：为满足整个输入电压范围内电感工作在电流连续导通模式，取两个输入电压下的大电感值，即**170.69 μH** 。



4、升降压斩波电路(Boost-Buck Chopper)

L 和 C 很大

电感电流 i_L 和负载电压 u_o 基本为恒值

工作原理：

V通时 E 经 V 向 L 供电使其贮能，电流为 i_1

C 维持输出电压恒定向负载供电

V断时 L 的能量向负载释放，电流为 i_2

负载电压上负下正

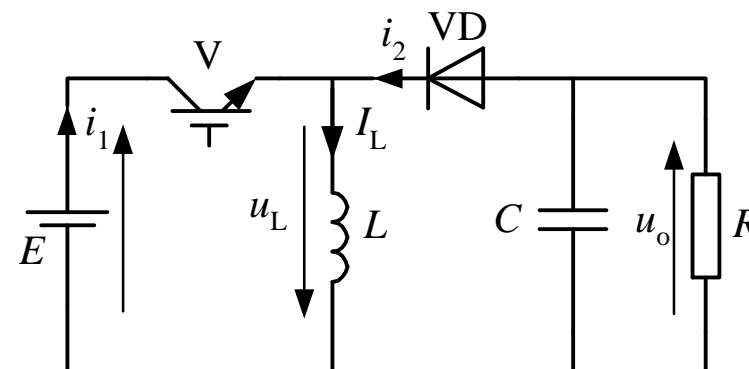
稳态时 $\oint u_L dt = 0$ $E > t_{on} = U_o > t_{off}$

$$U_o = \frac{t_{on}}{t_{off}} E = \frac{t_{on}}{T - t_{on}} E = \frac{a}{1 - a} E$$

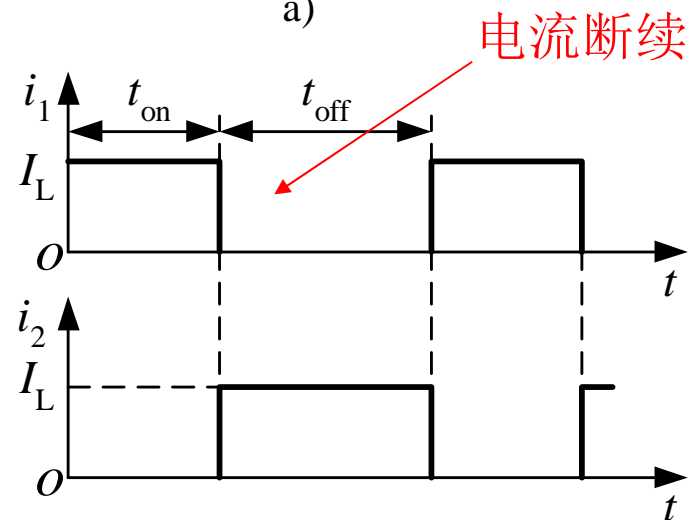
$0 < a < 1/2$ 时：为降压

$1/2 < a < 1$ 时：为升压

注意输出电压极性



a)



b)



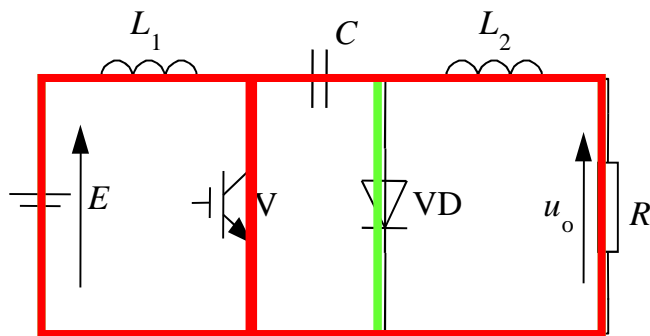
4、升降压斩波电路(Boost-Buck Chopper)

对升降压变换器，同样存在电感电流连续与断续模式，教材上没有给出推导的公式，可以参考降压与升压变换器的推导过程进行。

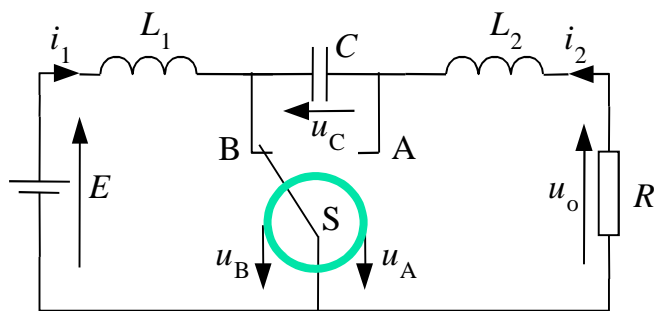
推导过程中注意：负载电流与电感电流之间的关系。

P172页第5题，是一个与第1，第3题类似的题目。

Cuk斩波电路



a)



b)

Cuk斩波电路及其等效电路
a) 电路图 b) 等效电路

■ V处于通态时， $E-L_1-V$ 回路和 $R-L_2-C-V$ 回路分别流过电流。

■ V处于断态时， $E-L_1-C-VD$ 回路和 $R-L_2-VD$ 回路分别流过电流

■ 输出电压的极性与电源电压极性相反。

■ 等效电路如图b所示，相当于开关S在A、B两点之间交替切换。

稳态时电容 C 的电流在一周期内的平均值应为零，也就是其对时间的积分为零，即

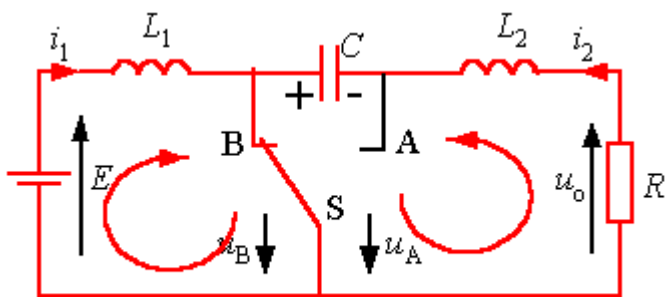
$$\oint_0^T i_C dt = 0$$

在图b的等效电路中，开关 S 合向B点时间即 V 处于通态的时间 t_{on} ，则电容电流和时间的乘积为 $I_2 t_{on}$ 。开关 S 合向A点的时间为 V 处于断态的时间 t_{off} ，则电容电流和时间的乘积为 $I_1 t_{off}$ 。由此可得

