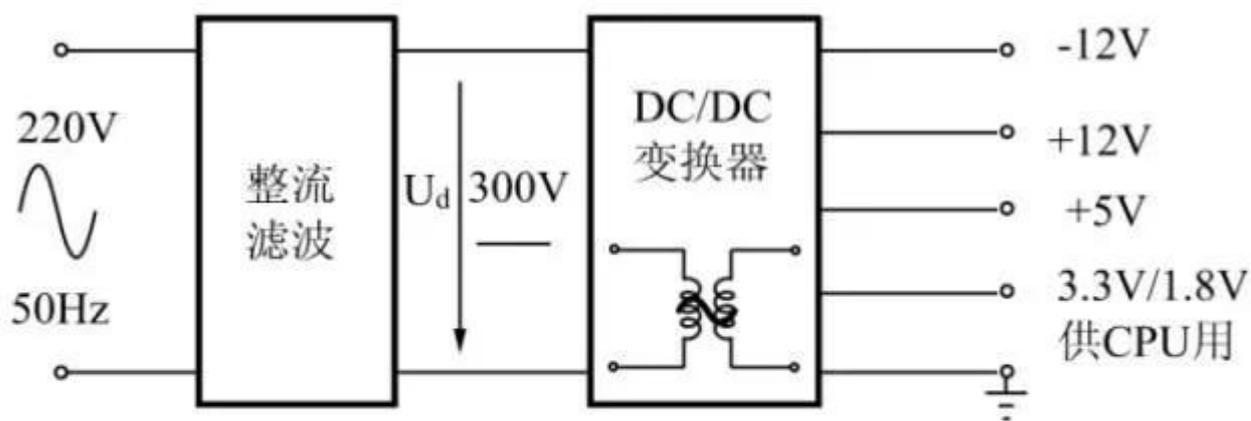


基本原理

一、基本概念

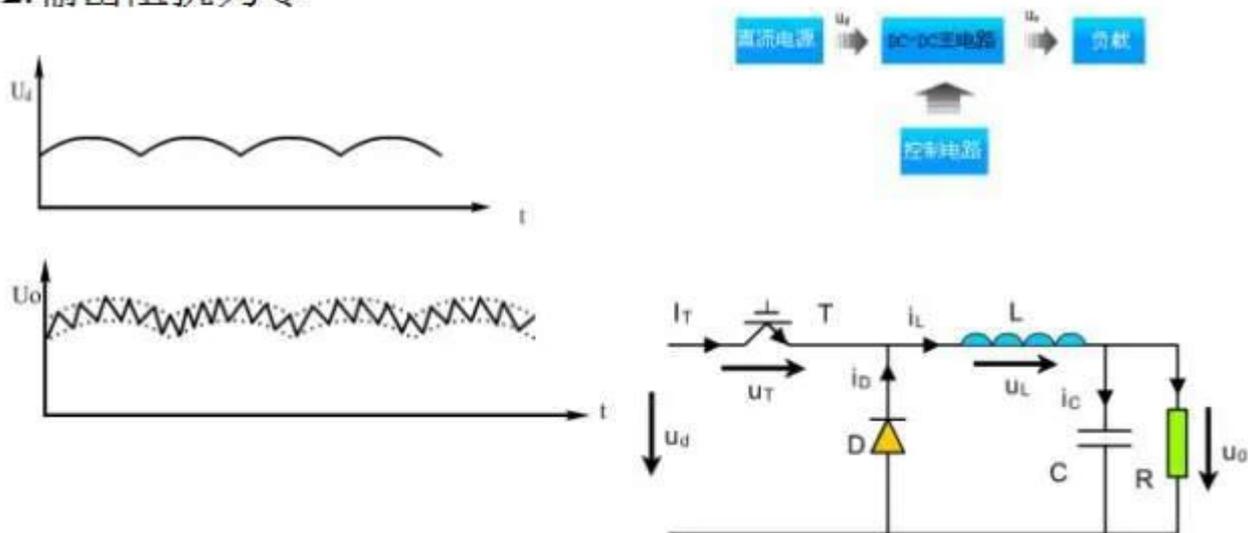


PC电源的结构框图

DC-DC变换器定义:只对直流参数进行变换的电路

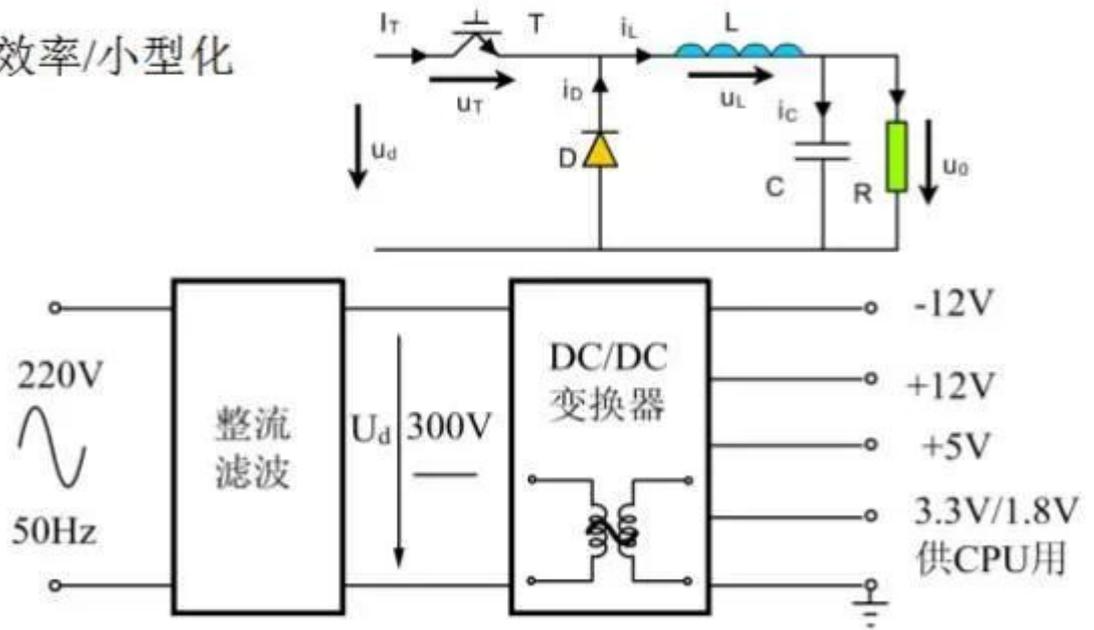
二. 理想直流变换器应具备的性能

1. 输入/输出端的电压均为平滑直流, 无交流谐波分量
2. 输出阻抗为零



3.快速动态响应,抑制干扰的能力强

4.高效率/小型化

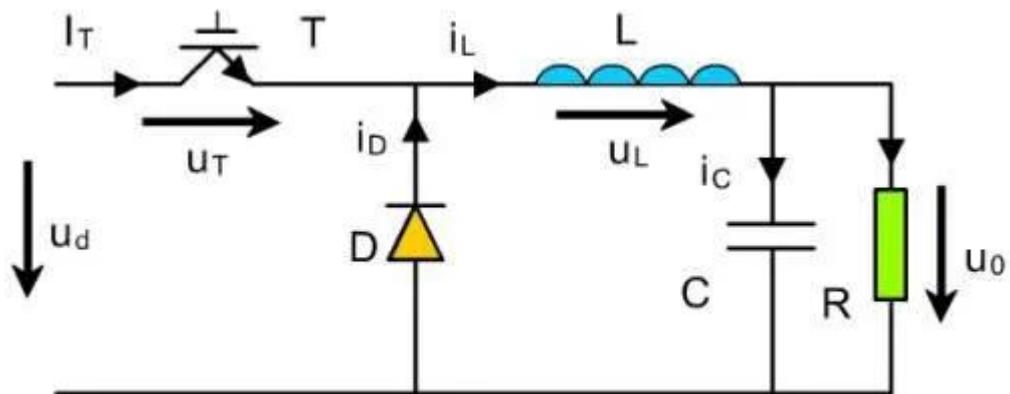


PC电源的结构框图

直流-直流降压变换器(BUCK 变换器)

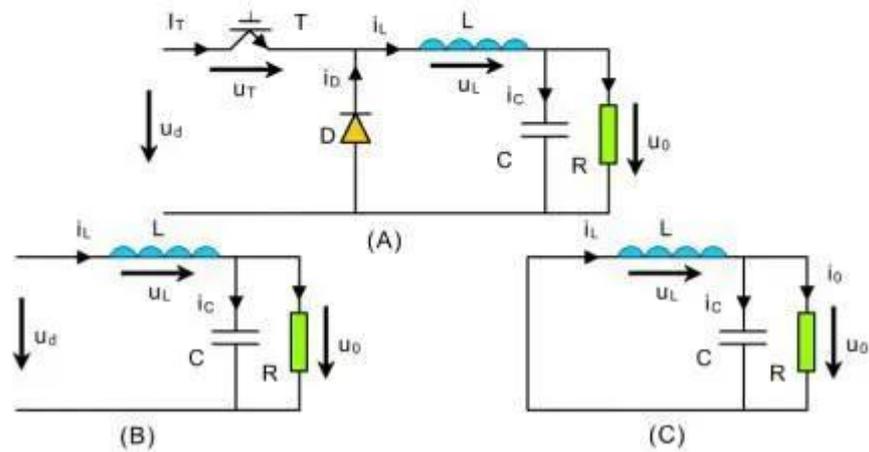
一、BUCK电路拓扑

- T是全控元件(GTR,GTO,MOSFET,IGBT), 当 $t \in [0, DT]$ 时, T导通。
- D: 续流二极管。
- L和C组成LPF。



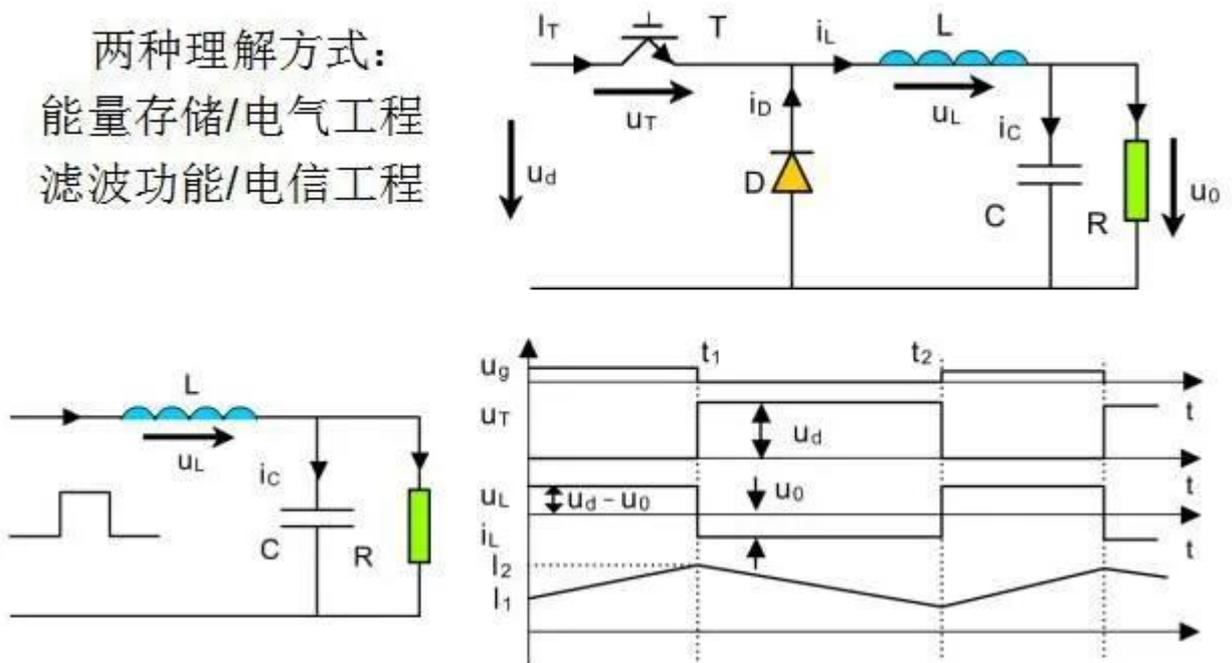
二、工作原理

- 当 $t \in [0, DT]$ 时，控制信号使得T导通，D截止，向L充磁,向C充电；
- 当 $t \in [DT, T]$ 时，T截止，D续流， U_0 靠C放电和L中电流下降维持。



