

电气精品教材丛书

“十三五”江苏省高等学校重点教材

工业和信息化部“十四五”规划教材

电力电子技术 · Power Electronics

# 第5章 隔离型直流变换器

2023/12/5





★ 5.1 正激变换器

★ 5.2 反激变换器

★ 5.3 推挽变换器

5.4 半桥变换器

5.5 全桥变换器

5.6 Buck类变换器的输出整流电路

5.7 隔离型Buck类变换器的比较



## ★ 5.1 正激变换器

5.1.1 正激变换器电路拓扑的推演

5.1.2 正激变换器的工作原理

5.1.3 正激变换器的基本关系

5.1.4 双管正激变换器



# 正激变换器电路拓扑的推演

## ■ $Q$ 导通时

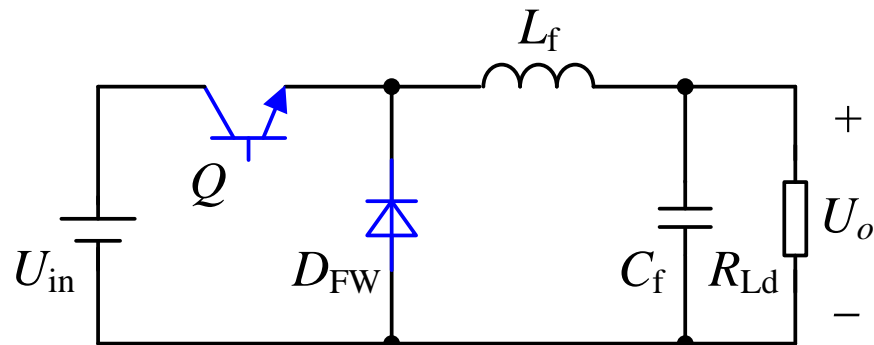
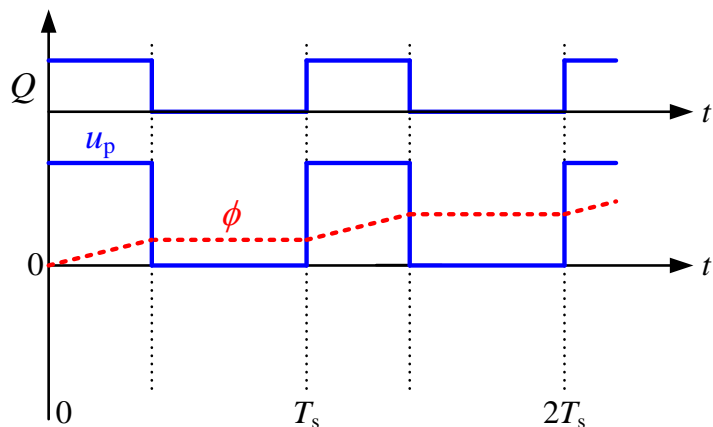
$u_p = U_{in}$ , 变压器被磁化, 励磁磁通线性增加

## ■ $Q$ 截止时

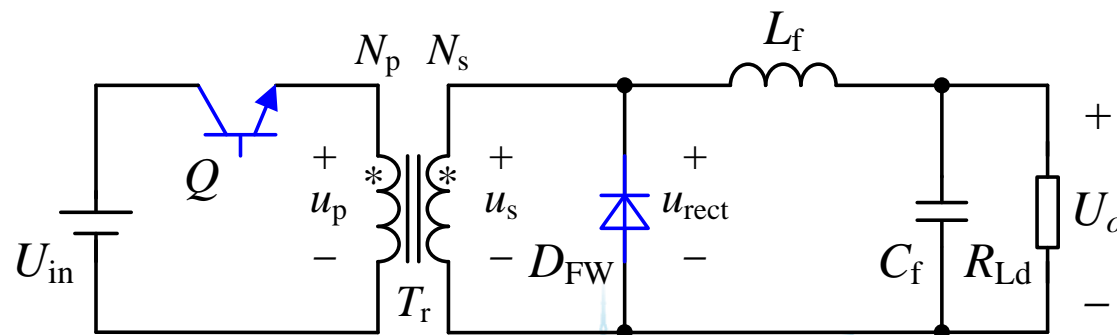
电感电流通过  $D_{FW}$  续流, 变压器副边绕组被短路,

$u_s = u_p = 0$ , 励磁磁通保持不变。一个开关周期内,

励磁磁通净增加, 变压器趋向饱和



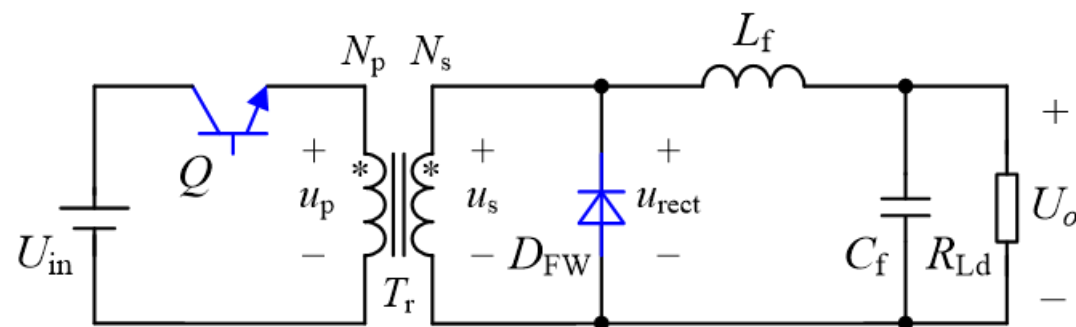
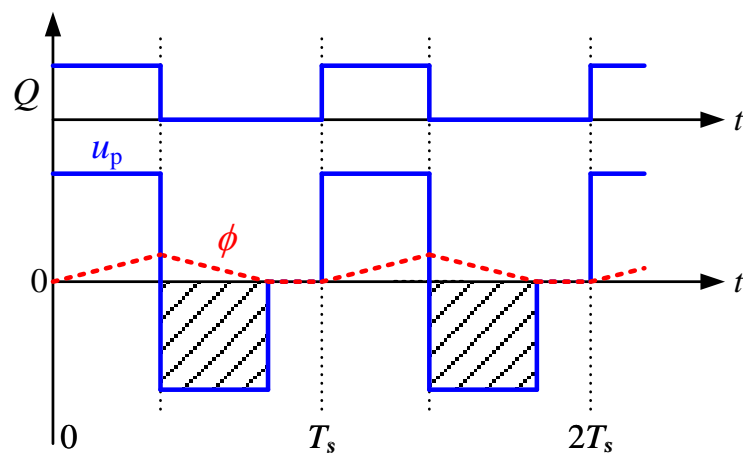
加入隔离变压器



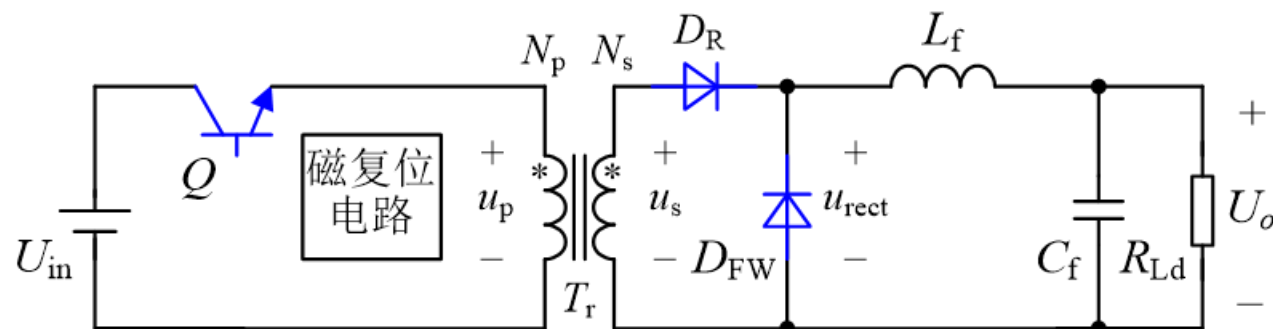
# 正激变换器电路拓扑的推演

为了防止变压器饱和，开关周期结束前使变压器励磁磁通减小到零。所以需要加入**磁复位电路**：

在 **$Q$ 截止**时，使原边绕组得到**负电压**。此时， $u_s < 0$ ， $D_{FW}$  导通，副边绕组短路，因此需要串入二极管  $D_R$

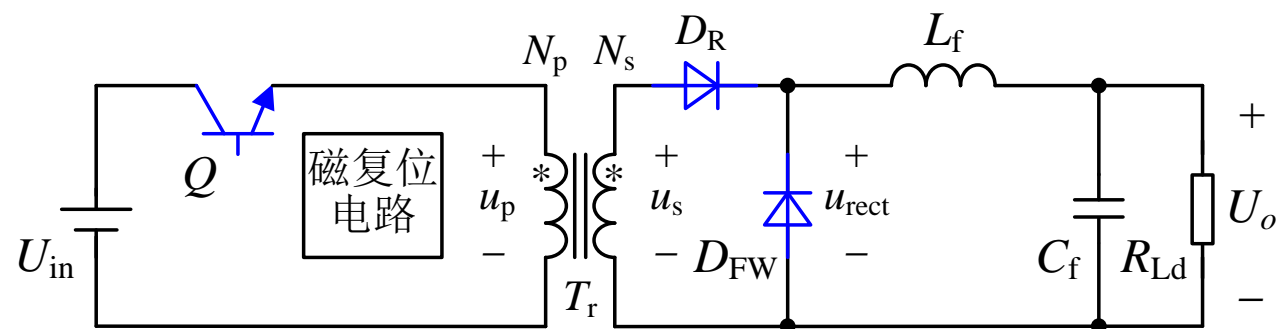


加入磁复位电路  
和二极管  $D_R$

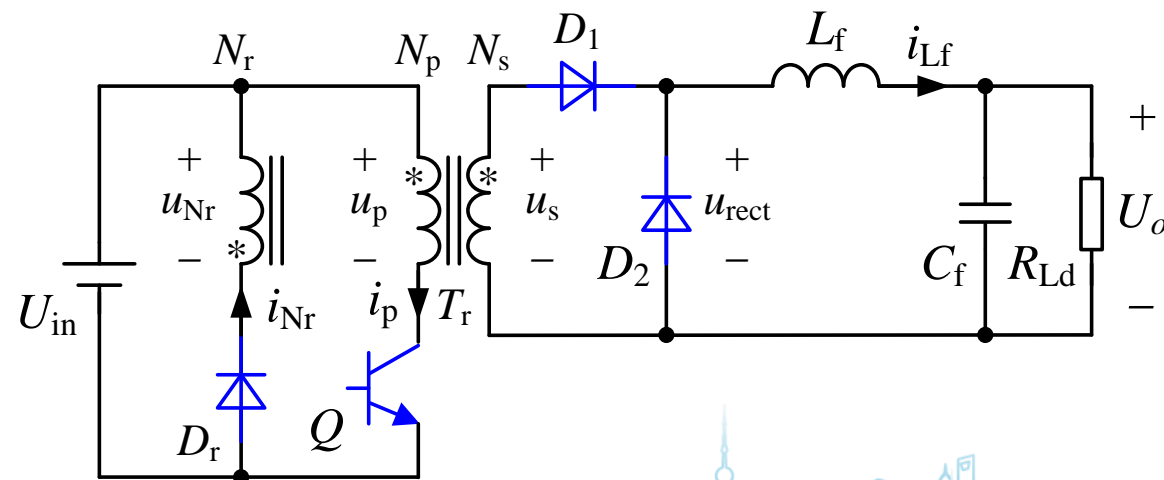


# 正激变换器电路拓扑的推演

- 复位绕组 $N_r$ 与复位二极管 $D_r$ 组成磁复位电路
- 开关管与变压器原边绕组换位  
即得到单管正激(Forward)变换器
- 变压器起到电气隔离和变压作用
- 整流二极管 $D_1$ 和续流二极管 $D_2$ 构成半波整流电路



开关管与原边绕组换位



## ★ 5.1 正激变换器

5.1.1 正激变换器电路拓扑的推演

5.1.2 正激变换器的工作原理

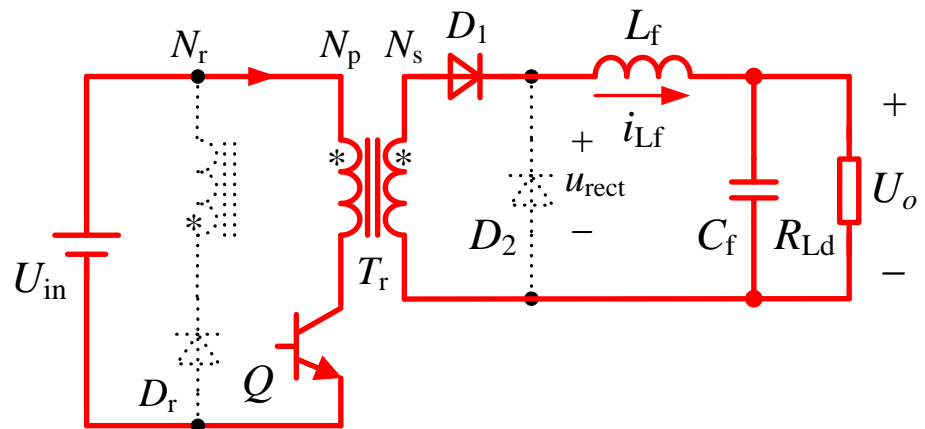
5.1.3 正激变换器的基本关系

5.1.4 双管正激变换器

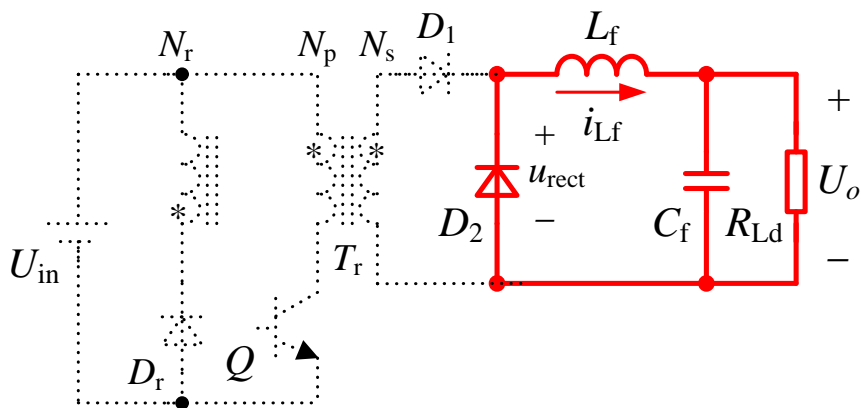


# 正激变换器的工作原理

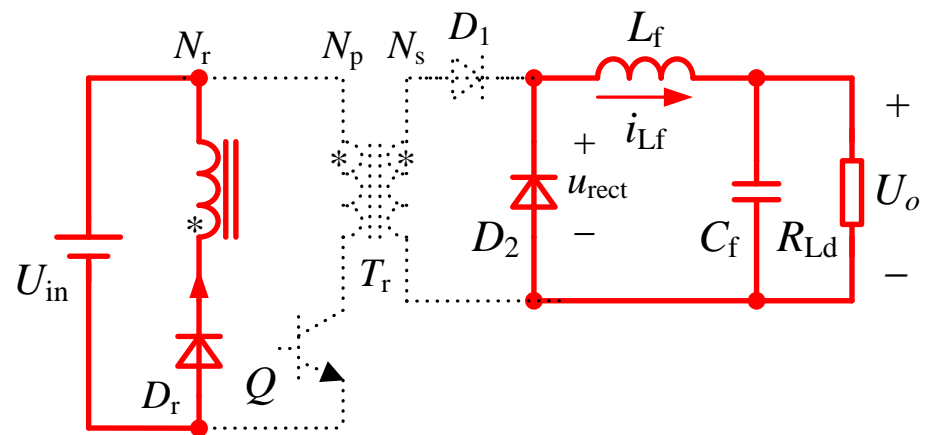
在一个开关周期内，正激变换器存在三种开关模态



(a)  $Q$  导通



(c)  $Q$  关断，磁复位完成



(b)  $Q$  关断



# 正激变换器的工作原理

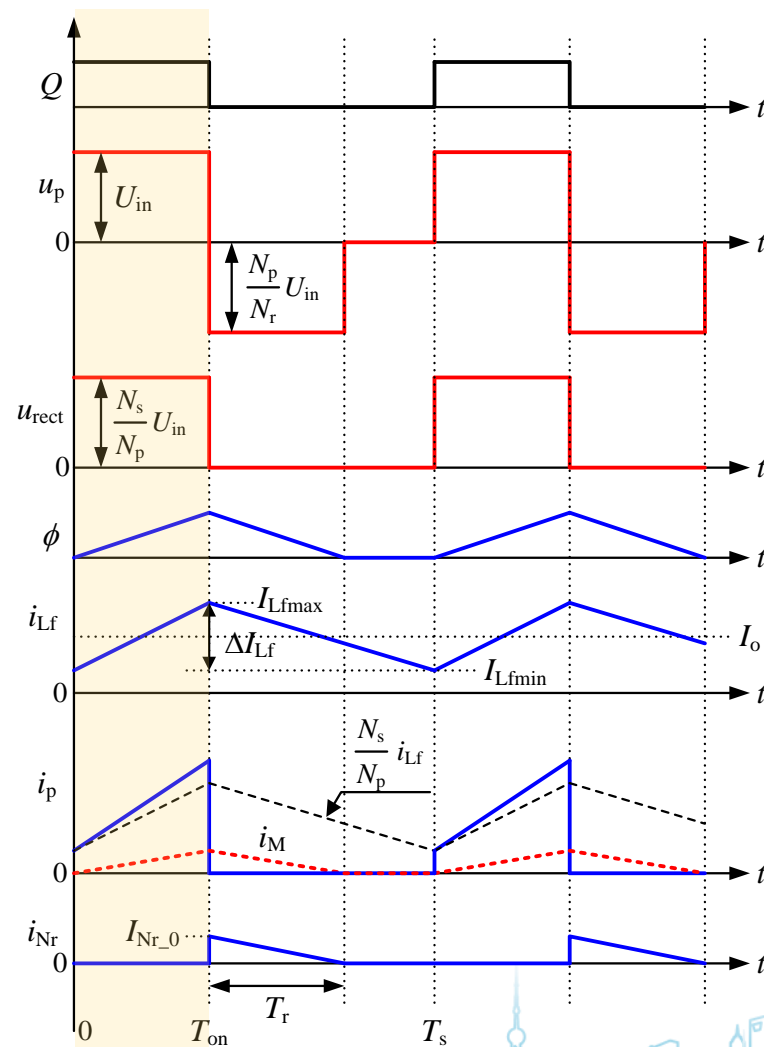
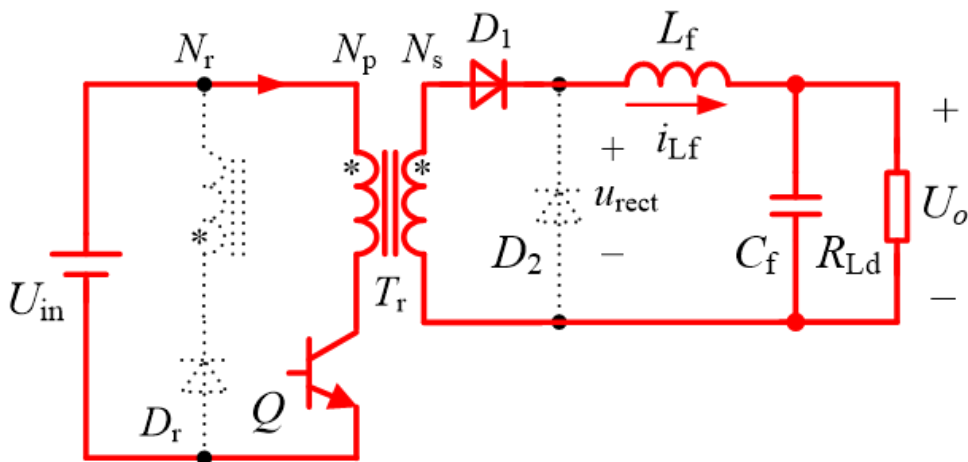
## 1. 开关模态1 $[0, T_{\text{on}}]$

$Q$ 导通，原边绕组电压： $u_p = N_p \frac{d\phi}{dt} = U_{\text{in}}$

磁通增长： $\Delta\phi_{(+)} = \frac{U_{\text{in}}}{N_p} D_y T_s$

占空比： $D_y = T_{\text{on}} / T_s$

$T_{\text{on}}$  为导通时间， $T_s$  为开关周期



# 正激变换器的工作原理

## 1. 开关模态1 $[0, T_{on}]$

变压器励磁电流:

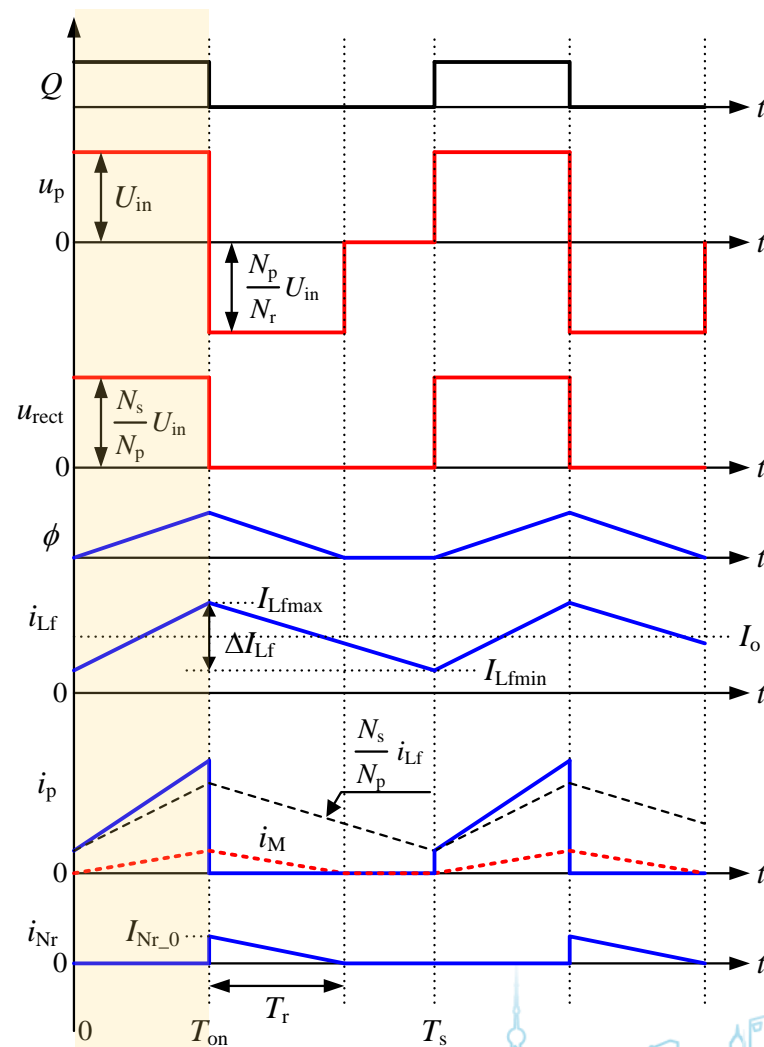
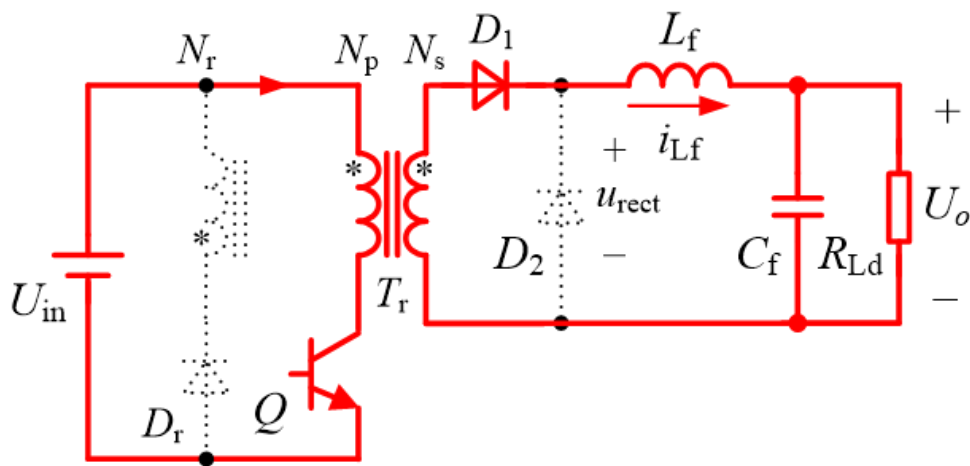
$$i_M = \frac{U_{in}}{L_M} t$$