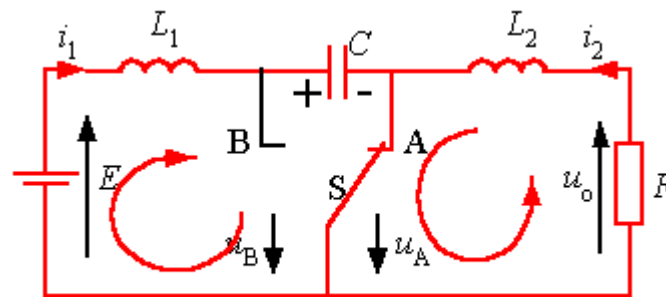
$$I_2 t_{on} = I_1 t_{off}$$

从而可得：

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{t_{off}}{t_{on}} = \frac{T - t_{on}}{t_{on}} = \frac{1 - a}{a}$$



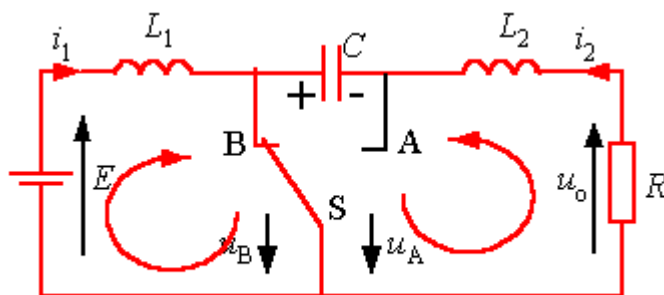
VT 通时



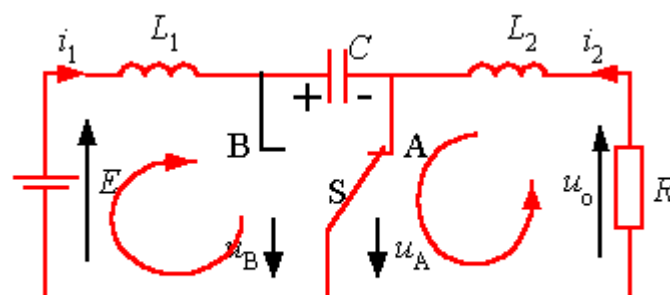
VT 断时



当电容 C 很大使电容电压 u_c 的脉动足够小时，输出电压 U_0 与输入电压 E 的关系可用以下方法求得：



VT 通时



VT 断时

当开关 S 合到 B 点时， B 点电压 $u_B=0$ ， A 点电压 $u_A=-u_c$

当开关 S 合到 A 点时， $u_B=u_c$ ， $u_A=0$ 。可以得到 B 点电压 u_B 平均值为： $U_B = \frac{t_{off}}{T} U_C$

又因电感 L_1 的电压平均值为零，所以有：

$$E = U_B = \frac{t_{off}}{T} U_C$$

A 点的电压平均值为： $U_A = - \frac{t_{on}}{T} U_C$

电感 L_2 的电压平均值为零，所以有： $U_A = - \frac{t_{on}}{T} U_C = - U_0$



$$\left\{ \begin{array}{l} E = U_B = \frac{t_{off}}{T} U_C \\ U_A = - \frac{t_{on}}{T} U_C = - U_0 \end{array} \right.$$



$$U_o = \frac{t_{on}}{t_{off}} E = \frac{t_{on}}{T - t_{on}} E = \frac{a}{1 - a} E$$

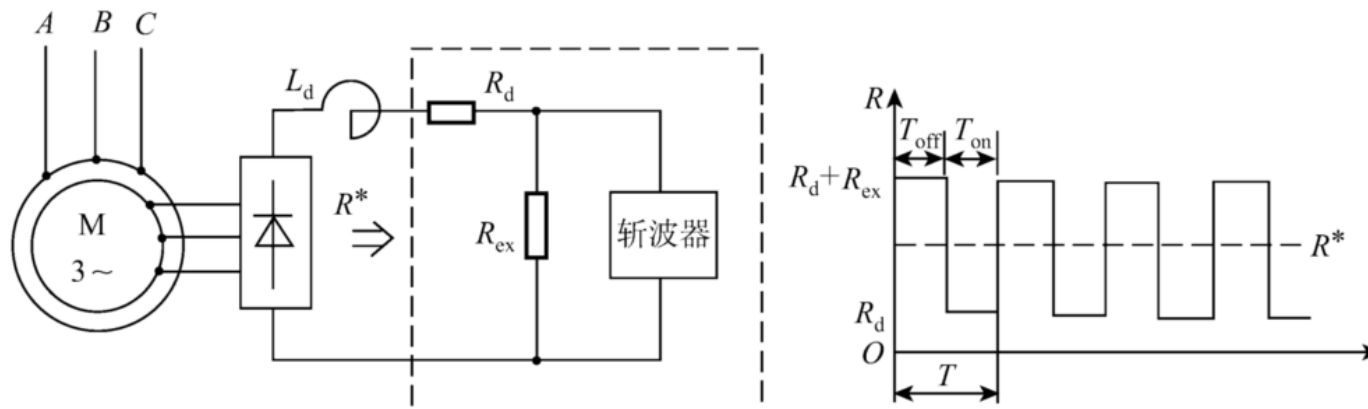
特点：输入电源电流是连续的。

P162页

CúK变换电路与Boost-Buck变换电路的比较：

- (1) 实现的变换功能相同；存在的差异如下：
- (2) CúK变换器的输入电源电流与输出负载电流均连续，脉动小，有利于滤波；
- (3) CúK变换器借助电容传输能量，Boost-Buck变换器借助电感传输能量，故CúK变换器的电容脉动电流大，要求电容量大；
- (4) CúK变换器开关管V导通时电流要流过两个电感 L_1 与 L_2 ，因此功率开关管的峰值电流大。