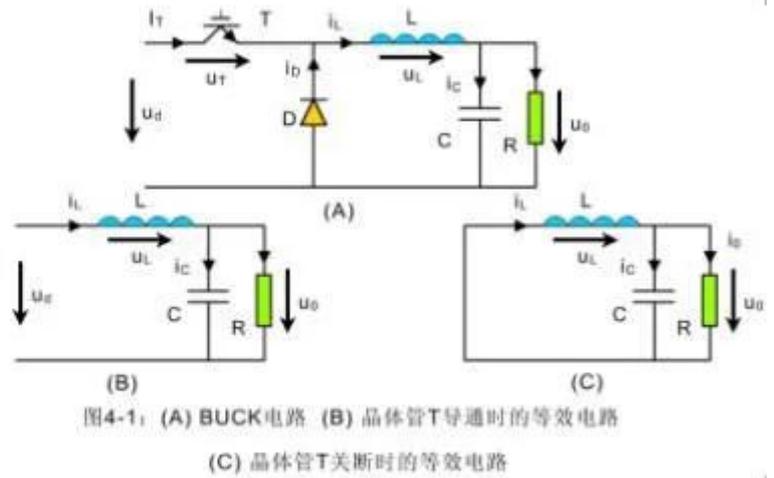
三、主要波形

两种理解方式：
能量存储/电气工程
滤波功能/电信工程



四、假设及参数计算

1. T, D均为理想器件
2. L较大, 使得在一个周期内电流连续且无内阻
3. 直流输出电压 U_0 为恒定
4. 整个电路无功耗
5. 电路已达稳态



(一)、晶体管T导通工作模式

($0 \leq t \leq t_1 = kT$)

$$u_L = u_d - u_0 = L \frac{di_L}{dt}$$

$$U_d - U_0 = L \frac{I_2 - I_1}{t_1} = L \frac{\Delta I}{t_1}$$

$$\Delta I = \frac{(U_d - U_0)t_1}{L}$$

$$\Delta I = I_2 - I_1$$

(二)、二极管D导通工作模式

($t_1 \leq t \leq T$)

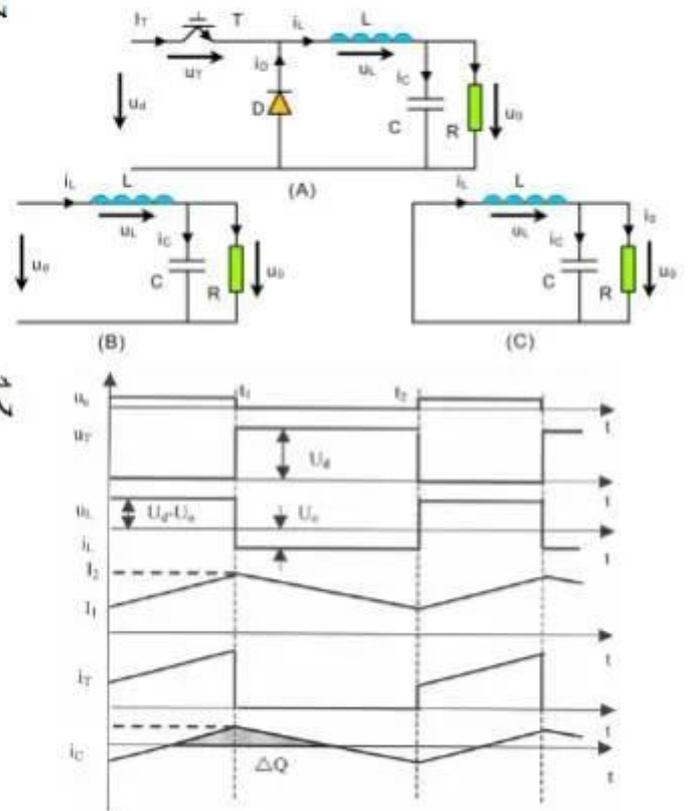
$$U_0 = L \frac{\Delta I}{t_2 - t_1} \quad \Delta I = \frac{U_0(t_2 - t_1)}{L}$$

由(一)、(二)得:

$$\Delta I = \frac{(U_d - U_0)t_1}{L} = \frac{U_0(t_2 - t_1)}{L}$$

$$t_1 = kT, t_2 - t_1 = (1 - k)T$$

$$U_0 = kU_d$$



若假定Buck电路为无损的，
则有

$$U_d I = U_o I_o = k U_d I_o$$

$$\text{即 } I = k I_o$$

开关周期T可表示为

$$T = \frac{1}{f} = \frac{(\Delta I) L U_d}{U_o (U_d - U_o)}$$

可求得 ΔI 的表达式为

$$\Delta I = \frac{U_o (U_d - U_o)}{f L U_d}$$

或

$$\Delta I = \frac{U_d k (1 - k)}{f L}$$

$$\Delta Q = \frac{\Delta I T}{4} = \frac{\Delta I}{2 f}$$

因此，电容上电压峰-峰脉动值为

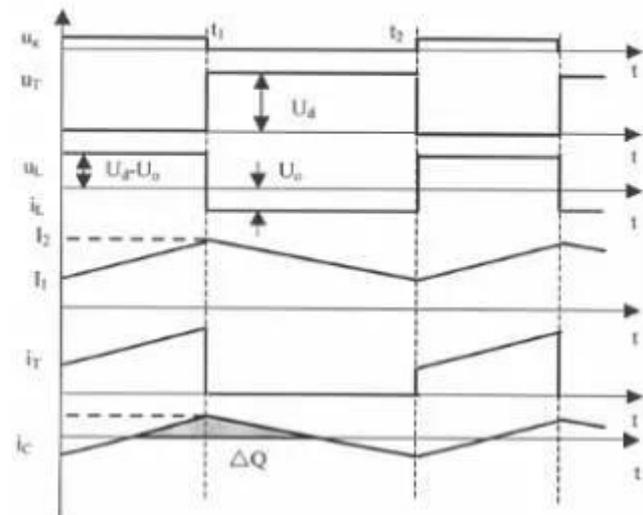
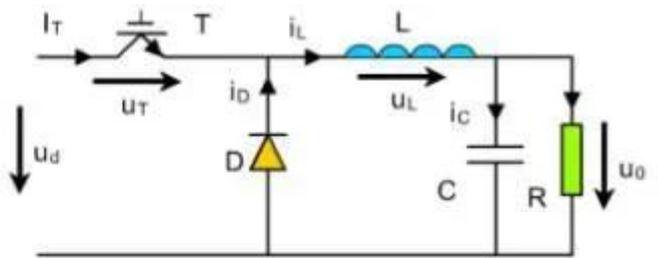
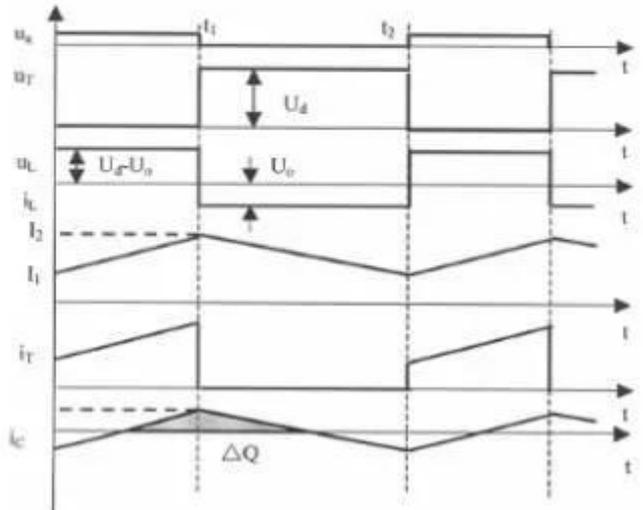
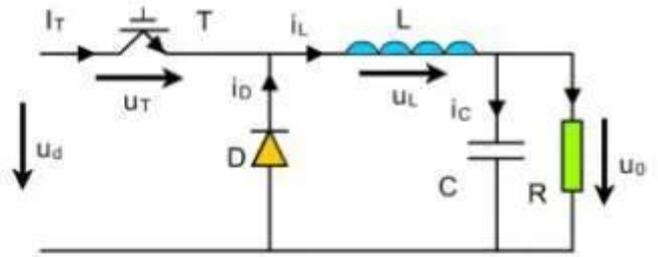
$$\Delta U_c = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{\Delta I}{8 f C}$$

得

$$\Delta U_c = \frac{U_o (U_d - U_o)}{8 L C f^2 U_d}$$

或

$$\Delta U_c = \frac{U_o k (1 - k)}{8 L C f^2}$$



五、分析方法小结

- 1、定性画出关键波形；
- 2、由于LC网路的输入是方波，采用分时区线性化处理
- 3、理想化处理：器件、电源和负载；
- 4、在DC/DC变换器中，降阶处理：假定电容上的端电压为恒定值，将二阶微分方程降为一阶微分方程
- 5、稳态条件下的两个重要定律：

$$\text{电感伏秒平衡: } \int_0^T u_L dt = 0$$

$$\text{电容电荷平衡: } \int_0^T i_c dt = 0$$

问题1：BUCK电路中，L、C对电感电流 i_L 脉动大小和输出电容电压 u_c 的脉动大小分别有何影响？

$$\Delta I = \frac{U_d k(1-k)}{fL} \quad \Delta U_c = \frac{U_0 k(1-k)}{8LCf^2}$$

- $L \uparrow \Rightarrow \Delta I \downarrow$
- $L \uparrow, C \uparrow \Rightarrow \Delta U_c \downarrow$
- $f \uparrow \Rightarrow \Delta I \downarrow, \Delta U_c \downarrow$
- $\Delta I, \Delta U_c$ 确定，则：
- $f \uparrow \Rightarrow C \downarrow, L \downarrow$

六、电流断续时的状况

1、求 A_V 根据伏秒平衡律：

$$(U_d - U_o)DT = U_o D_p T$$

$$U_d D = (D + D_p)U_o$$

$$A_V = \frac{U_o}{U_d} = \frac{D}{D + D_p}$$

2、求 D_p

$$\hat{I} = \frac{U_o}{L_o} D_p T$$

平均电流：

$$I_o = \frac{1}{2} \frac{\hat{I}(D + D_p)T}{T} = \frac{1}{2} \hat{I}(D + D_p) = \frac{U_o}{2L_o} D_p T (D + D_p)$$

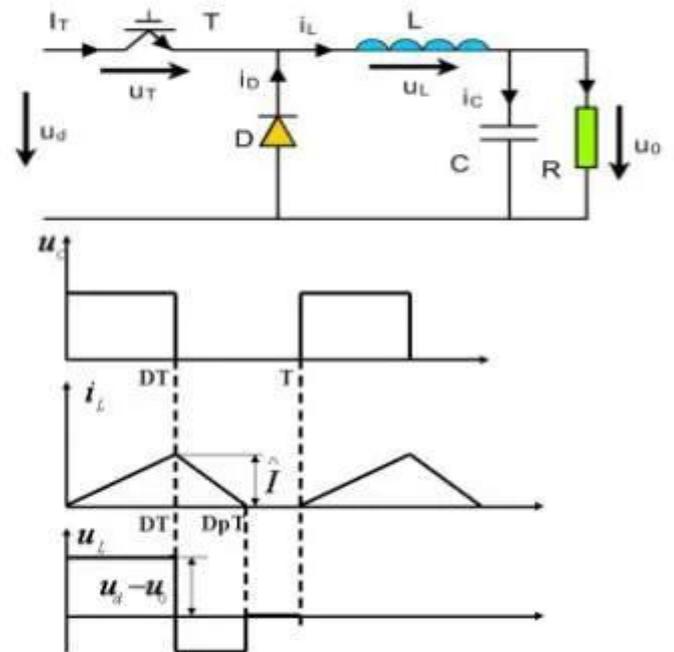
$$I_o = \frac{U_o}{2L_o} D_p T (D + D_p) = \frac{U_o}{R_o}$$

$$\frac{2L_o}{R_o T} = D_p + D D_p^2$$

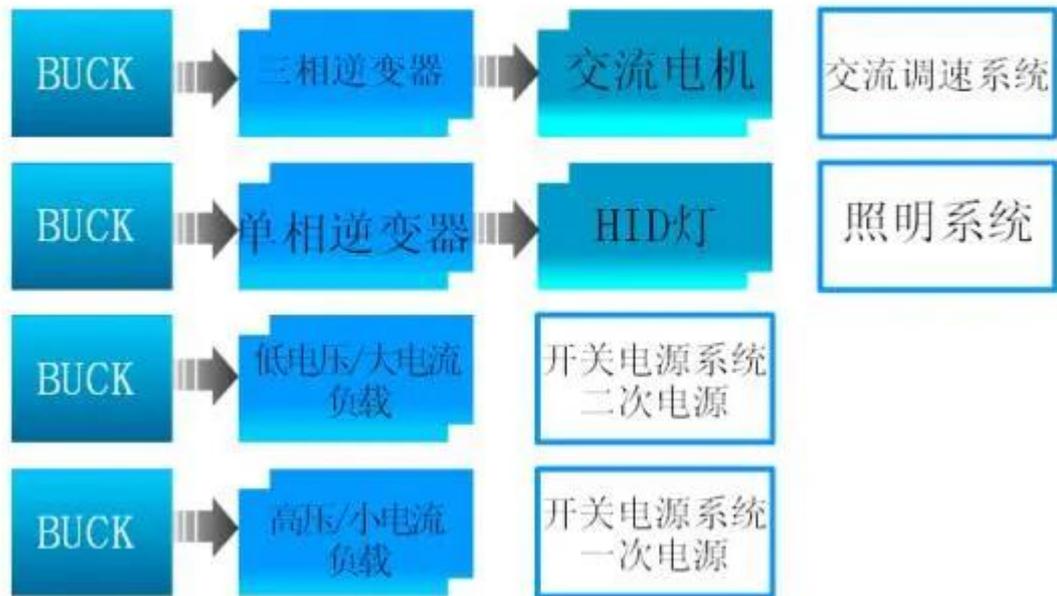
解得：

$$D_p = \frac{-D + \sqrt{D^2 + 8L_o / R_o T}}{2}$$

$$A_V = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + 8L_o / R_o T D^2}}$$