副边绕组电压:

$$u_s = \frac{N_s}{N_p} U_{in}$$

原边电流:

$$i_p = \frac{N_s}{N_p} i_{Lf} + i_M$$

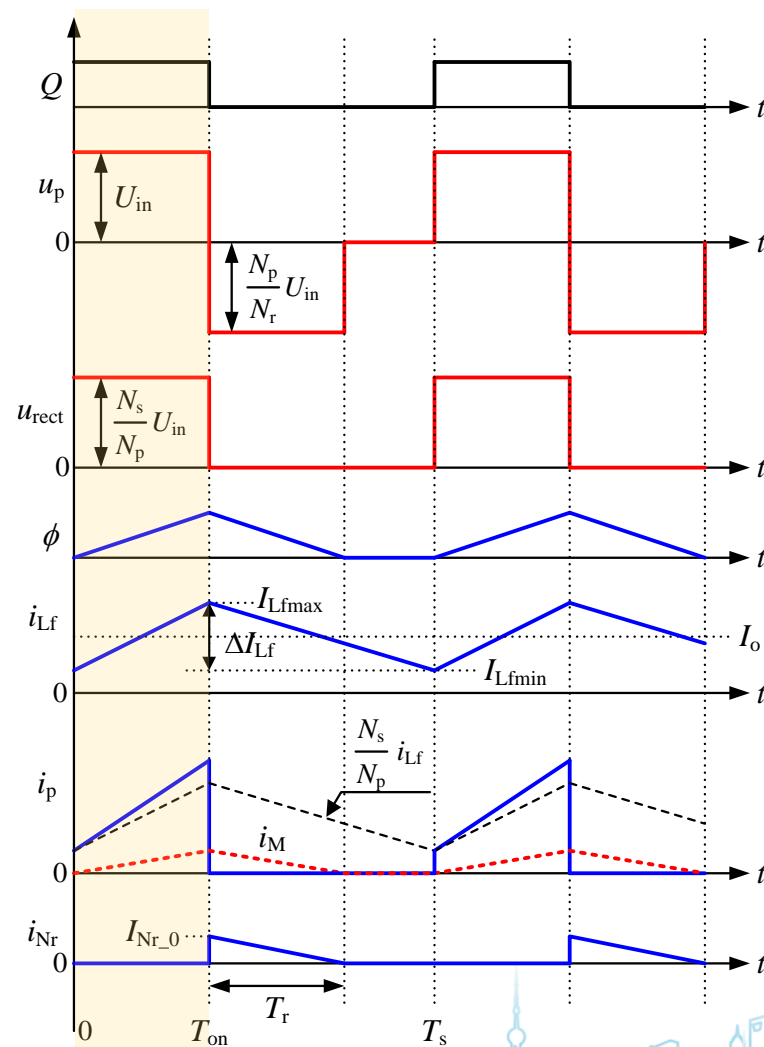
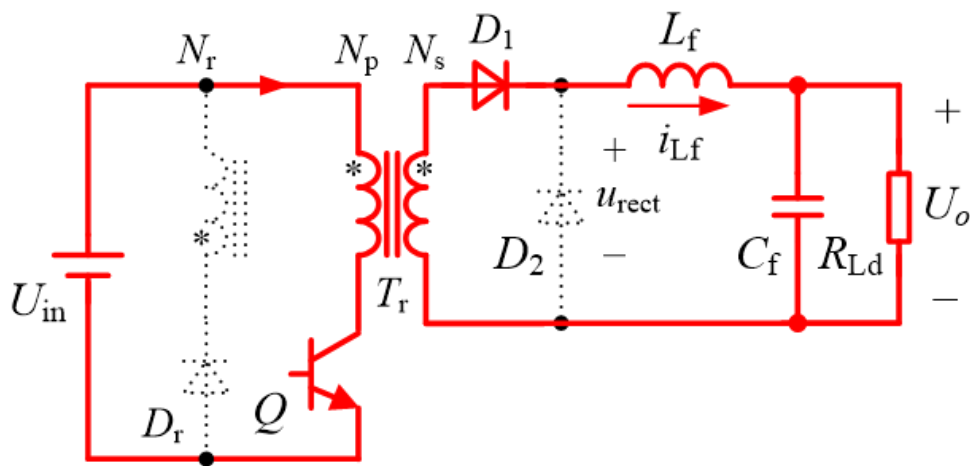


# 正激变换器的工作原理

## 1. 开关模态1 $[0, T_{\text{on}}]$

电感电流增量:

$$\Delta I_{L_f} = \frac{u_s - U_o}{L_f} T_{\text{on}} = \frac{\frac{N_s}{N_p} U_{\text{in}} - U_o}{L_f} T_{\text{on}}$$



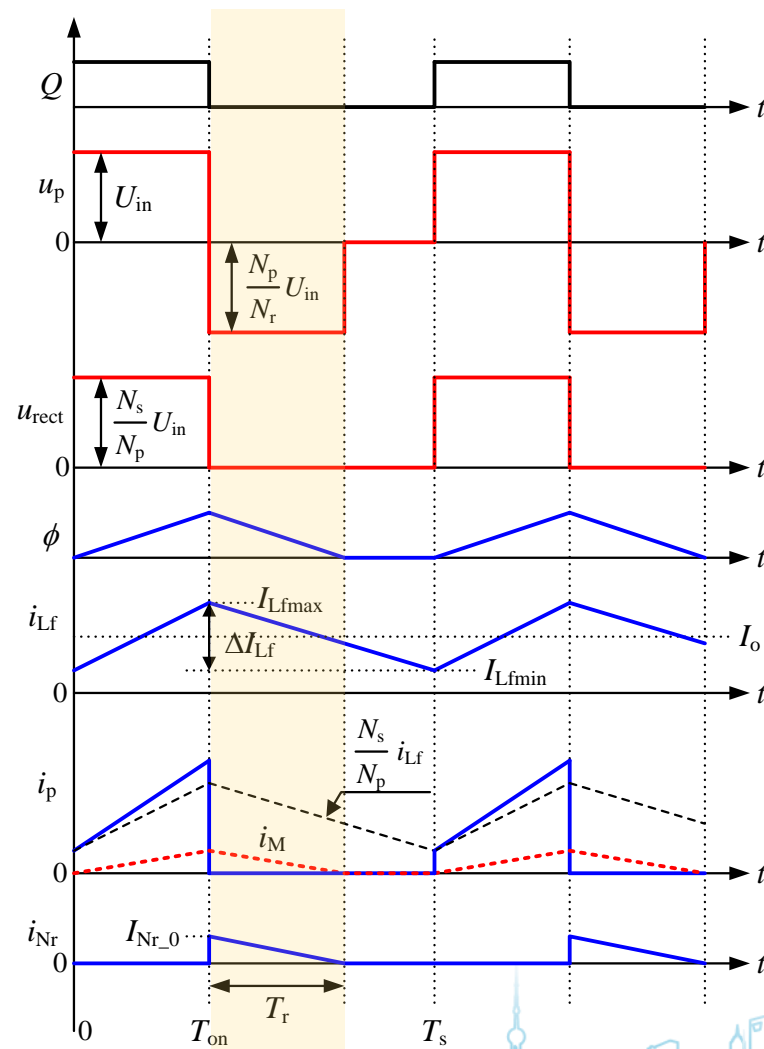
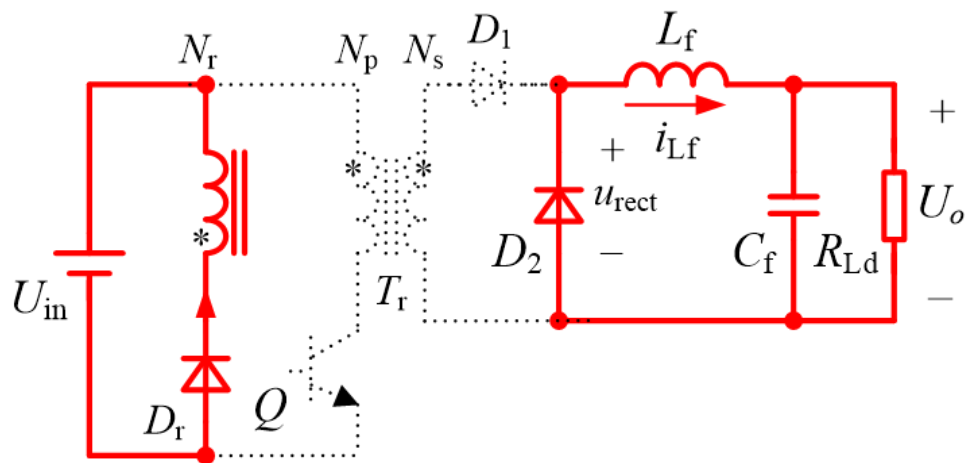
# 正激变换器的工作原理

## 2. 开关模态2 [ $T_{on}$ , $T_{on}+T_r$ ]

在 $t=T_{on}$ 时, 复位绕组 $N_r$ 中出现感应电压且极性为 “\*” 端为 “负”, 二极管 $D_r$ 导通

复位绕组初始电流:  $I_{Nr_0} = \frac{N_p}{N_r} \frac{U_{in}}{L_M} D_y T_s$

复位绕组电压:  $u_{Nr} = N_r \frac{d\phi}{dt} = -U_{in}$



# 正激变换器的工作原理

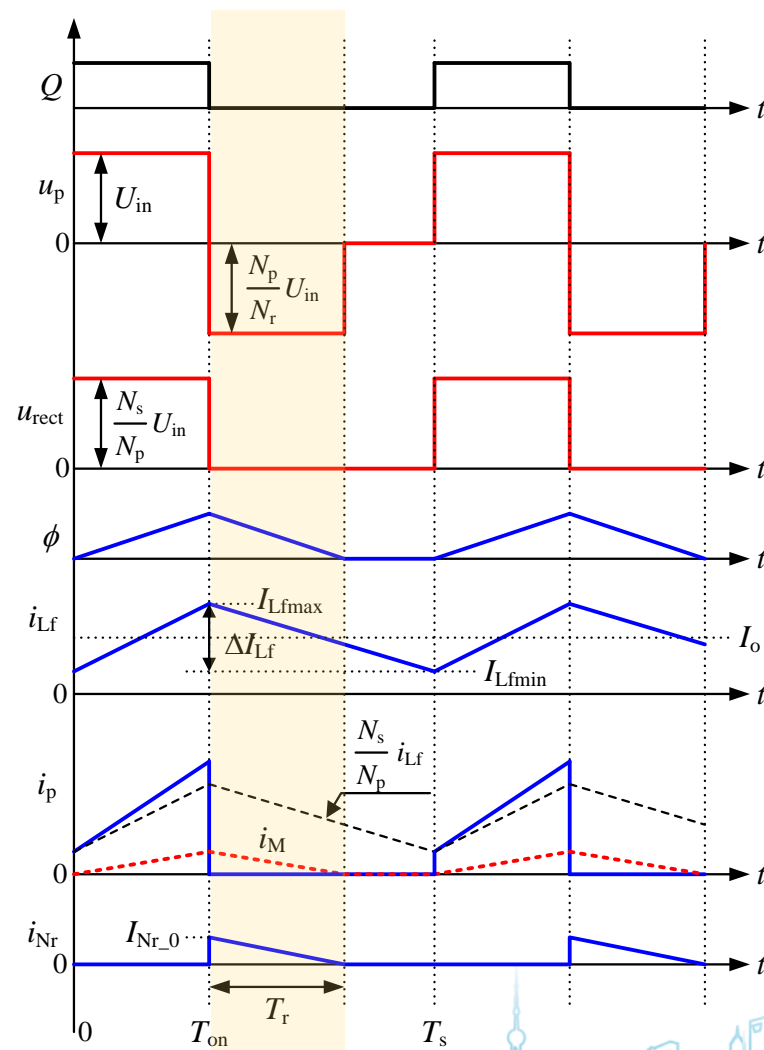
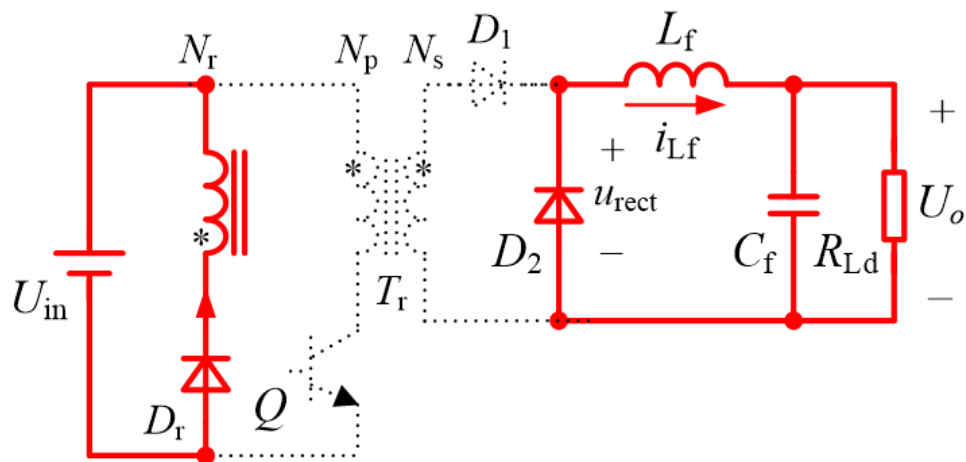
## 2. 开关模态2 [ $T_{on}$ , $T_{on}+T_r$ ]

磁通减小量:  $\Delta\phi_{(-)} = \frac{U_{in}}{N_r} T_r = \frac{U_{in}}{N_r} D_{reset} T_s$

$T_r$  为磁通减小到零的时间:  $D_{reset} = T_r / T_s$

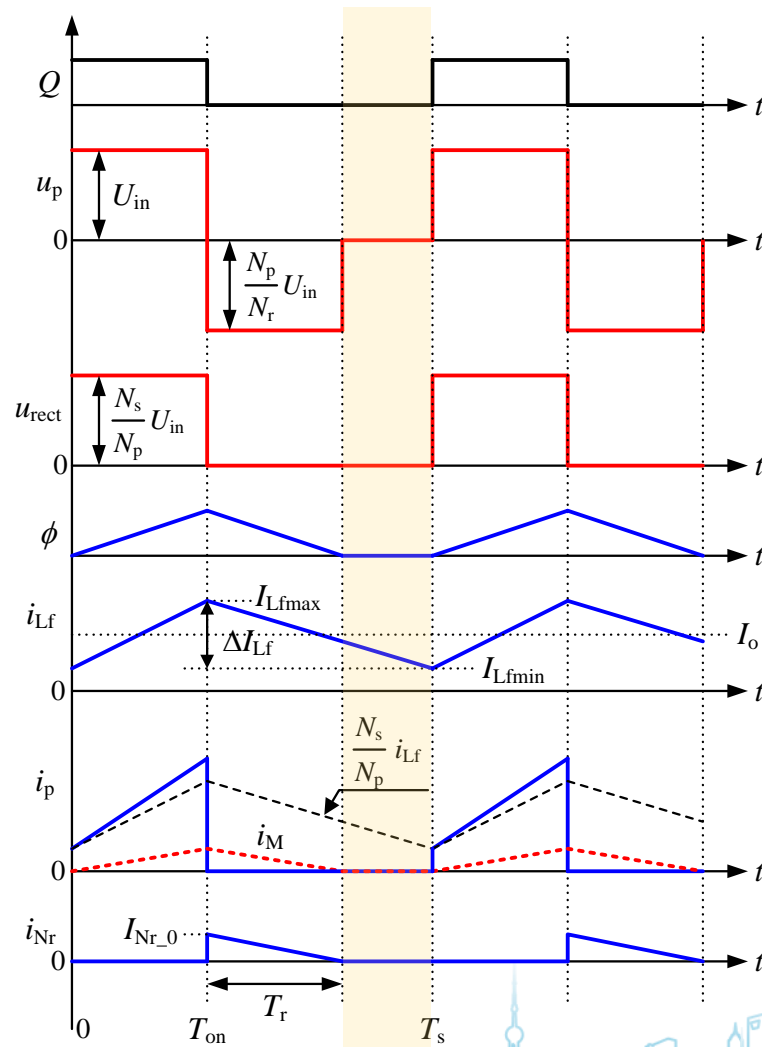
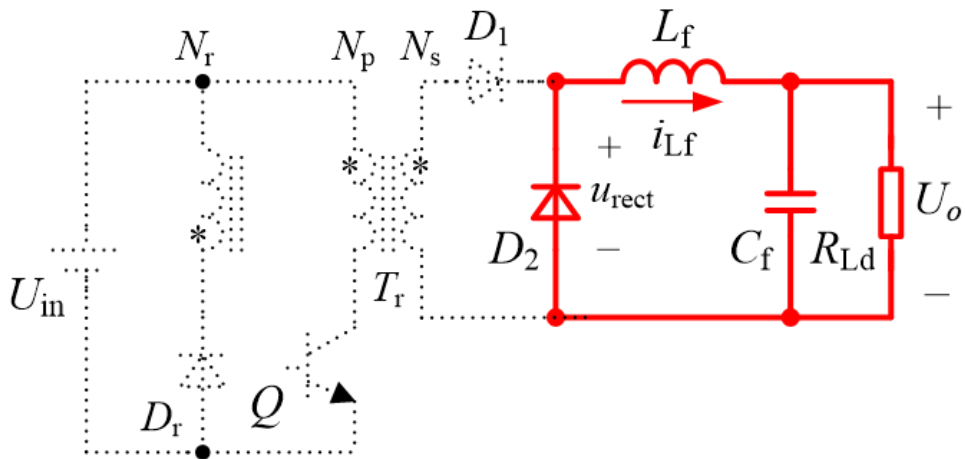
在  $t=T_{on}+T_r$  时,  $i_{Nr}=0$ ,  $i_M=0$ , 变压器磁复位

原/副边绕组电压:  $u_p = -\frac{N_p}{N_r} U_{in}$   $u_s = -\frac{N_s}{N_r} U_{in}$

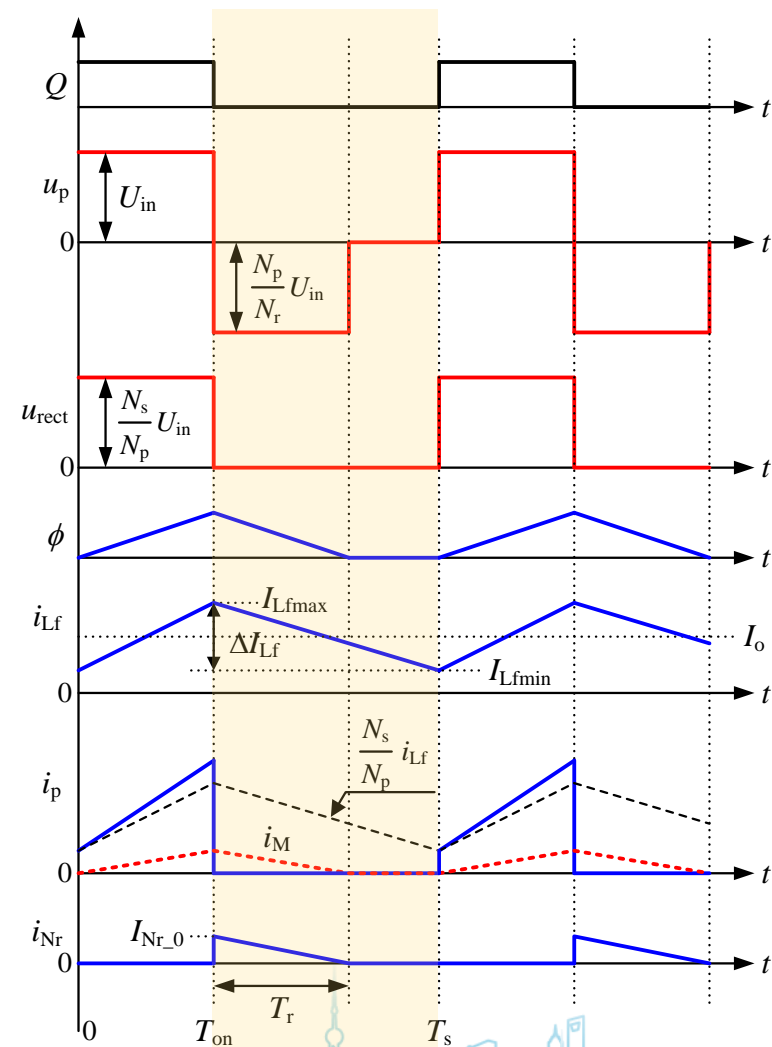
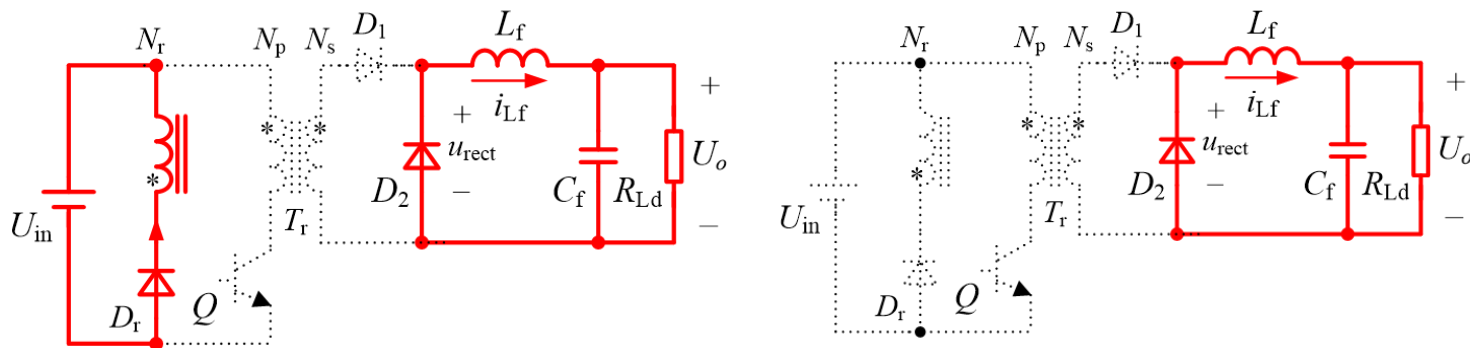


### 3. 开关模态3 [ $T_{on}+T_r$ , $T_s$ ]

在此开关模态中，变压器所有绕组电压和电流均为零。滤波电感电流 $i_{L_f}$ 继续经过续流二极管 $D_2$ 续流，并且线性下降。加在开关管 $Q$ 上的电压为： $u_Q=U_{in}$



### 3. 开关模态2和3 [ $T_{on}$ , $T_s$ ]

$$\Delta I_{Lf} = \frac{U_o}{L_f} (T_s - T_{on}) = \frac{U_o}{L_f} (1 - D_y) T_s$$