6、斩波调阻



斩波器断: $R = R_d + R_{ex}$

斩波器通: $R = R_d$

$$R^* = \frac{(R_d + R_{ex})t_{off} + R_d t_{on}}{T} = \frac{R_d(t_{off} + t_{on}) + R_{ex}t_{off}}{T}$$

$$= R_d + R_{ex} \frac{t_{off}}{T} = R_d + R_{ex}(1 - a)$$

东南大学

电力电子技术

第 33 讲

主讲教师：王念春

380419124@qq.com



7、多象限运行

二象限斩波器：1，2象限

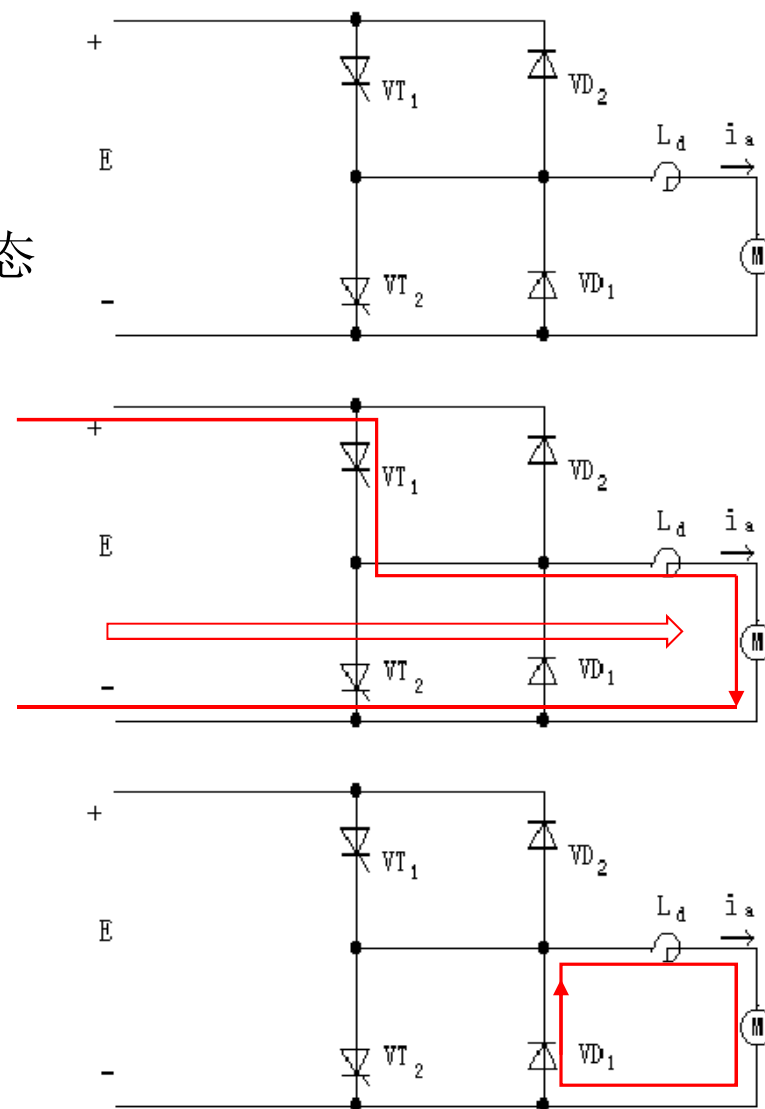
可使电机运行于电动机状态或则发电机状态

电动机状态：降压斩波变换

开关管导通：输入电源 $E \rightarrow$ 开关管 $VT_1 \rightarrow L_d \rightarrow$ 电机 M

开关管关断： $L_d \rightarrow$ 电机 $M \rightarrow$ 续流二极管 VD_1

VT_1 ， VT_2 为全控型器件。



7、多象限运行

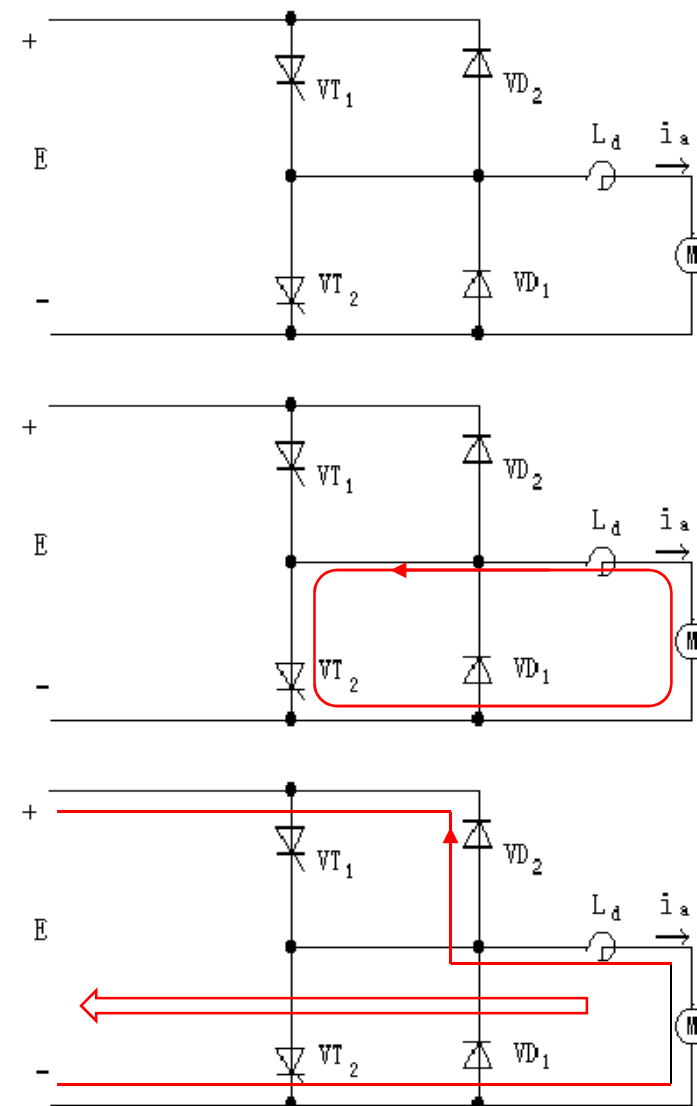
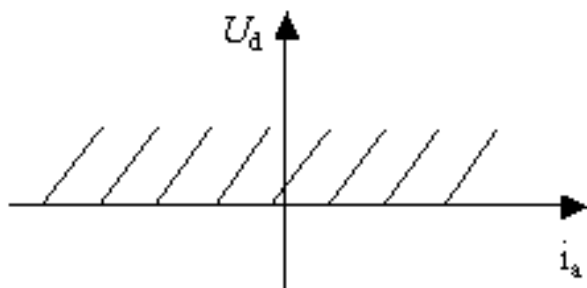
二象限斩波器：1，2象限

