



# 电力牵引传动与控制

## 第五章 脉冲整流器主电路及控制

西南交通大学

苟 斌

本科生讲稿



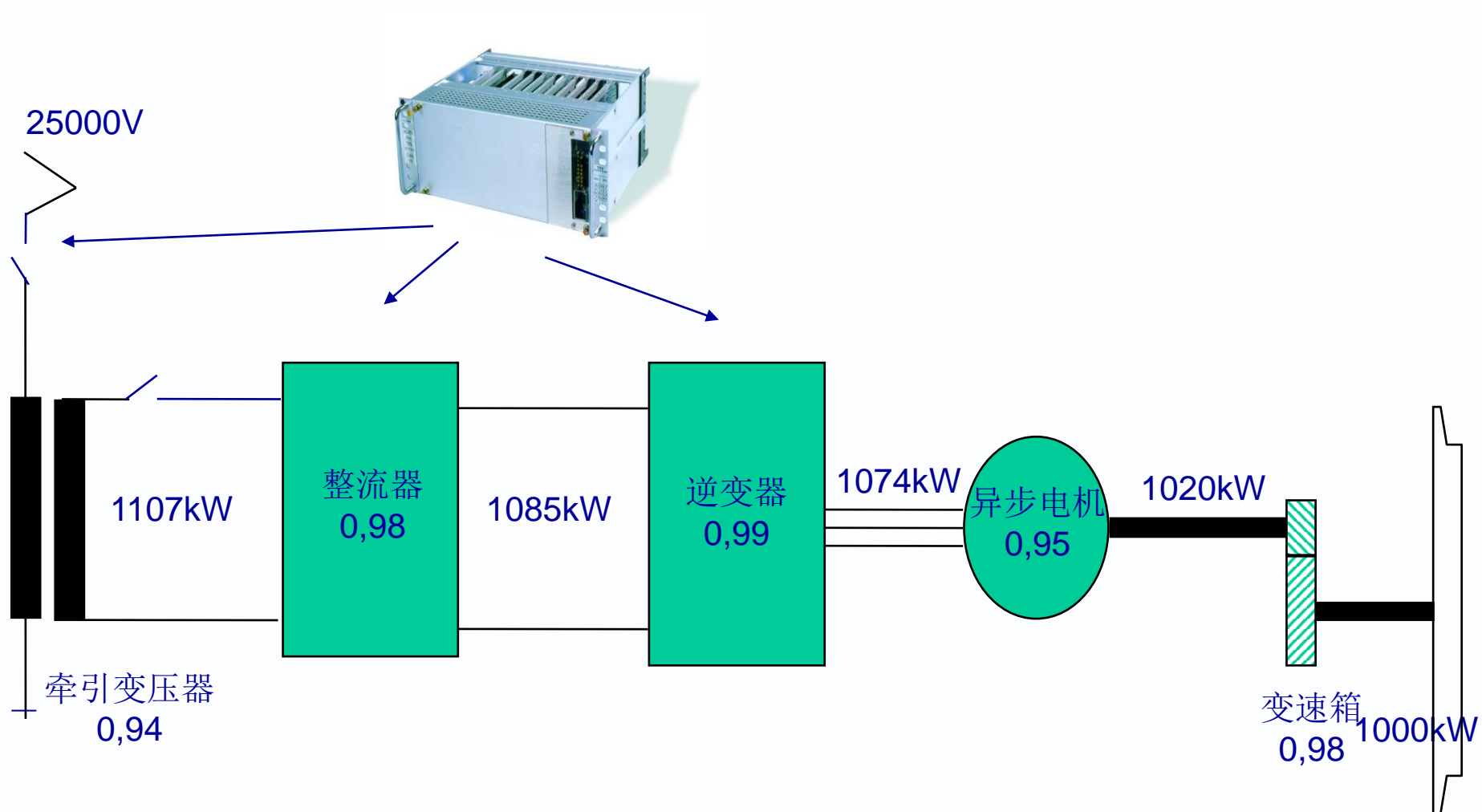


# 主要内容

- 5.1 PWM控制技术
- 5.2 理想脉冲整流器模型
- 5.3 两电平脉冲整流器主电路
- 5.4 脉冲整流器多重化控制技术
- 5.5 三电平脉冲整流器主电路
- 5.6 中间直流回路主电路



# 交流牵引传动系统组成



由AC25kV供电、交流电机驱动的机车（动车）称为交流传动电力机车（动车）



# 5.1 PWM 控制技术基本原理

——本节借鉴西安交通大学电力电子技术讲稿

## ● 定义：

- PWM (Pulse Width Modulation)
- 脉宽调制技术：通过对一系列脉冲的宽度进行调制，来等效的获得所需要的波形（含形状和幅值）



- PWM控制的思想源于通信技术，全控型器件的发展使得实现PWM控制变得十分容易。
- PWM技术的应用十分广泛，它使电力电子装置的性能大大提高，因此它在电力电子技术的发展史上占有十分重要的地位。
- PWM控制技术正是有赖于在逆变电路中的成功应用，才确定了它在电力电子技术中的重要地位。



