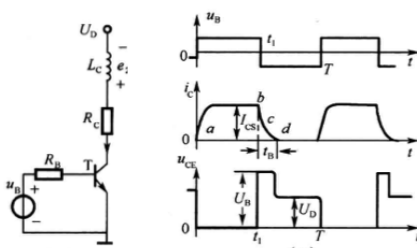


脉宽调制 (PWM) 技术: (书15章) (共3个问题)

Lec 9

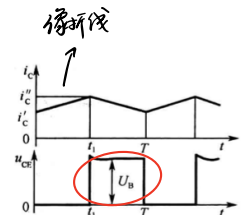
1. 电阻和电感负载的开关过程 → 其实就是拿PWM波驱动三极管, 有利于理解双极性 PWM 的工作过程

① 无续流回路 先分析电流断续情况



当管子从截止转向饱和时: 由于电流必须满足  $L_c \frac{di_c}{dt} + R_c i_c + U_{CE} = U_0$   
 此时自感电势为上正下负  
 可得电流按指数规律上升。

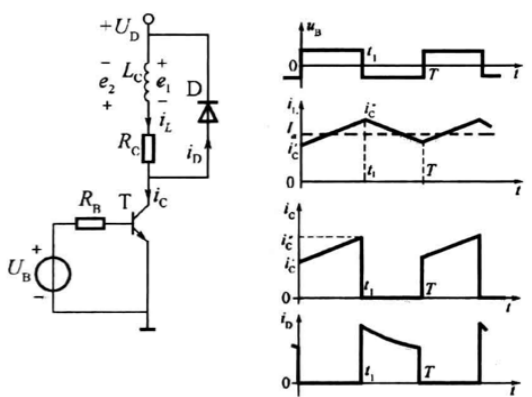
当管子从饱和转向截止时: 负载电流减小所产生的自感电势  $e_2$  为上负下正  
 $U_{CE} = U_0 + e_2 - i_c R_c \rightarrow$  晶体管击穿, 相当于一个理想放电电阻,  
 直到  $i_c = 0$  时,  $U_{CE} = U_0$  并保持(在截止状态)



电路时间常数与开关周期之比若较大, 则电流为连续(不会达到稳定), 此时管子的工作状态是在击穿区和饱和区间, 没法进入截止区。↗

② 有续流回路 大多情况下负载电流连续。

$0 < t < t_1$ , 晶体管处于饱和状态 与上面相同, 集电极电流按指数规律增加  
 二极管反向偏置, 无法开通, 自感电势上正下负。(e1)



$t = t_1$  时, 基极电压改变, 欲使晶体管由饱和变截止, 集电极电流 ↓  
 自感电势改变方向(上负下正, 欲维持  $i_c$  流动), 使二极管正端电位上升,  
 升至  $U_0 + 0.7V$  时二极管导通, 将集电极电压钳位在约  $U_0$  (实为  $U_0 + 0.7V$ ),  
 避免了击穿。接着, 集电极电流迅速减至0, 三极管进入截止区, 负载电流  
 全部由二极管的回路承担且逐渐减小。

$t = T$  时, 基极电压欲使三极管由截止变为饱和。晶体管刚开通时, 二极管已导通, 集电极电流逐渐个  
 开关过程中负载电流可视作基本不变, 当  $i_c$  增至  $i_{c1}$  时, 二极管上无电流, 随后有一反向漂移电流通过二极管, 晶体管上  
 电流骤然增大, 又回落回来。  
 随后二极管截止, 晶体管压降瞬时从  $U_0$  跳变至饱和管压降, 此后晶体管又工作于饱和状态。  
 原来二极管联通集电极和  $U_0$   
 现在集电极和  $U_0$  有个较大的负载压降

2. PWM 的基本原理

面积等效原理: 冲量相等而形状不同的窄脉冲加在具有惯性的环节上时, 其效果基本相同。  
 ↓  
 窄脉冲面积      ↓  
 指向, 低频段非常接近, 仅在高频段略有差异