## ★ 5.1 正激变换器

5.1.1 正激变换器电路拓扑的推演

5.1.2 正激变换器的工作原理

5.1.3 正激变换器的基本关系

5.1.4 双管正激变换器





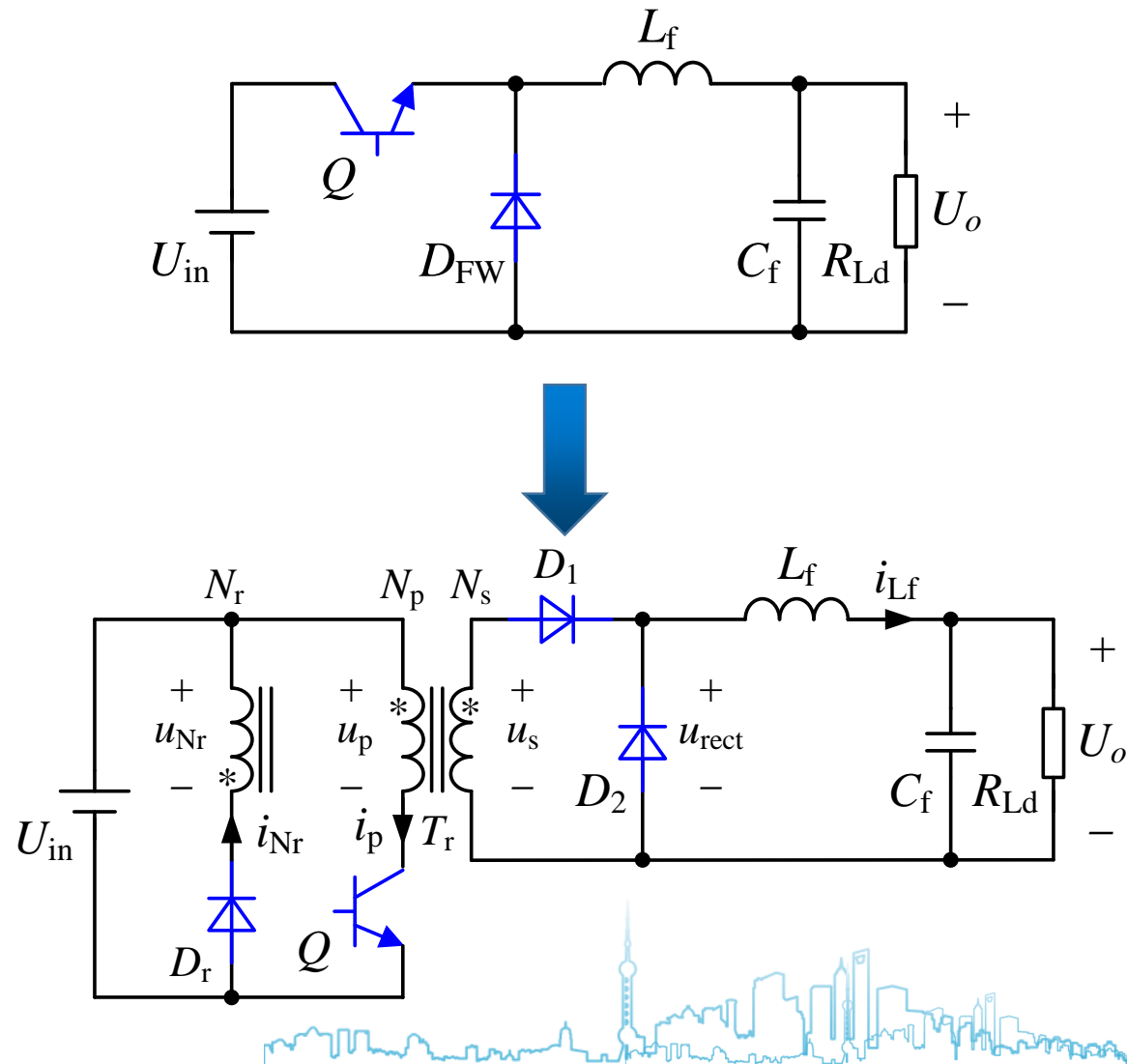
# 正激变换器的基本关系

## 1. 输出电压与输入电压的关系式

正激变换器实际上是一个隔离型的Buck变换器，其输出电压与输入电压之间的关系为：

$$U_o = D_y \frac{N_s}{N_p} U_{in}$$

其中占空比:  $D_y = T_{on} / T_s$



# 正激变换器的基本关系

## 2. 功率器件承受的电压应力和流过的电流

➤ 开关管 $Q$ 截止，变压器磁芯去磁

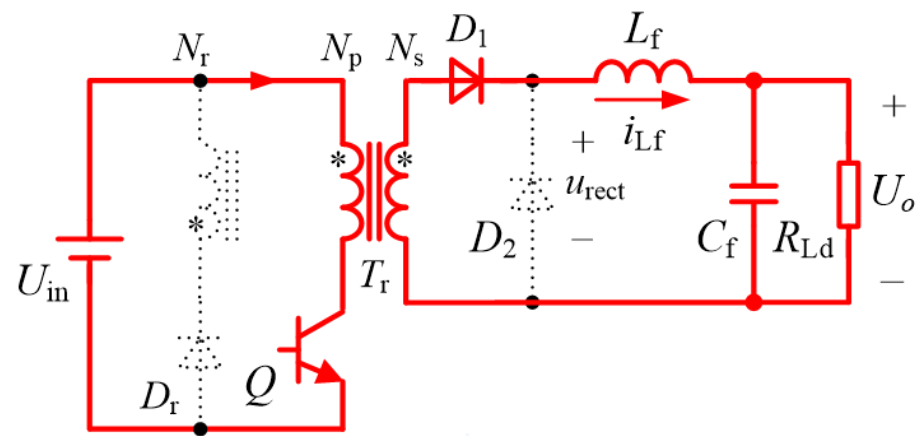
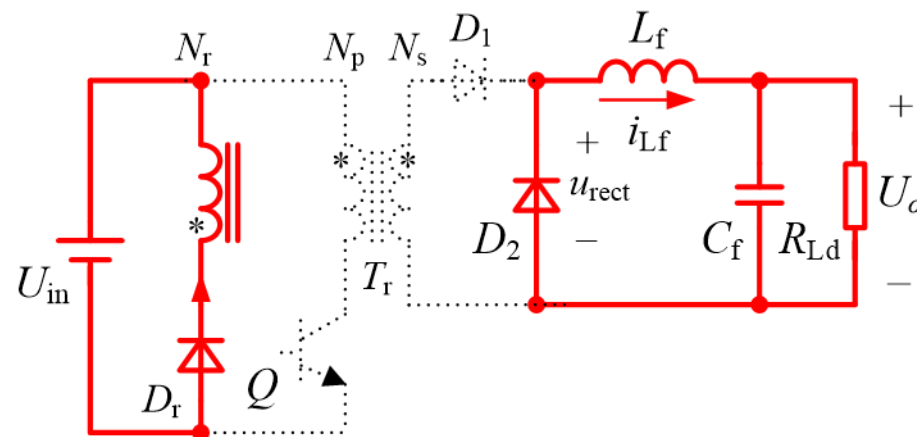
开关管 $Q$ 上电压：
$$U_Q = U_{in} + \frac{N_p}{N_r} U_{in} = \left(1 + \frac{N_p}{N_r}\right) U_{in}$$

整流二极管 $D_1$ 上电压：
$$U_{D1} = \frac{N_s}{N_r} U_{in}$$

➤ 开关管 $Q$ 导通，变压器磁芯增磁

续流二极管 $D_2$ 上电压：
$$U_{D2} = \frac{N_s}{N_p} U_{in}$$

整流二极管 $D_r$ 上电压：
$$U_{Dr} = \left(1 + \frac{N_r}{N_p}\right) U_{in}$$



# 正激变换器的工作原理

## 2. 功率器件承受的电压应力和流过的电流

电感电流 $i_{L_f}$ 的最大值为：

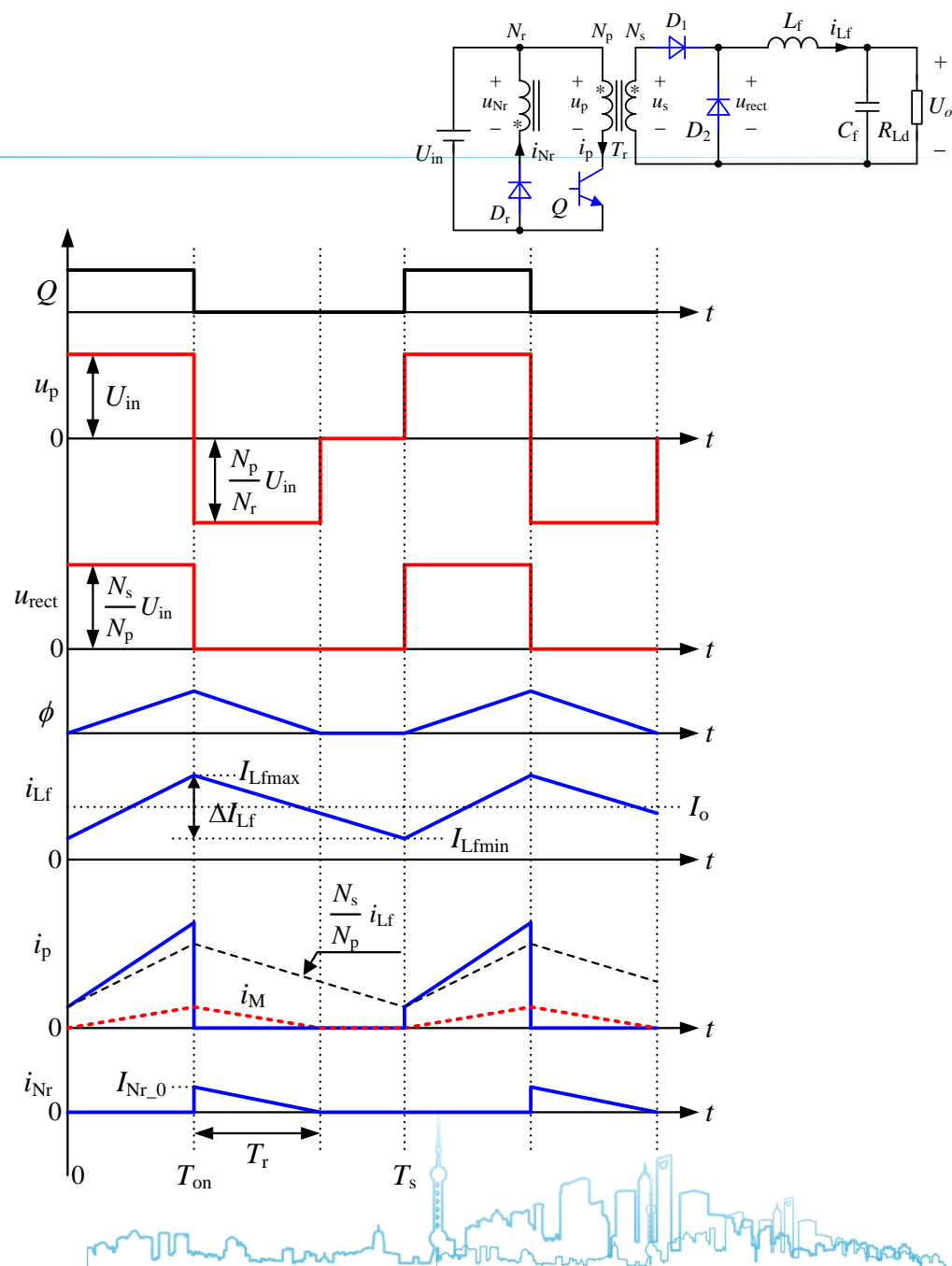
$$I_{L_{fmax}} = I_o + \frac{1}{2} \Delta I_{L_f} = I_o + \frac{1}{2L_f} \left( \frac{N_s}{N_p} U_{in} - U_o \right) D_y T_s$$

二极管 $D_1$ 、 $D_2$ 导通时电流均为 $i_{L_f}$

即 $D_1$ 、 $D_2$ 上最大电流均等于 $I_{L_{fmax}}$

开关管电流 $i_Q$ 最大值为：

$$I_{Q_{max}} = \frac{N_s}{N_p} I_{L_{fmax}} + I_{M_{max}} = \frac{N_s}{N_p} I_{L_{fmax}} + \frac{U_{in}}{L_M} D_y T_s$$



# 正激变换器的工作原理

## 3. 复位绕组匝数的选取

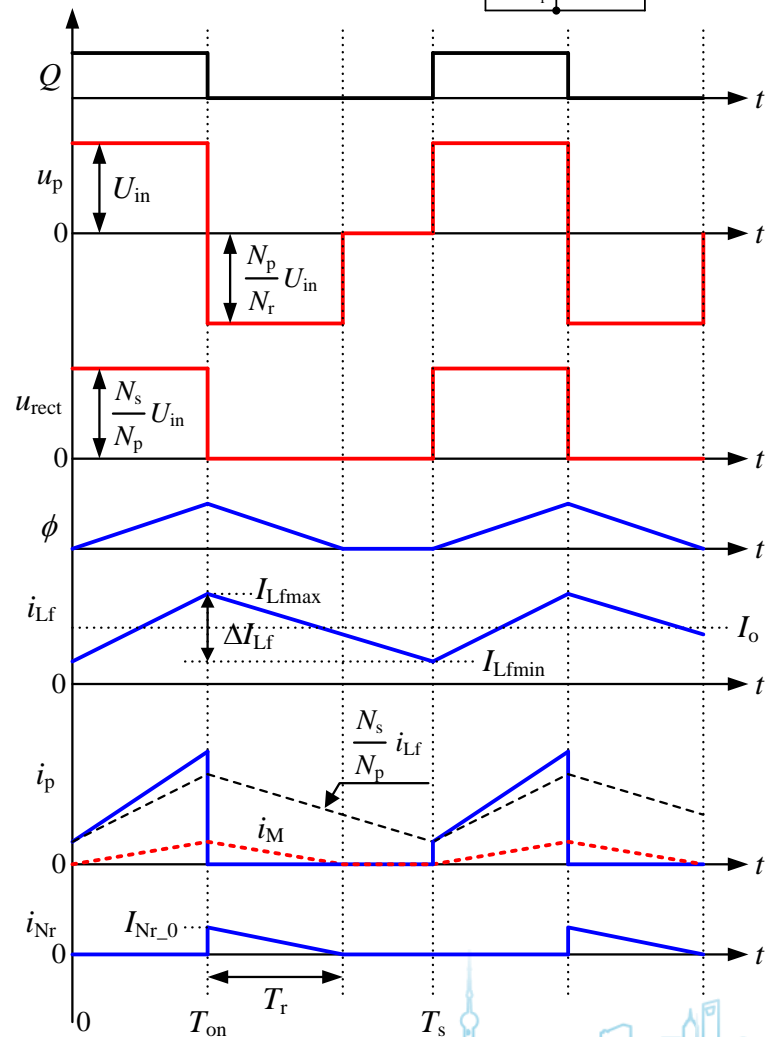
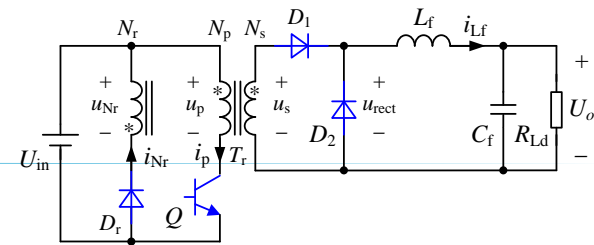
为了保证变压器磁芯的磁复位，防止磁芯饱和损坏，磁芯磁通的增加量应等于减小量：

$$\Delta\phi_{(+)} = \frac{U_{in}}{N_p} D_y T_s = \Delta\phi_{(-)} = \frac{U_{in}}{N_r} T_r = \frac{U_{in}}{N_r} D_{reset} T_s$$

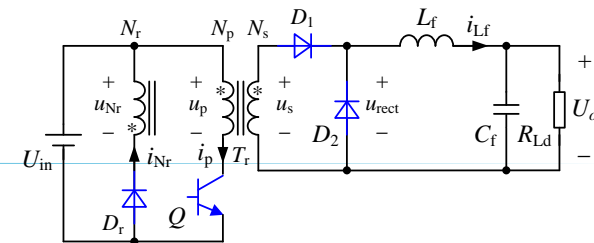
可以得到：  $D_{reset} = \frac{N_r}{N_p} D_y$

为保证变压器磁芯可靠复位：  $D_{reset} < 1 - D_y$

最大占空比  $D_{ymax}$  满足：  $D_{ymax} \leq \frac{N_p / N_r}{1 + N_p / N_r}$



# 正激变换器的工作原理



## 3. 复位绕组匝数的选取

变压器的引入，不仅实现了输入和输出侧的电气隔离，也使正激变换器的输出电压可以高于输入电压，或低于输入电压，还可实现多输出

$$U_o = D_y \frac{N_s}{N_p} U_{in} \quad U_Q = U_{in} + \frac{N_p}{N_r} U_{in} = \left(1 + \frac{N_p}{N_r}\right) U_{in} \quad D_{y\max} \leq \frac{N_p / N_r}{1 + N_p / N_r}$$

- $N_p \geq N_r$ ,  $D_{y\max} > 0.5$ ,  $U_Q > 2U_{in}$ ,  $N_p/N_r$  越大,  $D_{y\max}$  可以越大, 而  $U_Q$  则越高
- $N_p \leq N_r$ ,  $D_{y\max} < 0.5$ ,  $U_Q < 2U_{in}$ ,  $N_p/N_r$  越小,  $D_{y\max}$  可以越小, 而  $U_Q$  则越低
- 为了充分提高  $D_y$ , 而又减小  $U_Q$ , 一般选择  $N_r = N_p$ , 此时  $D_{y\max} = 0.5$ , 而  $U_Q = 2U_{in}$

# 正激变换器的工作原理

## 4. 滤波电感量与滤波电容量

### (1) 开关模态1 $[0, T_{\text{on}}]$

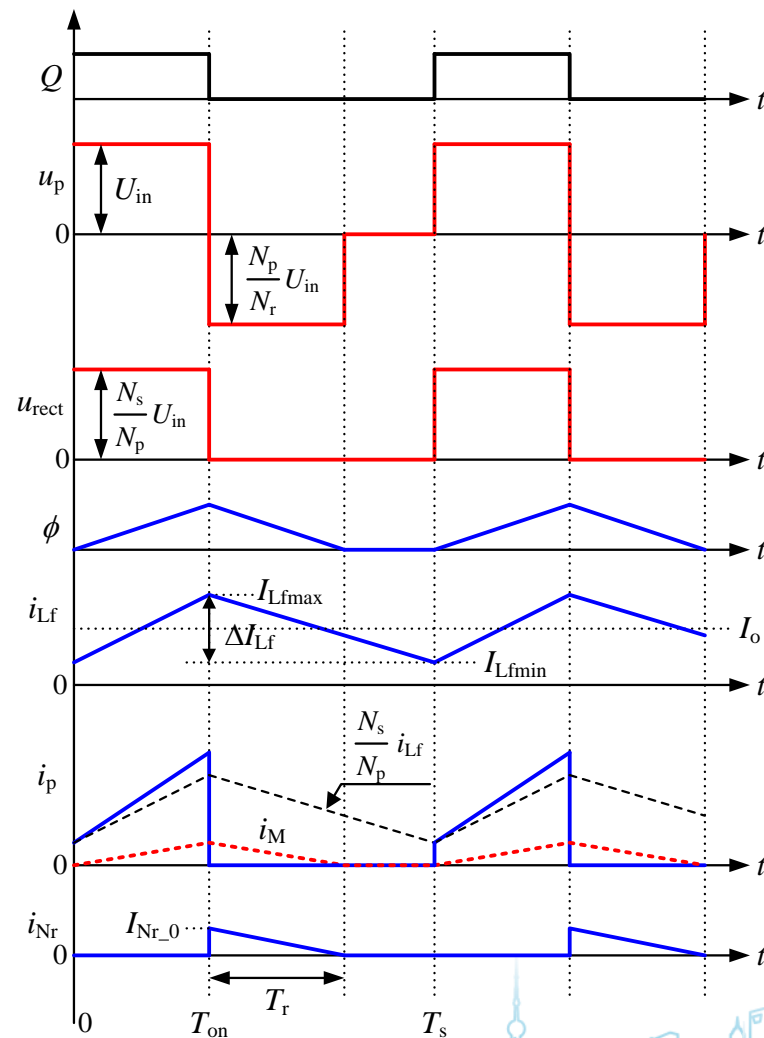
电感电流增量:

$$\Delta I_{L_f} = \frac{u_s - U_o}{L_f} T_{\text{on}} = \frac{\frac{N_s}{N_p} U_{\text{in}} - U_o}{L_f} T_{\text{on}}$$

### (2) 开关模态2和3 $[T_{\text{on}}, T_s]$

电感电流减量:

$$\Delta I_{L_f} = \frac{U_o}{L_f} (T_s - T_{\text{on}}) = \frac{U_o}{L_f} (1 - D_y) T_s$$



# 正激变换器的工作原理

## 4. 滤波电感量与滤波电容量

正激变换器本质上是一个隔离型的Buck变换器，其滤波电感量与滤波电容量的计算与Buck变换器类似，只是将加在滤波器上的电压的幅值改为 $U_{in}N_s/N_p$ 即可

滤波电感量：

$$L_f = \frac{U_o}{\Delta I_{L_{fmax\_permit}}} \left( 1 - \frac{N_p U_o}{N_s U_{inmax}} \right) T_s$$
$$L_f = \begin{cases} \frac{N_s U_{in}}{N_p \Delta I_{L_{fmax\_permit}}} (1 - D_{y_{max}}) D_{y_{max}} T_s & (D_y \leq 0.5) \\ \frac{N_s U_{in}}{N_p \Delta I_{L_{fmax\_permit}}} (1 - D_{y_{min}}) D_{y_{min}} T_s & (D_y \geq 0.5) \\ \frac{N_s U_{in}}{4 N_p \Delta I_{L_{fma\_permit}}} T_s & (D_{y_{min}} \leq 0.5 \leq D_{y_{max}}) \end{cases}$$

$U_o$ 不变

滤波电容量：

$$C_f = \frac{(1 - D_y) U_o}{8 L_f f_s^2 \Delta U_o}$$

$U_{in}$ 不变



# 正激变换器的工作原理

## 4. 滤波电感量与滤波电容量

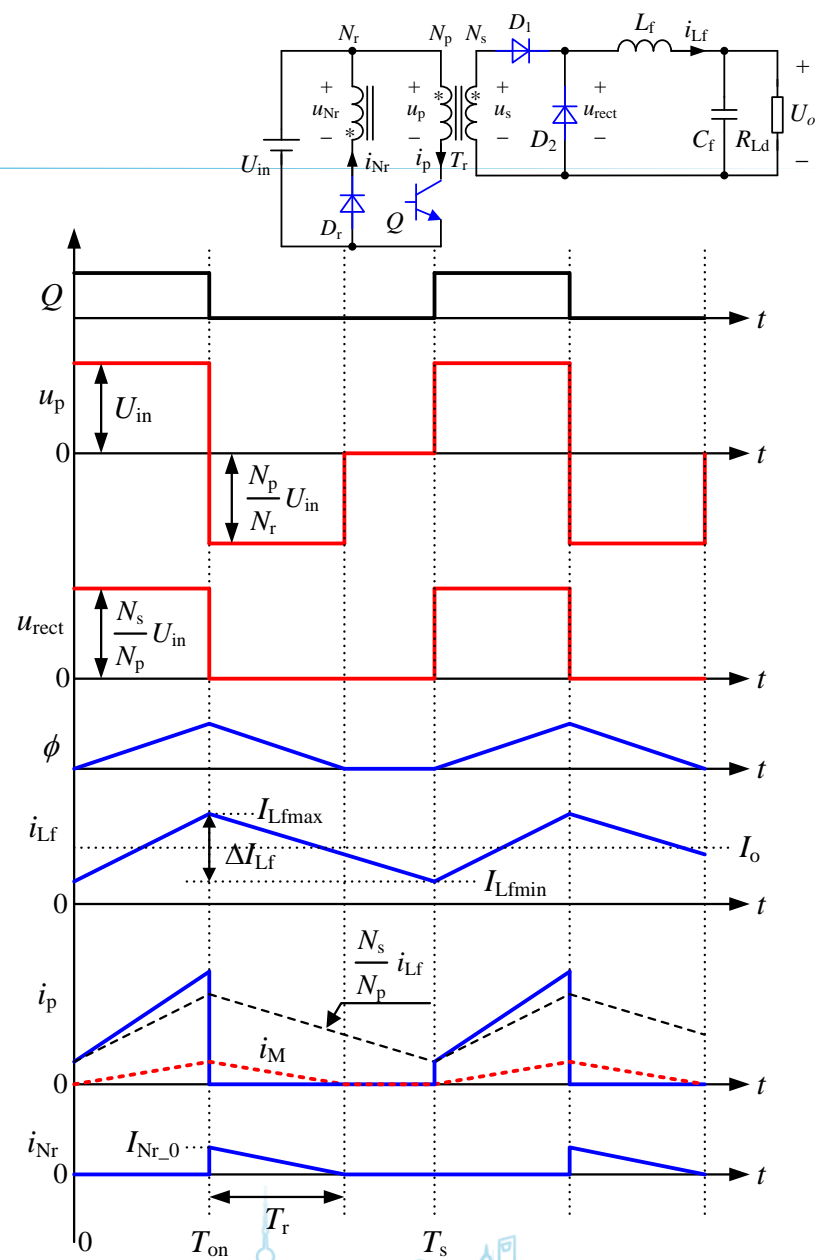
正激变换器本质上是一个隔离型的Buck变换器，其滤波电感量与滤波电容量的计算与Buck变换器类似，只是将加在滤波器上的电压的幅值改为 $U_{in}N_s/N_p$ 即可