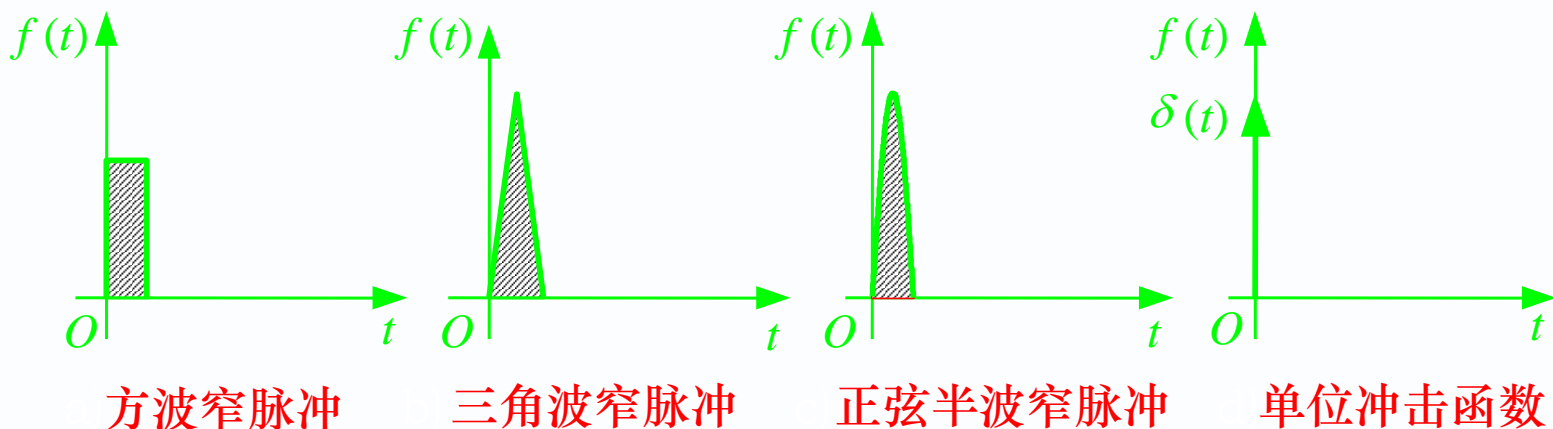
# 5.1 PWM 控制技术基本原理

## 理论基础

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。

冲量指窄脉冲的面积

指环节的输出响应波形基本相同

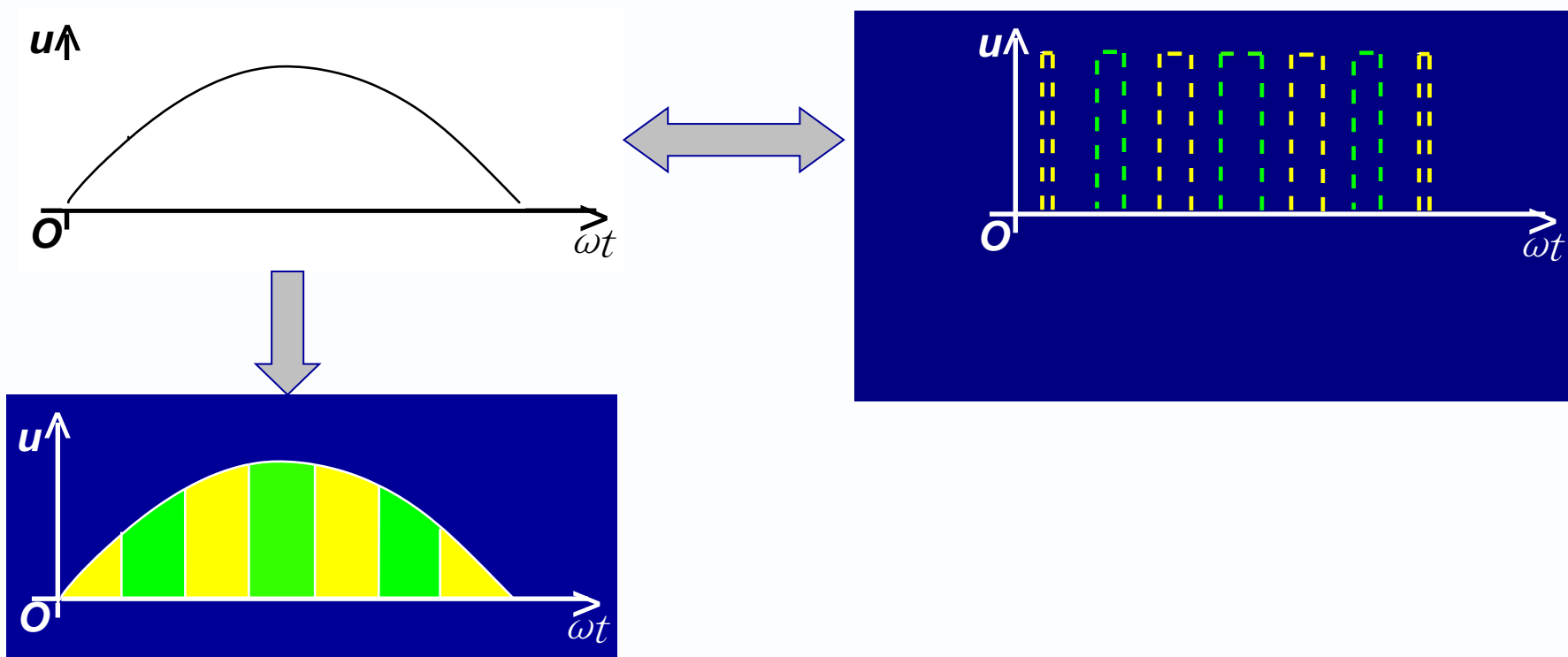


形状不同而冲量相同的各种窄脉冲



# 5.1 PWM 控制技术基本原理

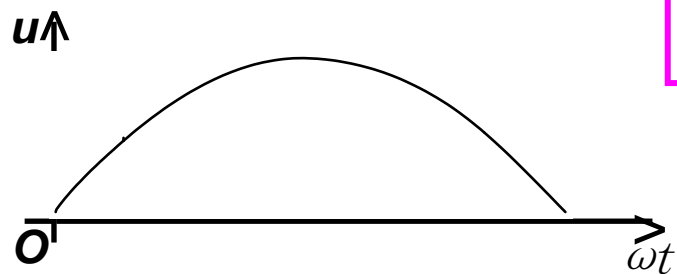
如何用一系列等幅不等宽的脉冲来代替一个正弦半波



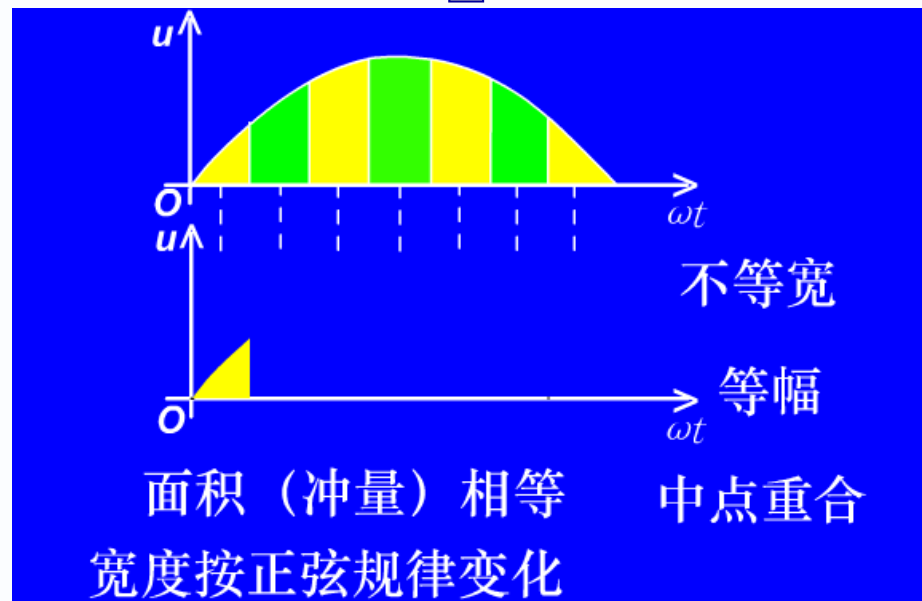
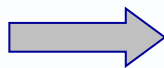
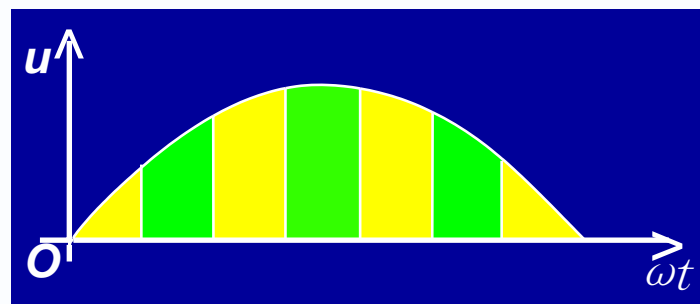
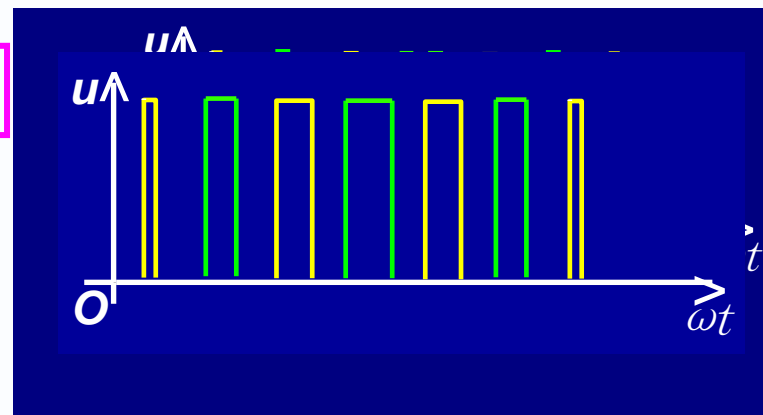
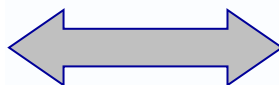