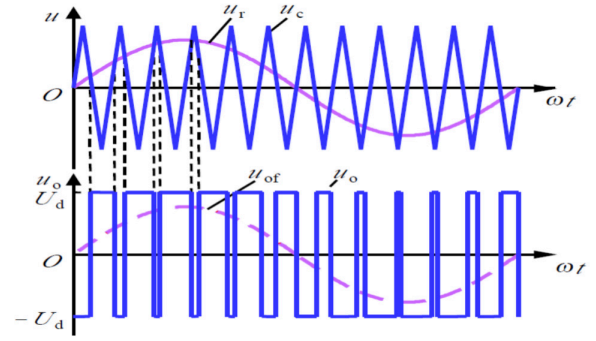
应用实例: 用 PWM 技术来调制一个正弦波: 将正弦波  $N$  等分, 得到  $N$  个等宽不等幅的窄脉冲。根据冲量(面积)等效原理, 用等幅不等宽的矩形脉冲来代替, 且宽度按正弦规律变化(使面积与正弦半波切分出的窄脉冲相同)

⇒ 可以通过更改各种脉冲宽度来改变等效正弦波的幅值

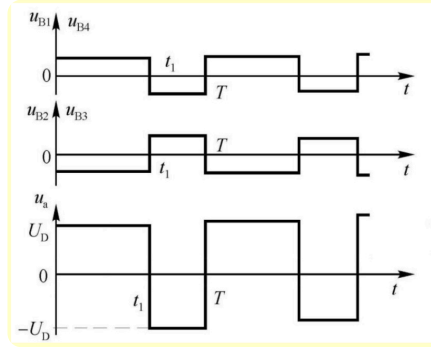
实现手段：将待调制信号与一参考三角波/锯齿波相比较，来确定输出的极性。

用此种信号来驱动负载会如何？

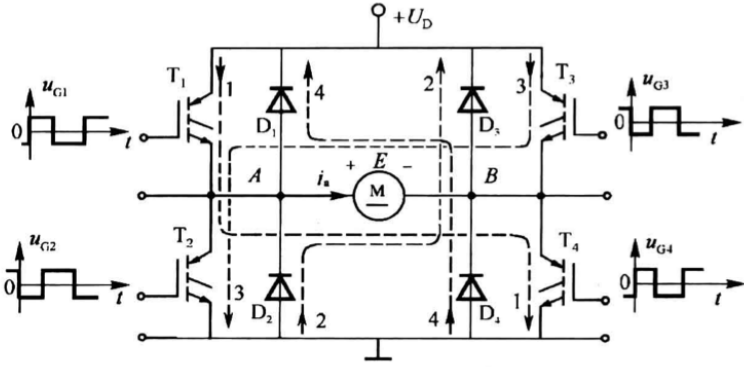
### 3. 双极+2 PWM驱动的分析



$$U_{av} = \frac{1}{T} \int_0^{t_1} U_D dt - \frac{1}{T} \int_{t_1}^T U_D dt = U_D (2 \frac{t_1}{T} - 1)$$



$$\begin{aligned} \frac{t_1}{T} > \frac{1}{2} & U_{av} > 0 \\ = \frac{1}{2} & = 0 \\ < \frac{1}{2} & < 0 \end{aligned}$$



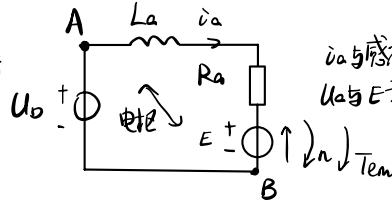
不是0  
 $U_{av} > E$  时，电路处于电动机状态

$0 < t < t_1$ ， $T_1, T_4$  饱和导通，电流如左图路径  
 $T_2, T_3$  截止

$$R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E = U_D \Rightarrow i_a(t) = \frac{U_D - E}{R_a} - \left( \frac{U_D - E}{R_a} - I_0 \right) e^{-\frac{R_a}{L_a} t}$$

$I_0$  为  $t=0$  时电流

等效电路



$i_a$  与感生电动势方向相反  
 $U_D$  与  $E$  方向也相反

处于电动机状态  
电机电感储存能量  
(磁场增强)  
电源供电  
电 → 机械

则  $i_a$  且  $\rightarrow \frac{U_D - E}{R_a}$

$t_1 \leq t \leq T$  时， $T_1, T_4$  关断。电机电流 ↓ 电机两端电压  $U_{AB} = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E$  则  $U_{AB} < 0$   $U_A \downarrow$   $U_B \uparrow$

$U_A$  降至  $-0.7V$ ， $U_B$  升至  $U_D + 0.7V$  时，两二极管导通，电机中电流维持原方向  
 $D_2, D_3$  (电感续流作用)

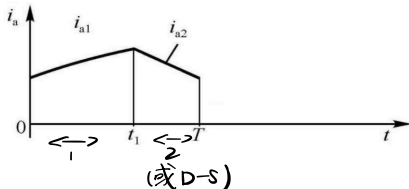
电流路径变成 2 (相当于 A 接地 B 接  $U_D$ )