可使电机运行于电动机状态或则发电机状态

发电机状态：升压斩波变换

开关管导通：电机 $M \rightarrow L_d \rightarrow VT_2$

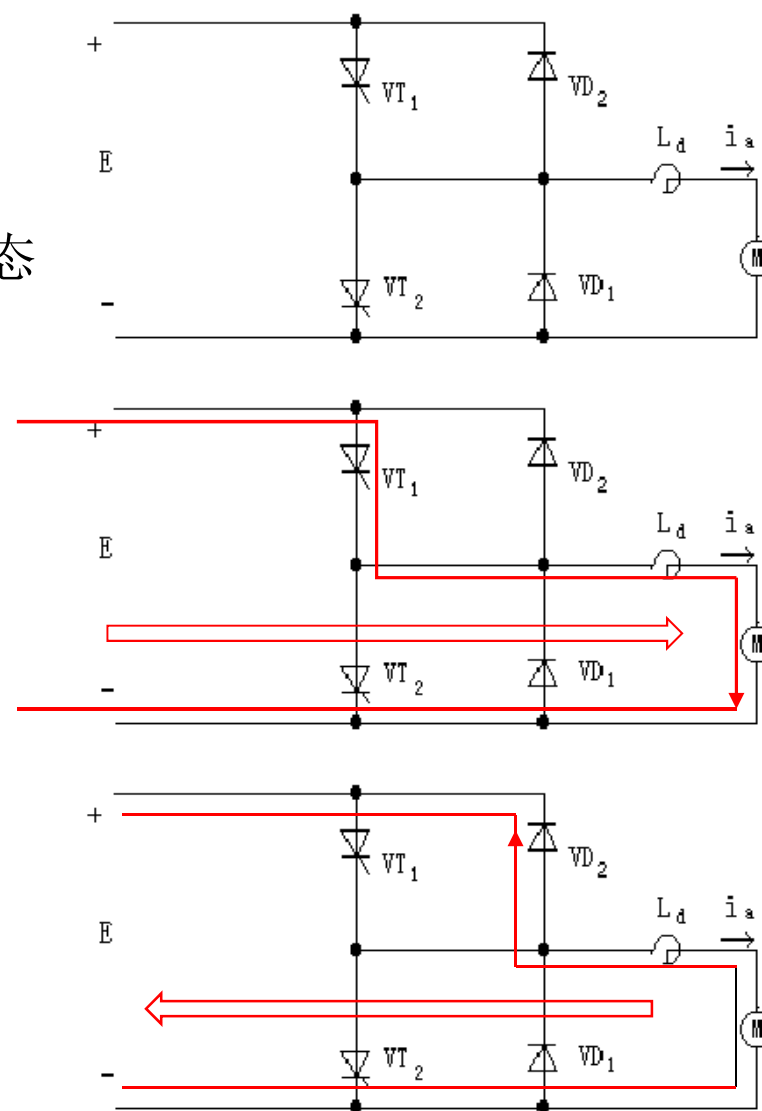
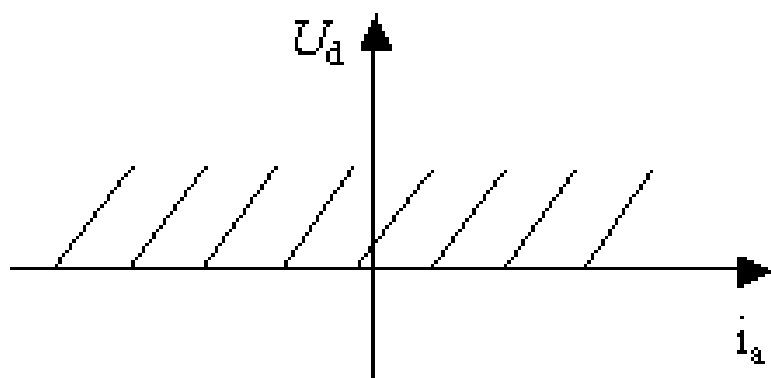
开关管关断：电机 $\rightarrow L_d \rightarrow$ 续流二极管 VD_2



7、多象限运行

二象限斩波器：1，2象限

可使电机运行于电动机状态或则发电机状态



(一、四) 象限:

(1) VT_1 , VT_2 通, $i_1(+)$, $E_M(+)$ 电源到电机

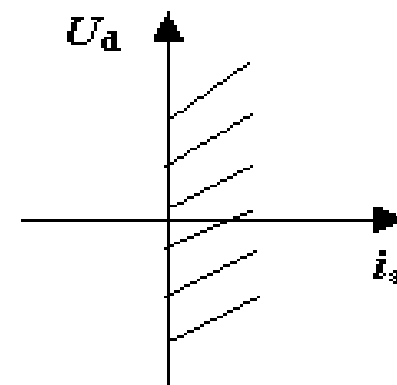
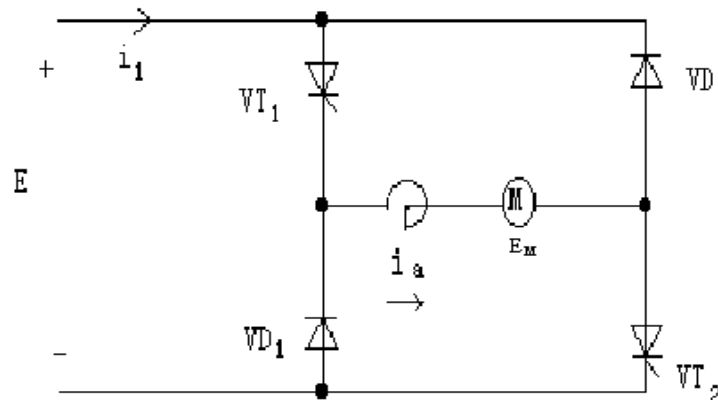
(2) VT_1 , VD_2 或者 VT_2 , VD_1 通