# 5.1 PWM 控制技术基本原理

如何用一系列等幅不等宽的脉冲来代替一个正弦半波



SPWM波

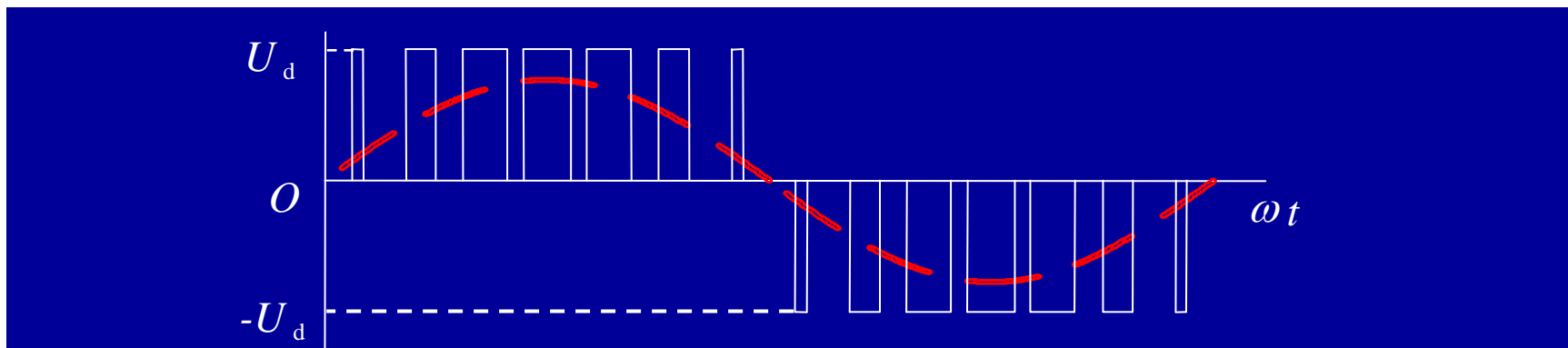


若要改变等效输出正弦波幅值，按同一比例改变各脉冲宽度即可。

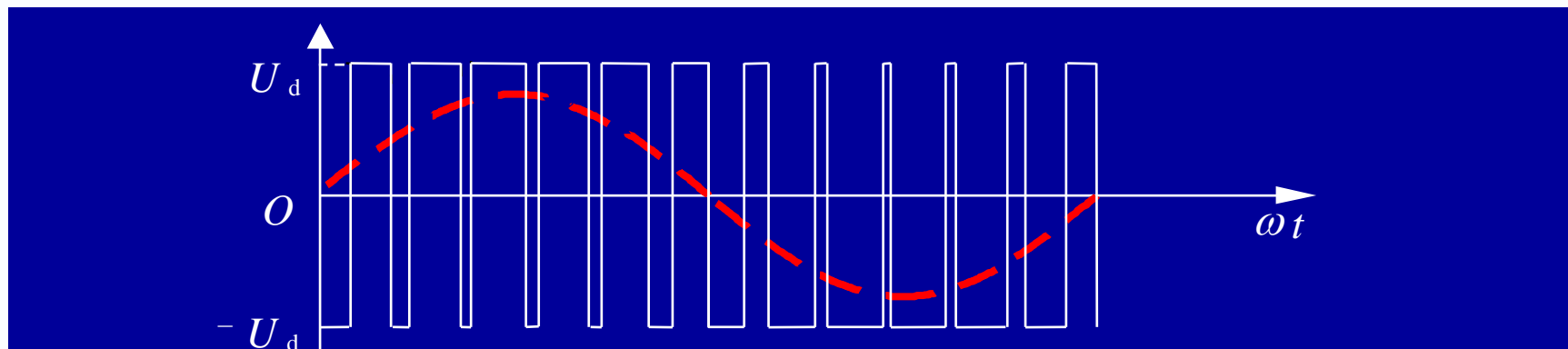


# 5.1 PWM 控制技术基本原理

- 对于正弦波的负半周，采取同样的方法，得到PWM波形，因此正弦波一个完整周期的等效PWM波为：

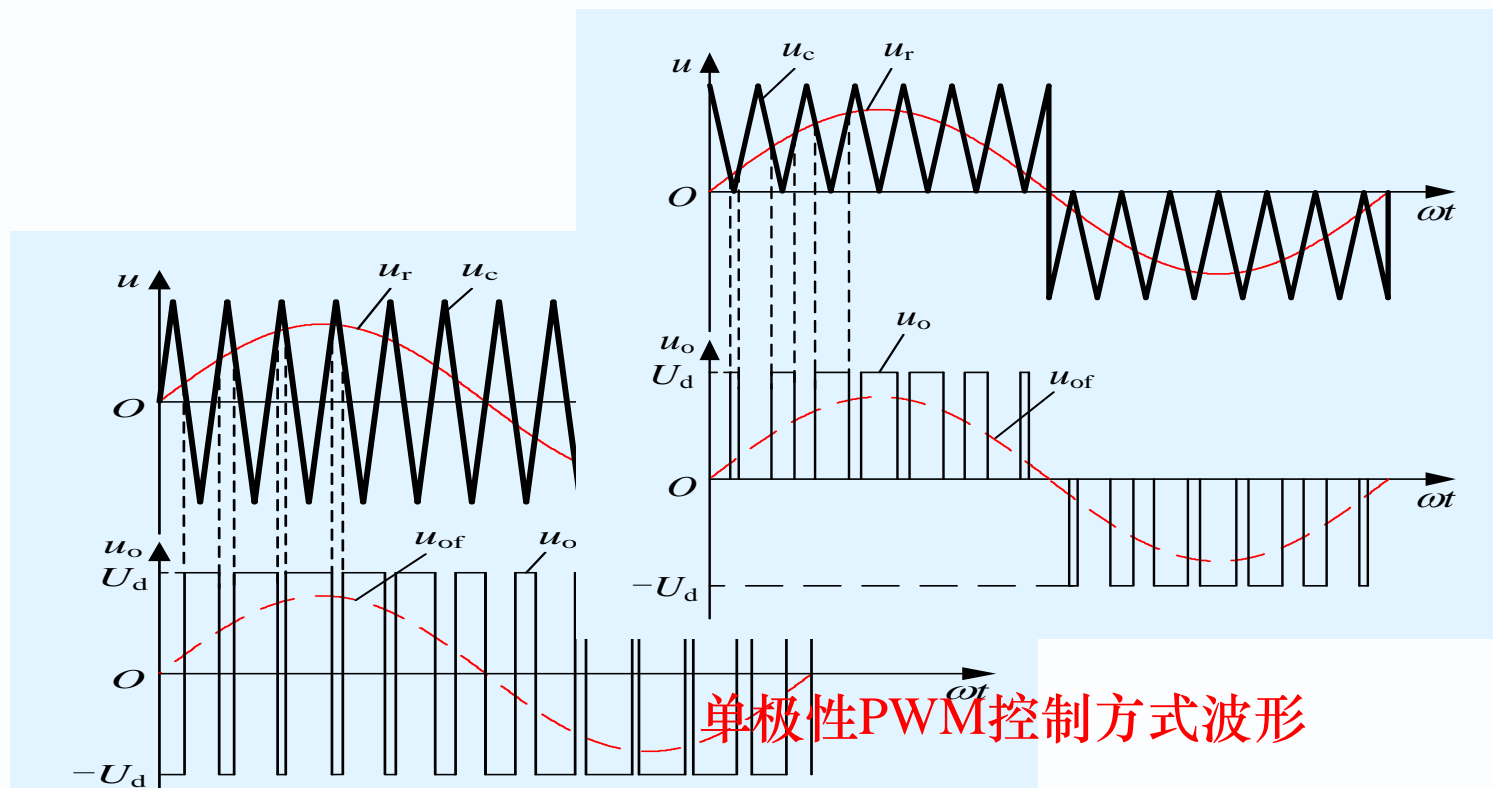


- 根据面积等效原理，正弦波还可等效为下图中的PWM波，而且这种方式在实际应用中更为广泛。





# 5.1 PWM 控制技术基本原理

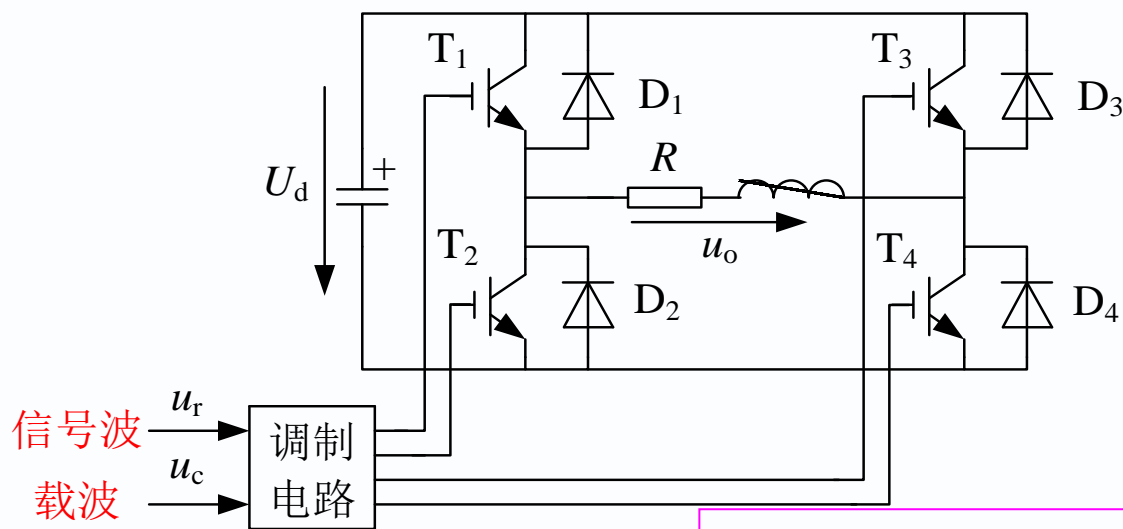


对照上述两图可以看出，单相桥式电路既可采取单极  
性调制，也可采用双极性调制，由于对开关器件  
通断控制的规律不同，它们的输出波形也有较大的  
差别



# 5.1 PWM 控制技术基本原理

➤ 结合IGBT单相桥式电压型逆变电路对调制法进行说明

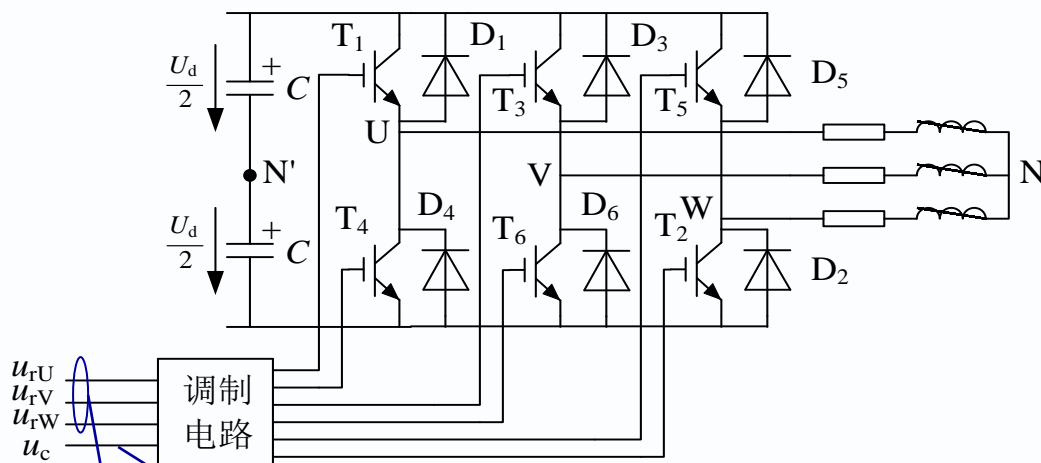


工作时T1和T2通断互补，T3和T4通断也互补



# 5.1 PWM 控制技术基本原理

## ► 双极性PWM控制方式（三相桥逆变）



三相桥式PWM  
型逆变电路

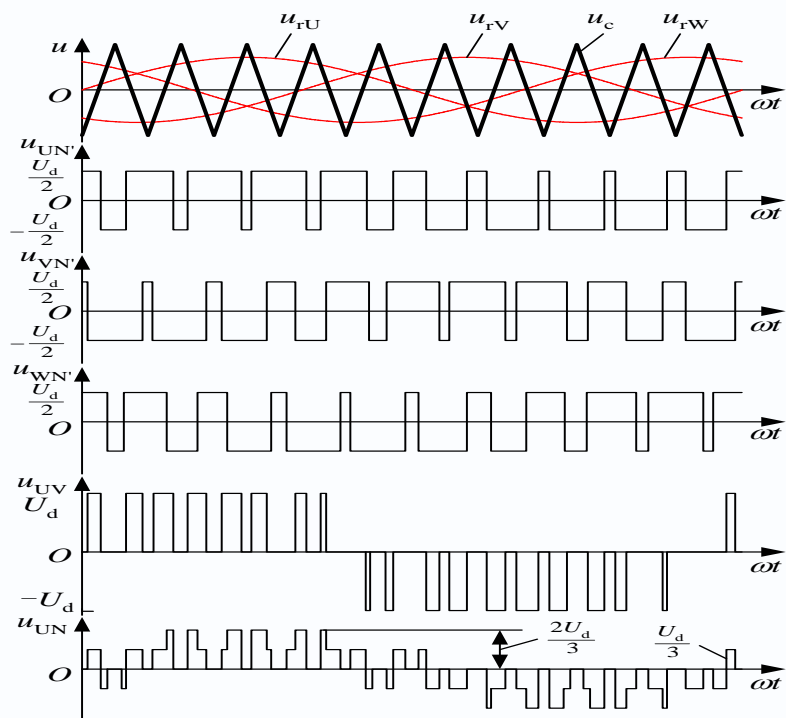
三相的PWM控制公用三角波载波 $u_c$

三相的调制信号 $u_{rU}$ 、 $u_{rV}$ 和 $u_{rW}$ 依次相差 $120^\circ$

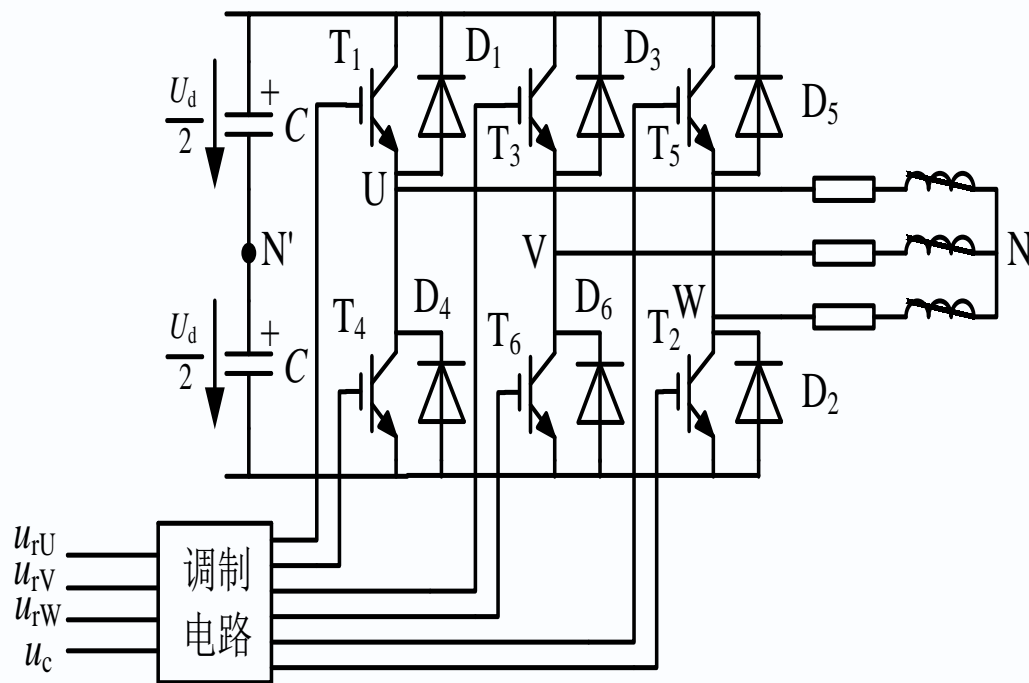


# 5.1 PWM 控制技术基本原理

## ● 控制规律：



三相桥式PWM逆变电路波形



三相桥式PWM型逆变电路



# 5.1 PWM 控制技术基本原理

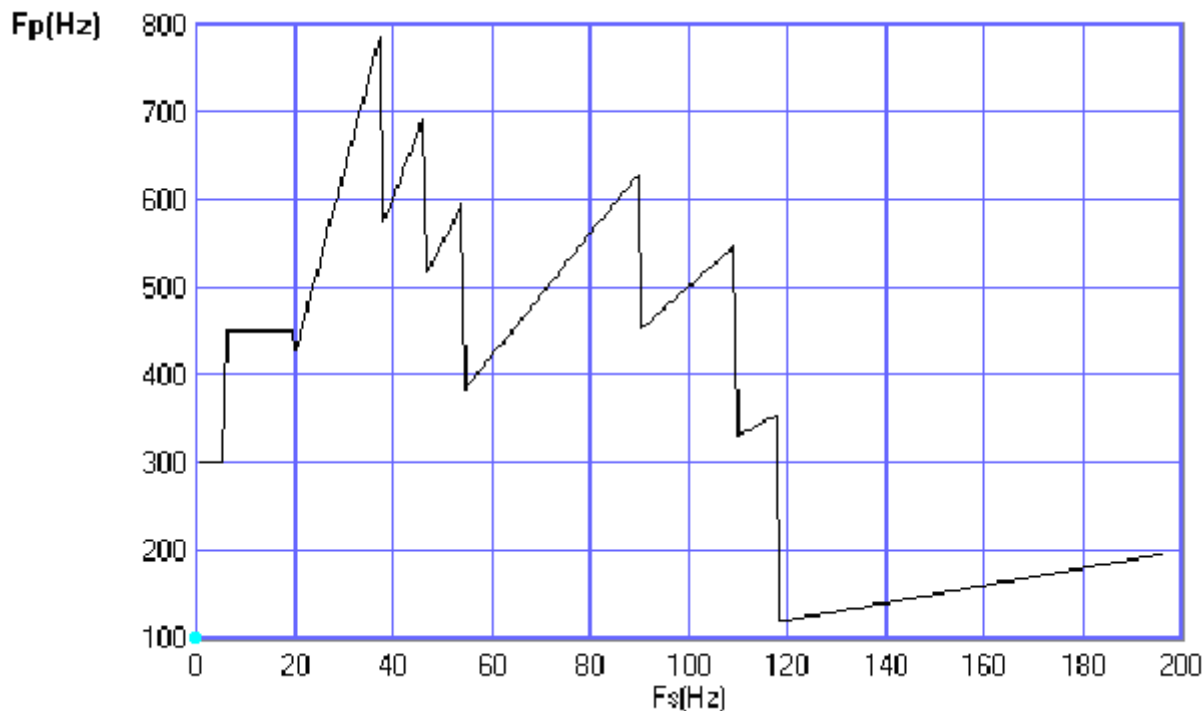
- 防直通的死区时间:

1. 同一相上下两臂的驱动信号互补，为防止上下臂直通而造成短路，留一小段上下臂都施加关断信号的死区时间
2. 死区时间的长短主要由开关器件的关断时间决定
3. 死区时间会给输出的PWM波带来影响，使其稍稍偏离正弦波



# 5.1 PWM 控制技术基本原理

## ➤ 分段同步调制——异步调制和同步调制的综合应用



分段同步调制方式举例

结论：  
::

➤ 可把频率范围划分为若干段，每段采用不同的载波频率，使载波频率随调制频率的变化而变化，这样既能保证在低频时采用较高的载波频率，使载波频率不致过低，又能保证在高频时采用较低的载波频率，使载波频率不致过高，从而提高了调制效率，改善了输出波形质量。

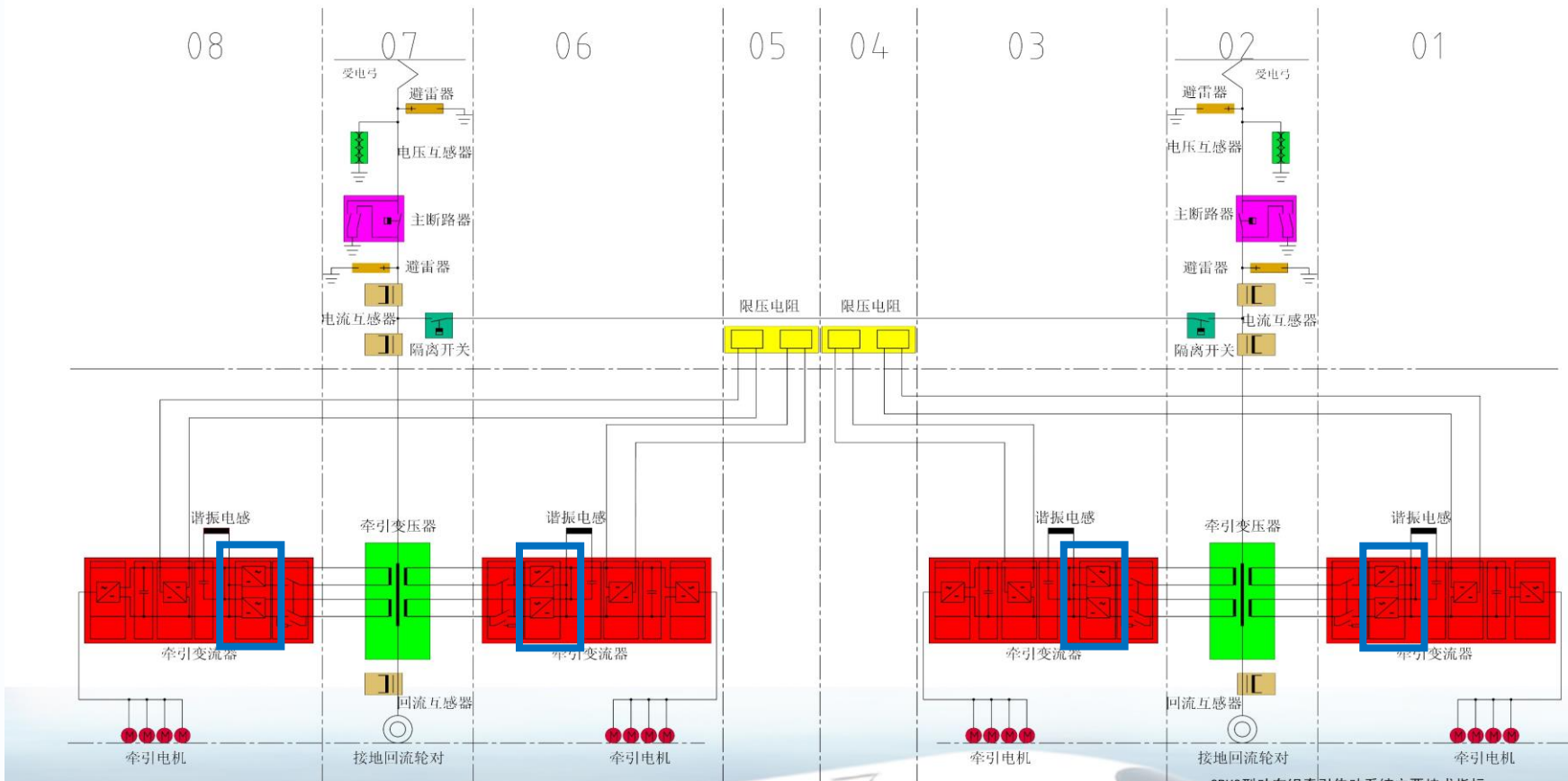


# 什么是脉冲整流器？

16

## CRH3 型动车组技术系列挂图

### 牵引系统原理图



CRH3型动车组牵引传动系统主要技术指标

序号	技术指标	指标值
1	额定工作网压	交流25KV
2	轮周最大牵引功率	8800KW
3	轮轴最大再生制动功率	8000KW
4	启动牵引力	300KN
5	传动比	2.793
6	中间直流环节电压(牵引时)	2700~3600V

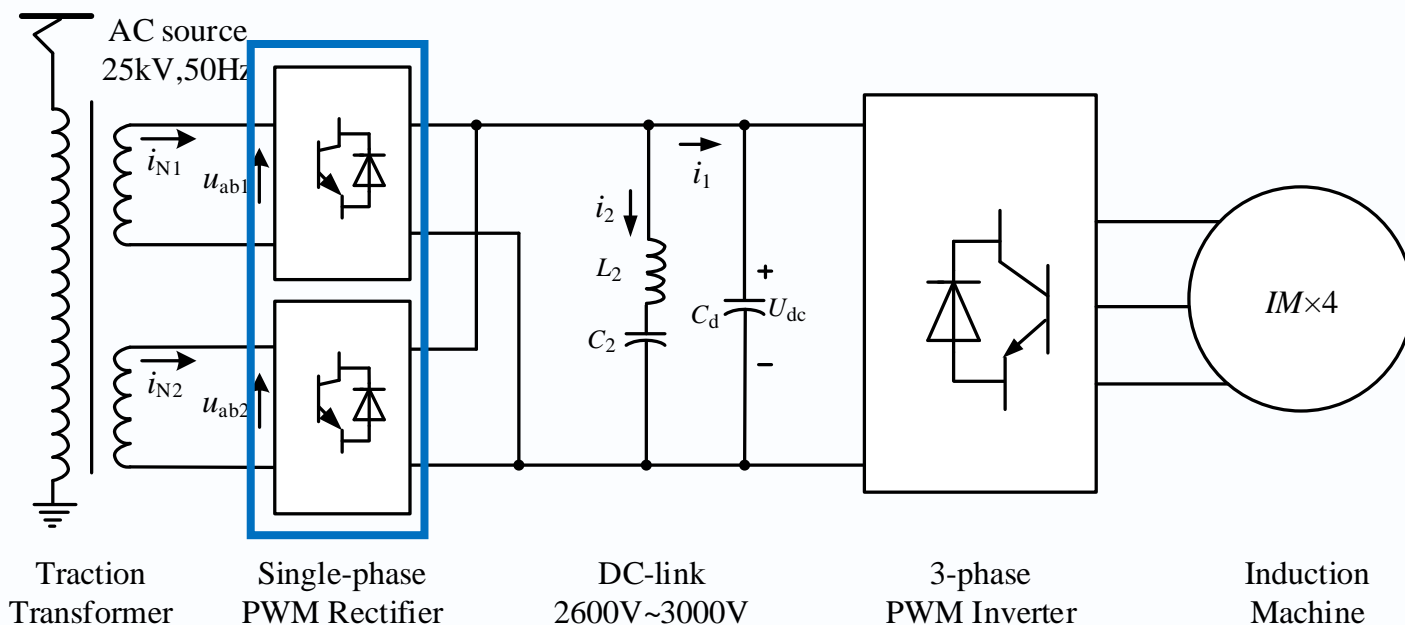
铁道部运输局装备部





## 5.2 脉冲整流器工作原理

17

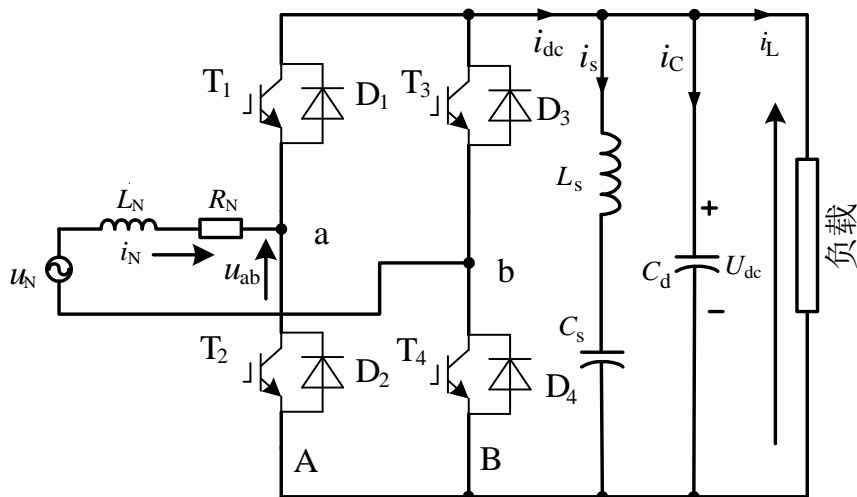


- 列车牵引时起**整流作用**，将单相交流电转变成直流电；
- 再生制动时起**逆变作用**，将直流电转变成单相交流电回馈牵引供电网；
- 其可以工作在电压电流坐标平面的四个象限，因此亦称为**四象限整流器**；
- 当前牵引传动系统基本采用PWM技术控制整流器，又称之为**脉冲整流器**；
- 理想的脉冲整流器，一要**为直流侧提供平直稳定的直流电压（或电流）**，二是**只从交流电网吸取有功功率，即输入侧单位功率因数运行**。

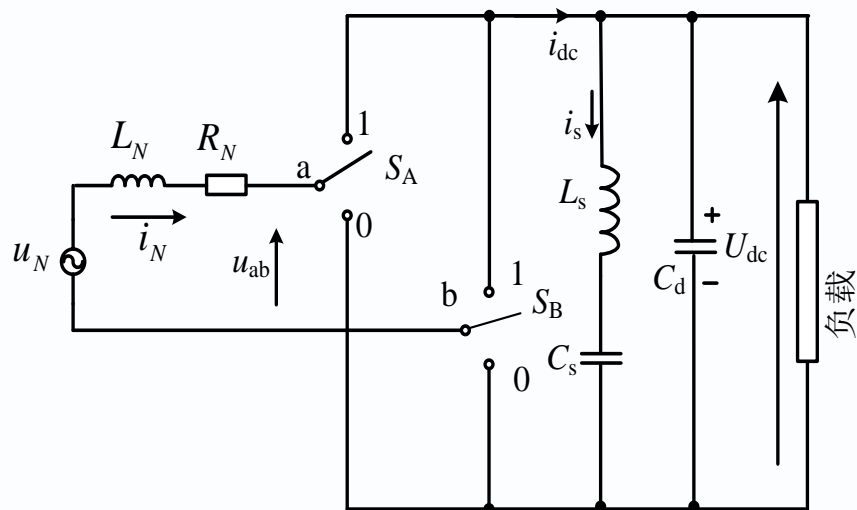


# 5.3 两电平脉冲整流器主电路

18



两电平脉冲整流器主电路结构



两电平脉冲整流器开关等效图

定义理想开关函数：

$$S_A = \begin{cases} 1 & T_1 \text{ 或 } D_1 \text{ 导通} \\ 0 & T_2 \text{ 或 } D_2 \text{ 导通} \end{cases} \quad S_B = \begin{cases} 1 & T_3 \text{ 或 } D_3 \text{ 导通} \\ 0 & T_4 \text{ 或 } D_4 \text{ 导通} \end{cases}$$