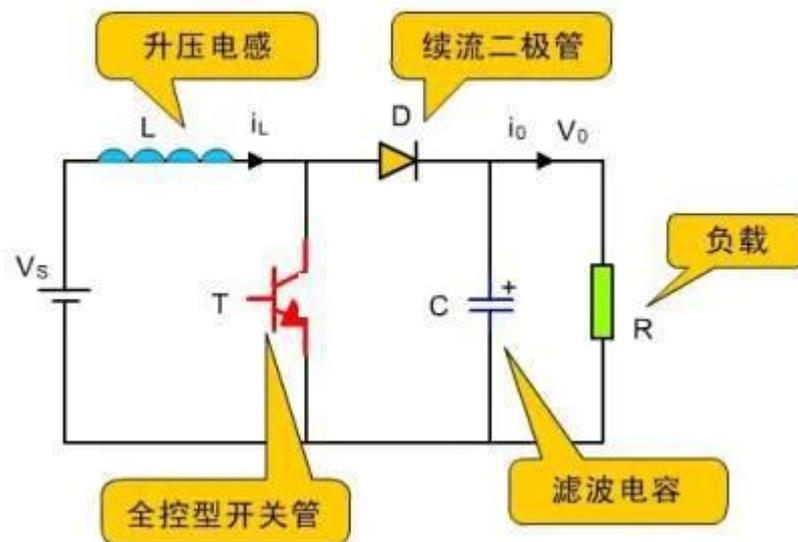


七、典型应用



直流-直流升压变换器(BOOST 变换器)

一、BOOST电路拓扑

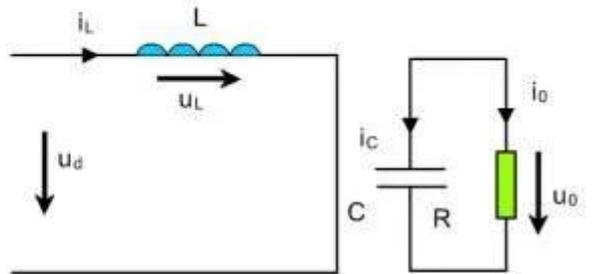
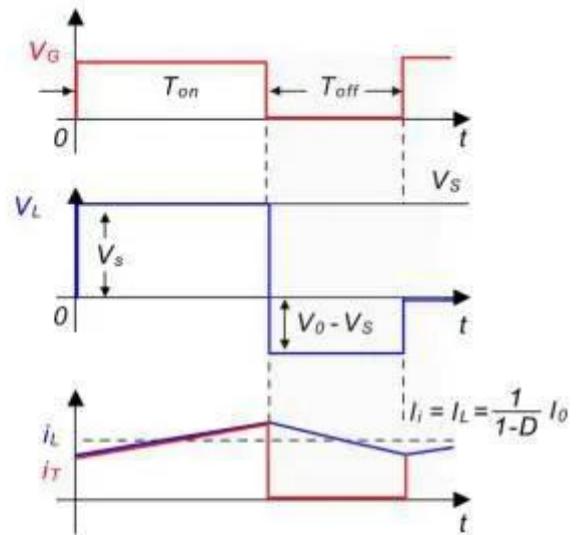
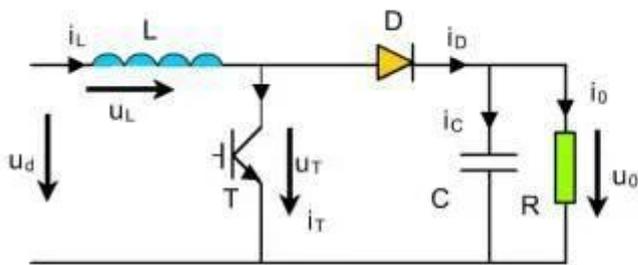


二、工作原理

当 $t \in [0, t_1]$,

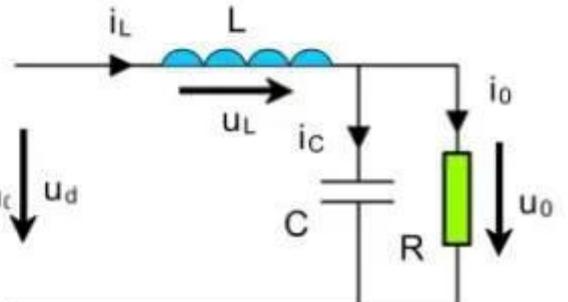
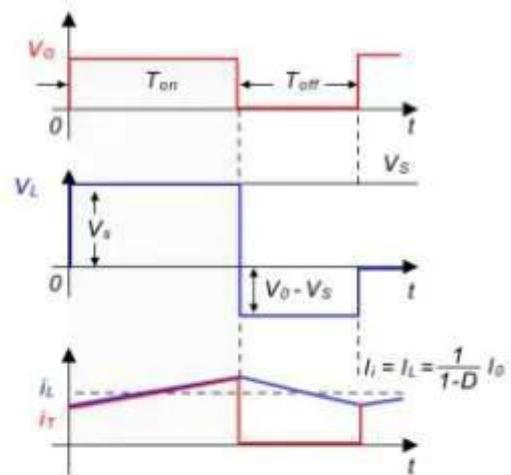
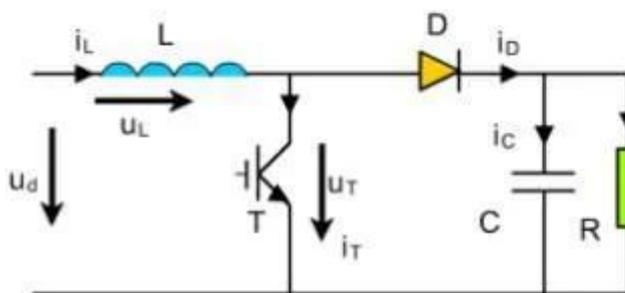
$u_g > 0, V_T \text{ on},$

$V_D \text{ off}, u_L = U_d$

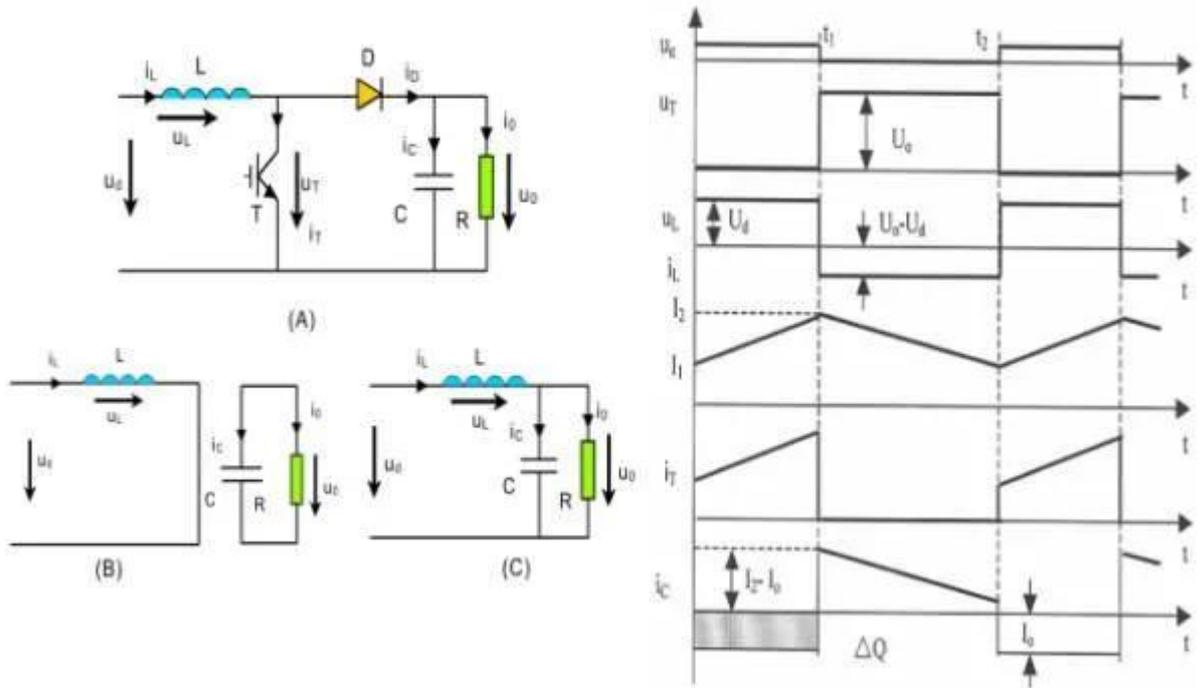


$t \in [t_1, t_2], u_g = 0, V_T \text{ off},$

$V_D \text{ on}, u_L = u_d - U_0$



三、主要波形



四、参数计算

(一)、晶体管T导通工作模式
($0 \leq t \leq t_1 = kT$)

$$U_d = L \frac{I_2 - I_1}{t_1} = L \frac{\Delta I}{t_1} \quad \Delta I = \frac{U_d t_1}{L}$$

(二)、二极管D导通工作模式
($t_1 \leq t \leq T$)

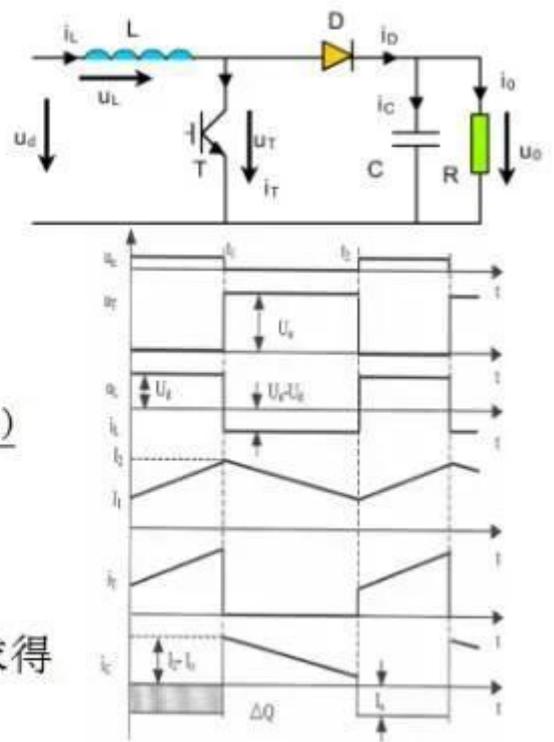
$$U_0 - U_d = L \frac{\Delta I}{t_2 - t_1} \quad \Delta I = \frac{(t_2 - t_1)(U_0 - U_d)}{L}$$

由 (一)、(二) 可得:

$$\Delta I = \frac{U_d t_1}{L} = \frac{(U_0 - U_d)(t_2 - t_1)}{L}$$

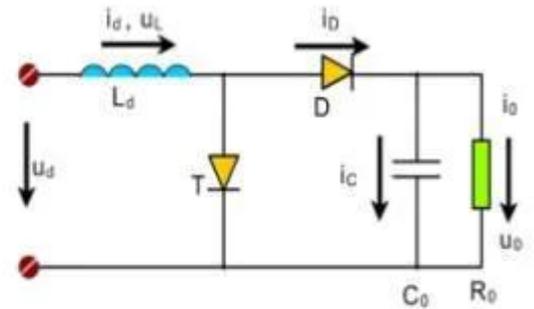
将 $t_1 = kT, t_2 - t_1 = (1-k)T$ 代入上式, 则求得

$$U_0 = \frac{U_d}{1-k} \quad K_o = 1-k$$



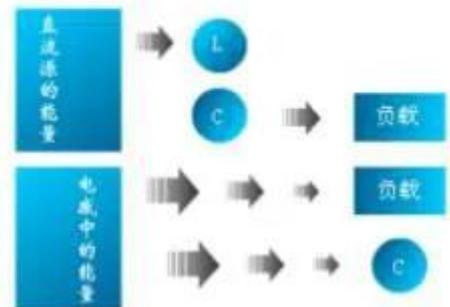
说明:

- 1) $K_0 < 1, A_V > 1$, 所以 $U_0 > U_d$, 是升压电路。
- 2) $U_0 = \frac{U_d}{K_0}, K_0 \uparrow, K_0 \downarrow, U_0 \downarrow$ 可以调压。