滤波电容量：

$$Q = \frac{1}{2} \frac{T_s}{2} \frac{\Delta I_{Lf}}{2} \quad \text{其中} \quad \begin{cases} \Delta I_{Lf} = \frac{u_s - U_o}{L_f} T_{on} = \frac{N_s}{N_p} \frac{U_{in} - U_o}{L_f} T_{on} \\ \Delta I_{Lf} = \frac{U_o}{L_f} (T_s - T_{on}) = \frac{U_o}{L_f} (1 - D_y) T_s \end{cases}$$

结果

$$\Delta U_o = \frac{Q}{C_f} = \frac{(1 - D_y) U_o}{8 L_f f_s^2 C_f} \Rightarrow C_f = \frac{(1 - D_y) U_o}{8 L_f f_s^2 \Delta U_o}$$





## ★ 5.2 反激变换器

5.2.1 反激变换器电路拓扑的推演

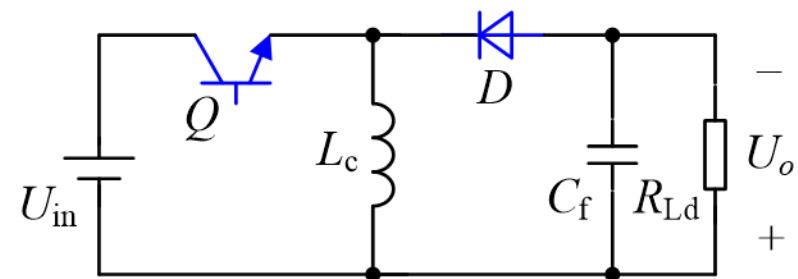
5.2.2 反激变换器的工作模式和开关模态

5.2.3 电流连续时反激变换器的工作原理与基本关系

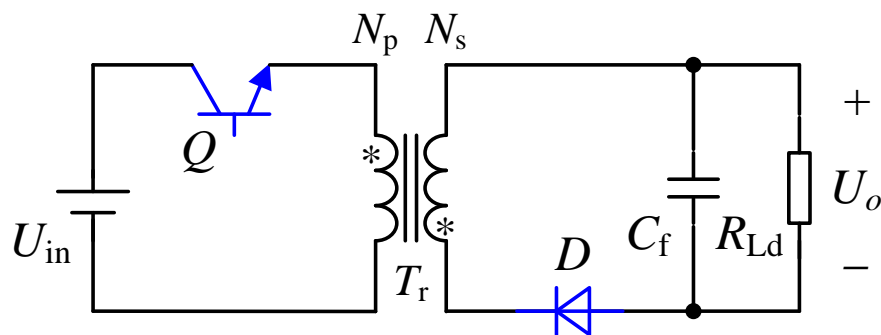
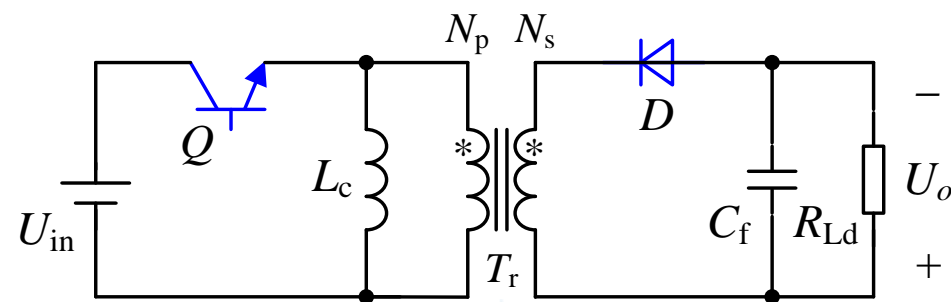


# 反激变换器电路拓扑的推演

根据伏秒面积平衡原理，加在电感 $L_c$ 上的电压是一个纯交流电压，因此，可以将变压器并联在 $L_c$ 上；同时，电感 $L_c$ 可以用变压器的励磁电感代替，因此它可以集成到变压器中



加入隔离变压器



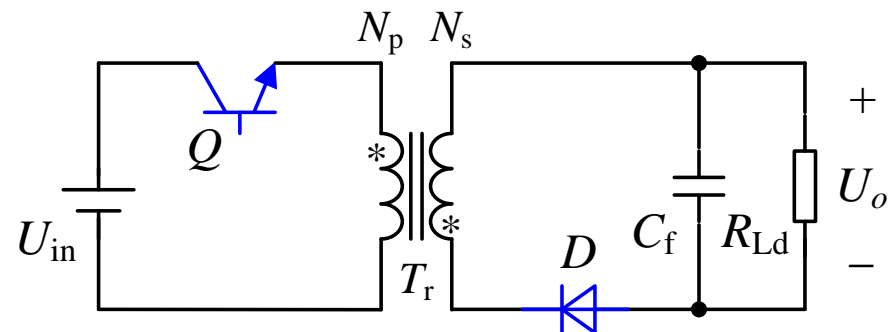
$L_c$ 集成至变压器  
副边电路镜像翻转

# 反激变换器电路拓扑的推演

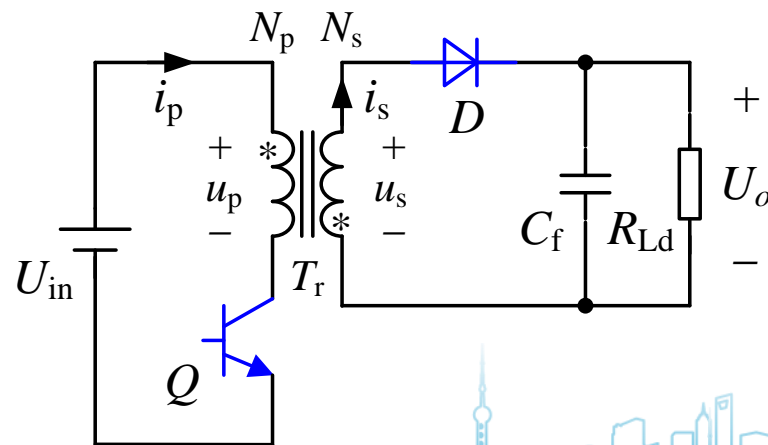
将二极管 $D$ 移到副边电路的上面，同时将开关管 $Q$ 和变压器原边绕组交换位置，即可得到反激(Flyback)变换器：

- 电路拓扑简洁
- 使用元器件数量少

注：反激变换器的变压器本质上是一个耦合电感，其磁芯必须留有气隙，以避免饱和



开关管与变压器换位  
二极管移位



## ★ 5.2 反激变换器

5.2.1 反激变换器电路拓扑的推演

5.2.2 反激变换器的工作模式和开关模态

5.2.3 电流连续时反激变换器的工作原理与基本关系

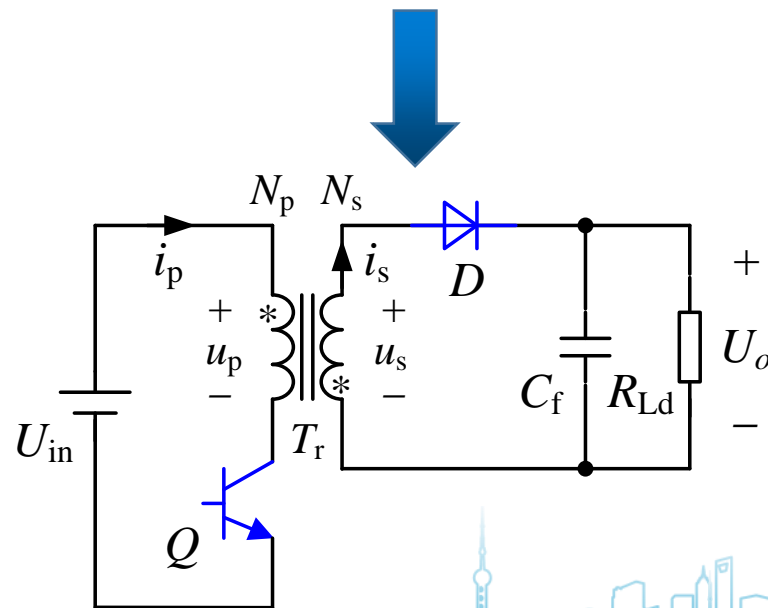
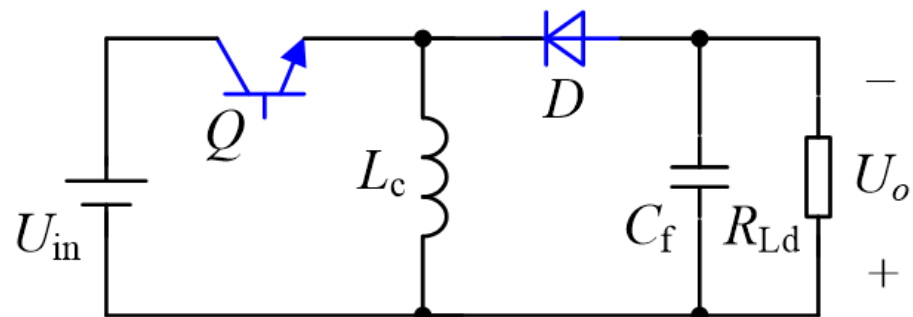


# 反激变换器的工作模式和开关模态

## 1. 反激变换器的工作模式

和Buck-Boost变换器一样，反激变换器也有**电流连续**和**断续**两种工作方式，但其含义不同：

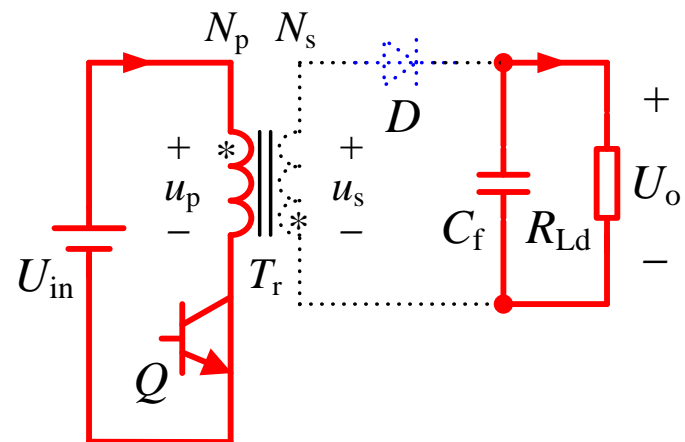
- 电流连续是指变压器两个绕组的**合成安匝**在一个开关周期中不为零
- 而电流断续是指合成安匝在 $Q$ 截止期间有一段时间为零



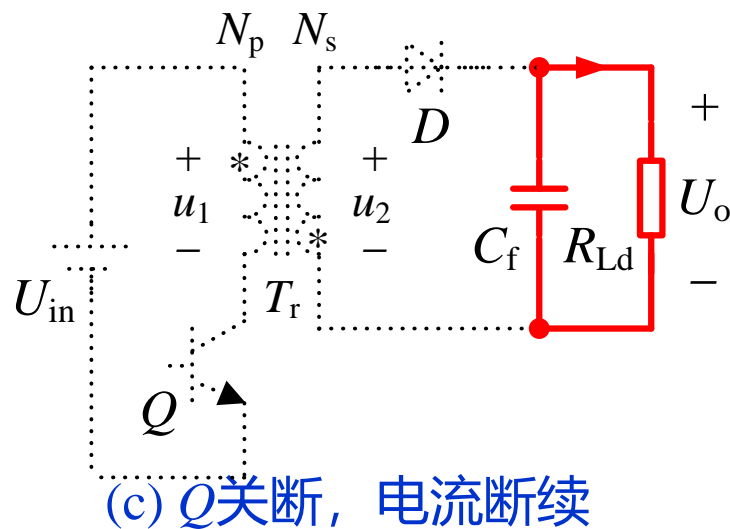
# 反激变换器的工作模式和开关模态

## 2. 反激变换器的开关模态

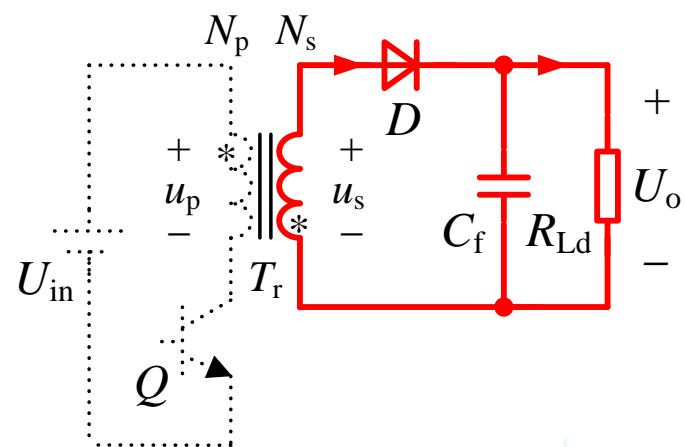
- 电流连续时，有(a)和(b)两种开关模态
- 电流断续时，有(a)、(b)、(c)三种开关模态



(a)  $Q$  导通



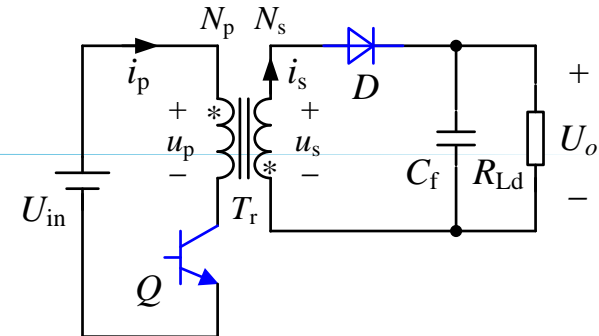
(c)  $Q$  关断，电流断续



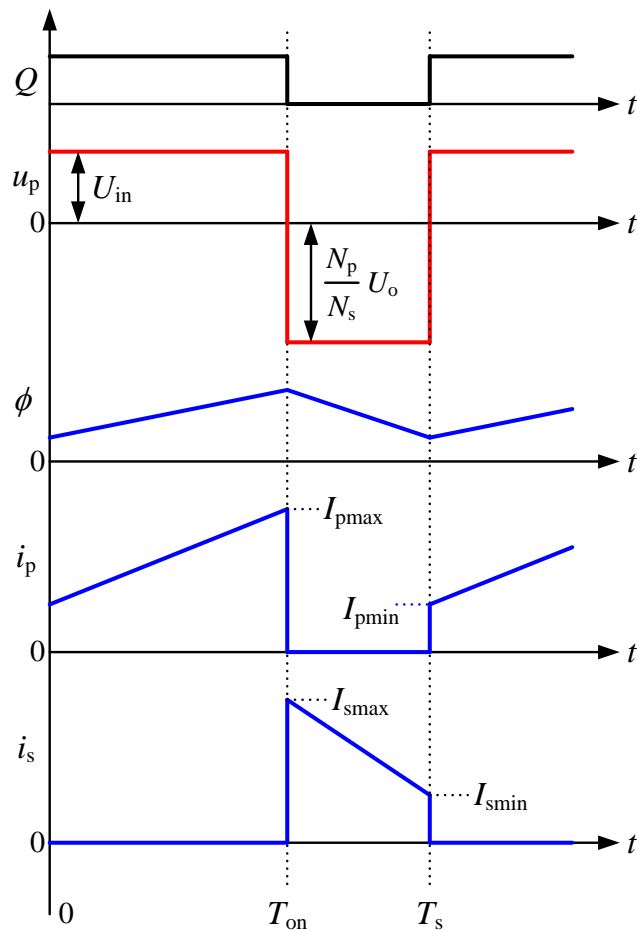
(b)  $Q$  关断

# 反激变换器电路拓扑的推演

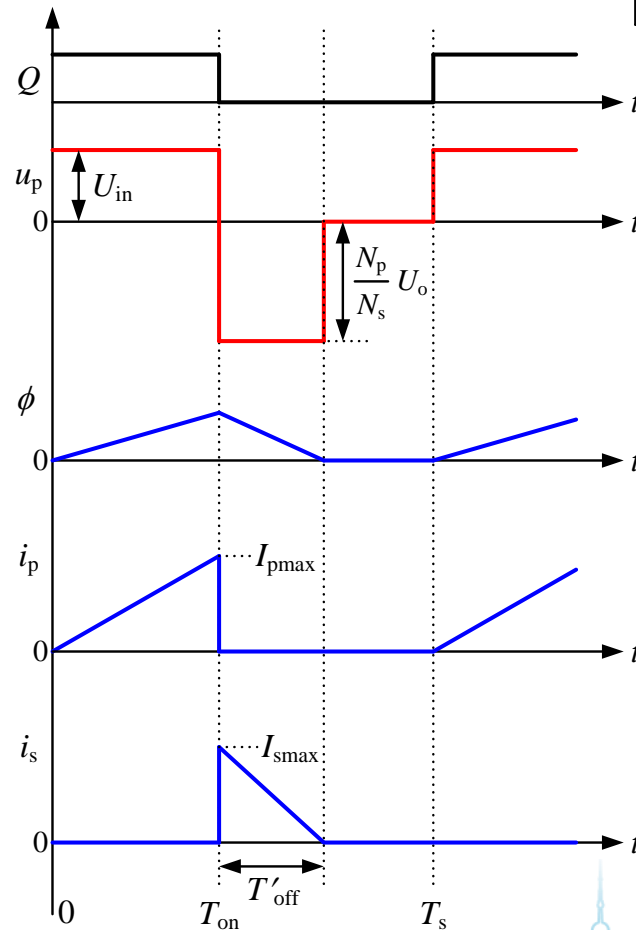
## 3. 反激变换器的主要波形



电流连续



电流断续



## ★ 5.2 反激变换器

5.2.1 反激变换器电路拓扑的推演

5.2.2 反激变换器的工作模式和开关模态

5.2.3 电流连续时反激变换器的工作原理与基本关系





# 电流连续时反激变换器的工作原理与基本关系

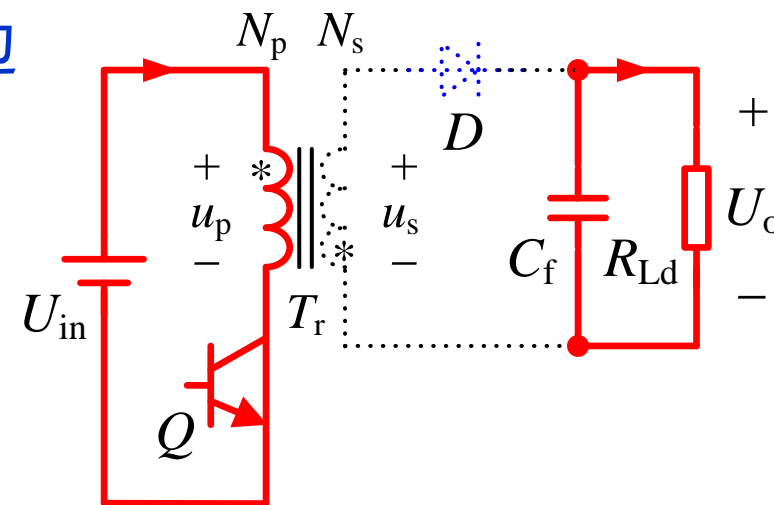
## 1. 工作原理

### 1). 开关模态1 $[0, T_{on}]$

在 $t=0$ 时, 开关管 $Q$ 导通, 输入电压 $U_{in}$ 加在变压器原边绕组 $N_p$ 上, 此时副边绕组 $N_s$ 的感应电压为:

$$u_s = -\frac{N_s}{N_p} U_{in}$$

其极性为 “\*” 端为 “正”, 二极管 $D$ 截止, 负载电流由滤波电容 $C_f$ 提供。此时, 变压器的副边绕组开路, 只有原边绕组工作, 相当于电感量为 $L_p$ 的一个电感



$Q$ 导通

# 电流连续时反激变换器的工作原理与基本关系

## 1. 工作原理

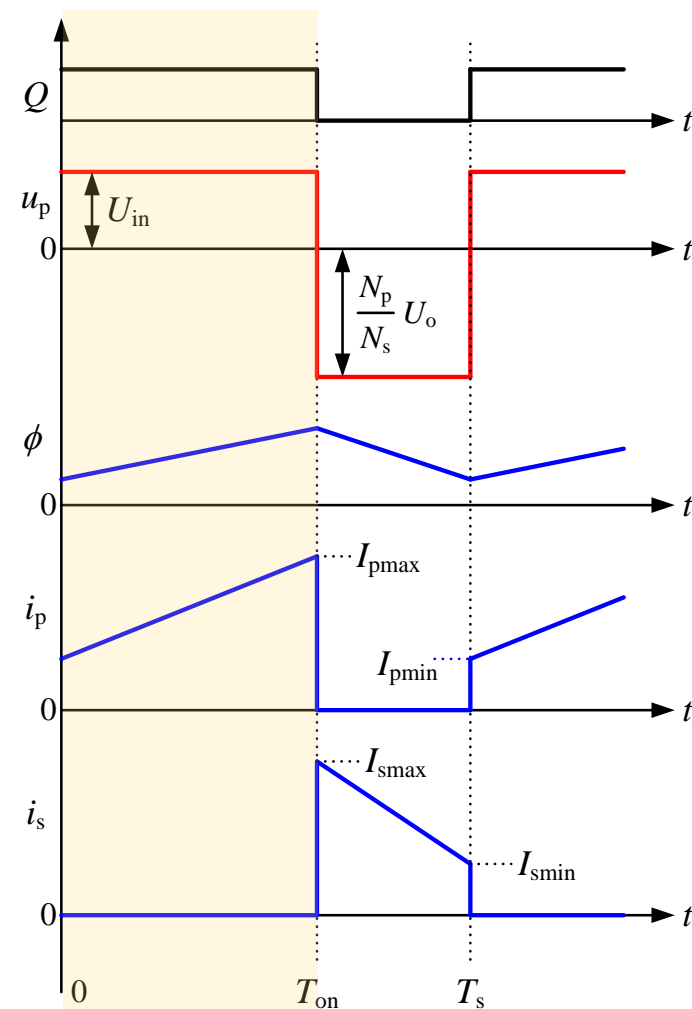
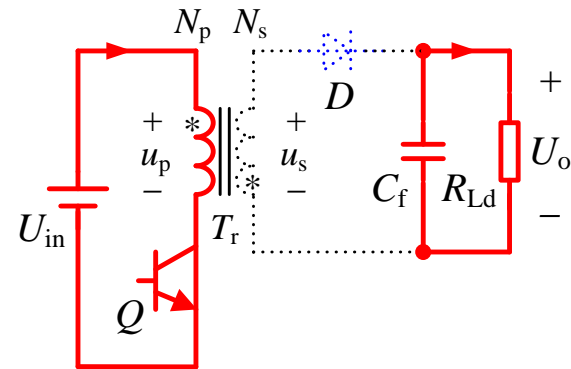
### 1). 开关模态1 $[0, T_{on}]$