□ 有效开关组合有  $2^2 = 4$  种，即  $S_A S_B$

$= 00、01、10、11$  四种逻辑；

□ 输入端电压  $u_{ab}$  的取值有  $U_{dc}$ 、 $0$ 、 $-U_{dc}$  三种电平；

□ 输入端电压  $u_{ab}$  可总结为：

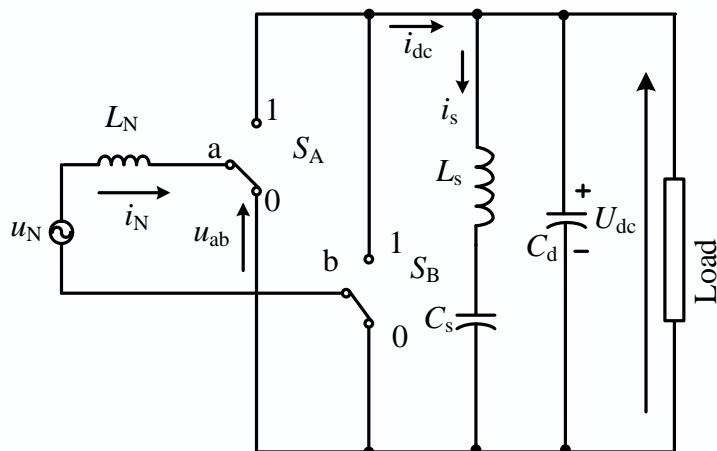
$$u_{ab} = (S_A - S_B)U_{dc}$$



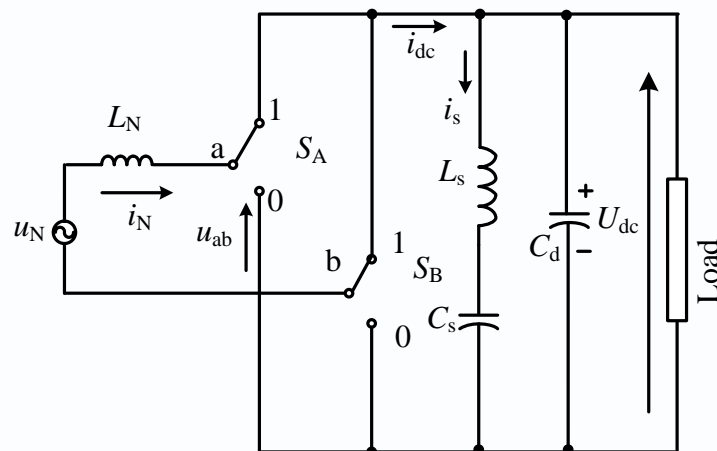
# 工作模式1: $S_A S_B = 00$ 或 $11$

19

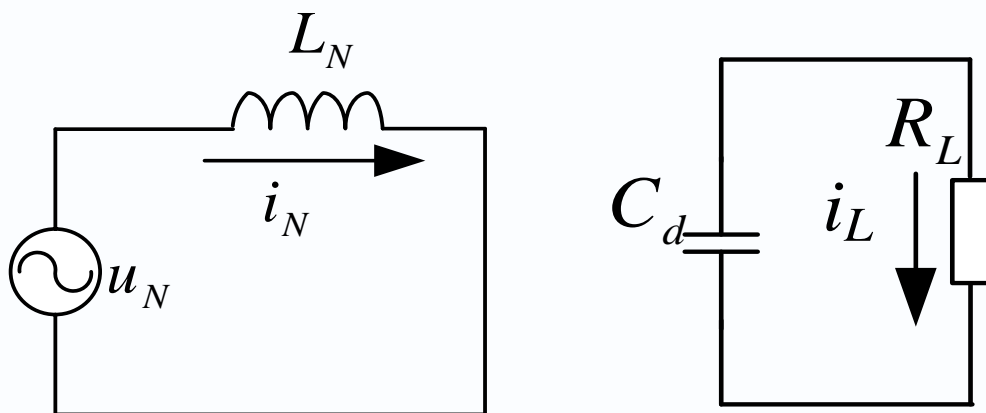
$S_A S_B = 00$  或  $11$ , 即: 下桥臂开关或上桥臂开关全部导通



$S_A S_B = 00$  下等效电路



$S_A S_B = 11$  下等效电路



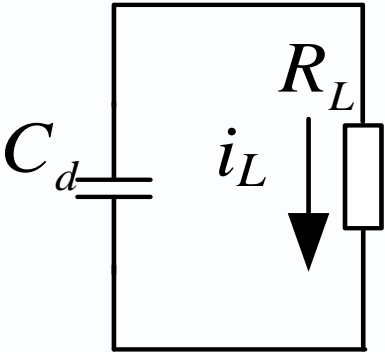
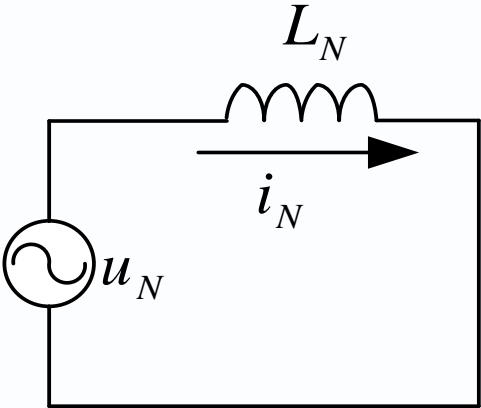
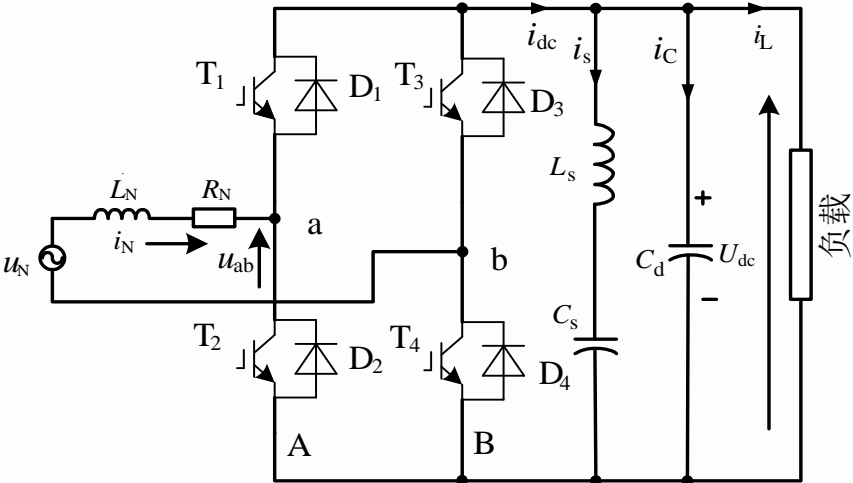
$S_A S_B = 00$  或  $11$  等效电路

则满足如下关系式:

$$u_N = L_N \frac{di_N}{dt}$$



# 工作模式1： $S_A S_B = 00$ 或 $11$



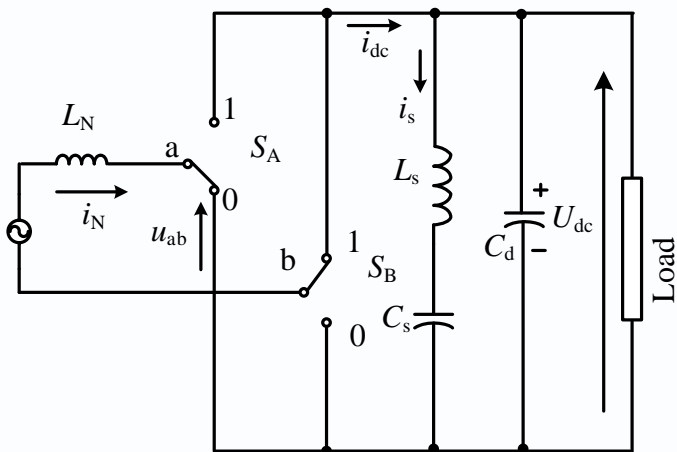
$u_N$	$i_N$	$u_{ab}$	$u_{LN}$	导通的器件	$i_N$ 的变化	工作状态	能量传送
$>0$	$>0$						
	$<0$						
$<0$	$>0$						
	$<0$						



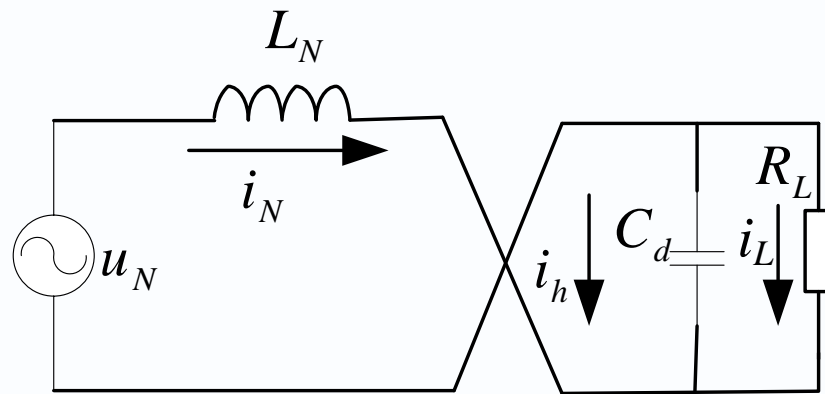
## 工作模式2: $S_A S_B = 01$

21

$$S_A S_B = 01, u_{ab} = -U_{dc}$$



$S_A S_B = 01$  下等效电路

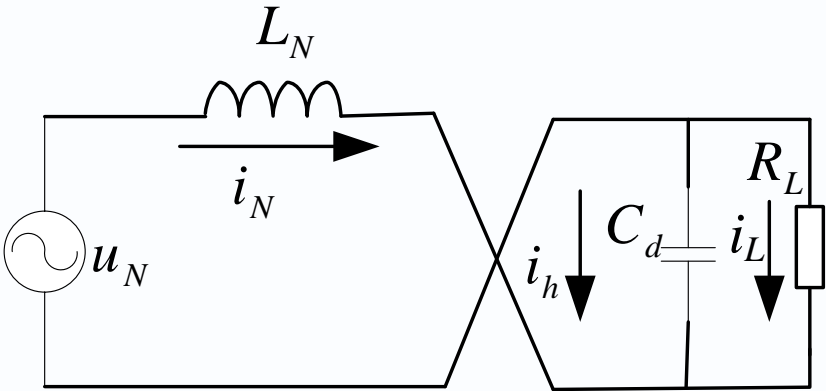
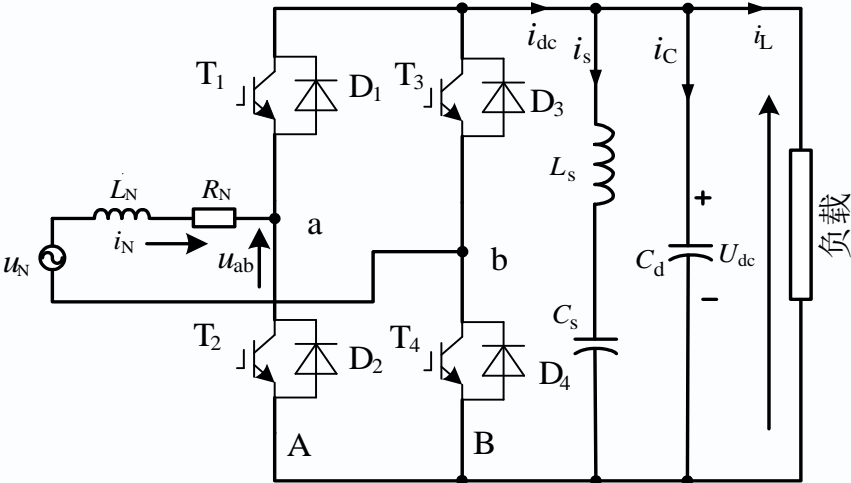