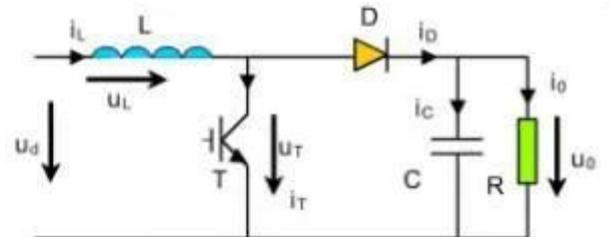
两种模式: 能量的传输

- 模式1: $0 < t < KT$, T/on, D/off, 电流 i_L 升高, 等效电路:
- 模式2: $KT < t < T$, T/off, D/on, 电流 i_L 降低, 等效电路:



设BOOST电路是无损的

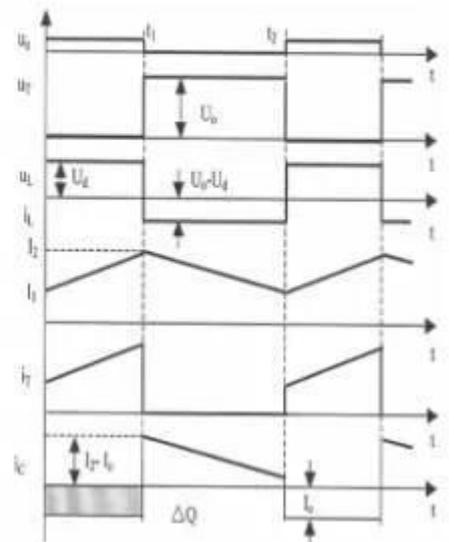
$$I = \frac{I_0}{1-k}$$



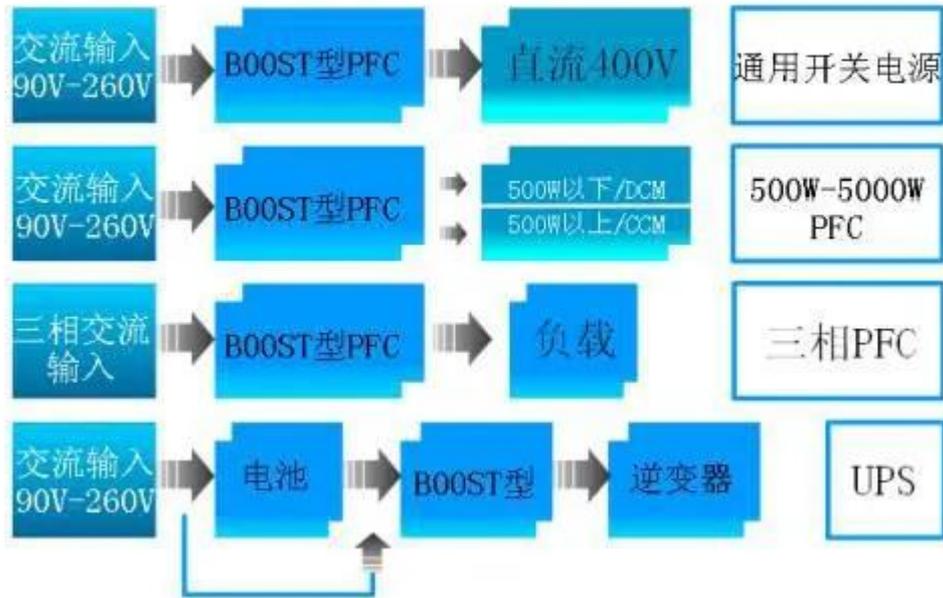
在 $0-t_1$ 期间, 二极管D截止, 电容C向负载提供能量, 电容电压的脉动量取决于在这期间电容上释放的电荷量, 当输出电压的脉动量远小于输出电压时, 负载电流的脉动量可以忽略。则电容电压的脉动量为

$$\Delta U_C = \frac{1}{C} \int_0^{t_1} i_C dt = \frac{1}{C} \int_0^{t_1} I_0 dt = \frac{I_0 t_1}{C}$$

或
$$\Delta U_C = \frac{I_0 k}{fC}$$



五、典型应用(1)



六、典型应用(2)



• 作业:

- 1.设计一个BUCK变换器并进行仿真, 条件: $f=25\text{KHz}$, $U_i=300\text{v}$, $U_o=150\text{v}$, $I_o=6\text{A}$, $\Delta I_o=1\text{A}$, $\Delta U_{pp}=10\text{v}$;
- 2.设计一个BOOST变换器, 条件: $f=100\text{KHz}$, $U_i=150\text{v}$, $U_o=300\text{v}$, $I_o=6\text{A}$, $\Delta I_L=1\text{A}$, $\Delta U_{pp}=10\text{v}$.

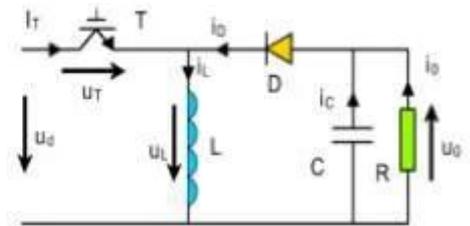
直流降压升压变换器(BUCK-BOOST 变换器)

一、电路

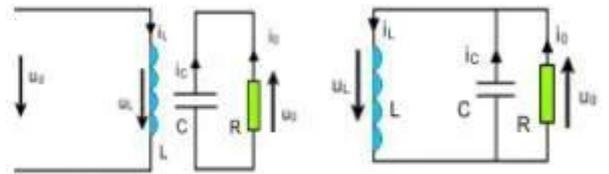
- 输入和输出反相，输出电压可以大于或小于输入电压。

二、工作原理

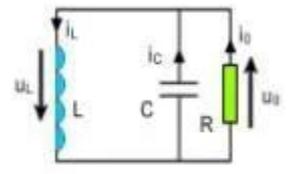
- 在T导通时，D截止，电源向L_d输送能量，输出电压是靠C₀的放电保持基本不变；
- 在T/off时，D/on，把存放在中的能量释放给负载和电容。



(A)

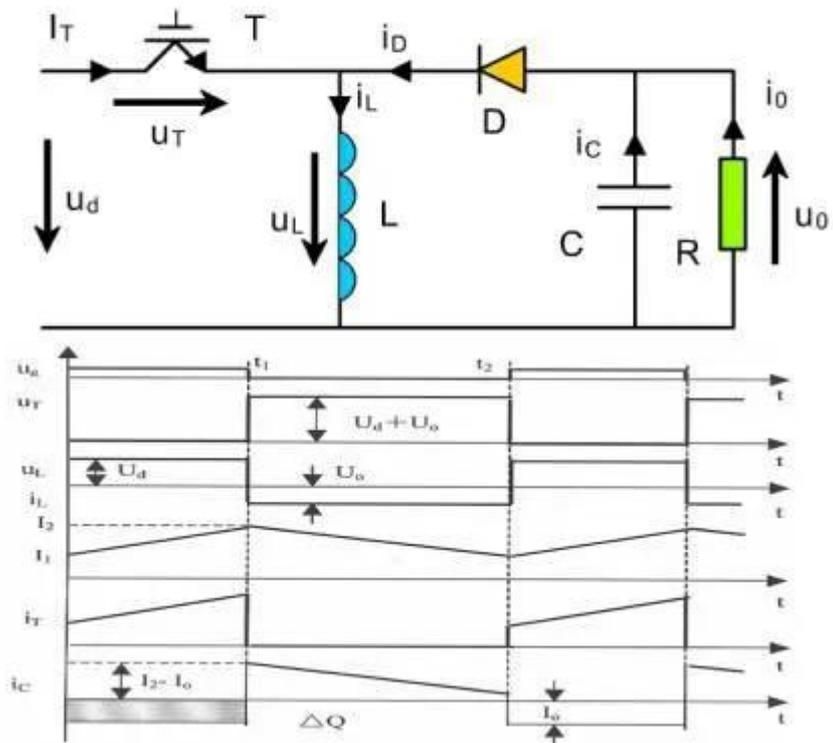


(B)



(C)

三、主要波形



四、参数计算

(一)、晶体管T导通工作模式

($0 \leq t \leq t_1 = kT$)

$$U_d = L \frac{I_2 - I_1}{t_1} = L \frac{\Delta I}{t_1} \quad \Delta I = \frac{U_d t_1}{L}$$

(二)、二极管D导通工作模式

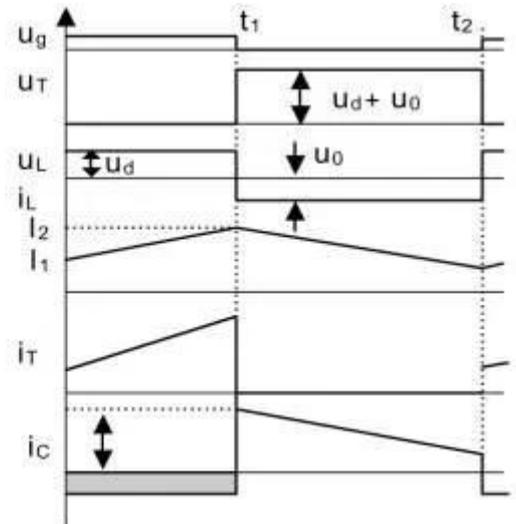
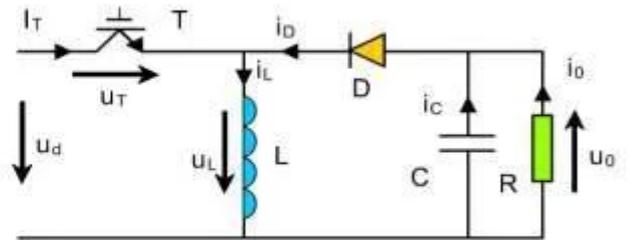
($t_1 \leq t \leq t_2 = T$)

$$U_0 = L \frac{\Delta I}{t_2 - t_1} \quad \Delta I = \frac{(t_2 - t_1) U_0}{L}$$

由(一)、(二)可得:

$$\Delta I = \frac{U_d t_1}{L} = \frac{U_0 (t_2 - t_1)}{L}$$

$$t_1 = kT, t_2 - t_1 = (1 - k)T \quad U_0 = \frac{k U_d}{1 - k}$$



设BUCK-BOOST电路是无损的

$$I = \frac{k I_0}{1 - k}$$

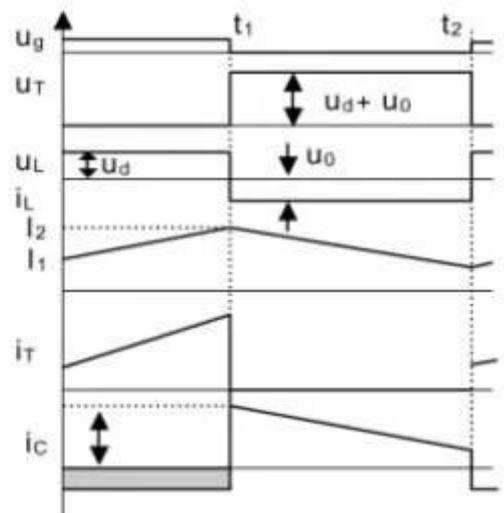
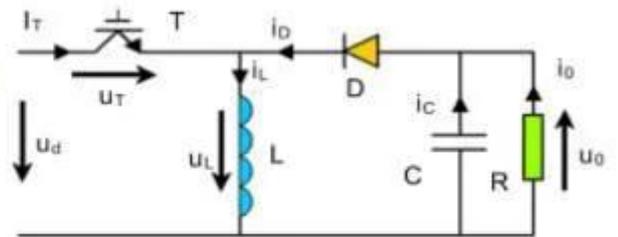
从式(4-28)可得

$$\Delta I = \frac{U_d k}{fL}$$

电容电压的脉动量为

$$\Delta U_c = \frac{1}{C} \int_0^{t_1} i_c dt = \frac{1}{C} \int_0^{t_1} I_0 dt = \frac{I_0 t_1}{C}$$

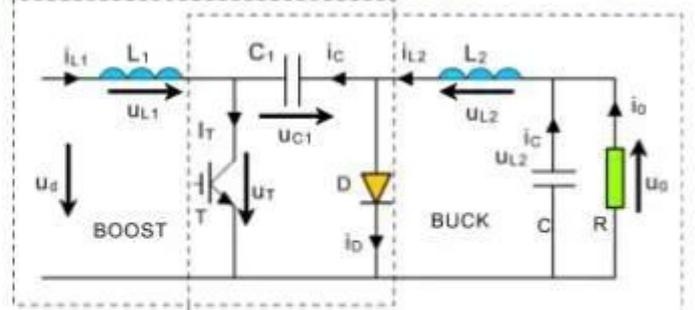
$$\Delta U_c = \frac{I_0 k}{fC}$$



直流升压降压变换器(CUK 变换器)

一、CUK电路的特点

- 1.输入，输出电流皆没有脉动，只是在直流成分的基础上附加了一个不大的开关纹波；
- 2.既可升压也可降压；
- 3.开关晶体管发射极接地；
- 4.输入输出电压反相。



二、CUK电路

- BUCK电路：以 C_1 作为输入电源；R为负载，所以输出电流为连续。
- BOOST电路：以 U_d 作为输入电源；LPF为负载。与普通的BOOST电路相比，D与 C_1 交换了以下位置，由于 L_1 存在，所以输入电流为连续。