原边电压:  $u_p = L_p \frac{di_p}{dt} = U_{in}$

原边电流  $i_p$  从其最小值  $I_{pmin}$  开始线性增加, 在  $t = T_{on}$

时,  $i_p$  达到最大值  $I_{pmax}$ :  $I_{pmax} = I_{pmin} + \frac{U_{in}}{L_p} D_y T_s$

磁芯磁通增加量:  $\Delta\phi_{(+)} = \frac{U_{in}}{N_p} D_y T_s$

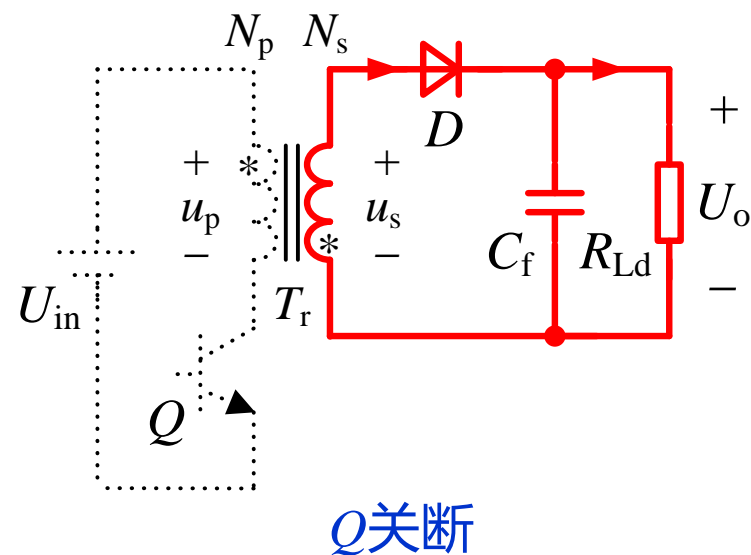


# 电流连续时反激变换器的工作原理与基本关系

## 1. 工作原理

### 2). 开关模态2 [ $T_{on}$ , $T_s$ ]

在 $t=T_{on}$ 时, 开关管 $Q$ 截止, 原边绕组开路, **副边绕组**的感应电势反向, 其极性为 “\*” 端为 “负”, 二极管 $D$ 导通, 储存在变压器磁场中的能量通过 $D$ 释放, 一方面给滤波电容 $C_f$ 充电, 另一方面向负载供电。此时, 变压器只有副边绕组工作, **相当于电感量为 $L_s$** 的一个电感, 副边绕组上的电压为:  $u_s = U_o$



# 电流连续时反激变换器的工作原理与基本关系

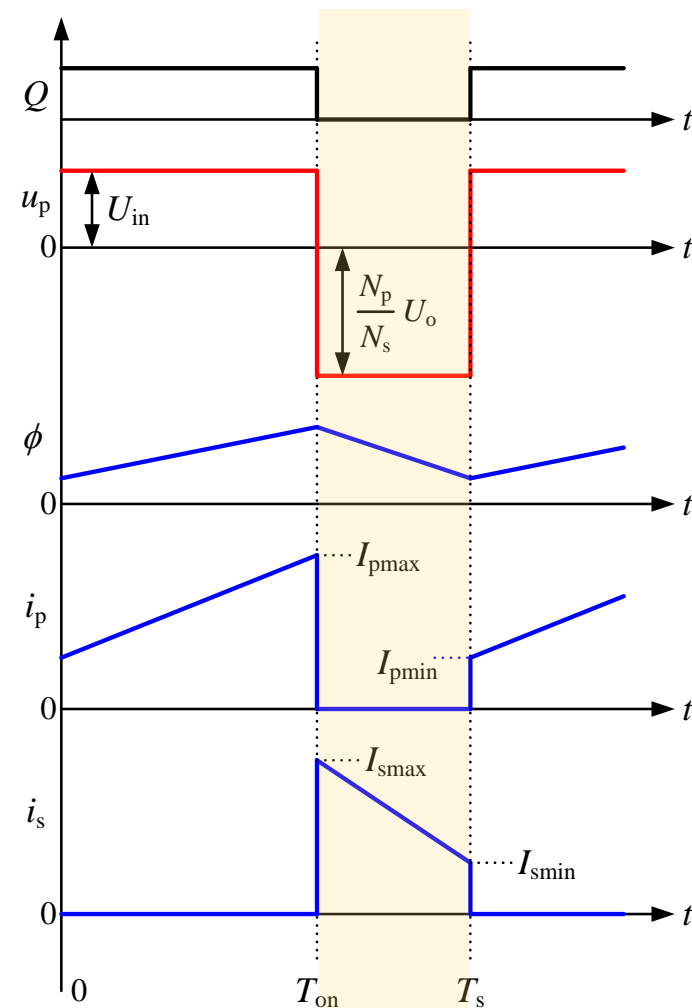
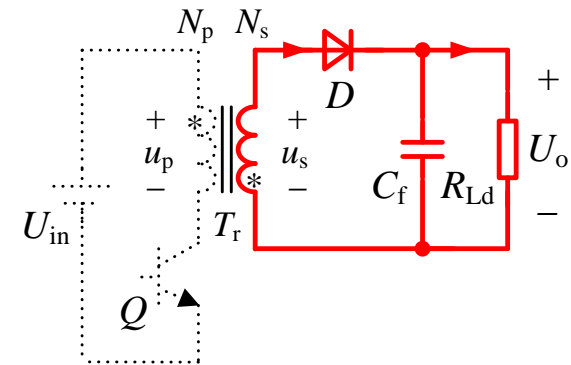
## 1. 工作原理

### 2). 开关模态2 [ $T_{on}$ , $T_s$ ]

副边电压:  $u_s = L_s \frac{di_s}{dt} = U_o$

副边电流 $i_s$ 从其最大值 $I_{smax}$ 开始线性下降。在 $t = T_s$ 时,  $i_s$ 达到最小值 $I_{smin}$ :  $I_{smin} = I_{smax} - \frac{U_o}{L_s} (1 - D_y) T_s$

磁芯磁通减小量:  $\Delta\phi_{(-)} = \frac{U_o}{N_s} (1 - D_y) T_s$



# 电流连续时反激变换器的工作原理与基本关系

## 2. 基本关系

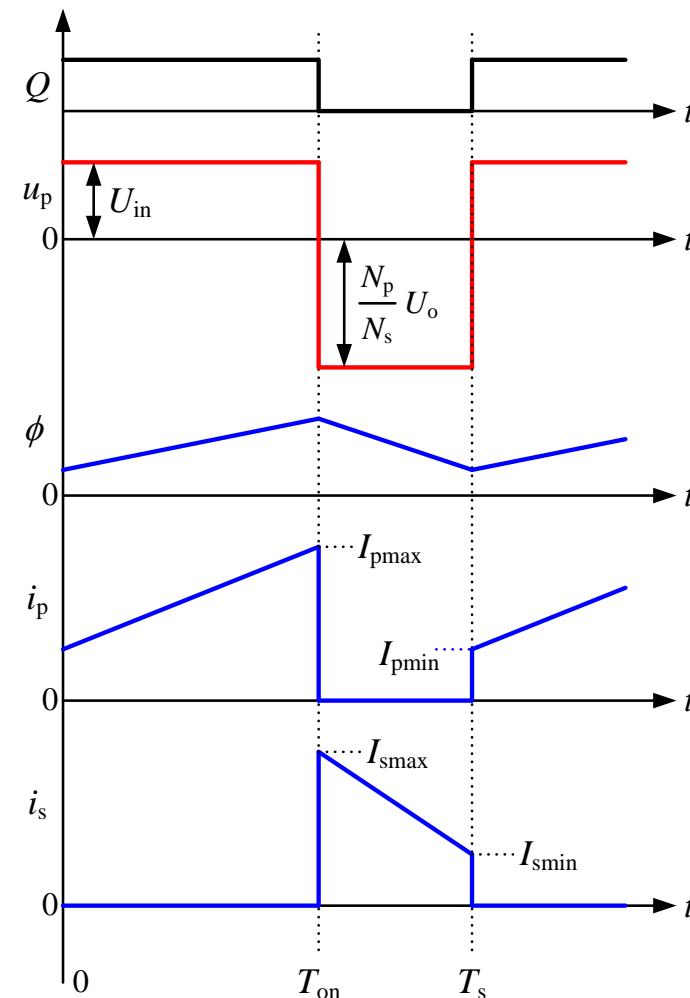
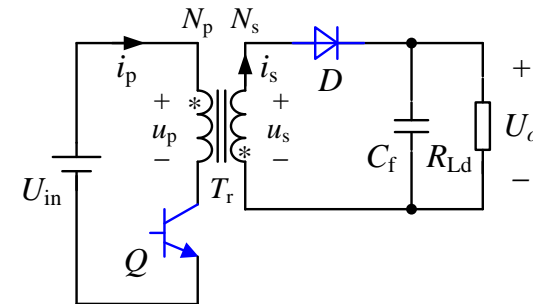
稳态工作时，磁芯磁通增长量等于减小量：

$$\Delta\phi_{(+)} = \frac{U_{in}}{N_p} D_y T_s = \Delta\phi_{(-)} = \frac{U_o}{N_s} (1 - D_y) T_s$$

得到：

$$\frac{U_o}{U_{in}} = \frac{N_s}{N_p} \frac{D_y}{1 - D_y}$$

若 $N_p=N_s$ ，则反激变换器的电压表达式与 Buck-Boost 变换器的完全一样



# 电流连续时反激变换器的工作原理与基本关系

## 2. 基本关系

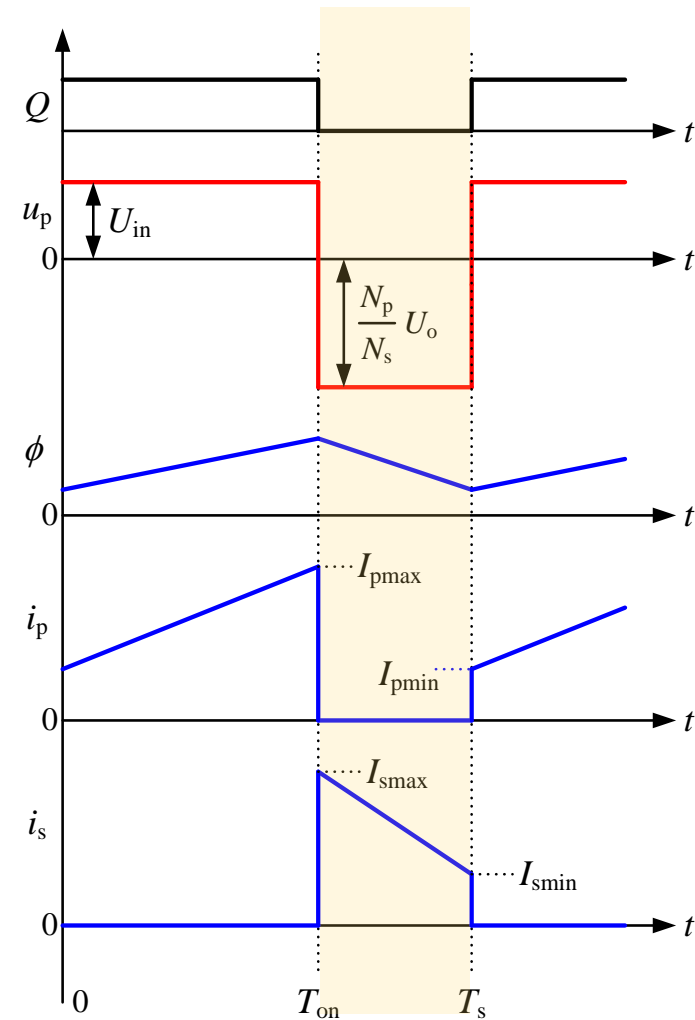
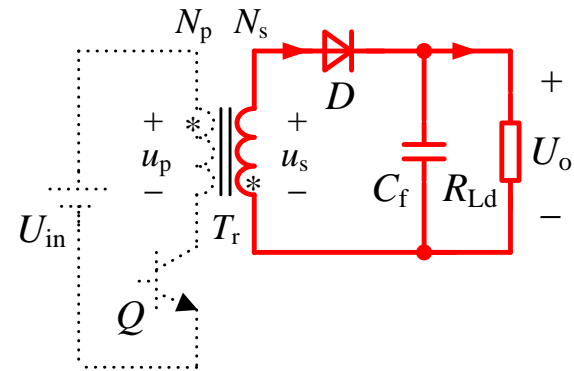
输出电流 $I_o$ 就是流过二极管 $D$ 的电流平均值，亦即副边电流 $i_s$ 的平均值：

$$I_o = \frac{1}{2} (I_{smin} + I_{smax}) (1 - D_y)$$

$$\frac{I_{smin} + I_{smax}}{2} = \frac{I_o}{1 - D_y}$$

可以得到：

$$\begin{cases} I_{smax} = \frac{I_o}{1 - D_y} + \frac{U_o}{2L_s} (1 - D_y) T_s \\ I_{smin} = \frac{I_o}{1 - D_y} - \frac{U_o}{2L_s} (1 - D_y) T_s \end{cases}$$



# 电流连续时反激变换器的工作原理与基本关系

## 2. 基本关系

根据变压器的工作原理，存在以下关系式：

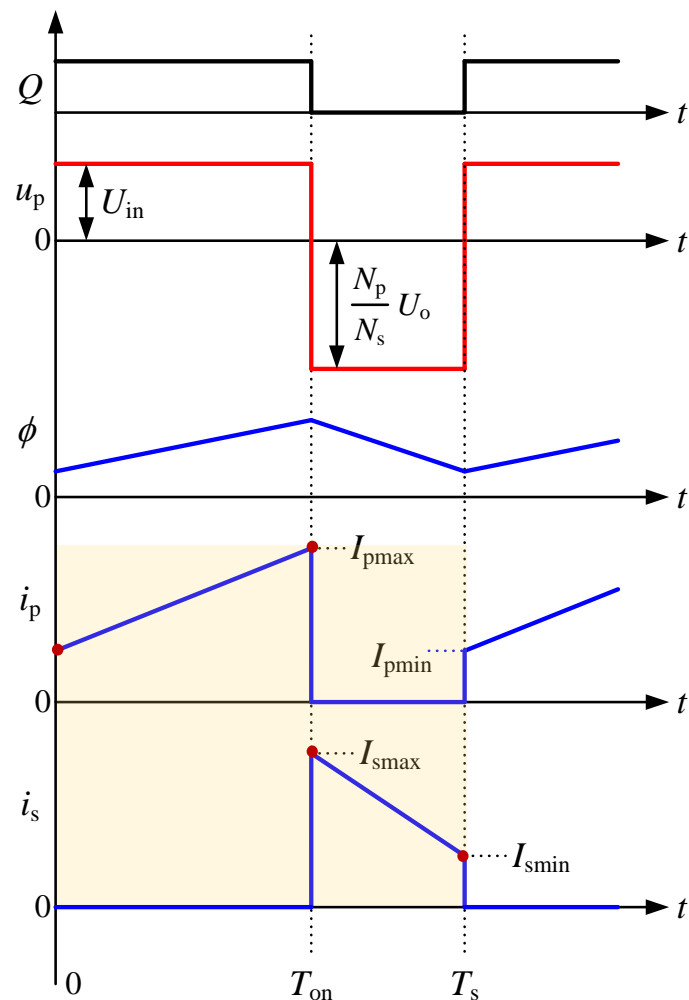
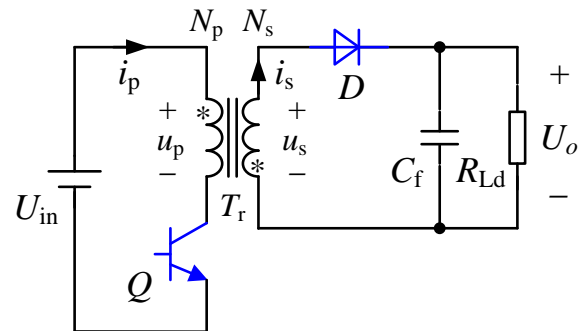
$$\begin{cases} N_p I_{pmin} = N_s I_{smin} \\ N_p I_{pmax} = N_s I_{smax} \end{cases} \quad \frac{L_p}{L_s} = \left( \frac{N_p}{N_s} \right)^2$$

可以得到：

$$I_{pmax} = \frac{N_s}{N_p} \frac{I_o}{1 - D_y} + \frac{N_s}{N_p} \frac{U_o}{2L_s} (1 - D_y) T_s = \frac{N_s}{N_p} \frac{I_o}{1 - D_y} + \frac{U_{in}}{2L_p} D_y T_s$$

$$I_{pmax} = \frac{N_s}{N_p} I_{smax} = \frac{N_s}{N_p} \left[ \frac{I_o}{1 - D_y} + \frac{U_o}{2L_s} (1 - D_y) T_s \right]$$

$$\frac{U_o}{U_{in}} = \frac{N_s}{N_p} \frac{D_y}{1 - D_y}$$



# 电流连续时反激变换器的工作原理与基本关系

## 2. 基本关系

根据变压器的工作原理，存在以下关系式：

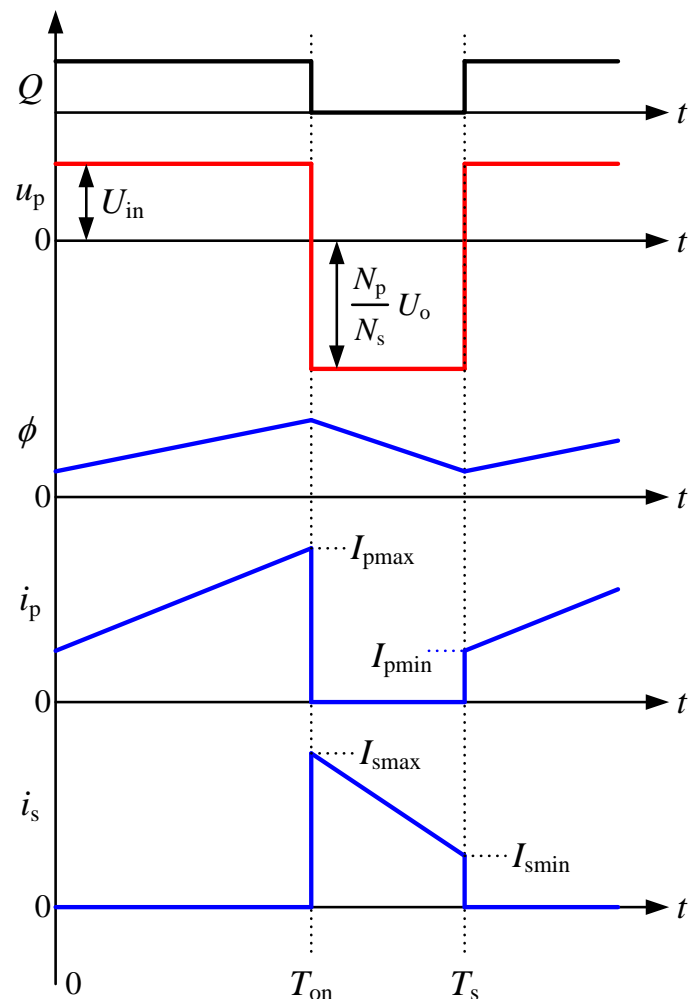
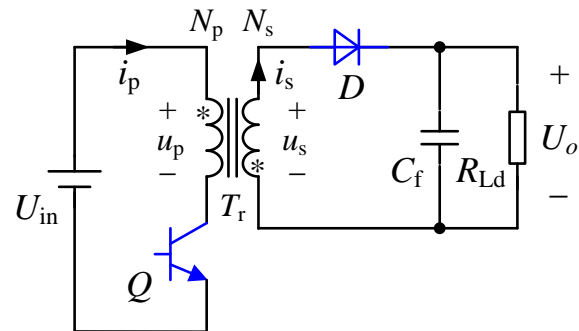
$$\begin{cases} N_p I_{pmin} = N_s I_{smin} \\ N_p I_{pmax} = N_s I_{smax} \end{cases} \quad \frac{L_p}{L_s} = \left( \frac{N_p}{N_s} \right)^2$$

可以得到：

$$I_{pmin} = \frac{N_s}{N_p} \frac{I_o}{1-D_y} - \frac{N_s}{N_p} \frac{U_o}{2L_s} (1-D_y) T_s = \frac{N_s}{N_p} \frac{I_o}{1-D_y} - \frac{U_{in}}{2L_p} D_y T_s$$

$$I_{pmin} = \frac{N_s}{N_p} I_{smin} = \frac{N_s}{N_p} \left[ \frac{I_o}{1-D_y} - \frac{U_o}{2L_s} (1-D_y) T_s \right]$$

$$\frac{U_o}{U_{in}} = \frac{N_s}{N_p} \frac{D_y}{1-D_y}$$





# 电流连续时反激变换器的工作原理与基本关系

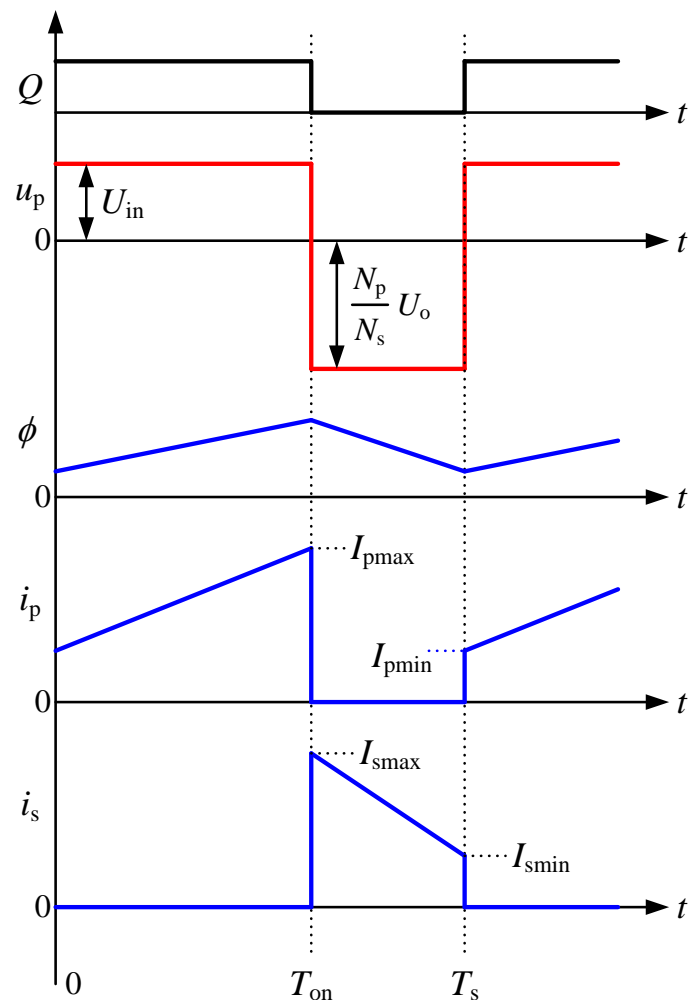
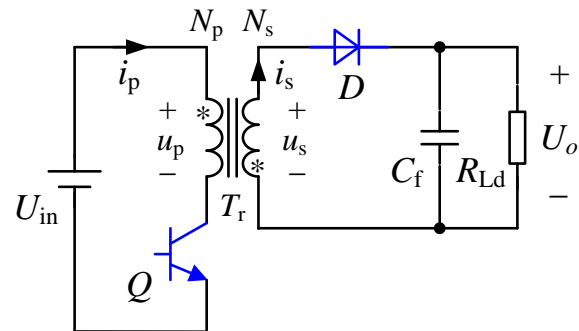
## 2. 基本关系