回路短接。 $U_d=0$, i_a 续流。

(3) VD_1 , VD_2 通, $i_1(-)$, $E_M(-)$,

功率由电机到电源

VT_1 , VT_2 为全控型器件。



四象限斩波器:

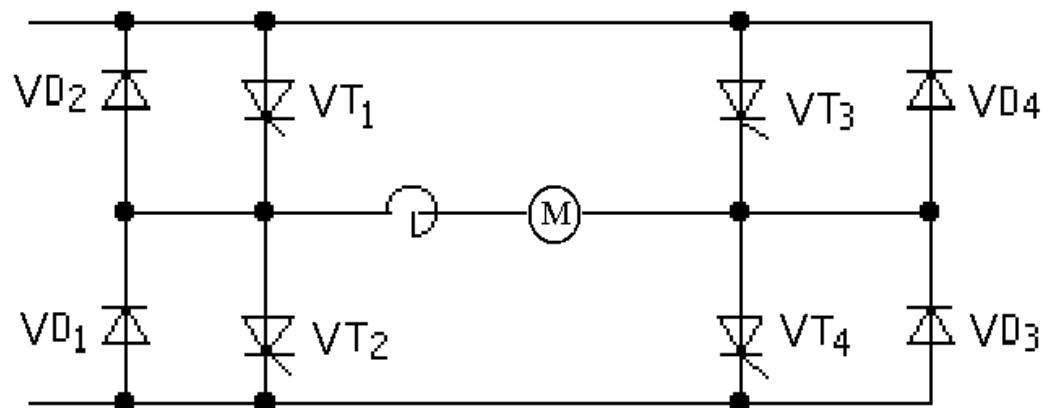
两个二象限斩波器组合在一起

(1) VT_4 一直通, VT_3 一直断,

左侧工作, 1、2象限。

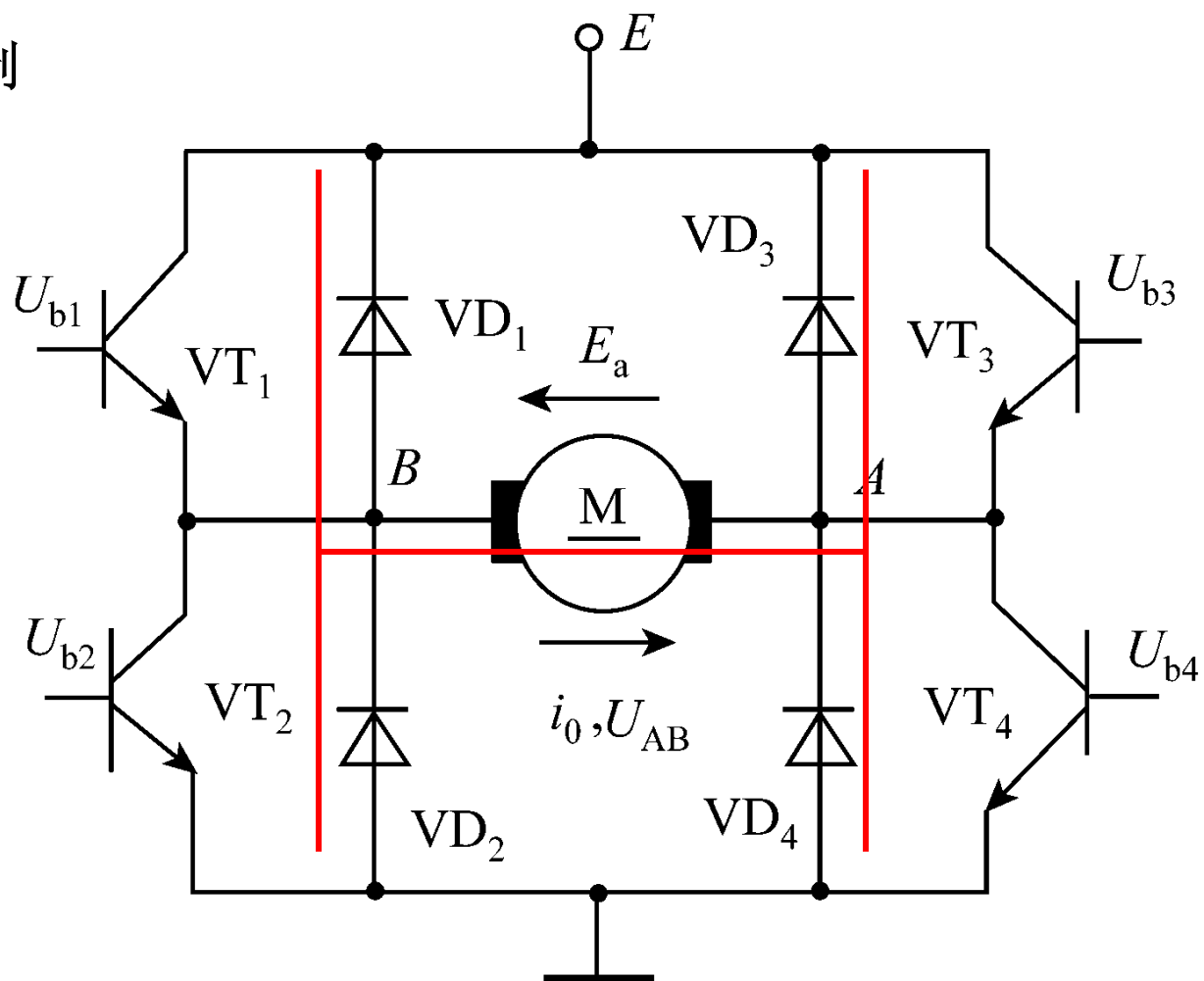
(2) VT_2 通, VT_1 断,

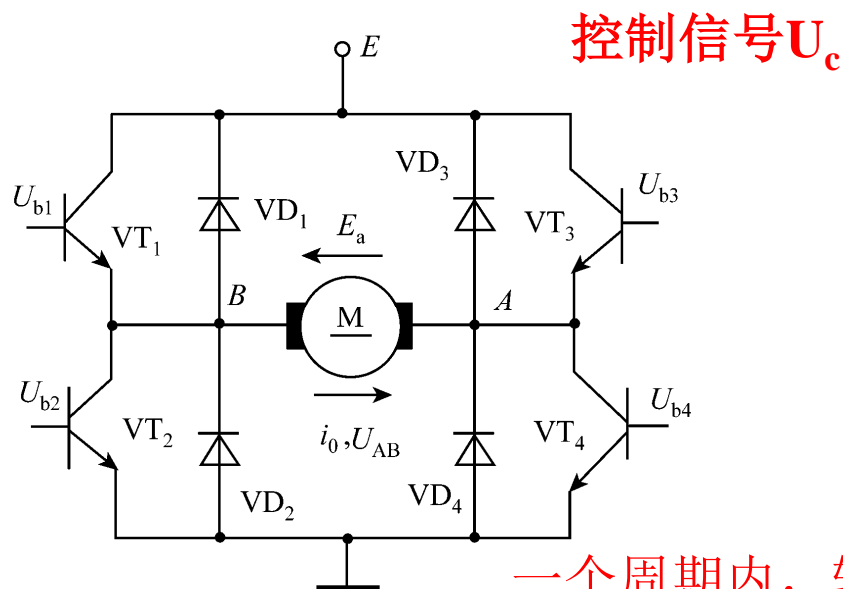
右侧工作, 3、4 象限。



四、桥式可逆斩波器

输入电源E，控制
AB两点的电压





$U_c > 0$ VT_1 、 VT_2 交替导通， VT_4 一直通， VT_3 不通。 **B+A-**

$U_c < 0$ VT_3 、 VT_4 交替导通， VT_2 一直通， VT_1 不通。 **A+B-**