三、工作原理

- 这个电路的关键是靠 C_1 传输能量 $u_{c1} = U_d + U_o$

在 $t \in [0, t_1]$ 期间，VT/on，VD/off。

输入电路： U_d 给 L_1 充磁；

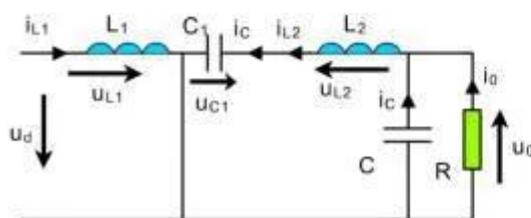
输出电路： U_{c1} 给 L_2 充磁。

在 $t \in [t_1, t_2]$ 期间，VT/off，VD/on。

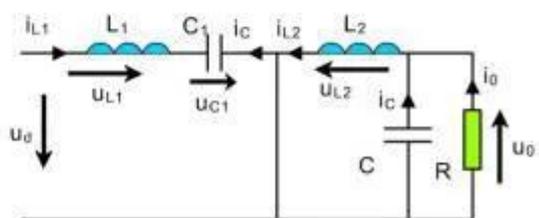
输入电路：把 L_1 中的存能送给 C_1 ，给 C_1 充电，

L_1 ， L_2 中的能量均是减小的；

输出电路：靠 L_2 ， C_2 中的存能维持输出电压基本不变。



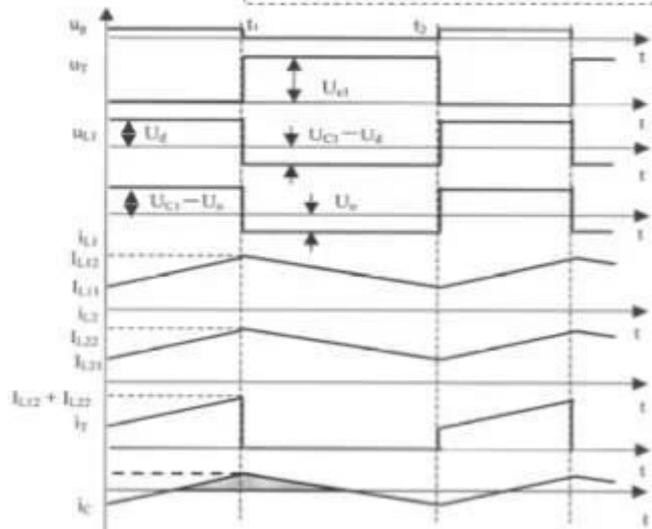
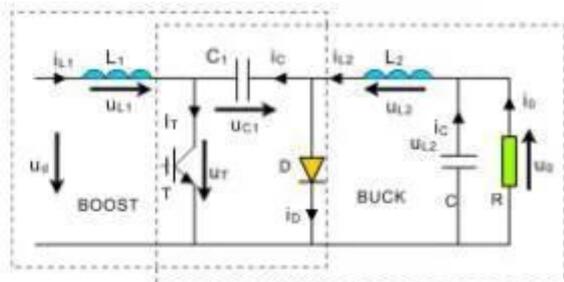
VTon VDoff等效电路



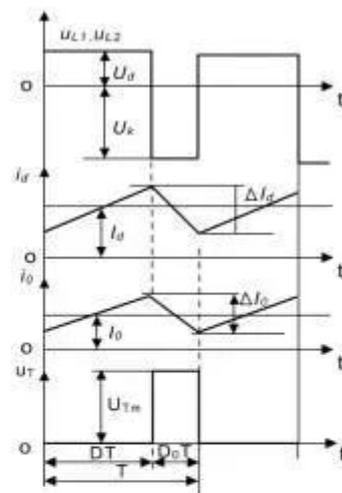
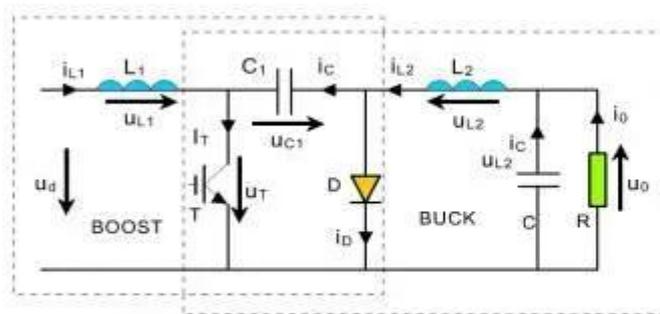
VToff VDon等效电路

波形

- 1、两个电感上的电压是相等的。
- 2、管子所承受的反压=输入电压+输出电压= C_1 上的电压。
- 3、管子所流过的电流=输入电流+输出电流
- 4、 C_1 充当了一个直流电源；作用存储能量/使得前后两级独立工作。



四、电路分析(连续模型)



1. 均值等效电路

- $\because \int_0^T u_L dt = 0$ 所以电感两端的均值电压为0，相当于虚短。
- $\because \int_0^T i_c dt = 0$ 所以电容中的电流的均值为0，相当于虚断。

2. CUK 均值等效电路

$$U_{c1} = U_d + U_0 \quad \langle 1 \rangle$$

3. 电压增益

L₁ 电压的瞬时值:

$$u_{L1} = \begin{cases} U_d & t \in [0, KT] \\ U_d - u_{c1} & t \in [KT, T] \end{cases}$$

若 C₁, C 较大, 认为电压恒定即: $u_{c1} = U_{c1}, U_{c2} = U_0$

$$\text{所以 } u_{L1} = \begin{cases} U_d & t \in [0, KT] \\ U_d - U_{c1} = -U_0 & t \in [KT, T] \end{cases} \quad \langle 2 \rangle$$

L₂ 电压的瞬态值:

$$u_{L2} = \begin{cases} u_{c1} - U_0 = U_d & t \in [0, KT] \\ -U_0 & t \in [KT, T] \end{cases} \quad \langle 3 \rangle$$

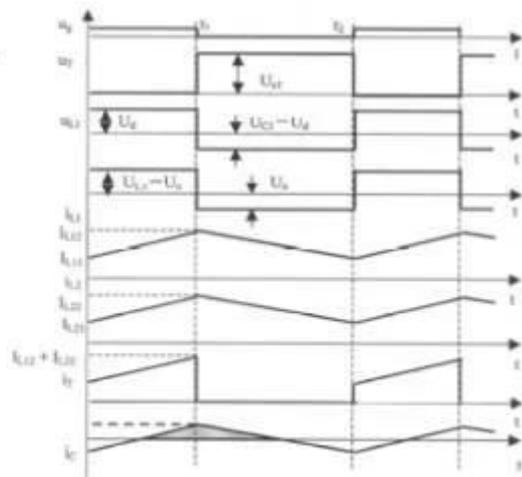
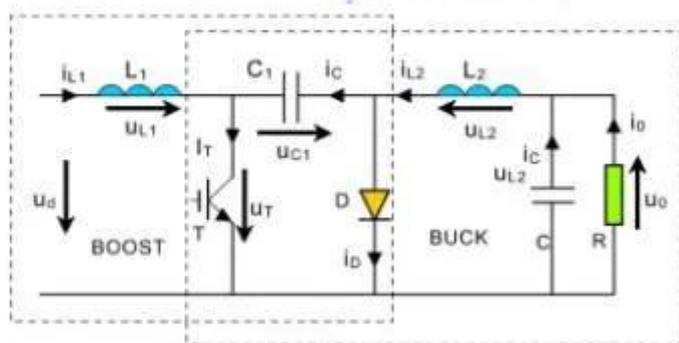
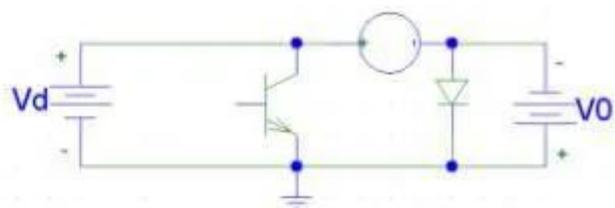
结论: 如果 $C_1, C_2 \rightarrow \infty$ 则 $u_{L1} = u_{L2}$ $\langle 4 \rangle$

$$\Delta I_1 = U_d KT \quad \Delta I_2 = (1-K)TU_0$$

$$\Delta I_1 = \Delta I_2$$

$$U_d KT = (1-K)TU_0 = K_0 TU_0$$

$$\therefore A_v = \frac{D}{D_0} = \frac{1}{D_0} \cdot D \quad \langle 5 \rangle$$



$$\text{Cuk: } A_v = \frac{D}{D_0} = \frac{1}{D_0} \cdot D$$

$$\text{Buck: } A_v = D$$

$$\text{Boost: } A_v = D_0$$

所以Buck-Boost及Cuk的增益为Buck与 Boost增益的积。

$$\text{电流增益: } A_i = \frac{I_o}{I_d} = \frac{D_0}{D} \quad \langle 6 \rangle$$

4.输出，入端电流脉动

$$\text{入端: } \Delta I_d = \frac{U_d DT}{L_1} \quad \langle 7 \rangle$$

$$\text{出端: } \Delta I_o = \frac{(U_{c1} - U_o)DT}{L_2} = \frac{U_d DT}{L_2} \quad \langle 8 \rangle$$

上式说明：如果 $L_1 \uparrow$ ， $\Delta I_d \downarrow$ ，如果 $L_2 \uparrow$ ， $\Delta I_d \downarrow$ 。

式 $\langle 7 \rangle$ 和式 $\langle 8 \rangle$ 相除得：

$$\frac{\Delta I_d}{\Delta I_o} = \frac{L_2}{L_1} \Rightarrow L_2 \frac{di_o}{dt} = L_1 \frac{di_d}{dt}$$

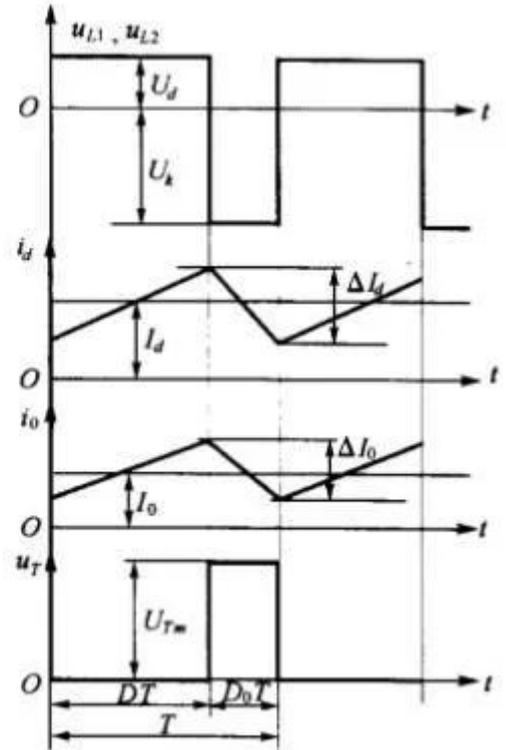
上式再次证明了 $u_{L1} = u_{L2}$ 的结论。

$$\text{输入电流的最大值: } I_{dm} = I_d + \frac{\Delta I_d}{2} = \frac{D_0}{D} I_o + \frac{U_d DT}{2L_1} \quad \langle 9 \rangle$$

$$\text{输出电流的最大值: } I_{om} = I_o + \frac{\Delta I_o}{2} = I_o + \frac{U_d DT}{2L_2} \quad \langle 10 \rangle$$

$$\text{V}_T \text{电流最大值: } I_{TM} = I_{dm} + I_{om}$$

注意： i_T 的最大值发生在 $t=DT$ ，与 I_d ， I_0 的最大值同时发生。

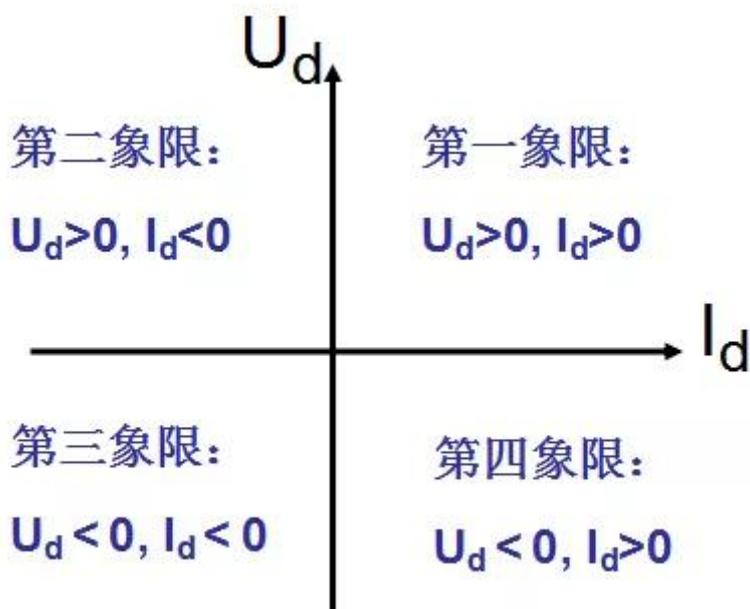


5.波形(自己画)