同样列电压平衡方程  $R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E = -U_D \Rightarrow i_a(t) = \frac{-U_D - E}{R_a} - \left[ \frac{-U_D - E}{R_a} - I(t_1) \right] e^{-\frac{R_a}{L_a} t}$

$I(t_1)$  为  $t_1$  时电流

$i_a \rightarrow -\frac{U_D + E}{R_a}$   
但没时间达稳态

最终电流波形：

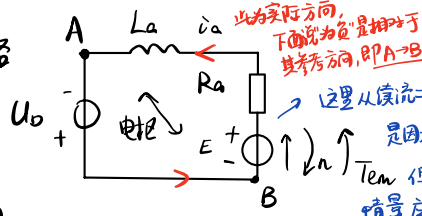


若无续流 = 极管，当 A 电位 ↓ B 电位 ↑，达到管子 C-E 击穿电压时， $T_1, T_4$  将运行于击穿区， $D_2, D_3$  (A 与  $U_D$ ，T1，B 与地，T4)

所以接续流 = 极管时避免开关器件击穿，维持电动机的电机电流。

$U_{av} < E$  时 电路处于发电机状态

等效电路



此为实际方向，下面说为负是相对于其参考方向，即 A → B  
反接制动状态 (电流从电源 + 流出，磁场增强)  
电 → 机械

$t_1 \leq t \leq T$  时， $T_2, T_3$  饱和导通，

电流： $U_D \rightarrow T_3 \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow T_2 \rightarrow GND$  (路径 3)

$(i_a) \uparrow i_a \rightarrow -\frac{U_D + E}{R_a}$  (为负)

这里从续流 = 极管不工作的状态开始分析，是因为续流 = 极管不会先行工作，逻辑上没问题，但就是这个 E 的正反容易搞混。为什么是正还是负？请导应该是电机不在正转，此时  $U_{av}$  突然变成小于 E。对。否则说不通，如果一开始就从反接制动状态开始，肯定不是制动，而是电动机状态。

$0 \leq t \leq t_1$  时  $T_2, T_3$  关断, 电流绝对值减小

由于电机电感作用, 电流维持原方向,

保护  $T_2, T_3$

在电感的自感电势影响下,  $U_B \downarrow$   $U_A \uparrow$

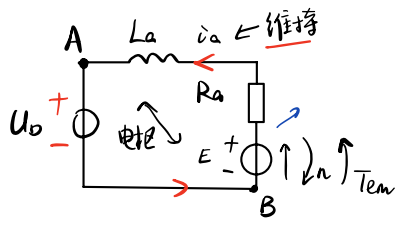
同样, 当  $U_B$  下降至  $-0.7V$ ,  $U_A$  上升至  $U_0 + 0.7V$  时, = 极管  $D_1, D_4$  导通,

电流路径变成 4。 (相当于 A 接  $U_0$  B 接地)

$|i_a| \downarrow$   $i_a \rightarrow \frac{U_0 - E}{R_a}$  (为负)

( $T_1, T_4$  虽栅极正向偏压, 但  $U_{CE}$  (或  $U_{DS}$ )  $< 0$ , 不能导通)

等效电路:



发电机状态 (回馈制动状态)

磁场力变为电能

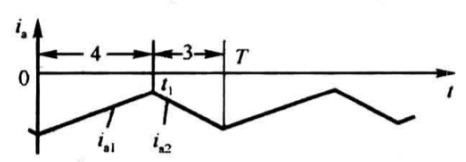
(电磁转矩与转速反向, 电流与感应电势同向  $\rightarrow$  制动)

机械  $\rightarrow$  电

电流流进电源 "+" 端, 给电源充电  $\rightarrow$  回馈)

电源吸收能量

最终电流波形:



占空比为 50% 时可视为能耗制动

若讨论其反转情形? 回路 3, 4 为其电动状态 回路 1 为反接制动 回路 2 为发电机状态。

优点: 电流连续, 可使电机四象限运行, 低速平稳性好, 调速范围大, 电机停转时有微小电流, 消除静摩擦死区

低速时开关器件驱动脉冲较宽, 有利于保证器件可靠导通

\* 单极性 PWM: 减少开关管导通次数, 延长其寿命, 但控制复杂。

关于开关元件的功率损耗, 看书 15.6.1。公式较多。注意区分阻性负载与惯性负载 (1/2 与 1/4) (电阻电感)