一个周期内，输出电压根据 U_c 情况，极性单一。

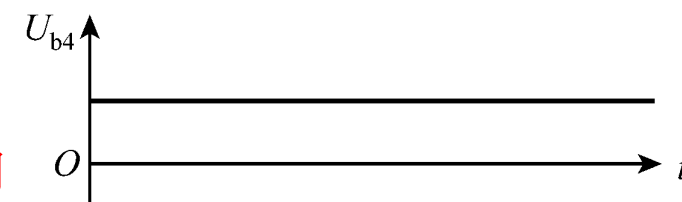
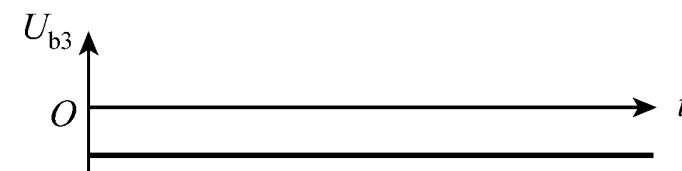
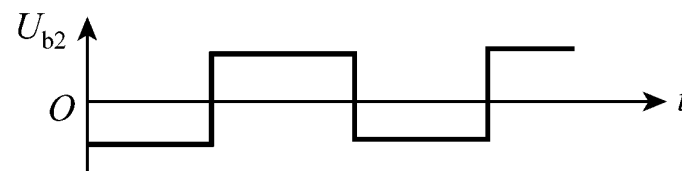
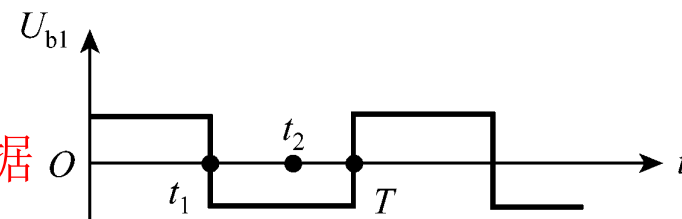
1、单极性脉宽调制

(1) $E > E_a$ 时

$0 \leq t < t_1$ VT_1 、 VT_4 导通， VT_2 、 VT_3 关断
电动状态。

$t_1 \leq t < T$ VT_4 、 VD_2 导通续流，方向不变，
电流衰减。电动状态。

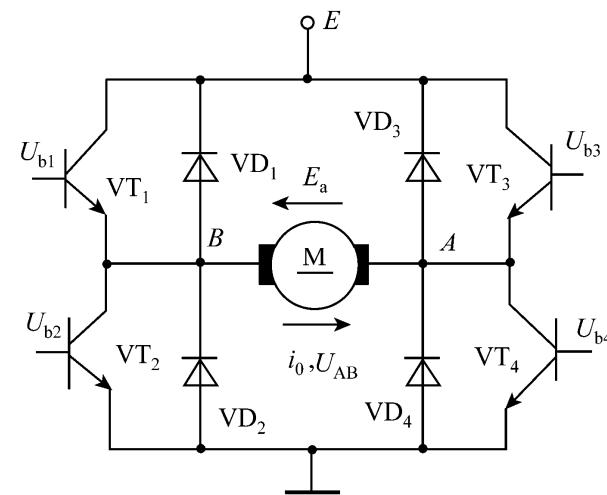
$t_2 < t < T$ 若 t_2 点电流为零，在 E_a 作用下 VT_2 、
 VD_4 导通，能耗制动状态。 **电流反向**