小结：不同变换器比较

	1. Buck 变换器	2. Boost 变换器	3. Cuk 或 Boost-Buck 变换器 4. Buck-Boost 变换器
电 路 结 构			
电 流 连 续 变 比 M	$M = \frac{V_o}{V_s} = D$	$M = \frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D}$ $D = \frac{M-1}{M}$	$M = \frac{V_o}{V_s} = \frac{D}{1-D}$ $D = \frac{M}{1+M}$
临 界 负 载 电 流	$I_{os} = \frac{V_o}{2Lf_s}(1-D)$ D 越小， I_{os} 越大 I_{os} 最大值 $I_{osm} = V_o / 2Lf_s$	$I_{os} = \frac{V_o}{2Lf_s} D(1-D)^2$ D = 1/3 时， I_{os} 最大值 $I_{osm} = V_o / 4Lf_s$	$I_{os} = \frac{V_o}{2Lf_s}(1-D)^2$ D 越小， I_{os} 越大， I_{os} 最大值 $I_{osm} = V_o / 2Lf_s$
电 流 不 连 续 变 比	$M = \frac{V_o}{V_s} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{4}{D^2} \frac{I_o}{V_o / 2Lf_s}}}$ $= \frac{D^2}{D^2 + \frac{I_o}{V_s / 2Lf_s}}$	$M = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{27 D^2}{I_o / \frac{V_o}{2Lf_s}}} \right)$ $= 1 + \frac{D^2}{I_o / \frac{V_s}{2Lf_s}}$	$M = \frac{V_o}{V_s} = \frac{D}{\sqrt{\frac{I_o}{V_o / 2Lf_s}}}$ $= \frac{D^2}{\frac{I_o}{V_s / 2Lf_s}}$

两象限/四象限直流-直流变换器



直流电动机的特性

- ✓ 直流电机电枢绕组的反电势 E_a 与其励磁磁通和转速 N 的乘积成正比：

$$E_a = K_e \cdot \phi \cdot N$$

- ✓ 电枢电压平衡方程为：

$$E_a = V_{AB} - R_a I_{AB} \doteq V_{AB}$$
$$N = \frac{E_a}{K_e \phi} = \frac{V_{AB} - R_a I_{AB}}{K_e \phi} \doteq \frac{V_{AB}}{K_e \phi}$$

转速高低由电枢电压的大小决定，转速方向由电枢电压的方向决定。

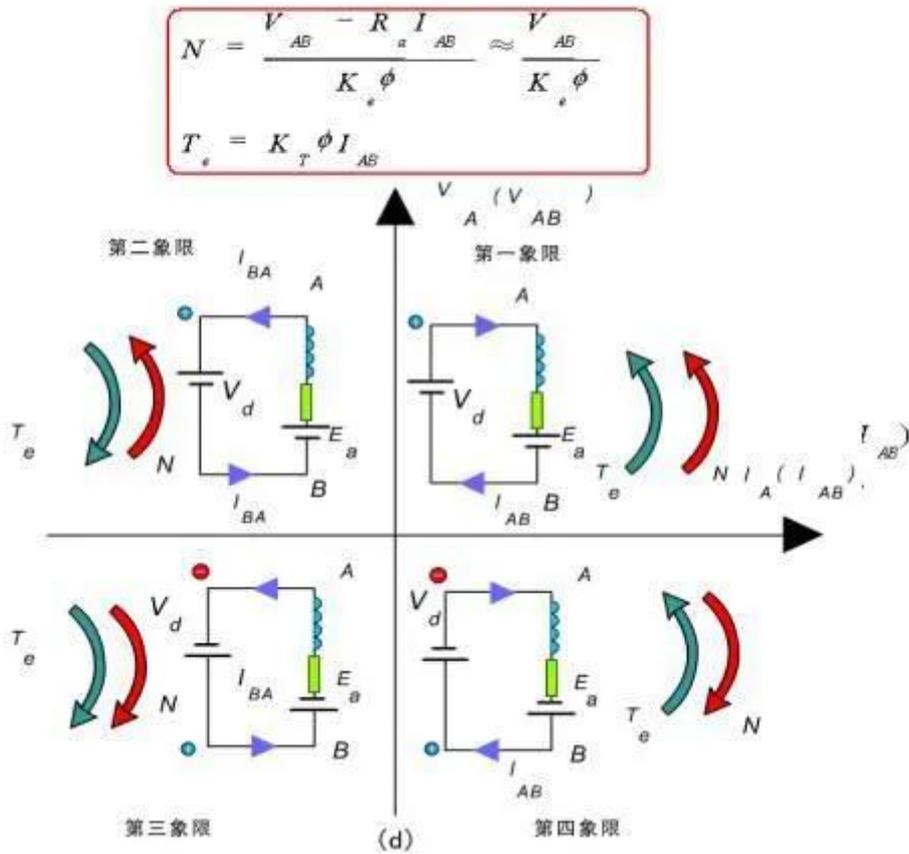
- ✓ 电机的转矩方程为：

$$T_e = K_T \cdot \phi \cdot I_{AB}$$

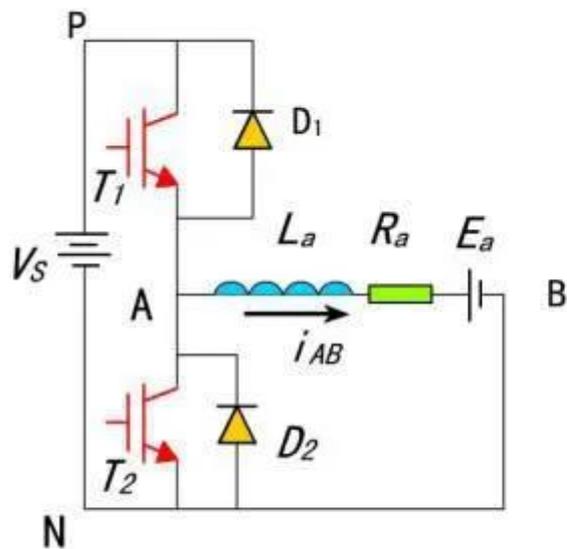
转矩大小由电枢电流的大小决定，转矩方向由电枢电流的方向决定。

- ✓ 转矩方向与电机转向相同为电动状态，反之为制动状态

直流电机的四象限运行



1、两象限直流一直流变换器

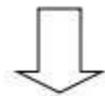


(a) 两象限直流-直流变换电路

工作状态:

U_{AB} 始终
大于零

i_{AB} 可正
可负



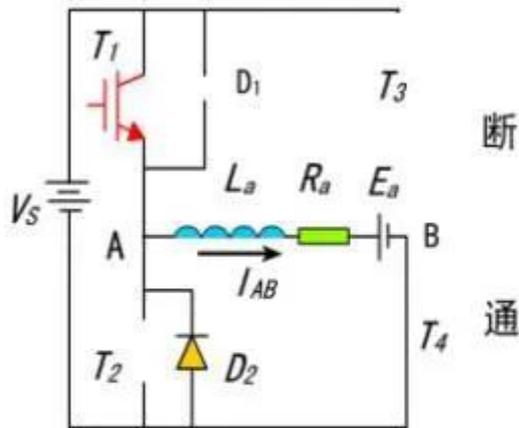
电机转向
始终为正

电磁转矩
可正可负

电动

制动

第一象限工作



(b) 降压变换电路

工作模式： 降压（将Vd的电压降低后送到负载）

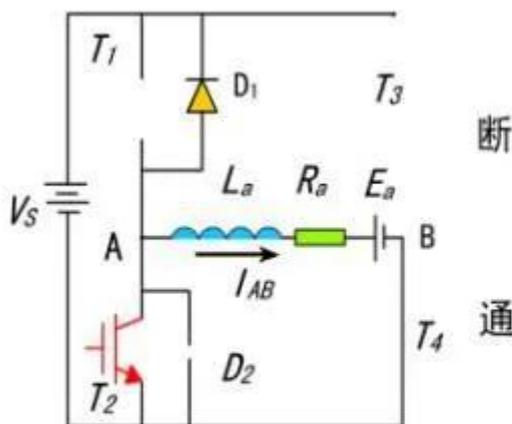
输出电压方向： 正向

输出电压大小： $V_{AB} = \frac{T_{on}}{T_s} V_D$

输出电流方向： 正向

电机运行于正向电动状态，能量由输入直流电源供向负载。

第二象限工作



(c) 升压变换电路

工作模式： 升压（将负载的电压升高后向Vd回馈电能）

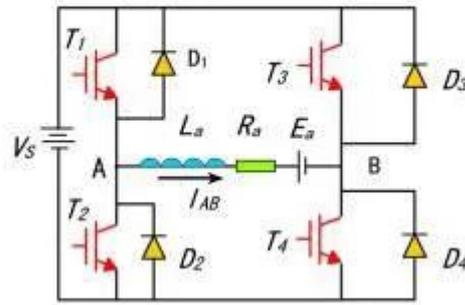
输出电压方向： 正向

输出电压大小： $V_d = \frac{1}{1-D} V_{AB} > V_{AB}$

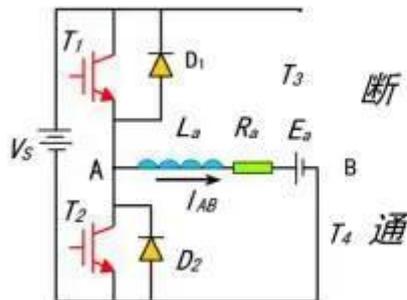
输出电流方向： 负向

电机运行于正向制动状态，能量由负载向直流输入电源回馈。

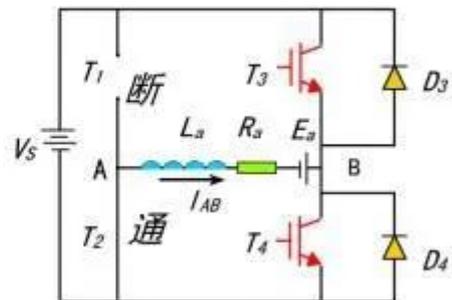
2、 四象限直流—直流变换器



(a) 四象限直流-直流变换电路



(b) 第一, 第二两象限变换电路



(c) 第三, 第四两象限变换电路

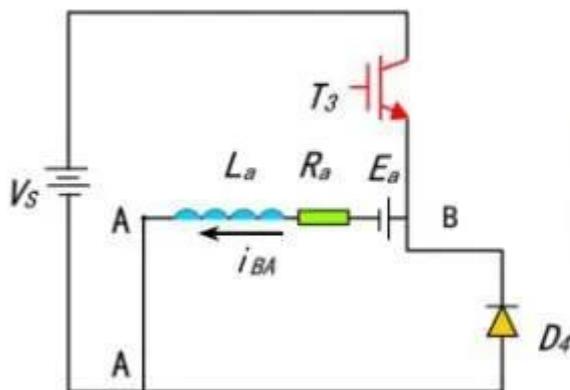
第三象限工作

工作模式: 降压 (将Vd的电压降低后送到负载)

输出电压方向: 反向 ($V_{AB} < 0$)

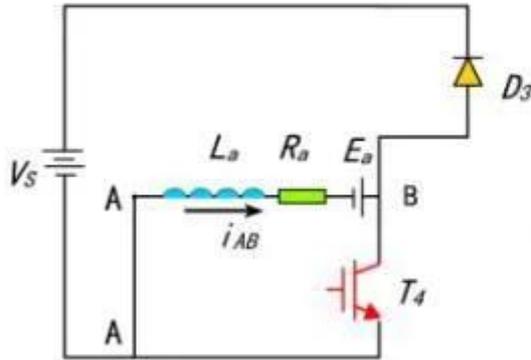
输出电压大小: $V_{BA} = \frac{T_{on}}{T_s} V_D$

输出电流方向: 反向



电机运行于反向电动状态, 能量由直流输入电源供向负载。

第四象限工作



工作模式： 升压（将负载的电压升高后向V_d回馈电能）

输出电压方向： 正向

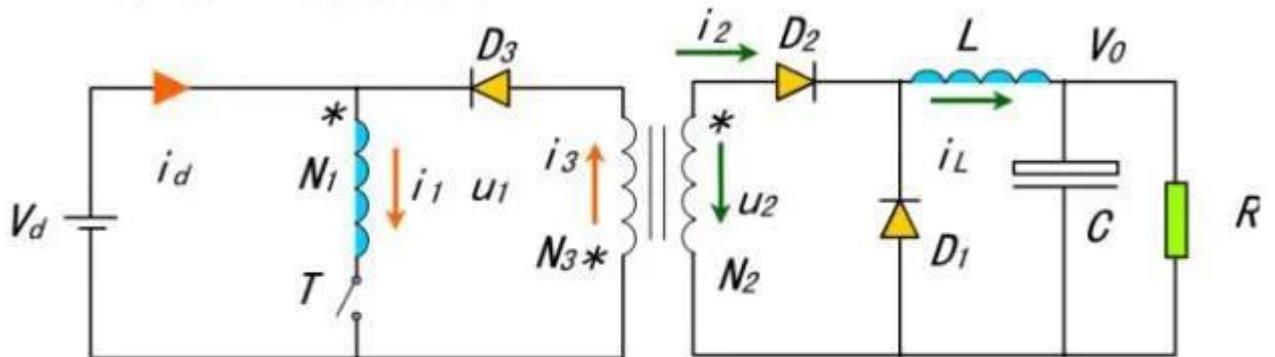
输出电压大小： $V_s = \frac{1}{1-D} V_{AB} > V_{AB}$