根据变压器的工作原理，存在以下关系式：

$$\begin{cases} N_p I_{pmin} = N_s I_{smin} \\ N_p I_{pmax} = N_s I_{smax} \end{cases} \quad \frac{L_p}{L_s} = \left( \frac{N_p}{N_s} \right)^2$$

可以得到：

$$\begin{cases} I_{pmax} = \frac{N_s}{N_p} \frac{I_o}{1-D_y} + \frac{N_s}{N_p} \frac{U_o}{2L_s} (1-D_y) T_s = \frac{N_s}{N_p} \frac{I_o}{1-D_y} + \frac{U_{in}}{2L_p} D_y T_s \\ I_{pmin} = \frac{N_s}{N_p} \frac{I_o}{1-D_y} - \frac{N_s}{N_p} \frac{U_o}{2L_s} (1-D_y) T_s = \frac{N_s}{N_p} \frac{I_o}{1-D_y} - \frac{U_{in}}{2L_p} D_y T_s \end{cases}$$





## 5.5 全桥变换器

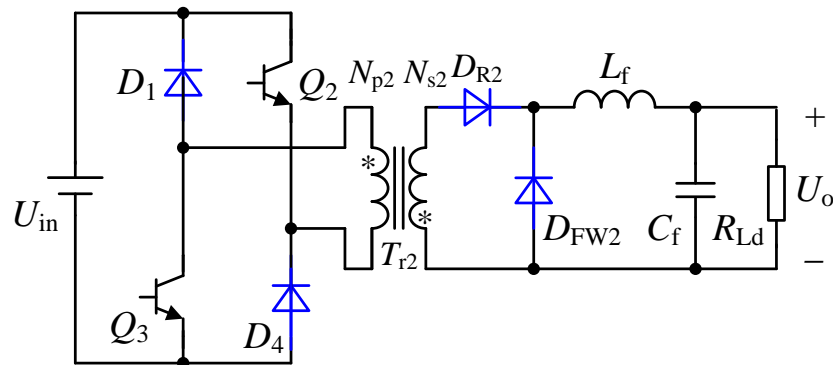
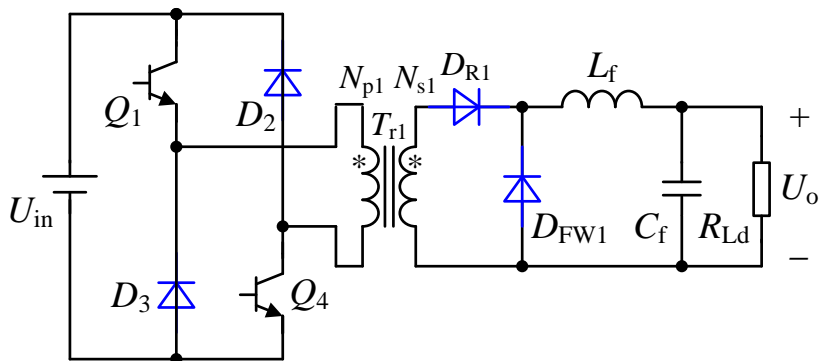
5.5.1 全桥变换器电路拓扑的推演

5.5.2 全桥变换器的工作原理

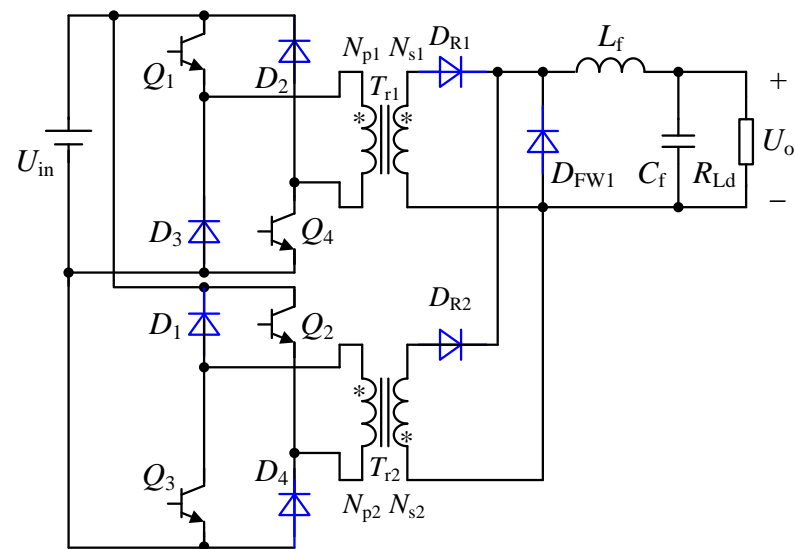
5.5.3 全桥变换器的基本关系



# 全桥变换器电路拓扑的推演



两种拓扑双管正激变换器在输入侧并联，在变压器副边整流后并联，共用输出滤波器和负载

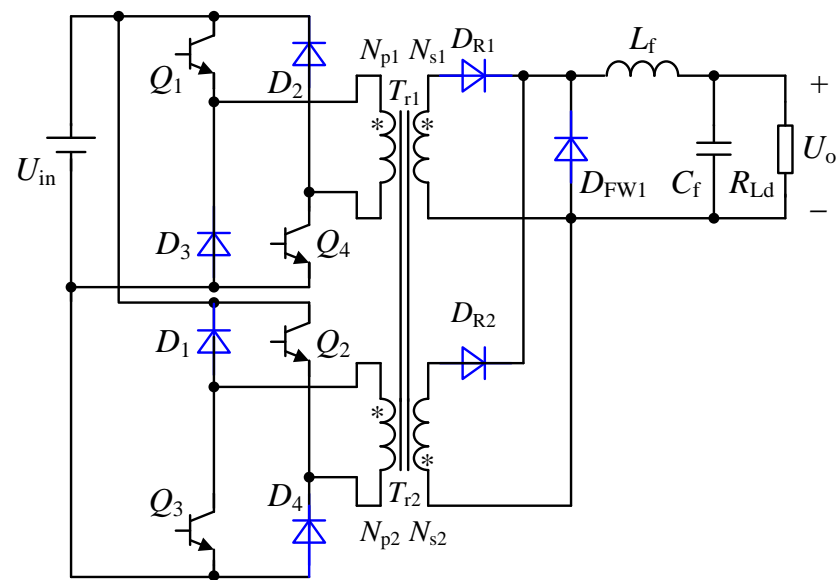


# 全桥变换中器电路拓扑的推演

将两个变压器共用一副磁芯，并且其原边同名端相反：

- $Q_1$ 、 $Q_4$  导通时，磁芯被正向磁化
- $Q_2$ 、 $Q_3$  导通时，磁芯被反向磁化

变压器磁芯的磁通在每个开关周期内不存在净增量

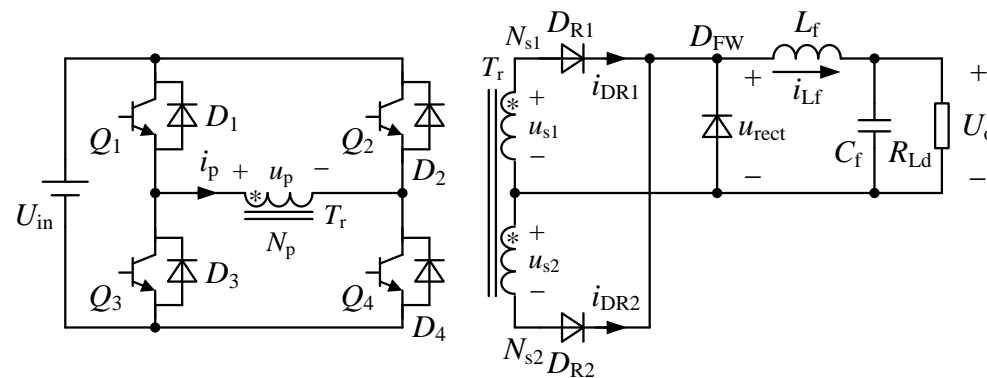


两个变压器共用一副磁芯

# 全桥变换中器电路拓扑的推演

- 将 $Q_1$ 和 $D_3$ 构成的桥臂和 $Q_3$ 和 $D_1$ 构成的桥臂合并
- 将 $Q_4$ 和 $D_2$ 构成的桥臂和 $Q_2$ 和 $D_4$ 构成的桥臂合并
- 将并联的变压器的两个原边绕组整合为一个  
即可得到全桥(Full-Bridge)变换器

全桥变换器的变压器也是双向磁化的，其原边绕组交流电压的幅值为输入电压 $U_{in}$ ，与推挽变换器的一样，是半桥变换器的2倍。开关管的电压应力与双管正激变换器的一样，也为 $U_{in}$



全桥变换器

## ★ 5.5 全桥变换器

5.5.1 全桥变换器电路拓扑的推演

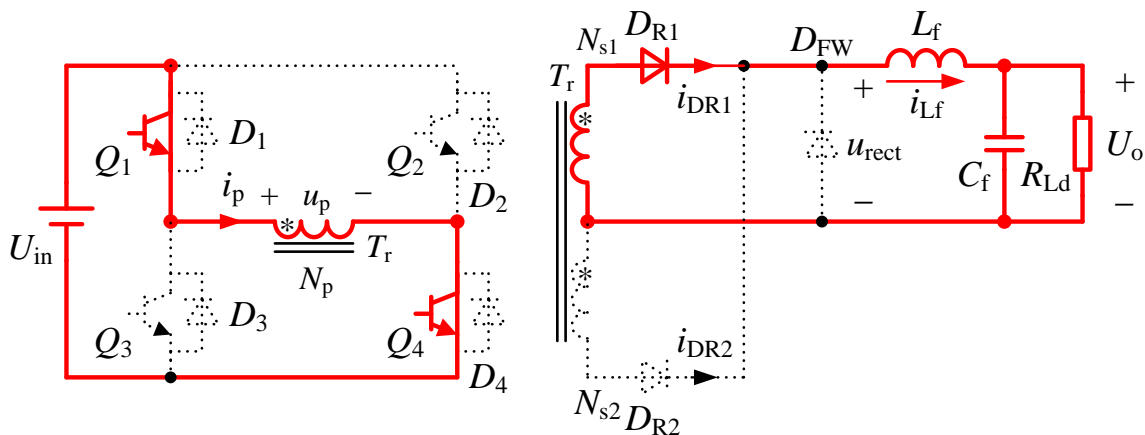
5.5.2 全桥变换器的工作原理

5.5.3 全桥变换器的基本关系

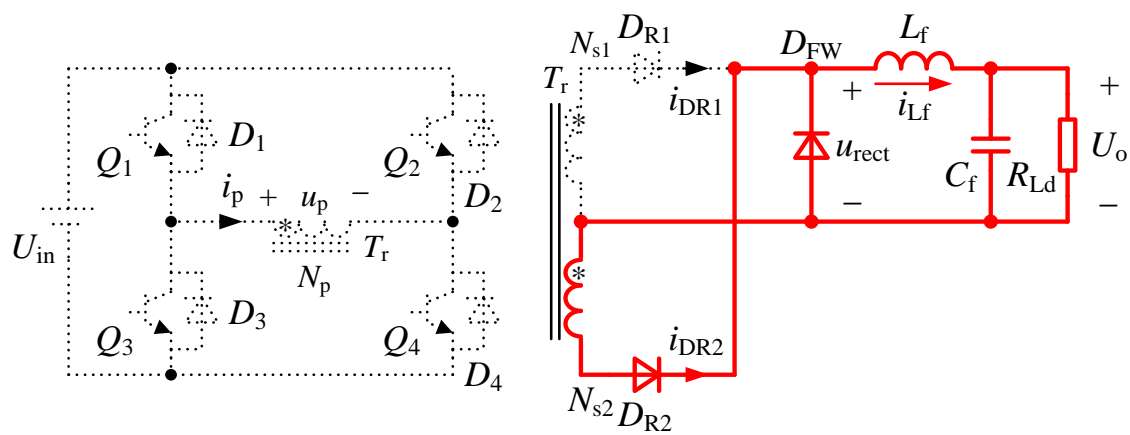


# 全桥变换器的工作原理

在一个开关周期内，半桥变换器有四种开关模态



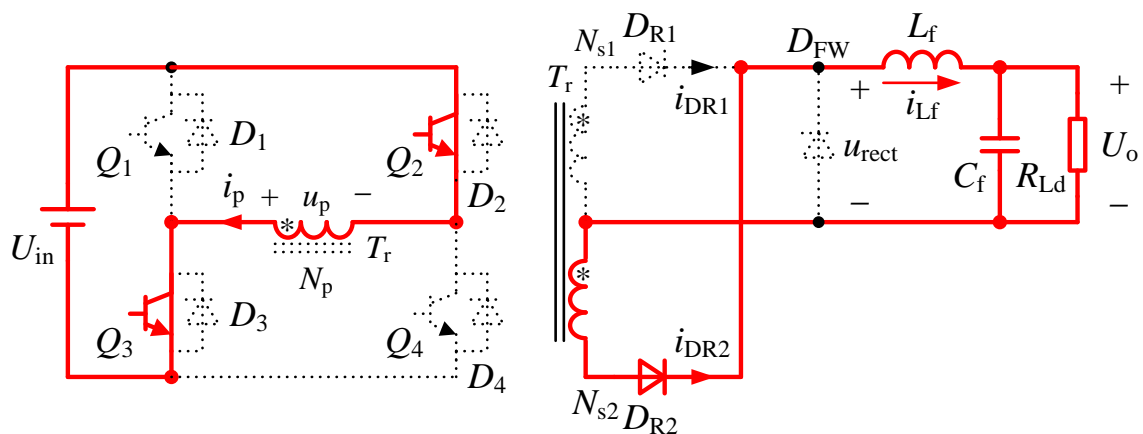
(a) 开关模态1



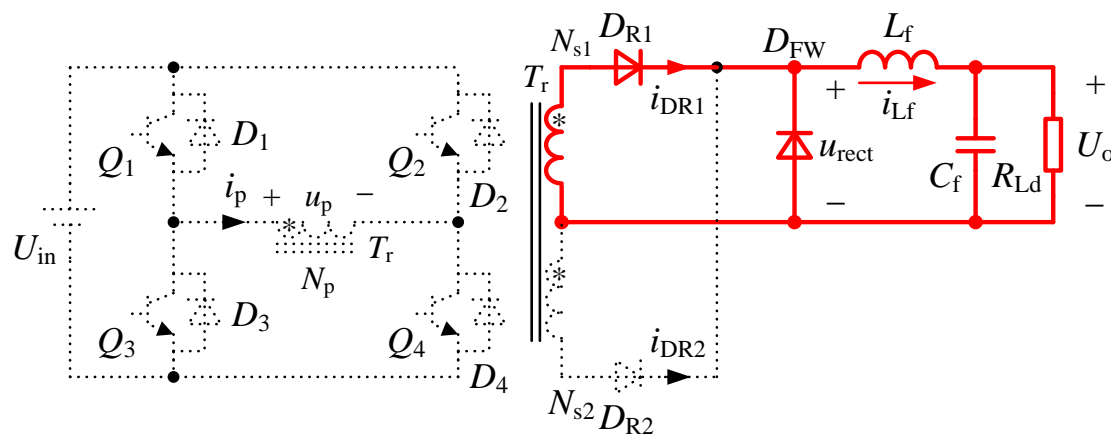
(b) 开关模态2

# 全桥变换器的工作原理

在一个开关周期内，半桥变换器有四种开关模态



(c) 开关模态3



(d) 开关模态4



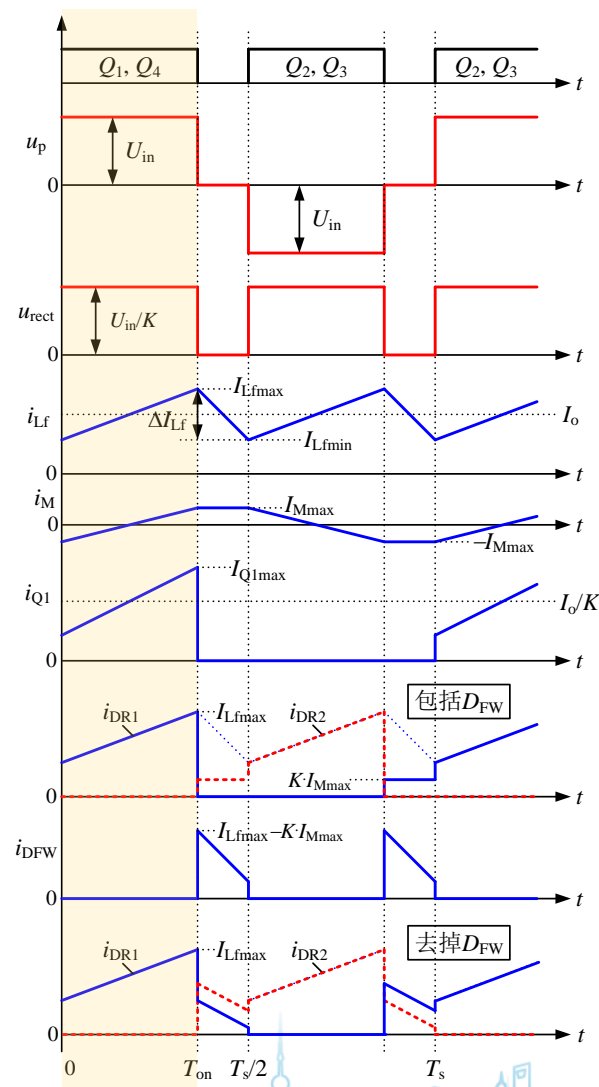
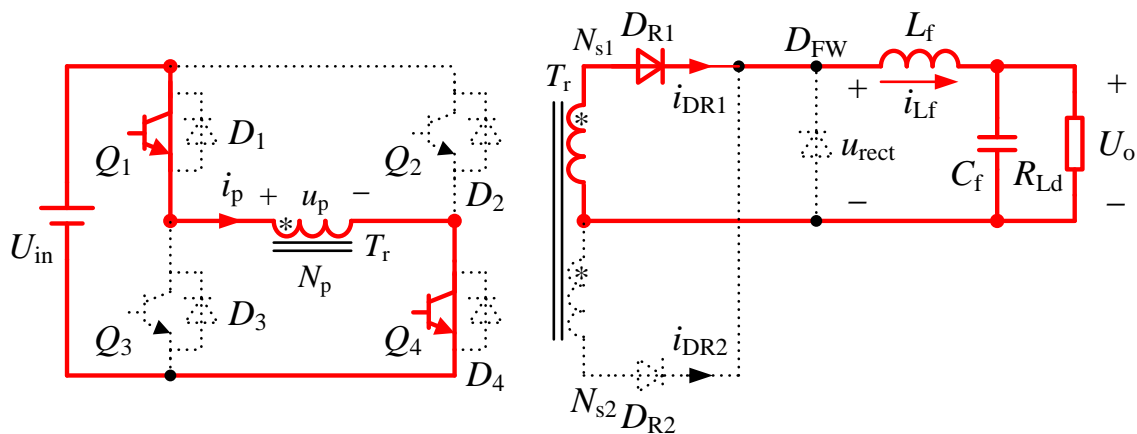
# 全桥变换器的工作原理

## 1. 开关模态1 $[0, T_{on}]$

在 $t=0$ 时，开关管 $Q_1$ 和 $Q_4$ 导通，输入电压 $U_{in}$ 加在变压器原边绕组 $N_p$ 上，变压器磁芯被磁化，其励磁电流 $i_M$ 从负的最大值 $I_{Mmax}$ 开始线性增加，即：

$L_M$  为原边绕组的励磁电感

$$i_M = -I_{Mmax} + \frac{U_{in}}{L_M} t$$



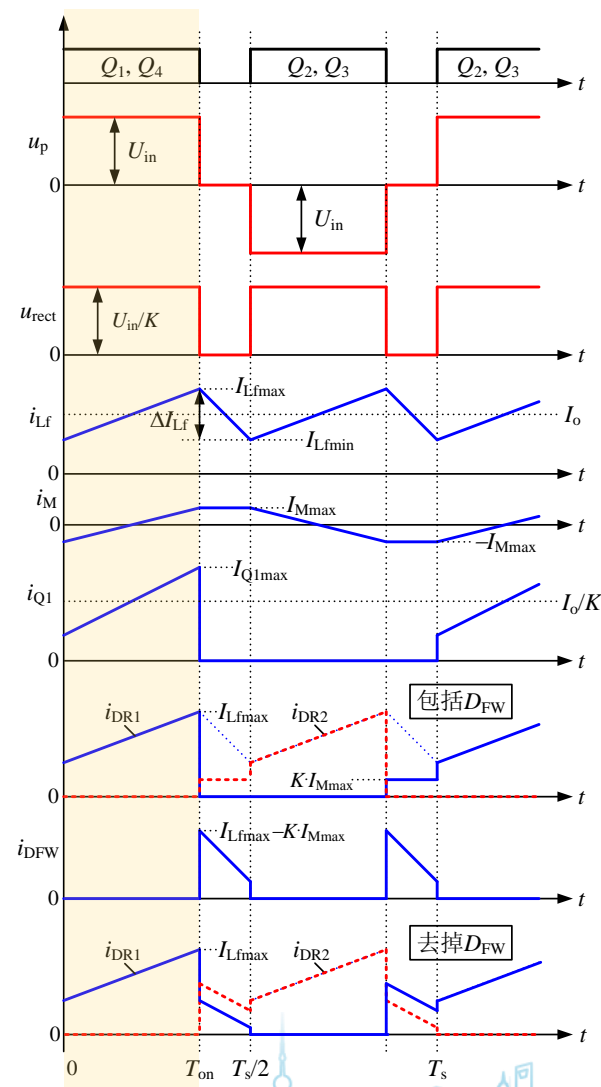
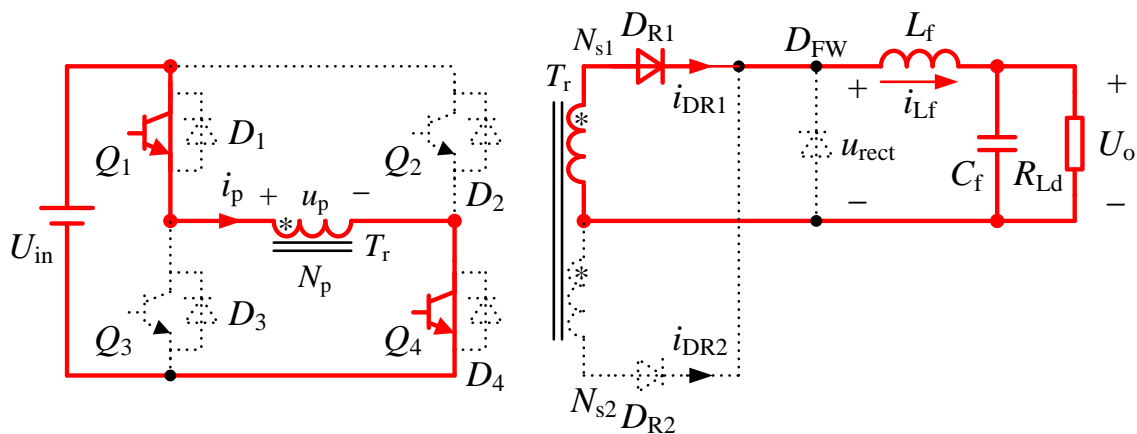
# 全桥变换器的工作原理