(2) $E < E_a$ 时

$0 \leq t < t_1$ VD_1 、 VD_4 导通，再生制动

$t_1 \leq t < T$ VT_2 、 VD_4 导通，能耗制动



控制电压 $U_c > 0$ 时 A (—)，B (+) 只输出正的脉冲电压

$U_c < 0$ 时 A (+)，B (—) 只输出负的脉冲电压

极性单一，单极性调制。

$$\left| \frac{U_0}{E} \right| = a$$



2、双极性脉宽调制

VT_1 和 VT_4 ， VT_2 和 VT_3 同时交替通、断

(1) $E > E_a$ 时

$0 \leq t < t_1$ VT_1 、 VT_4 导通， VT_2 、 VT_3 关断

$t_1 \leq t < T$ VD_2 、 VD_3 导通，电动状态

若负载电流大，斩波频率高，电机电流有可能不会下降到零，一直处于电动状态。否则 t_2 时刻电流换相。

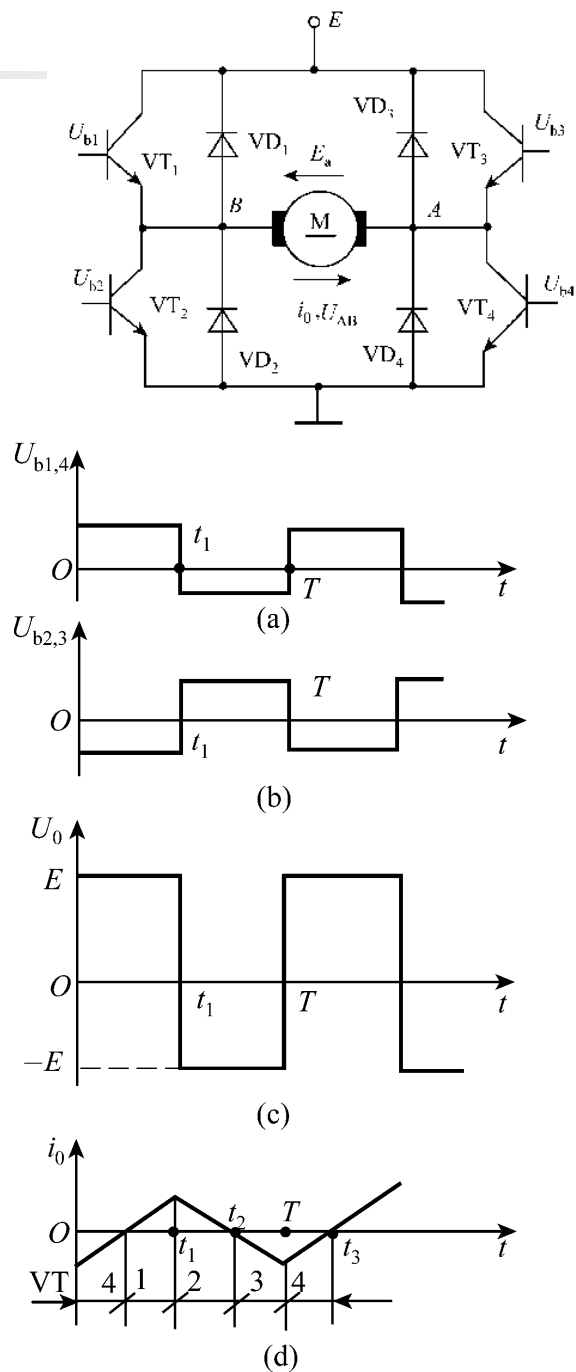
$t_2 < t < T$ VT_2 、 VT_3 导通，反接制动状态

$T \leq t < (T + t_1)$ VD_1 、 VD_4 续流，再生制动状态

特点：

$0 \leq t < t_1$ U_{AB} 总等于 $-E$

$t_1 \leq t < T$ U_{AB} 总等于 $+E$



2、双极性脉宽调制

特点:

$$\left. \begin{array}{ll} 0 \leq t < t_1 & U_{AB} \text{总等于} -E \\ t_1 \leq t < T & U_{AB} \text{总等于} +E \end{array} \right\}$$

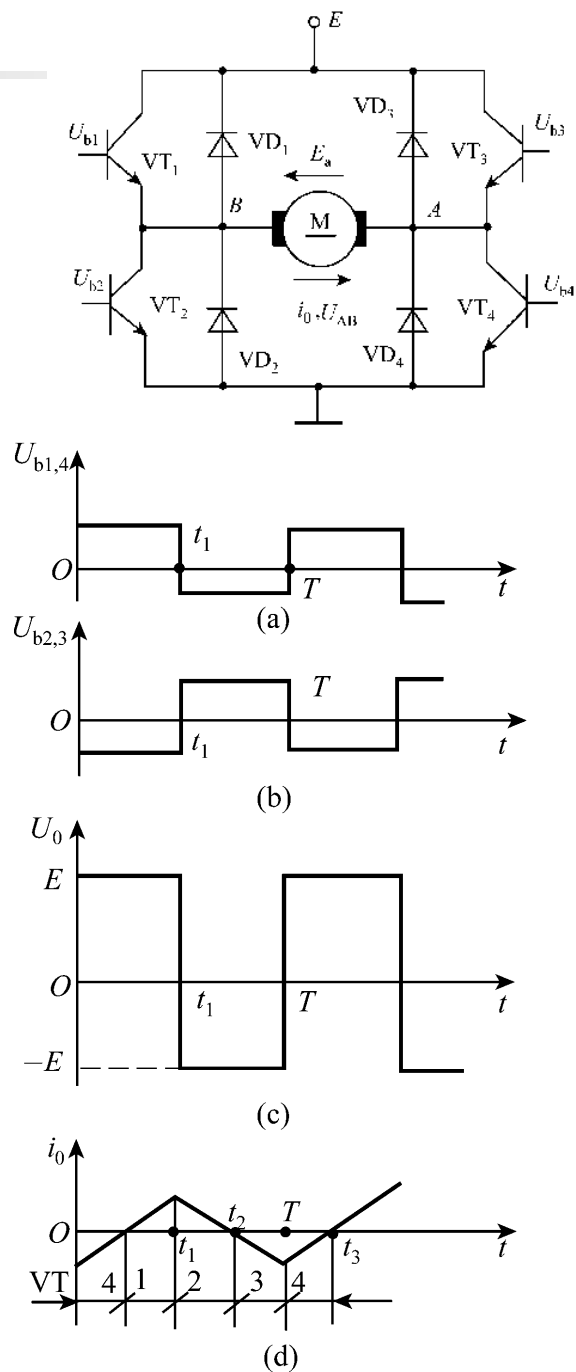
双极性脉宽调制

$$U_0 = \frac{t_1}{T} E - \frac{T - t_1}{T} E = 2 \frac{t_1}{T} E - E = (2a - 1) E$$