输出电流方向： 反向

电机运行于反向制动状态，能量由负载供向直流输入电源。

单端正激变换器

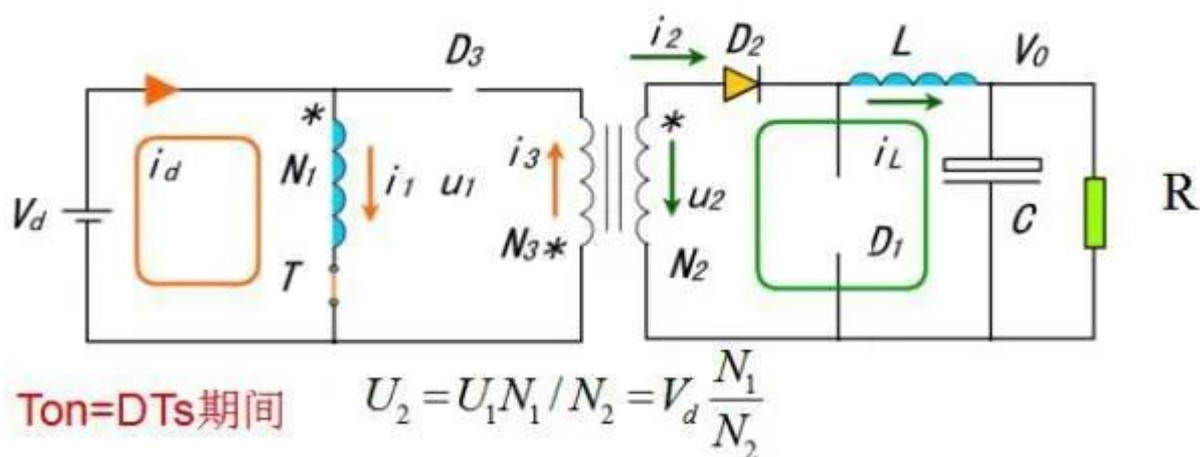
1、单端正激变换器



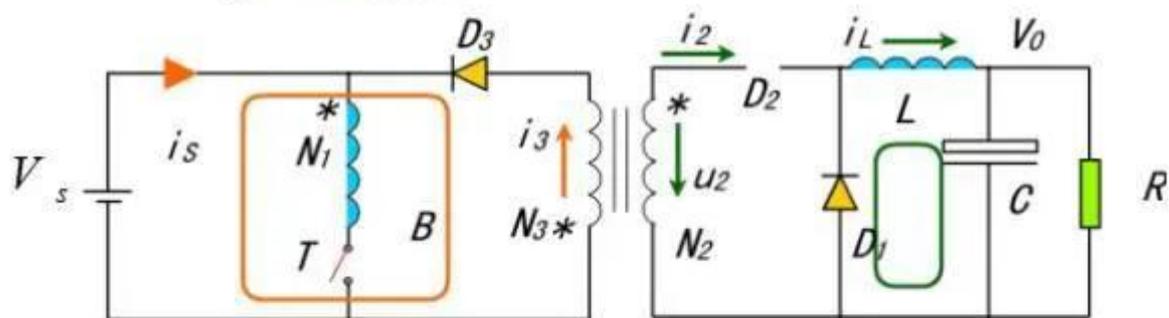
(b) 单端正激DC/DC变换器

- **单端变换器**——变压器工作在B-H平面的第一象限；
- **正激变换器**——在T导通时，变压器向负载传递能量。
- **正激变换器特点**——输出功率50-200W较大。

T导通: N_2 、 D_2 导电
 N_3 、 D_1 、 D_3 截止



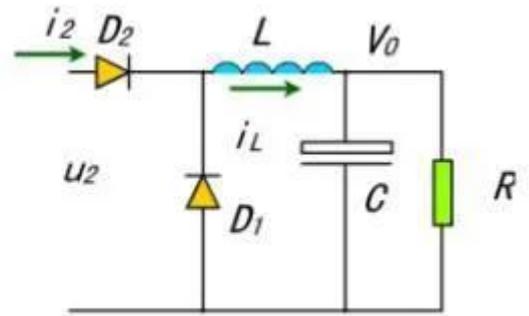
T截止: D_2 截止;
 i_3 将 N_3 感应电势经 D_3 反送至电源, i_3 减小到零;
 i_L 经 D_1 续流。



$T_{off} = (1-D)T_s$ 期间 $U_2 = 0$

输出电压 U_2 与 U_d 的关系

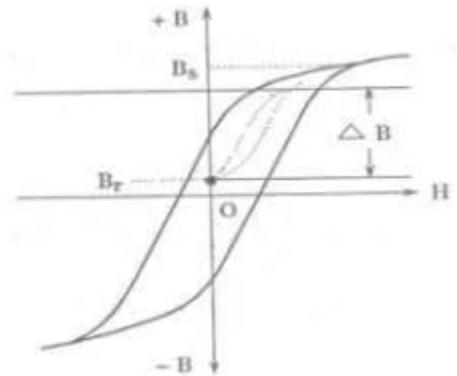
$$U_2 = \begin{cases} U_d \frac{N_2}{N_1} & t \in [0, T_{on}] \\ 0 & t \in [T_{on}, T] \end{cases}$$



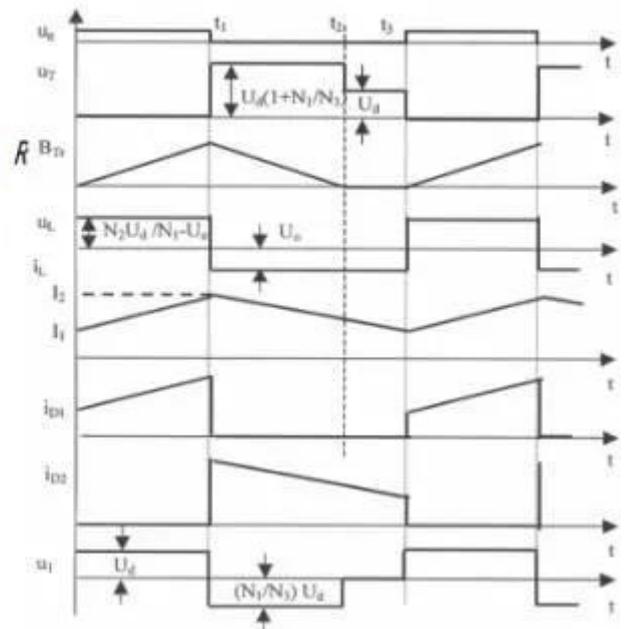
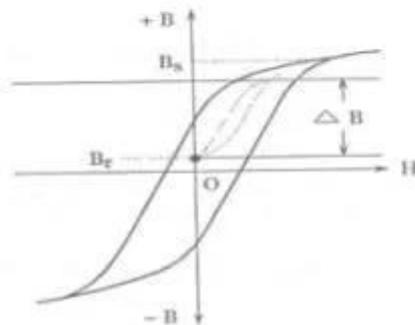
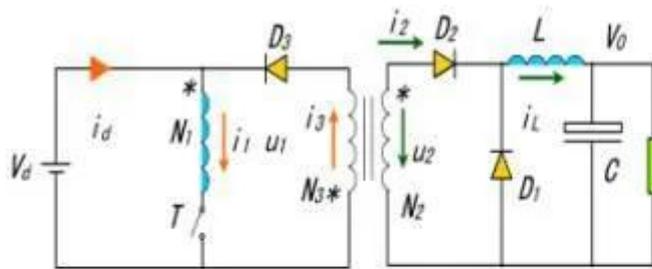
等效电路(N_2 向右看相当于BUCK电路)

$$V_o = \frac{U_2 T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = \frac{U_2 N_2 D}{N_1}$$