则满足如下关系式:

$$L_N \frac{di_N}{dt} = u_N + U_{dc}$$



# 工作模式2： $S_A S_B = 01$



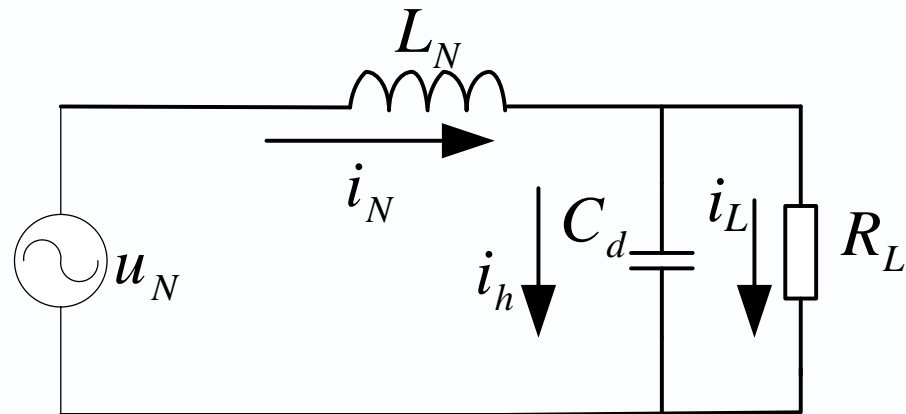
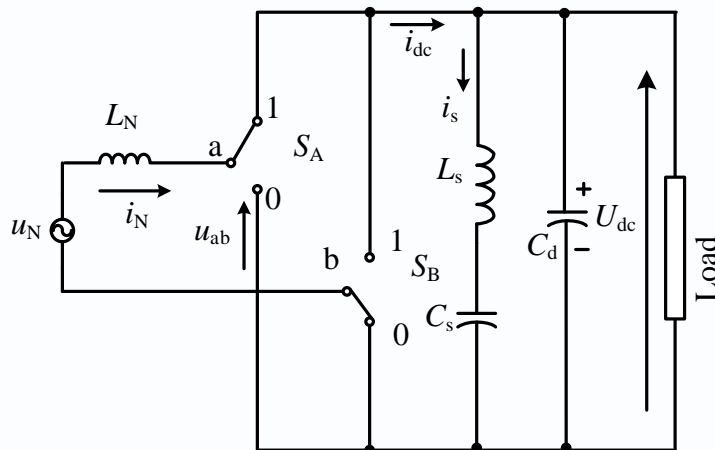
$u_N$	$i_N$	$u_{ab}$	$u_{LN}$	导通的器件	$i_N$ 的变化	工作状态	能量传送
$>0$	$>0$						
	$<0$						
$<0$	$>0$						
	$<0$						



# 工作模式3: $S_A S_B = 10$

23

$$S_A S_B = 10, u_{ab} = U_{dc}$$



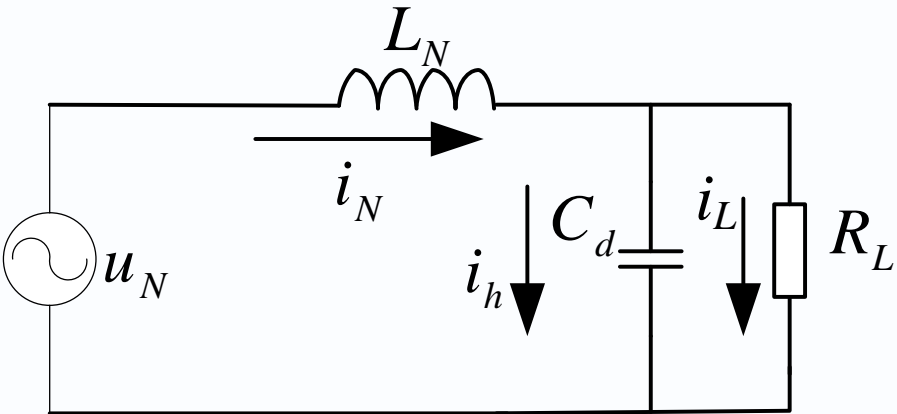
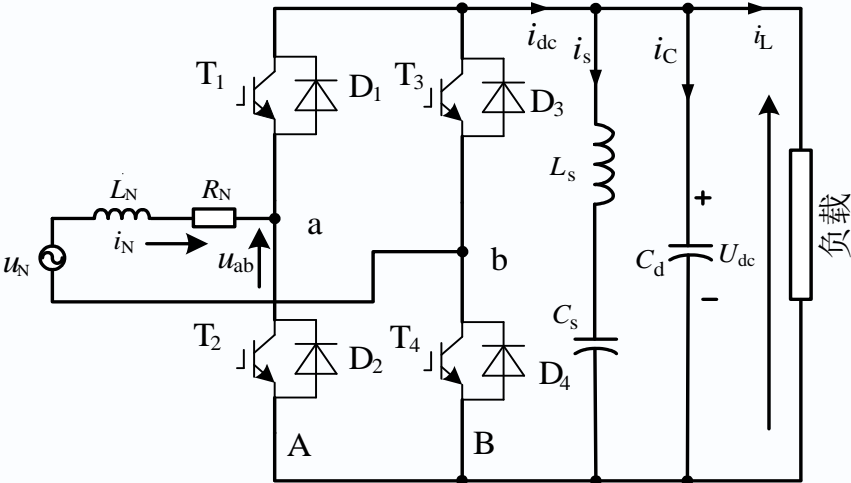
$S_A S_B = 10$  下等效电路

则满足如下关系式:

$$L_N \frac{di_N}{dt} = u_N - U_{dc}$$



# 工作模式3： $S_A S_B = 10$



$u_N$	$i_N$	$u_{ab}$	$u_{LN}$	导通的器件	$i_N$ 的变化	工作状态	能量传送
$>0$	$>0$						
	$<0$						
$<0$	$>0$						
	$<0$						

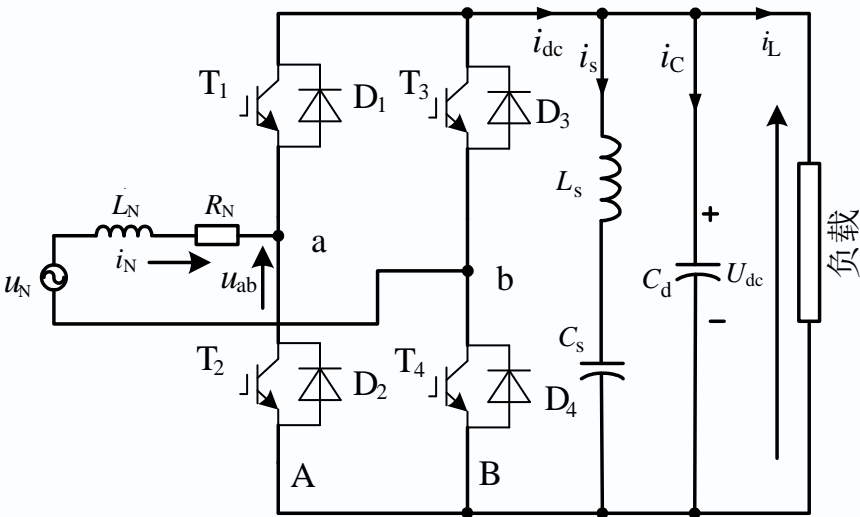




定义的理想开关函数：

$$S_A = \begin{cases} 1 & T_1 \text{或} D_1 \text{导通} \\ 0 & T_2 \text{或} D_2 \text{导通} \end{cases}$$

$$S_B = \begin{cases} 1 & T_3 \text{或} D_3 \text{导通} \\ 0 & T_4 \text{或} D_4 \text{导通} \end{cases}$$

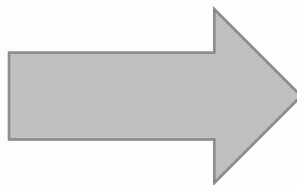
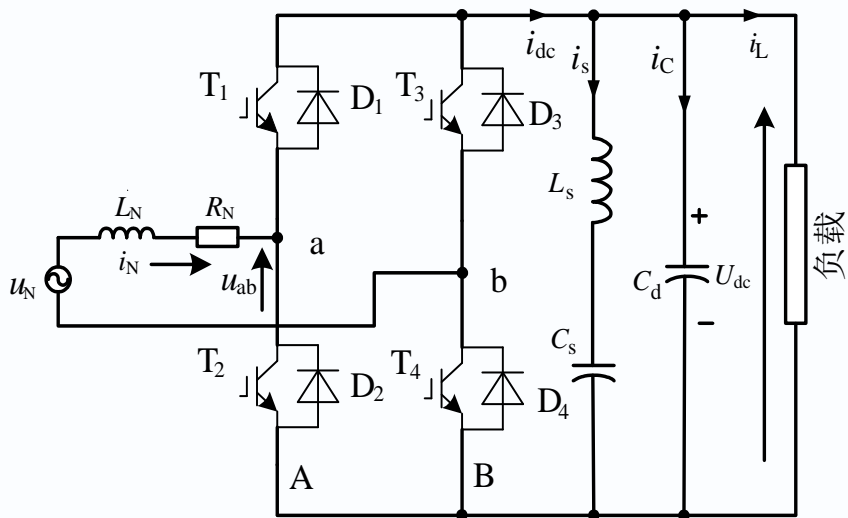


电流连续状态下  $S_A$  和  $S_B$  真值表

$i_N$	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$	$S_A$	$S_B$	$i_N$	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$	$S_A$	$S_B$
$i_N > 0$	0	0	0	0	1	0	$i_N < 0$	0	0	0	0	0	1
	0	0	0	1	1	0		0	0	0	1	0	0
	0	0	1	0	1	1		0	0	1	0	0	1
	0	1	0	0	0	0		0	1	0	0	0	1
	0	1	0	1	0	0		0	1	0	1	0	0
	0	1	1	0	0	1		0	1	1	0	0	1
	1	0	0	0	1	0		1	0	0	0	1	1
	1	0	0	1	1	0		1	0	0	1	1	0
	1	0	1	0	1	1		1	0	1	0	1	1