## 1. 开关模态1 $[0, T_{on}]$

变压器原边绕组 $N_p$ 上的电压:  $u_p = U_{in}$

变压器副边绕组 $N_{s1}$ 上的电压:  $u_{s1} = U_{in} / K$

式中,  $K=N_p/N_s$ , 为原副边绕组匝比



# 全桥变换器的工作原理

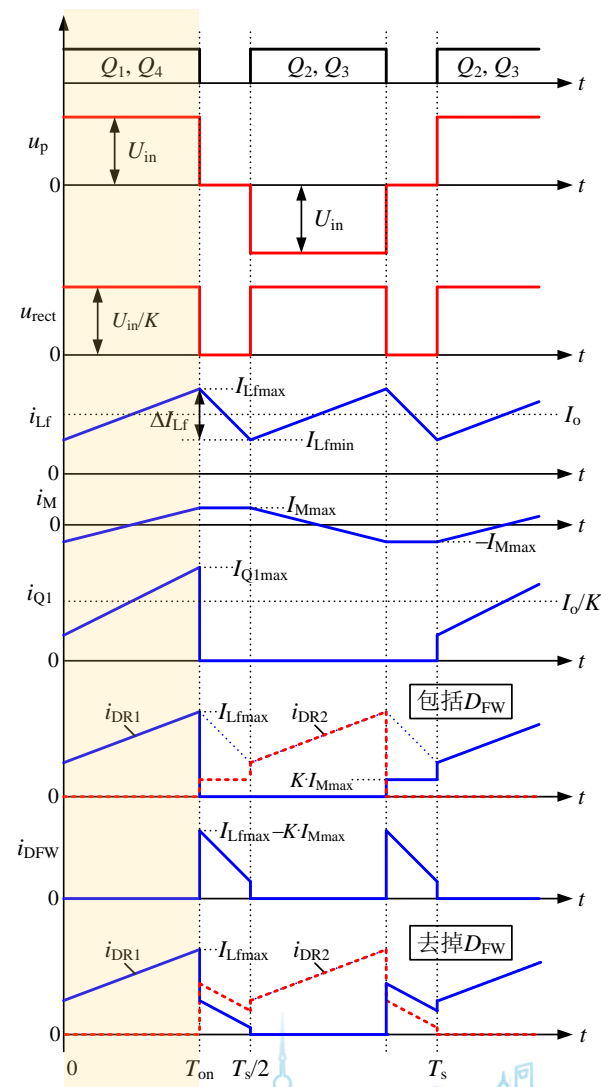
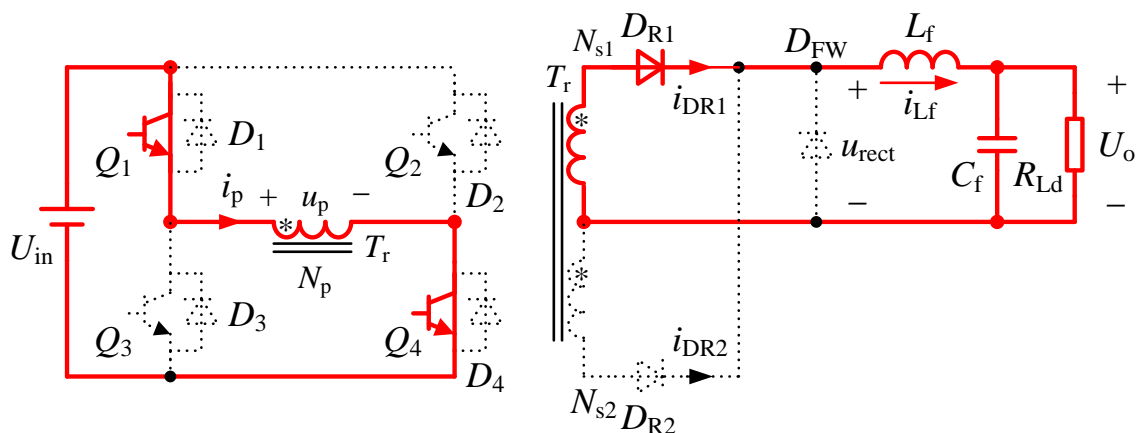
## 1. 开关模态1 $[0, T_{on}]$

整流二极管 $D_{R1}$  导通，整流二极管 $D_{R2}$  和续流二极管

$D_{FW}$  均截止，整流后的电压 $u_{rect}$  等于 $U_{in}/K$

滤波电感 $L_f$  上的电压为 $U_{in}/K - U_o$ ，其电流 $i_{Lf}$  线性增

加



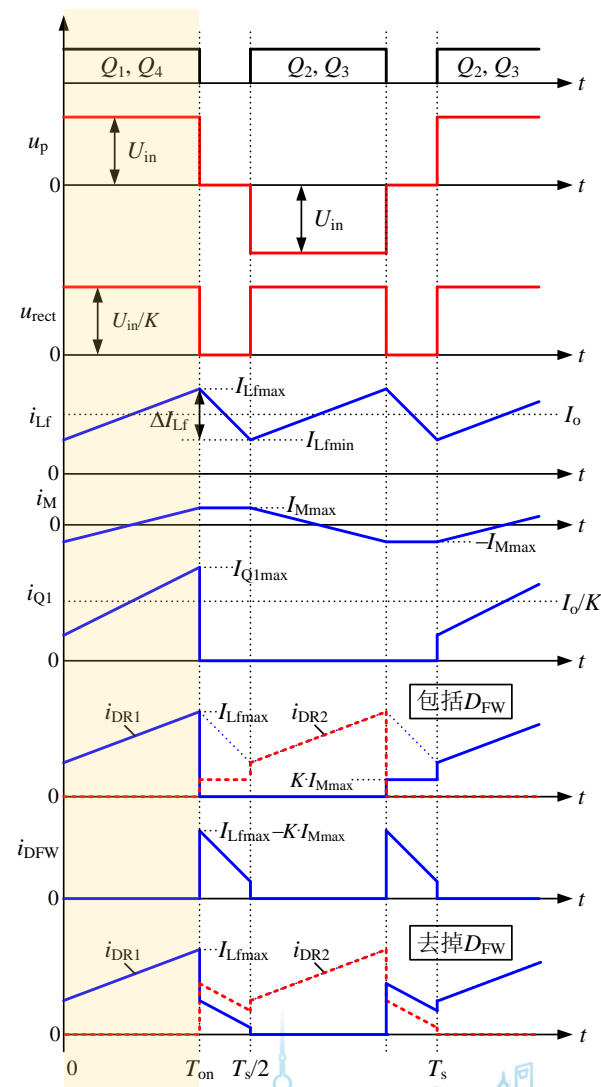
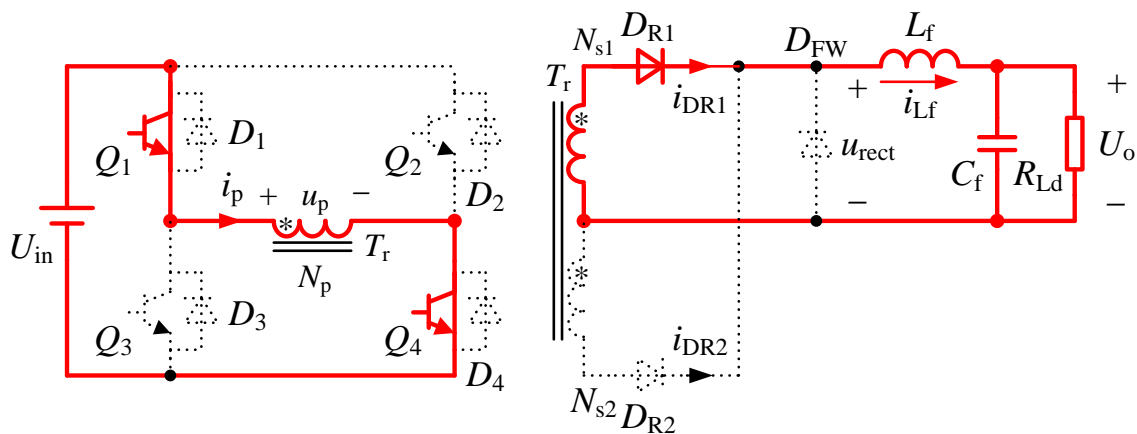
# 全桥变换器的工作原理

## 1. 开关模态1 $[0, T_{on}]$

原边绕组 $N_p$ 的电流 $i_p$ 为折算到原边的副边电流和励磁电流之和，即：

$$i_p = \frac{i_{L_f}}{K} + i_M$$

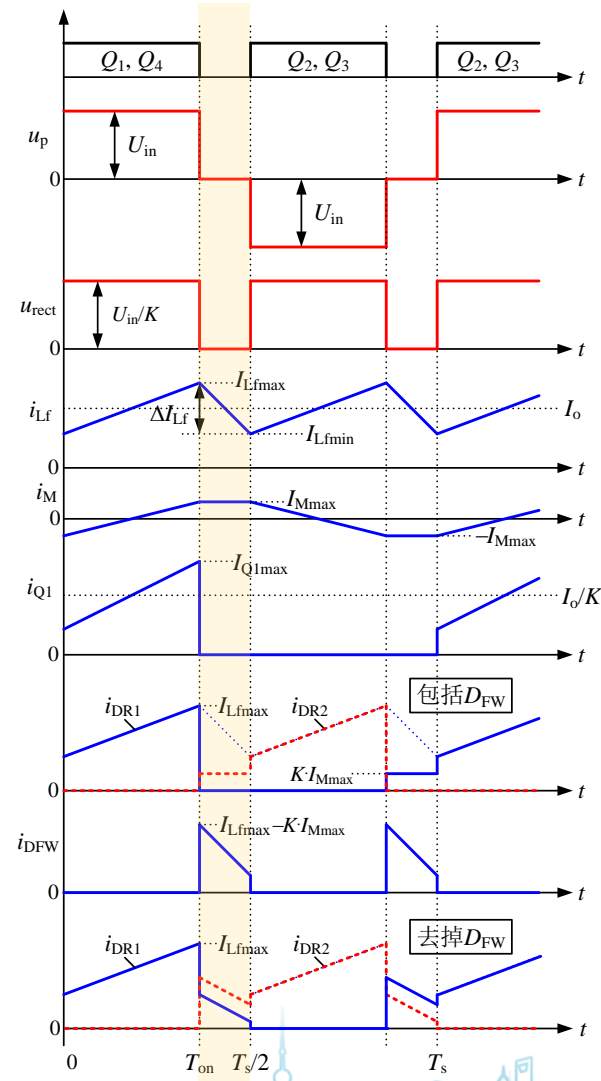
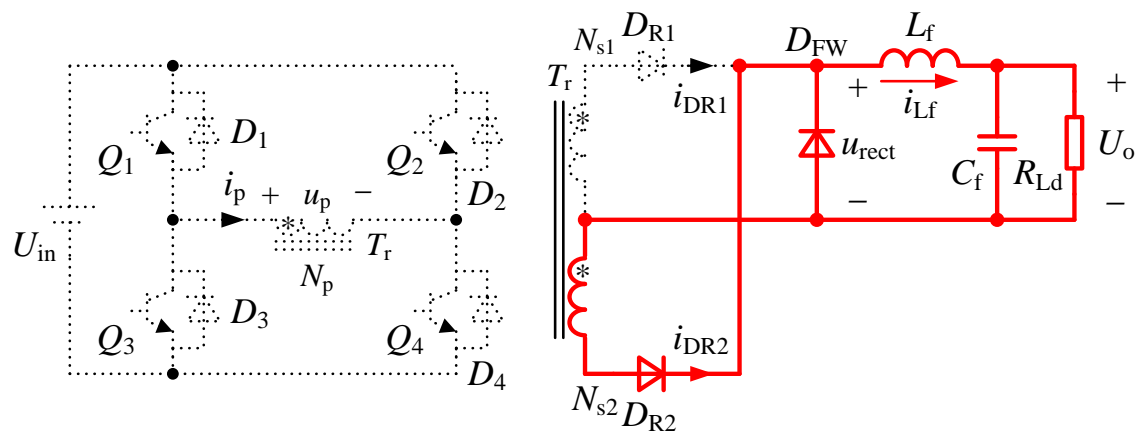
在 $t=T_{on}$ 时，开关模态结束，滤波电感电流 $i_{L_f}$ 达到其最大值 $I_{L_fmax}$ ，而励磁电流 $i_M$ 达到其最大值 $I_{Mmax}$



# 全桥变换器的工作原理

## 2. 开关模式2 [ $T_{on}$ , $T_s/2$ ]

在 $t=T_{on}$ 时，开关管 $Q_1$ 和 $Q_4$ 截止，变压器各绕组瞬时出现感应电压，其极性为“\*”端为“负”， $D_{R2}$ 导通， $D_{R1}$ 截止。电流 $i_{Lf}$ 经由 $D_{FW}$ 流通，加在滤波电感上的电压为 $-U_o$ ，滤波电感电流 $i_{Lf}$ 线性下降



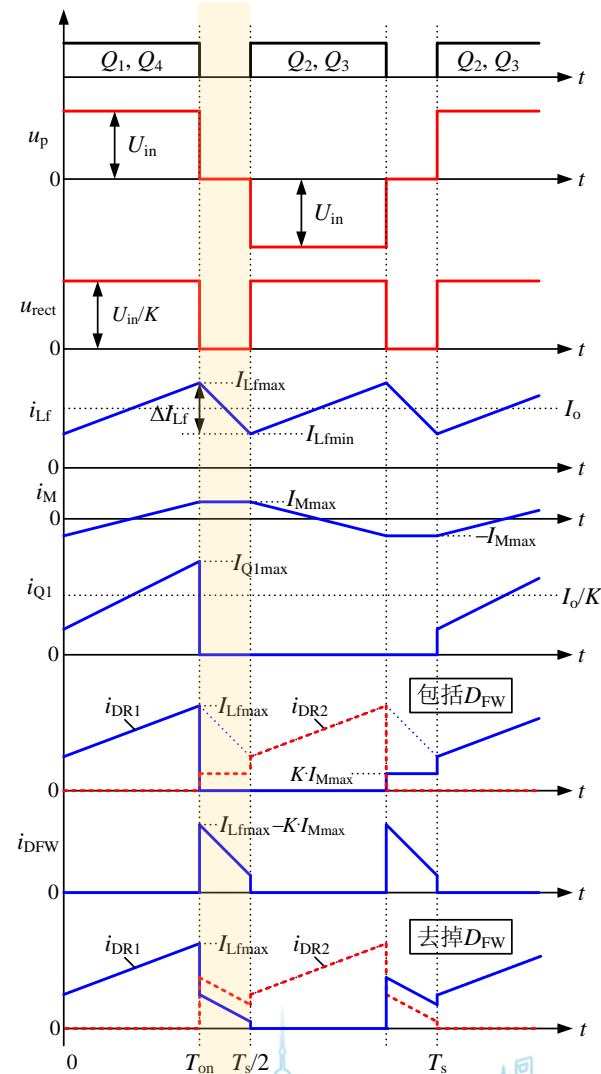
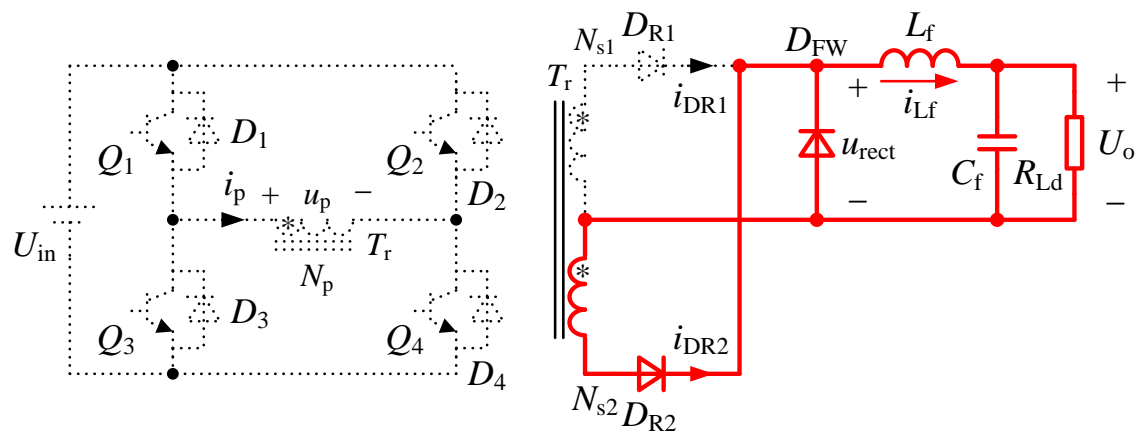
## 全桥变换器的工作原理

## 2. 开关模态2 [ $T_{on}$ , $T_s/2$ ]

在此开关模态中，整流二极管 $D_{R2}$ 的电流 $i_{DR2}$ 等

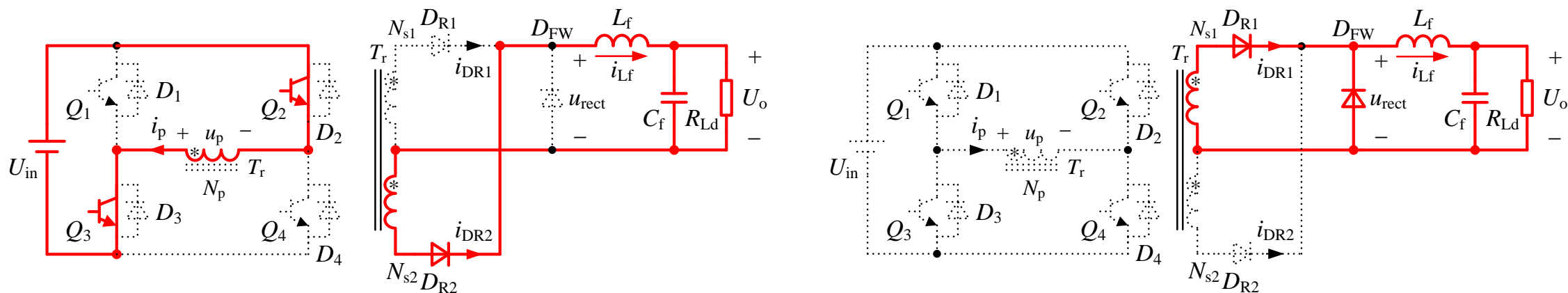
于折算过来的励磁电流，即： $i_{DR2}=K \cdot I_{Mmax}$

续流二极管 $D_{FW}$  的电流:  $i_{DFW}=i_{Lf}-K\cdot I_{Mmax}$



# 全桥变换器的工作原理

## 3. 开关模态3 $[T_s/2, T_s/2+T_{on}]$ 和开关模态4 $[T_s/2+T_{on}, T_s]$



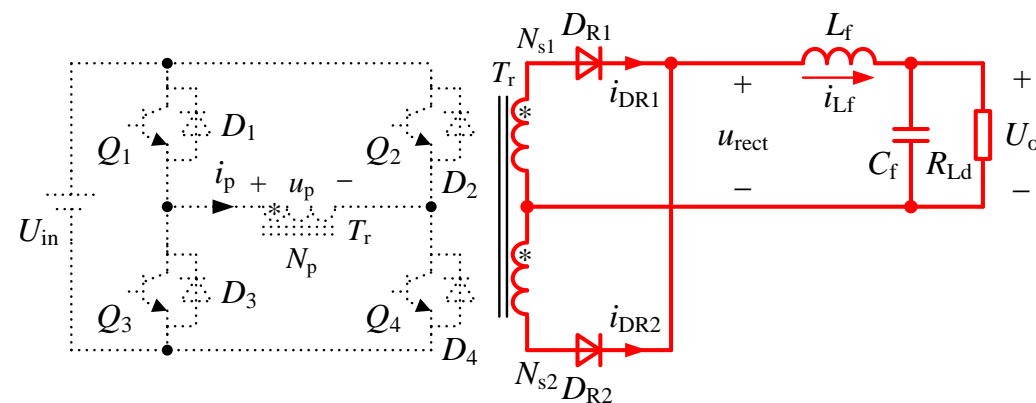
- 在开关模态3中，开关管 $Q_2$ 和 $Q_3$ 导通，工作情况与开关模态1类似
- 在开关模态4中，开关管 $Q_2$ 和 $Q_3$ 截止，工作情况与开关模态2类似

# 全桥变换器的工作原理

## 4. 去掉续流二极管 $D_{FW}$ 的工作原理

以上的分析都是基于存在续流二极管 $D_{FW}$ 的情况，与推挽变换器和半桥变换器类似，续流二极管是可以去掉的

在去掉续流二极管后，开关模态2和4的工作情况有所不同，此时两只整流二极管同时导通



去掉续流二极管后两只开关管均关断时的等效电路



# 全桥变换器的工作原理

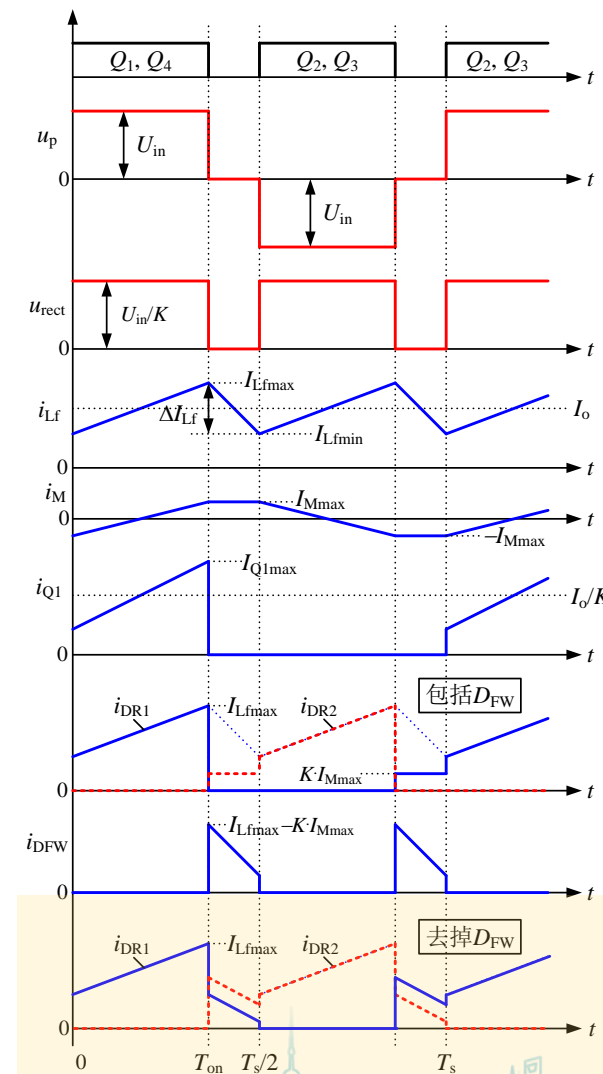
## 4. 去掉续流二极管 $D_{FW}$ 的工作原理

在去掉续流二极管后，两只整流二极管的电流为：

$$\begin{cases} i_{DR1} = \frac{1}{2}(i_{Lf} - KI_{Mmax}) \\ i_{DR2} = \frac{1}{2}(i_{Lf} + KI_{Mmax}) \end{cases}$$