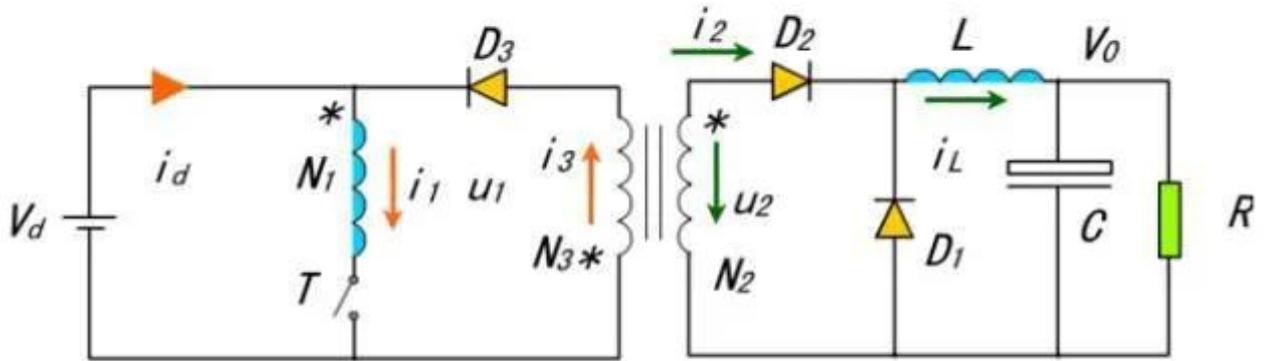
改变D可以改变 U_0



工作波形



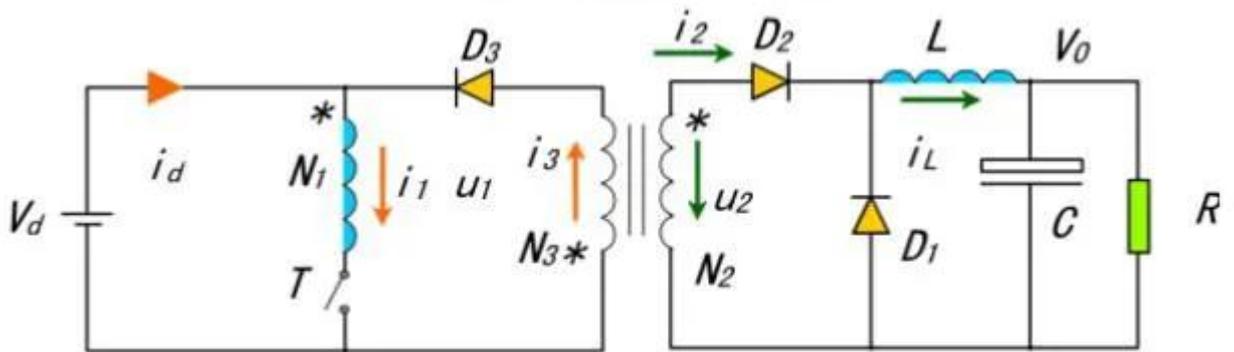
开关管两端的最大电压



T两端的反压为：

$$U_d + \frac{N_1}{N_3} U_d = \frac{N_1 + N_3}{N_3} U_d$$

最大运行导通比



$$D \leq D_{\max} = N_1 / (N_1 + N_3)$$

通常取 $N_3 = N_1$ ，故工作中的最大占空比 $D_{\max} = 0.5$

因此T的反压

$$U_T \max = \frac{N_1 + N_3}{N_3} U_d = 2U_d$$

双管正激变换器

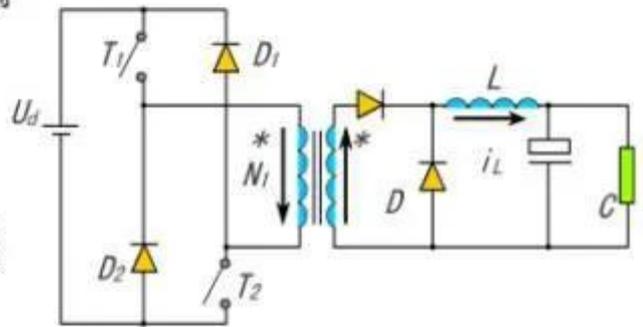
T1和T2具有相同的占空比；

T1、T2导通时，D1、D2反偏截止，电源通过变压器向负载输送能量

T1、T2截止时， i_L 经D续流，变压器激磁电流经D1、D2返回电源，起去磁作用。

不需要专门的去磁绕组；

多一个开关管；开关管上承受的电压仅为 U_d ，小于单管变换器。



双管正激变换器

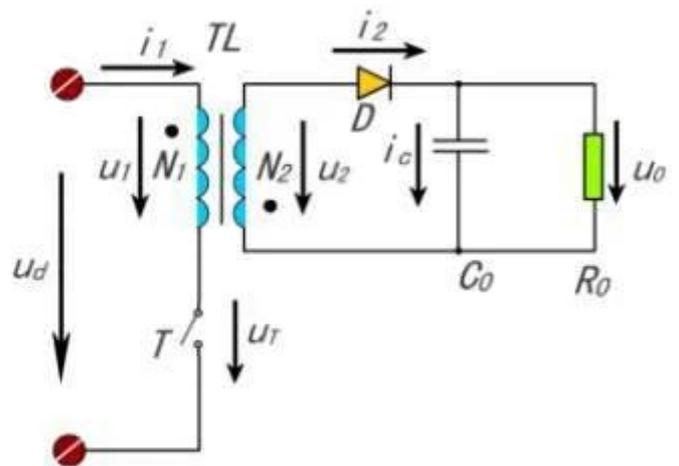
单端反激变换器

2、单端反激变换器

反激变换器——开关管导通时电源将电能转为磁能储存在电感（变压器）中，当开关管关断时再将磁能变为电能传送到负载

单端变换器——变压器工作在B-H平面的第一象限；

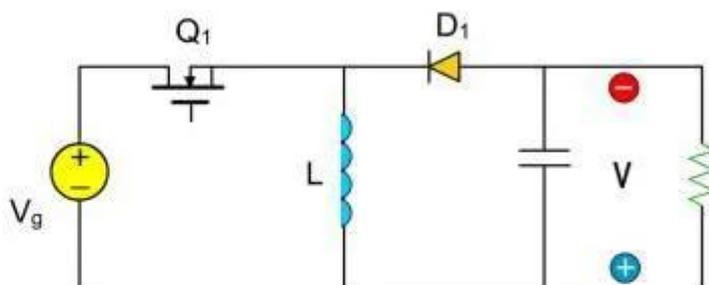
反激变换器特点——输出功率较小，一般小于100W。



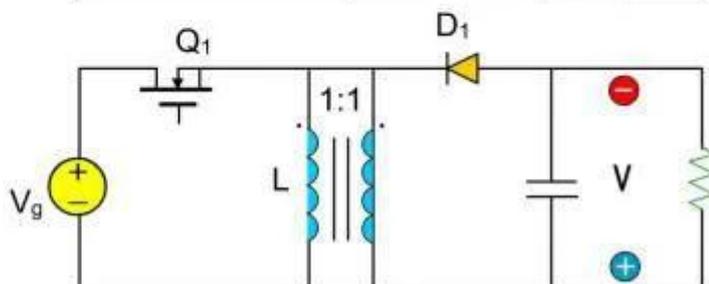
单端反激变换器

一、拓扑推演--从BUCK-BOOST到Flyback变换器

BUCK-BOOST变换器

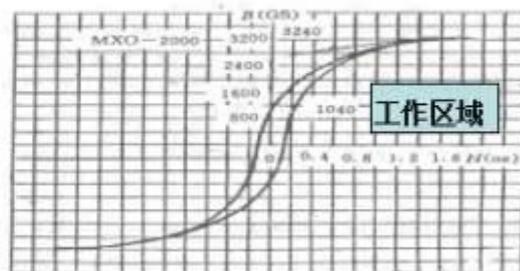


电感用两个并
联线圈代替

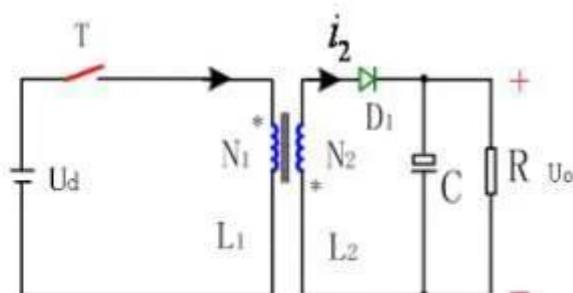


1. 工作原理

当 T 导通, 原边 N_1 电感上电压的极 **上正下负**, 副边 N_2 电压的极为 **上负下正**, 因此, 二极管 D_1 截止, 所以把能量存储在原边 N_1 上, 负载靠电容 C 放电维持。



当 T 截止, 原边电感上的电压为 **上负下正**, 副边电压为 **上正下负**,

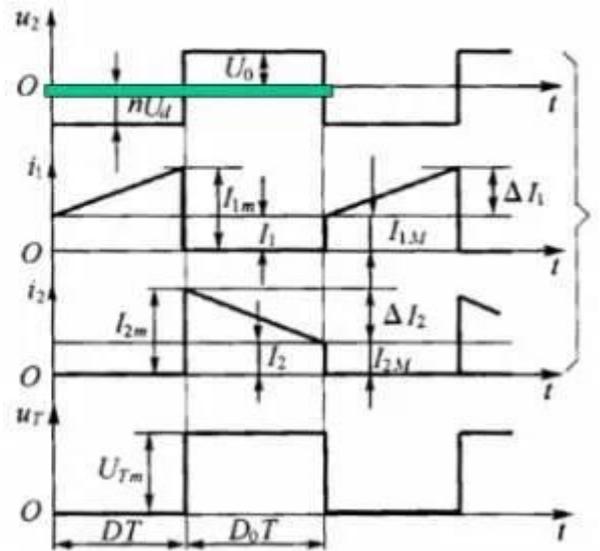
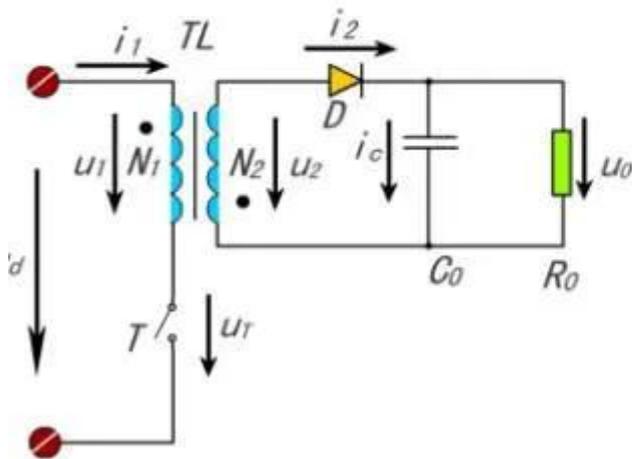


D_1 导通, 把存储在副边的能量传给电容和负载。

2. 两种导电模式

连续导电方式: 在T截止期间, 初级的储能被部分释放.

不连续导电方式: 在T截止期间, 初级的储能被全部释放.



波形分析和计算

有图b中 u_2 波形可知, 根据伏秒平衡原理:

$$nU_d DT = U_0 D_0 T, \quad n = N_2/N_1$$

得,

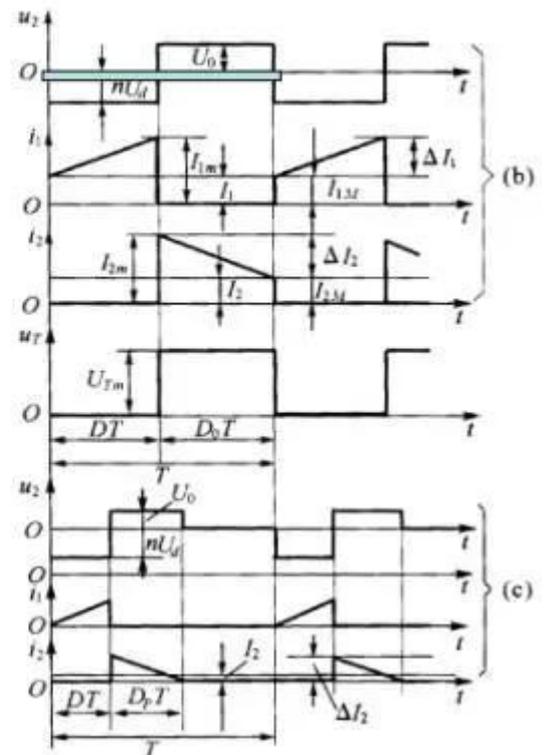
$$M = \frac{U_0}{nU_d} = \frac{D}{nD_0}$$

在换流瞬间, 原副边电流满足下面关系:

$$I_{1\min} N_1 = I_{2\min} N_2, \quad I_{1\max} N_1 = I_{2\max} N_2$$

$$\Delta I_1 N_1 = \Delta I_2 N_2$$

$$\mathbf{T} \text{的耐压: } U_T = u_d + \frac{N_1}{N_2} U_0$$



辅助网络的功能

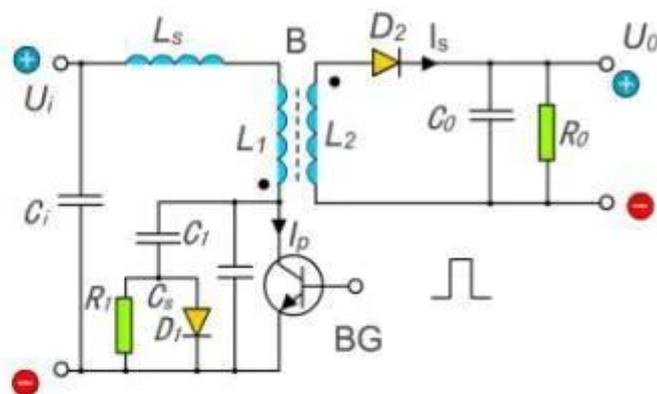
寄生参数及作用: C_s, L_s

C_s : 几百PF, $\frac{1}{2}C_s U_{ce}^2$ 它上的能量消耗在开关BG上, 增加了开通损耗

L_s : $\frac{1}{2}L_s I_p^2$ BG关断时, 这个能量将变为 C_s 上的电能, 是BG的开关应力增加

解决的方法: 增加 C_s 的数值

$$\frac{1}{2}L_s I_p^2 = \frac{1}{2}(C_s + C_1)U_{ce}^2$$



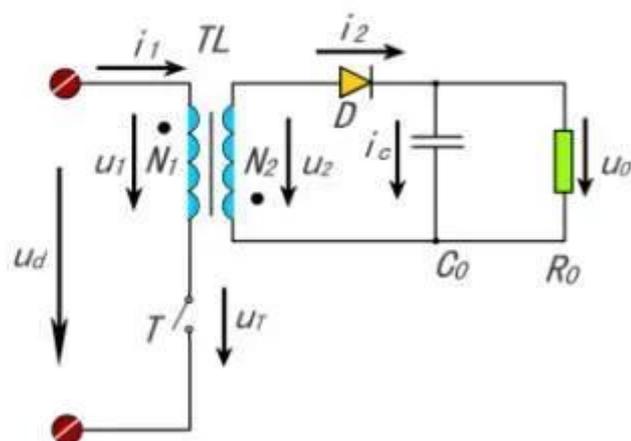
(a)电路

R_1, C_1, D_1 辅助网络的作用: 在BG截止时, D_1 导通, C_1 并联在ce之间, 使ce间电压的上升速度减慢, 且减少峰值电压和损耗; 在BG导通时, C_1 通过 R_1 向开关管ce极放电, 减少了BG导通时的峰值电流和损耗。

二、电路的外特性

- 1、与Boost/Buck-boost电路相同, Flyback的电路不能开路运行,
- 2、电路的外特性,

在CCM区, 相当于一个恒压源;
在DCM区, 相当于一个恒流源;



小结：各种DC/DC变换器的比较

表 4-1: 六种 DC-DC 变换电路电参数的比较

电路形式	晶体管最大电压 U_{Tm}	晶体管最大电流 I_{Tm}	输出电压 U_0
BUCK	U_d	$I_0 + \frac{\Delta I}{2}$	kU_d
BOOST	$\frac{1}{1-k}U_d$	$\frac{1}{1-k}I_0 + \frac{\Delta I}{2}$	$\frac{1}{1-k}U_d$
BUCK-BOOST	$\frac{1}{1-k}U_d$	$\frac{1}{1-k}I_0 + \frac{\Delta I}{2}$	$\frac{k}{1-k}U_d$
CUK	$\frac{1}{1-k}U_d$	$\frac{1}{1-k}I_0 + \frac{\Delta I_1 + \Delta I_2}{2}$	$\frac{k}{1-k}U_d$
正激式	$\left(1 + \frac{N_1}{N_3}\right)U_d$	$\left(I_0 + \frac{\Delta I}{2}\right)\frac{N_2}{N_1}$	$\frac{N_2}{N_1}kU_d$
反激式	$\frac{1}{1-k}U_d$	$\left(\frac{1}{1-k}I_0 + \frac{\Delta I}{2}\right)\frac{N_2}{N_1}$	$\frac{N_2}{N_1}\frac{k}{1-k}U_d$

表 4-2: 六种 DC-DC 变换电路的性能比较

电路形式	晶体管元件利用率 $\frac{U_0 I_0}{U_{Tm} I_{Tm}}$	输入电流脉动	输出电流脉动
BUCK	k	有	0
BOOST	$1-k$	0	有
BUCK-BOOST	$k(1-k)$	有	有
CUK	$k(1-k)$	0	0
正激式	$k \frac{N_3}{N_1 + N_3}$ $k \leq \frac{N_1}{N_1 + N_3}$	有	0
反激式	$k(1-k)$	有	有