## 两电平脉冲整流器数学关系:

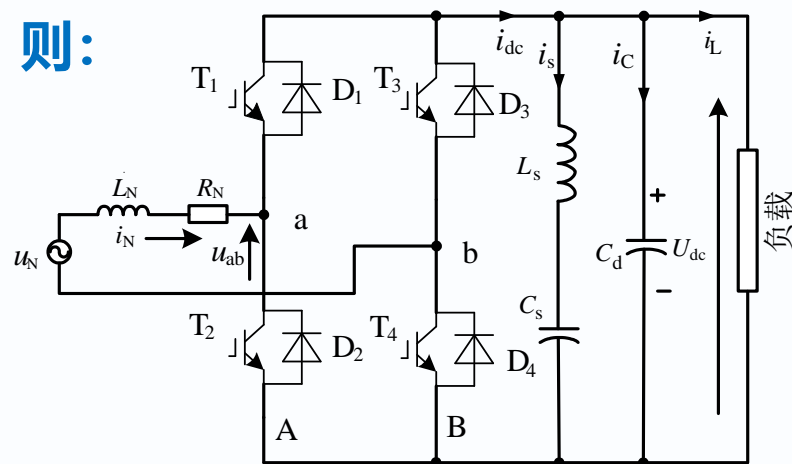


$$\left\{ \begin{array}{l} u_N = L_N \frac{di_N}{dt} + R_N i_N + u_{ab} \\ i_{dc} = i_s + i_c + i_L \\ i_c = C_d \frac{dU_{dc}}{dt} \\ i_s = C_s \frac{du_s}{dt} \\ L_s \frac{di_s}{dt} = U_{dc} - u_s \end{array} \right.$$



定义网侧电流流入整流器方向为参考方向，则：

$$\begin{cases} u_{ab} = (S_A - S_B)U_{dc} \\ i_{dc} = (S_A - S_B)i_N \end{cases}$$



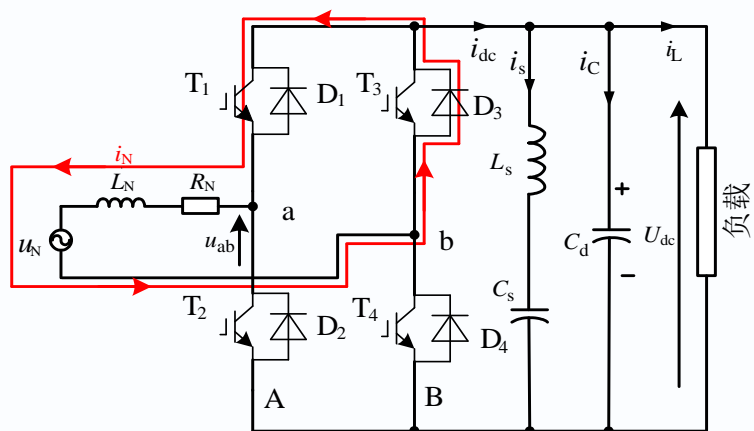
则两电平脉冲整流器数学模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_N \\ \dot{U}_{dc} \\ \dot{i}_s \\ \dot{u}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_N}{L_N} & -\frac{(S_A - S_B)}{L_N} & 0 & 0 \\ \frac{(S_A - S_B)}{C_d} & 0 & -1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} & 0 & -\frac{1}{L_s} \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_s} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_N \\ U_{dc} \\ i_s \\ u_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{u_N}{L_N} \\ -i_L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

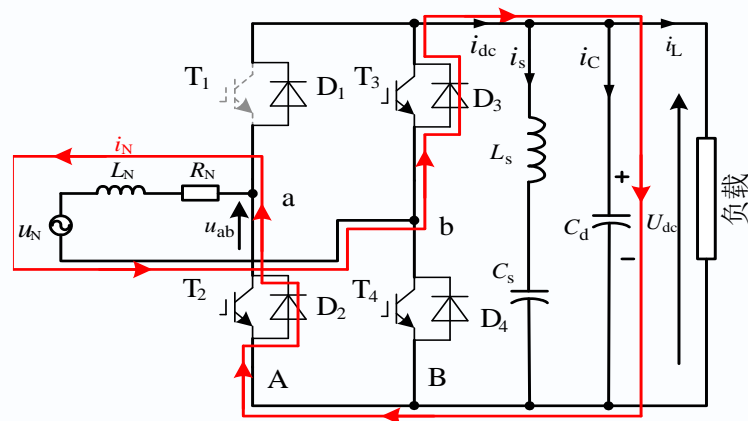


# 两电平脉冲整流器故障分析

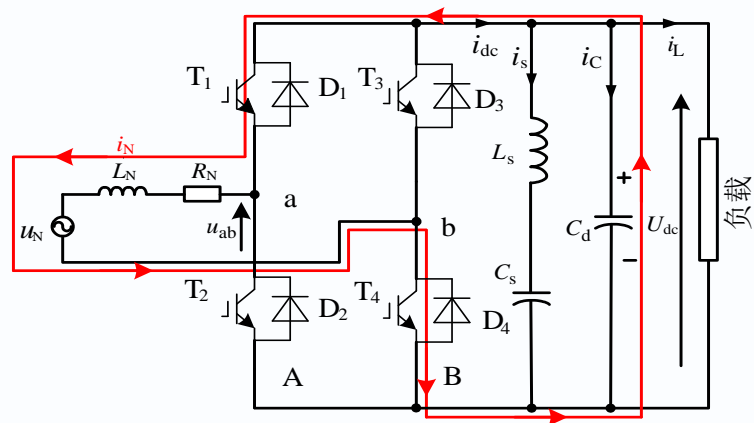
## 四象限脉冲整流器IGBT开路故障示意图：



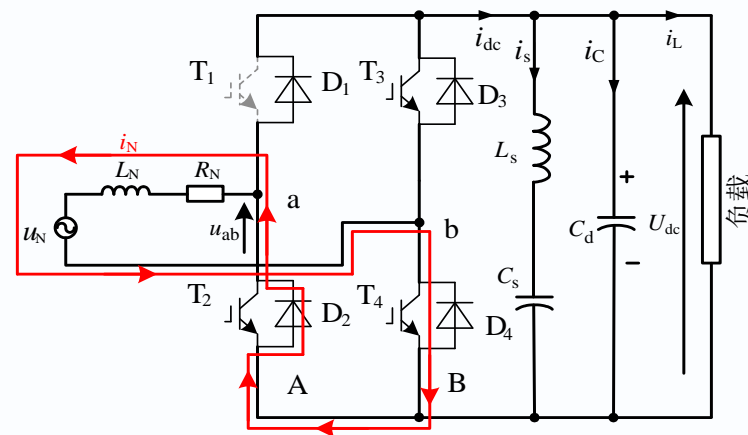
开关信号为(1000)和(1010)正常流向



开关信号为(1000)和(1010)时T1管故障下流向



开关信号为(1001)正常流向

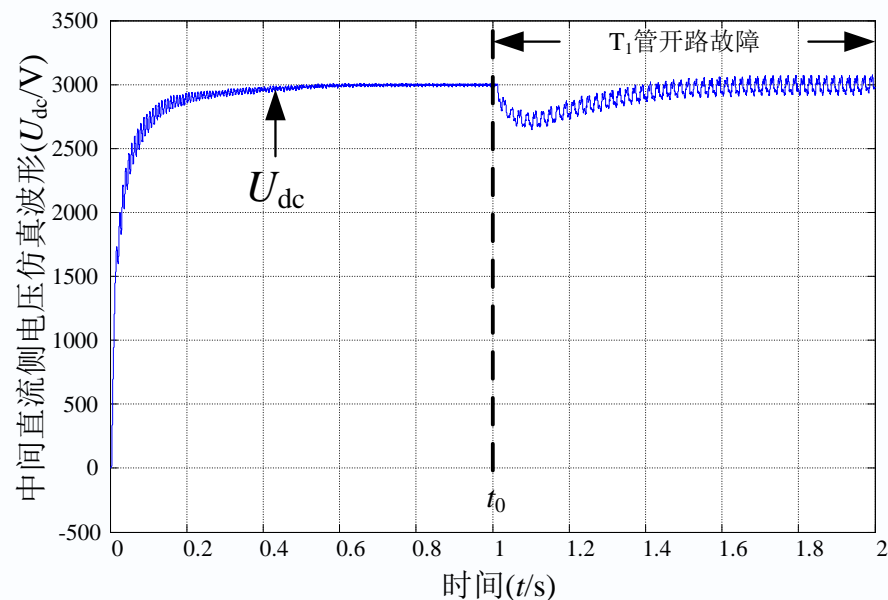
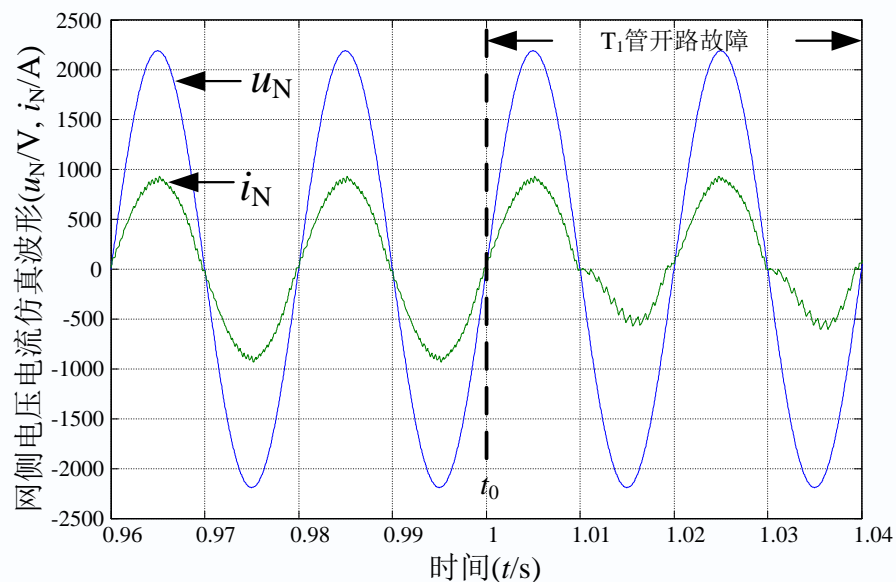