两只整流二极管的电流如右图最下面的波形所示

如果忽略励磁电流，那么两只整流二极管均分滤波电感电流，即 $i_{DR1}=i_{DR2}=i_{Lf}/2$



## ★ 5.5 全桥变换器

5.5.1 全桥变换器电路拓扑的推演

5.5.2 全桥变换器的工作原理

5.5.3 全桥变换器的基本关系



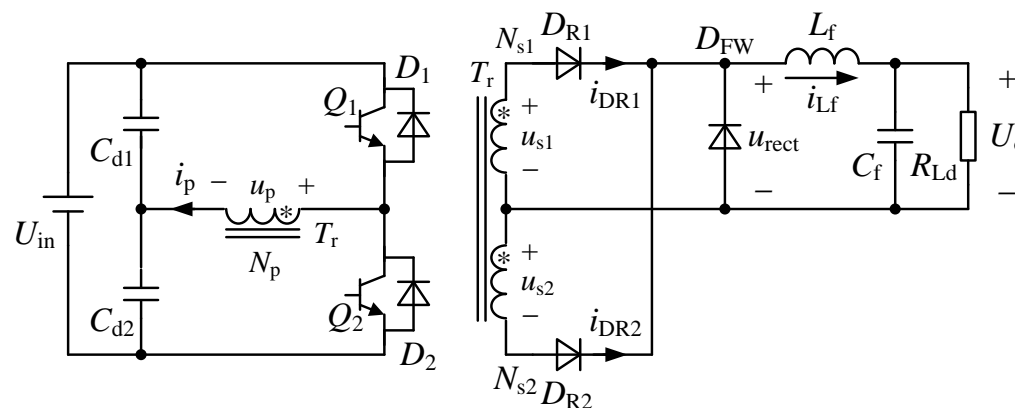
# 全桥变换器的基本关系

## 1. 输出电压与输入电压的关系式

全桥变换器实际上也是一个隔离型的Buck变换器，其输出电压与输入电压之间的关系为：

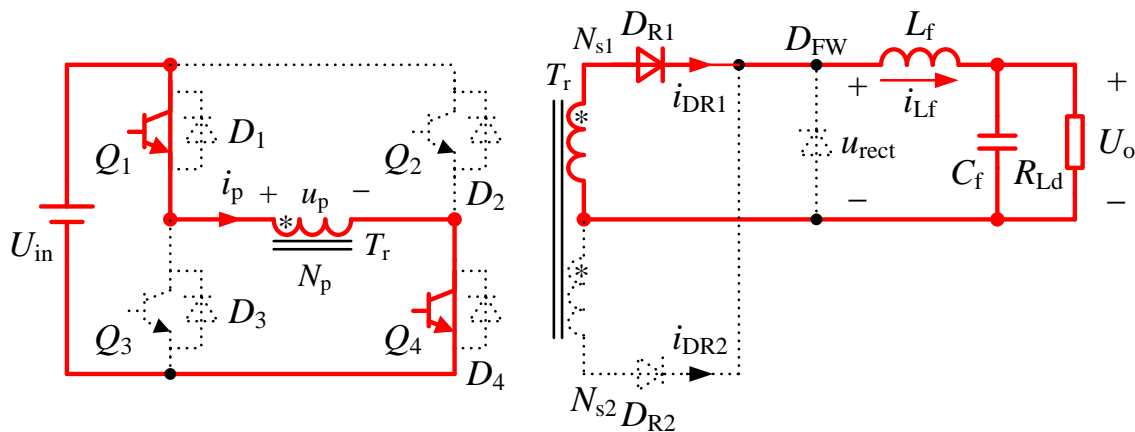
$$U_o = D_y U_{in} / K$$

注：与推挽变换器一样，这里的 $D_y$ 指的是副边整流电压 $u_{rect}$ 的占空比，它是开关管占空比的2倍，最大可达1



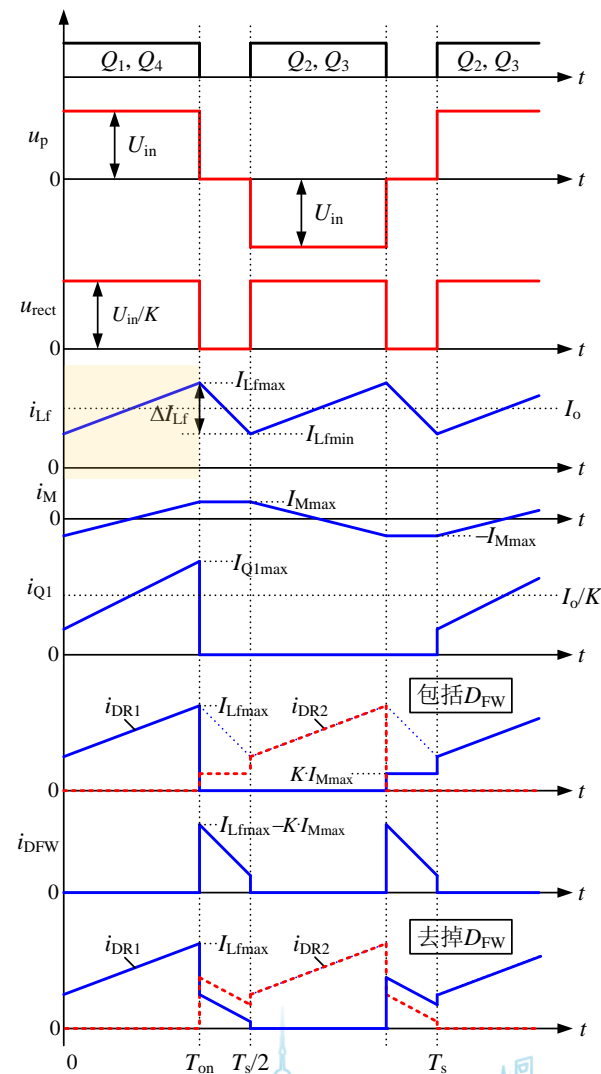
# 输出输入电压关系推导

## 1. 开关模态1 $[0, T_{on}]$



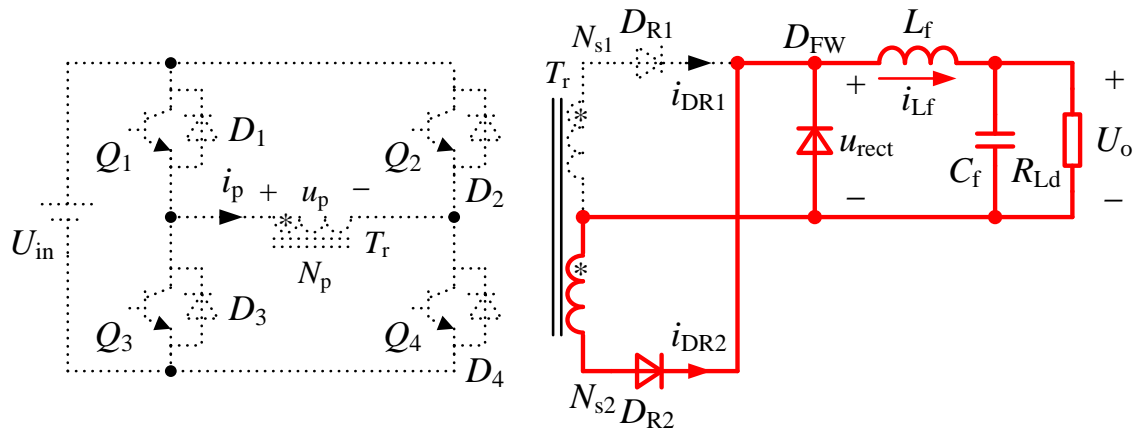
电感电流:

$$\Delta I_{L_f} = \frac{\frac{U_{in}}{K} - U_o}{L_f} \cdot \frac{D_y T_s}{2}$$



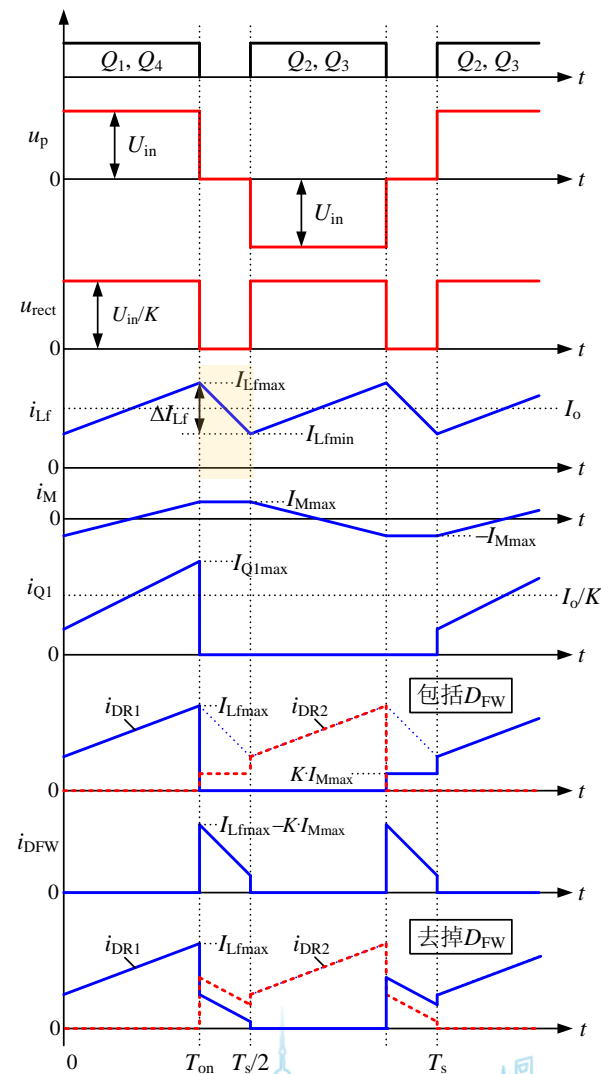
# 输出输入电压关系推导

## 2. 开关模态2 $[T_{on}, T_s/2]$



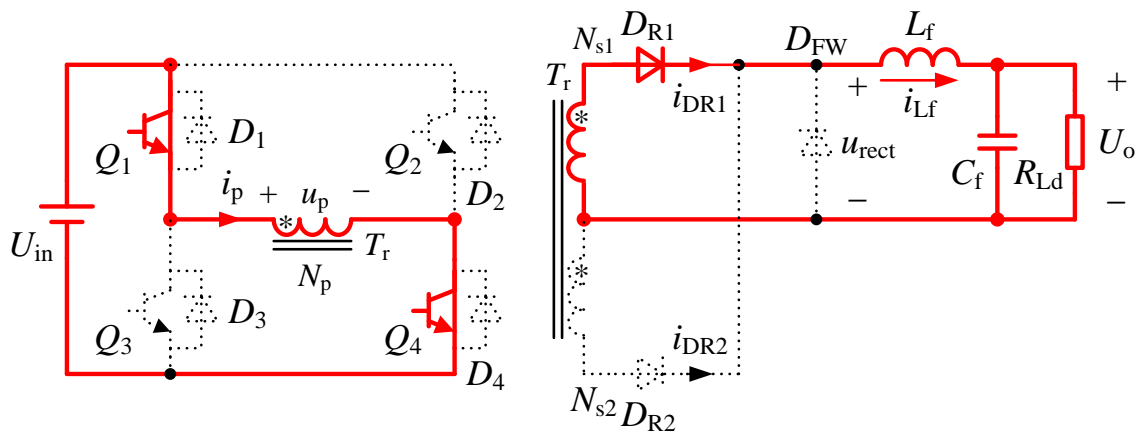
电感电流:

$$\Delta I_{Lf} = \frac{U_o}{L_f} \cdot \frac{(1 - D_y) T_s}{2}$$

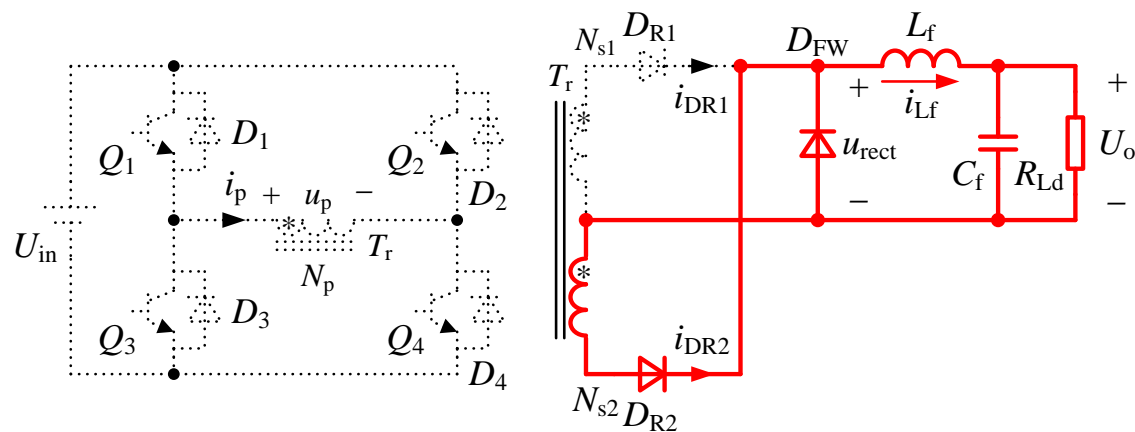


# 输出输入电压关系推导

## 1. 开关模态1 $[0, T_{on}]$



## 2. 开关模态2 $[T_{on}, T_s/2]$



电感电流:

$$\Delta I_{L_f} = \frac{\frac{U_{in}}{K} - U_o}{L_f} \cdot \frac{D_y T_s}{2}$$

$$\Delta I_{L_f} = \frac{U_o}{L_f} \cdot \frac{(1 - D_y) T_s}{2}$$

$$U_o = D_y U_{in} / K$$

# 全桥变换器的基本关系

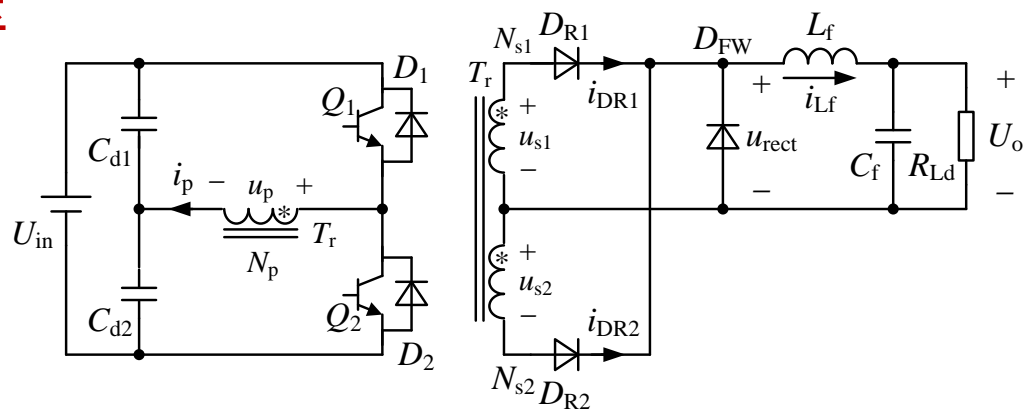
## 2. 变压器原副边匝比

一般来说，输入电压都有一定的变化范围，因此变压器原副边匝比的选择应保证在输入电压最低时能够得到所需要的输出电压

根据  $U_o = D_y U_{in} / K$

可以得到：  $K = D_{y\max} U_{in\min} / U_o$

式中， $U_{in\min}$  为最低输入电压， $D_{y\max}$  为最大占空比，一般可选为0.9







# 全桥变换器的基本关系

## 3. 开关管承受的电压应力和流过的电流

在各工作模态中：当任一只开关管导通时，同一桥臂的另一只开关管承受的电压为 $U_{in}$ 。

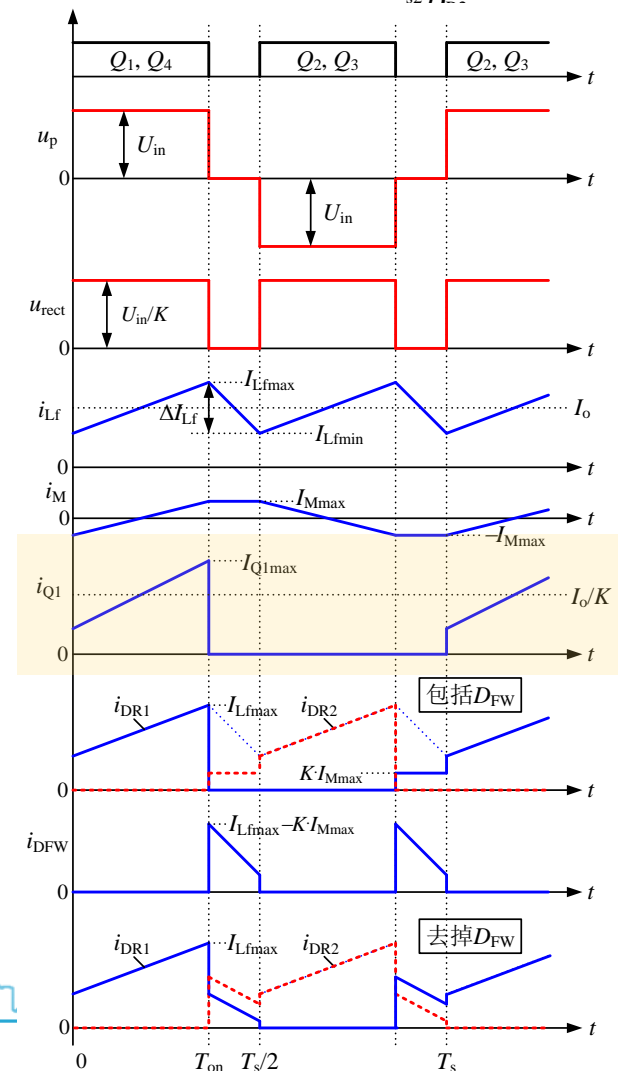
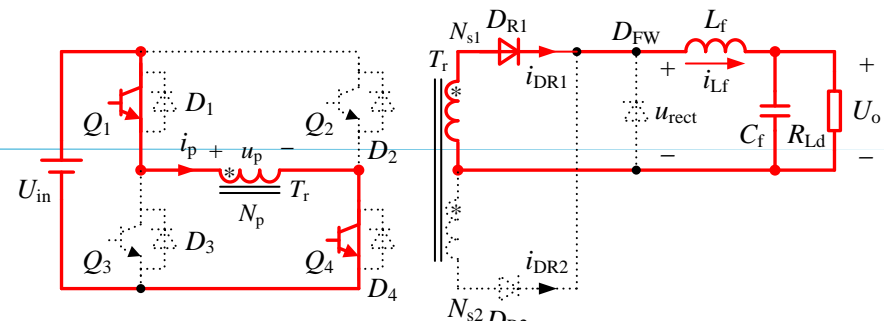
因此，四只开关管的电压应力为：

$$U_{Qj} = U_{in} \quad (j = 1, 2, 3, 4)$$

在开关模态1时，开关管 $Q_1$ 和 $Q_4$ 导通，其电流等于折算到原边的滤波电感电流与励磁电流之和。忽略励磁电流，则开关管电流的平均值为：

$$I_{Qj} = \frac{I_o}{K} \frac{D_y}{2} \quad (j = 1, 2, 3, 4)$$

式中， $I_o$ 为输出电流



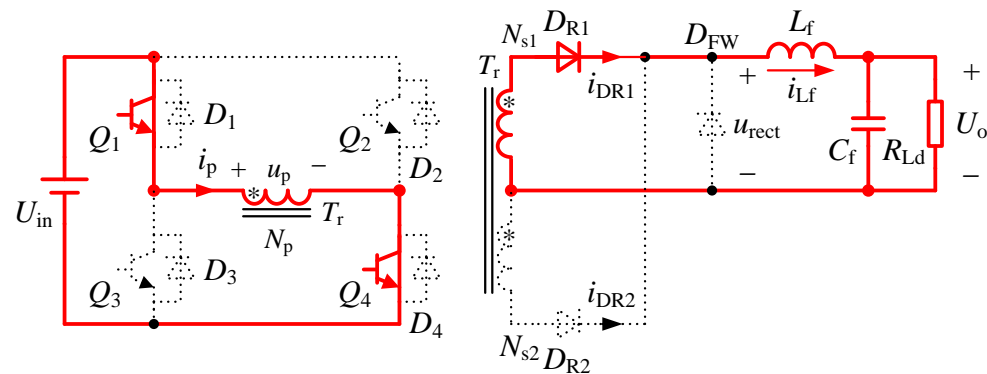
# 全桥变换器的基本关系

## 4. 整流二极管和续流二极管承受的电压应力和流过的电流

当开关管 $Q_1$ 导通时，两个副边绕组上的感应电压均为 $U_{in}/K$ ，其电压之和加在整流二极管 $D_{R2}$ 上，因此整流二极管的电压应力为：

$$U_{DR1} = U_{DR2} = 2U_{in}/K$$

同时，加在续流二极管 $D_{FW}$ 上的电压为 $U_{in}/K$ ，那么续流二极管的电压应力为： $U_{DFW} = U_{in}/K$



## 全桥变换器的基本关系

#### 4. 整流二极管和续流二极管承受的电压应力

## 和流过的电流

整流二极管的电流最大值为滤波电感电流，即有：

$$I_{\text{DR1max}} = I_{\text{DR2max}} = I_{\text{Lfmax}}$$

如果忽略励磁电流，那么整流二极管的电流平均值为：

$$I_{DR1} = I_{DR2} = I_o D_u / 2$$

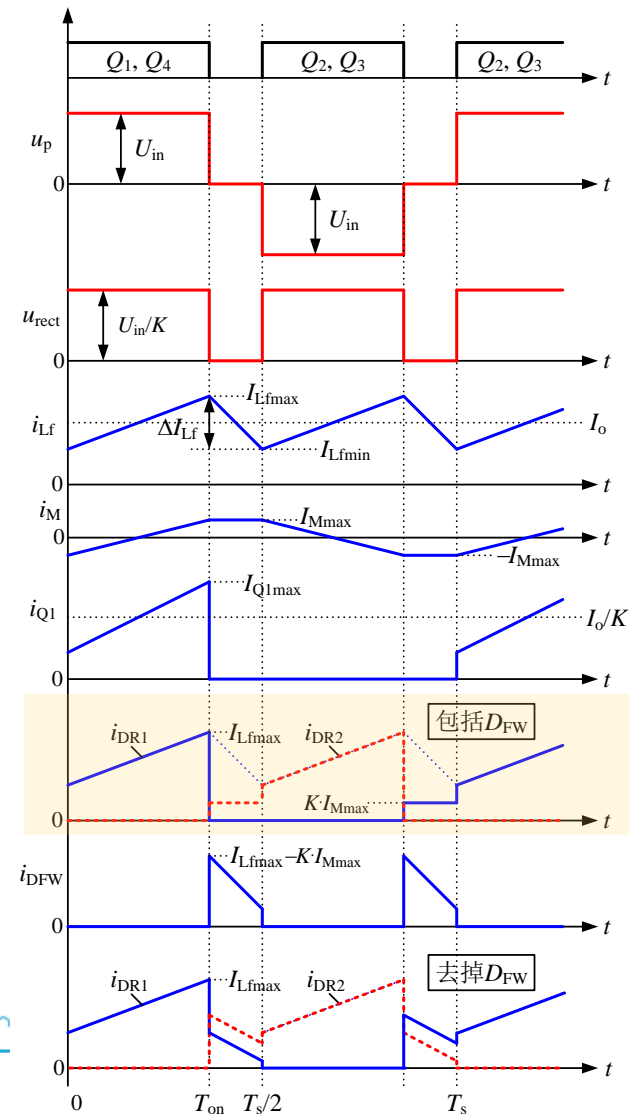
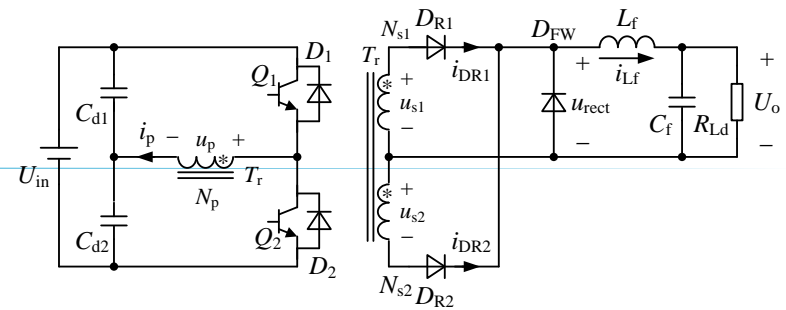
$$I_{\text{DR1}} = I_{\text{DR2}} = I_o D_y / 2$$

续流二极管电流的**最大值**和**平均值**分别为：

$$I_{\text{DFWmax}} = I_{\text{Lfmax}} \quad I_{\text{DFW}} = I_o \left(1 - D_y\right)$$

去掉续流二极管时，两只整流二极管的平均电流

均为输出电流的一半，即： $I_{DR1} = I_{DR2} = I_o/2$



# 全桥变换器的基本关系

## 5. 滤波电感量和滤波电容量

由于全桥变换器本质上也是一个隔离型的Buck变换器，其滤波电感量和滤波电容量的计算与Buck变换器的类似

注：在全桥变换器中，整流后电压 $u_{\text{rect}}$ 的幅值为 $U_{\text{in}}/K$ ，脉动频率为开关频率的两倍