$$a=0 \Rightarrow U_0 = -E$$

$$a=0.5 \Rightarrow U_0 = 0$$

$$a=1 \Rightarrow U_0 = E$$



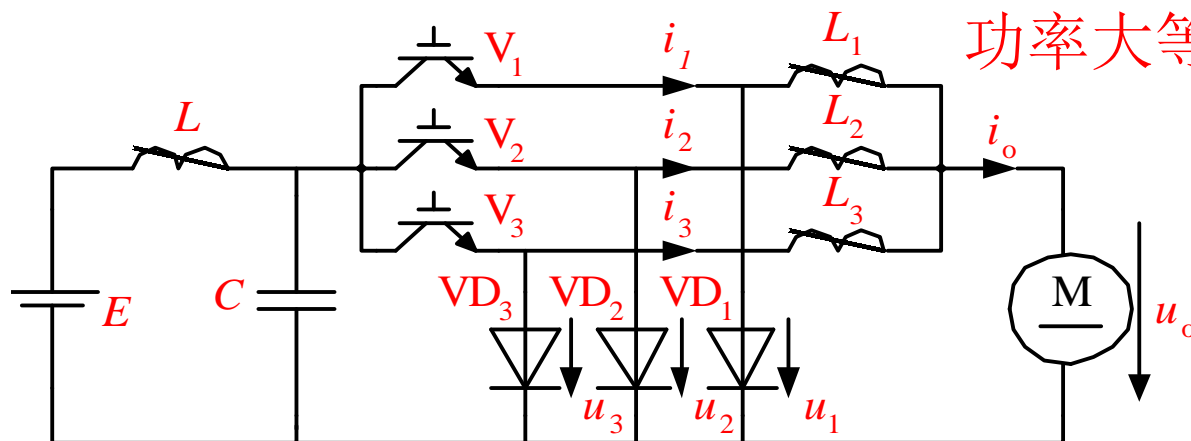
多相多重斩波电路

多相多重斩波电路 \longrightarrow 在电源和负载之间接入多个结构相同的基本斩波电路而构成

斩波电路相数 \longrightarrow 一个控制周期中电源侧的电流脉波数

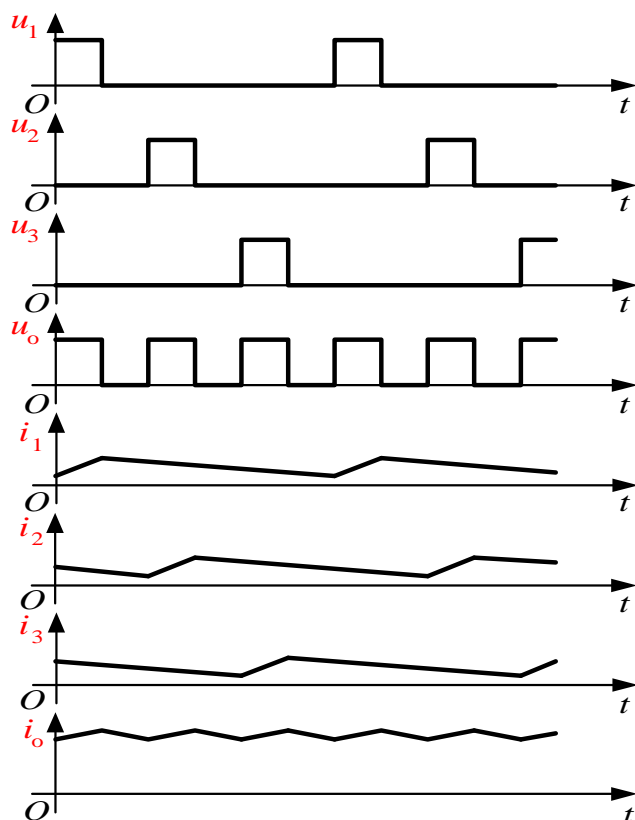
斩波电路重数 \longrightarrow 负载电流脉波数

适用可靠性要求高，
功率大等场合



3相3重斩波电路图

多相多重斩波电路



3相3重斩波波形

相当于由3个降压斩波电路单元并联而成，总输出电流为3个斩波电路单元输出电流之和，其平均值为单元输出电流平均值的3倍，脉动频率也提高。

为3倍。多相多重斩波电路和单相时相比，

在输出电流最大脉动率一定时，所需平波电抗器总重量大为减轻。由于3个单元电流的脉动幅值互相抵消，使总的输出电流脉动幅值变得很小。

多相多重斩波电路

3相1重斩波电路 → 电路电源公用而负载为3个独立负载时

1相3重斩波电路 → 电源为3个独立电源，向一个负载供电时

■ 电流电源为各可控开关的电流之和，其脉动频率为单个斩波电路时的3倍，谐波分量比单个斩波电路是显著减小，且电源电流的最大脉动率也是与相数的平方成反比。使得由电源电流引起的感应干扰大大减小，若需滤波，接上简单的LC滤波器即可充分防止感应干扰。

■ 多相多重斩波电路还具有冗余功能，各斩波电路单元可互为备用。一旦某单元发生故障，其余各单元仍可继续工作，提高了系统总体运行的可靠性。

教材P171页第四章小结

- ①四种基本变换电路：降压，升压，升降压，丘克。
- ②降压、升压两种最为基本。电感电流连续状态下的计算，临界状态下的计算。
- ③升降压与丘克变换电路的异同。
- ④双向直流变换器与H桥可逆斩波电路
- ⑤多相多重斩波电路

作业:

P. 177 习题1、6、7