开关信号为(1001)时T1管故障下流向



# 两电平脉冲整流器故障分析

四象限脉冲整流器IGBT开路故障仿真波形：



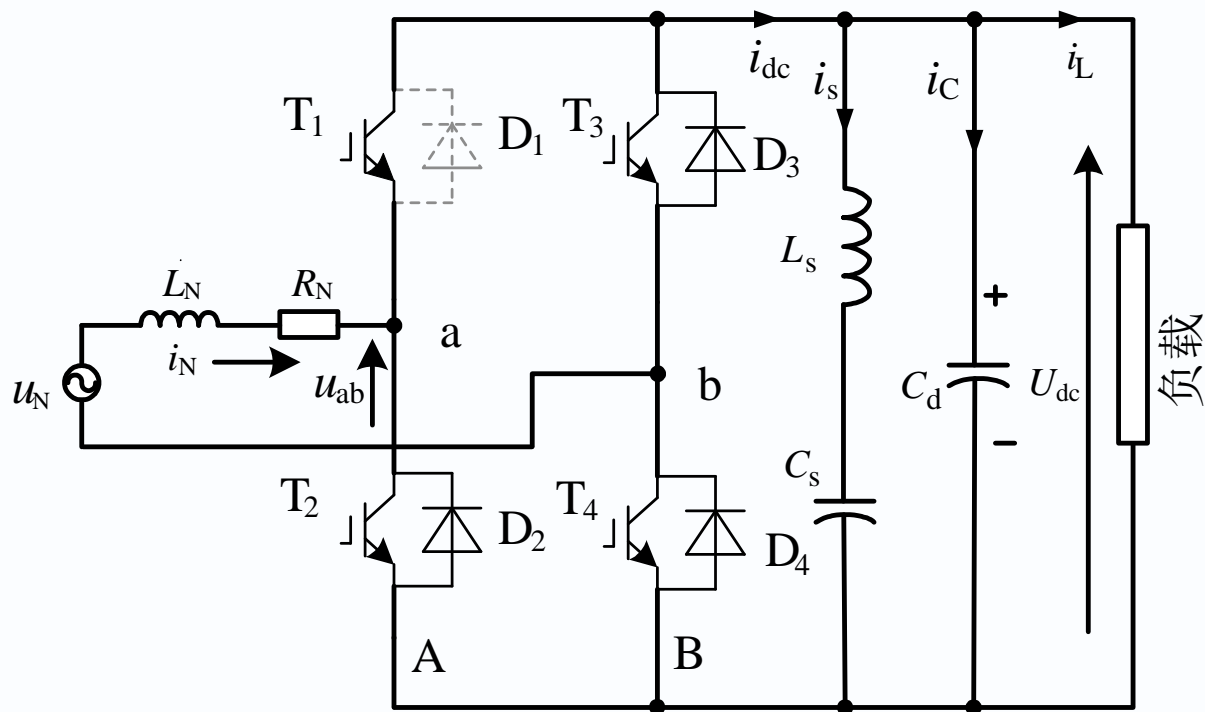
$T_1$ 管开路故障时四象限脉冲整流器仿真波形

(a) 网压网流波形, (b) 直流侧电压波形



# 两电平脉冲整流器故障分析

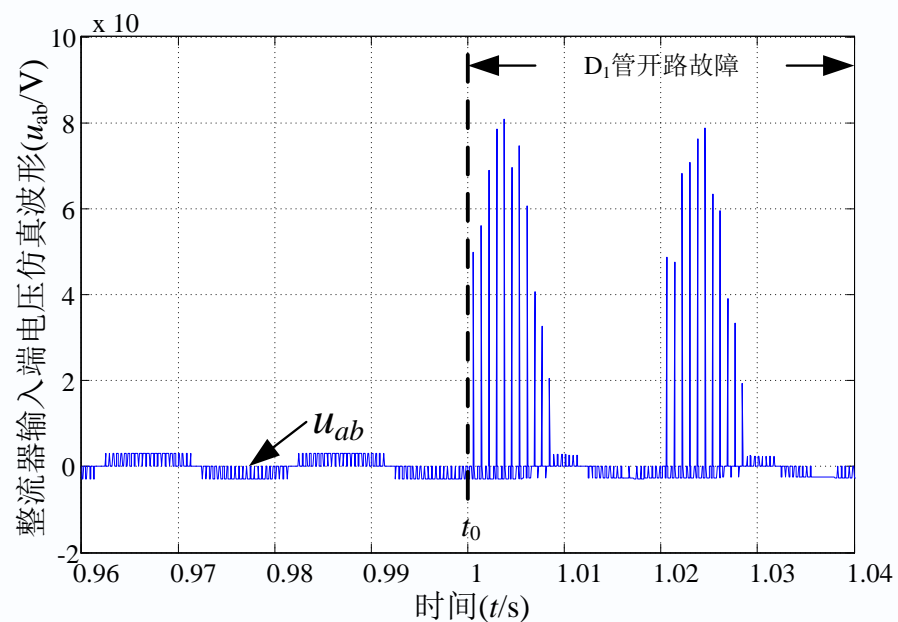
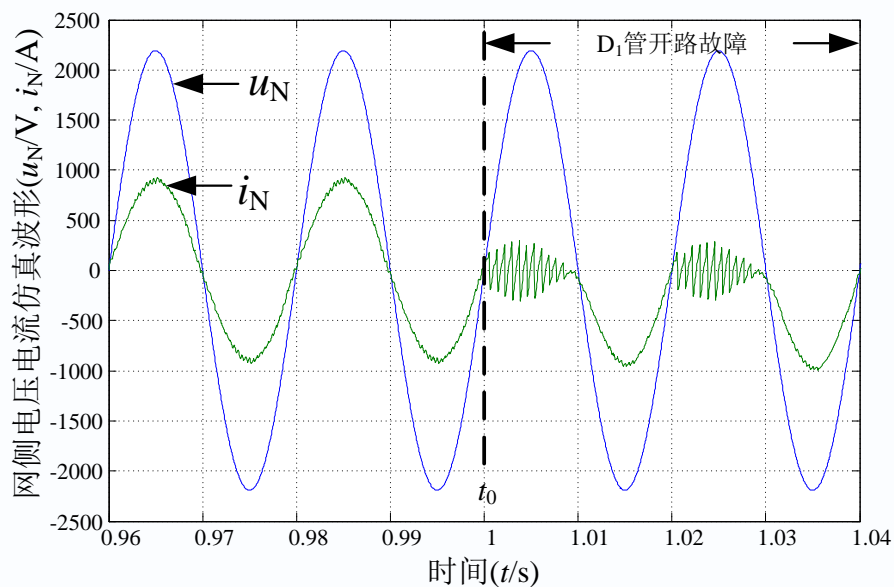
四象限脉冲整流器二极管开路故障示意图：





# 两电平脉冲整流器故障分析

四象限脉冲整流器二极管开路故障波形：



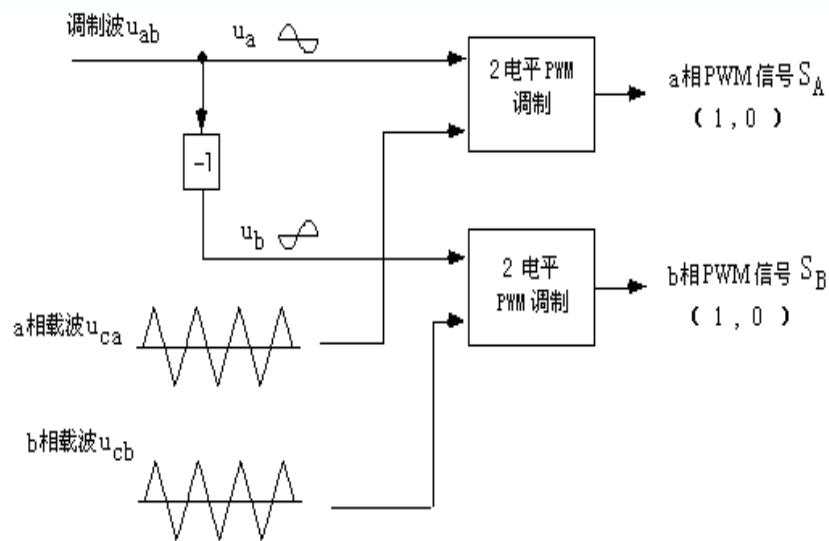
二极管管开路故障时四象限脉冲整流器仿真波形

(a) 网压网流波形, (b) 直流侧电压波形



# 两电平脉冲整流器的SPWM控制原理

- 两电平脉冲整流器采用SPWM调制，其调制方式如图所示。当 $u_a > u_{ca}$ 时， $S_A$ 为1，否则为0。b相与a相调制方式相同，但 $u_b$ 与 $u_a$ 相位相差 $180^\circ$ ， $u_{cb}$ 与 $u_{ca}$ 相同。

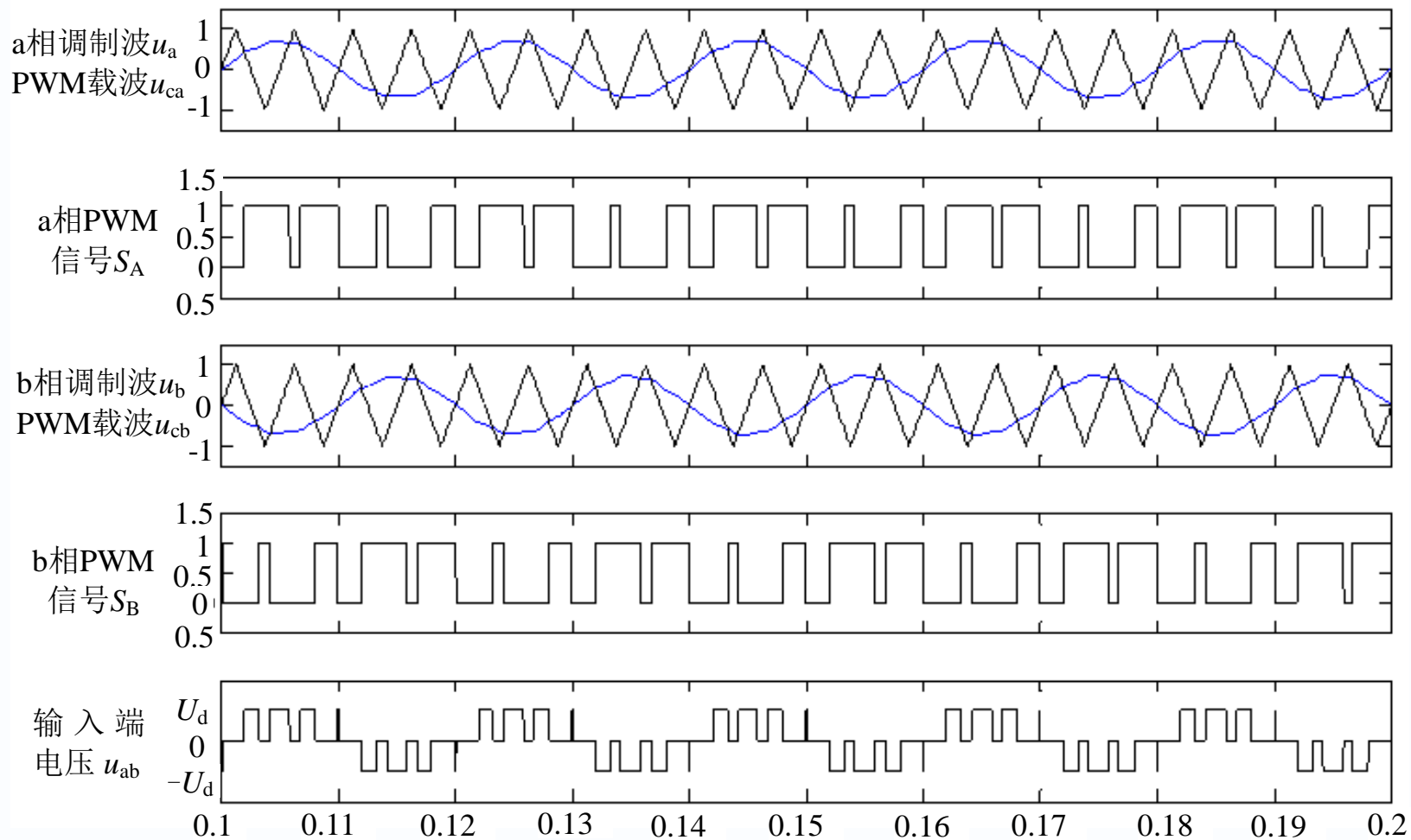


SPWM控制





# 两电平脉冲整流器SPWM调制波形





# 四象限脉冲整流器的控制策略

四象限脉冲整流器的常用电流控制策略有：

- ①间接电流控制
- ②滞环直接电流控制
- ③定时瞬时值电流控制
- ④瞬态直接电流控制
- ⑤预测直接电流控制

在交流传动机车的脉冲整流器中，瞬态直接电流控制是一种较常用的控制策略。



# 整流器控制的目标

1. 保证直流侧电压稳定在允许偏差范围内；
2. 使输入电流正弦化，单位功率因数运行，减小对电网谐波污染；
3. 开关频率尽量小，减小对开关管的损耗，增大其使用寿命；
5. 输出电压或电流能够快速的调节，达到稳定，即要求具有较好的动态特性，提高系统的动态响应能力，减少系统的动态响应时间



# 两电平脉冲整流器的瞬态电流控制

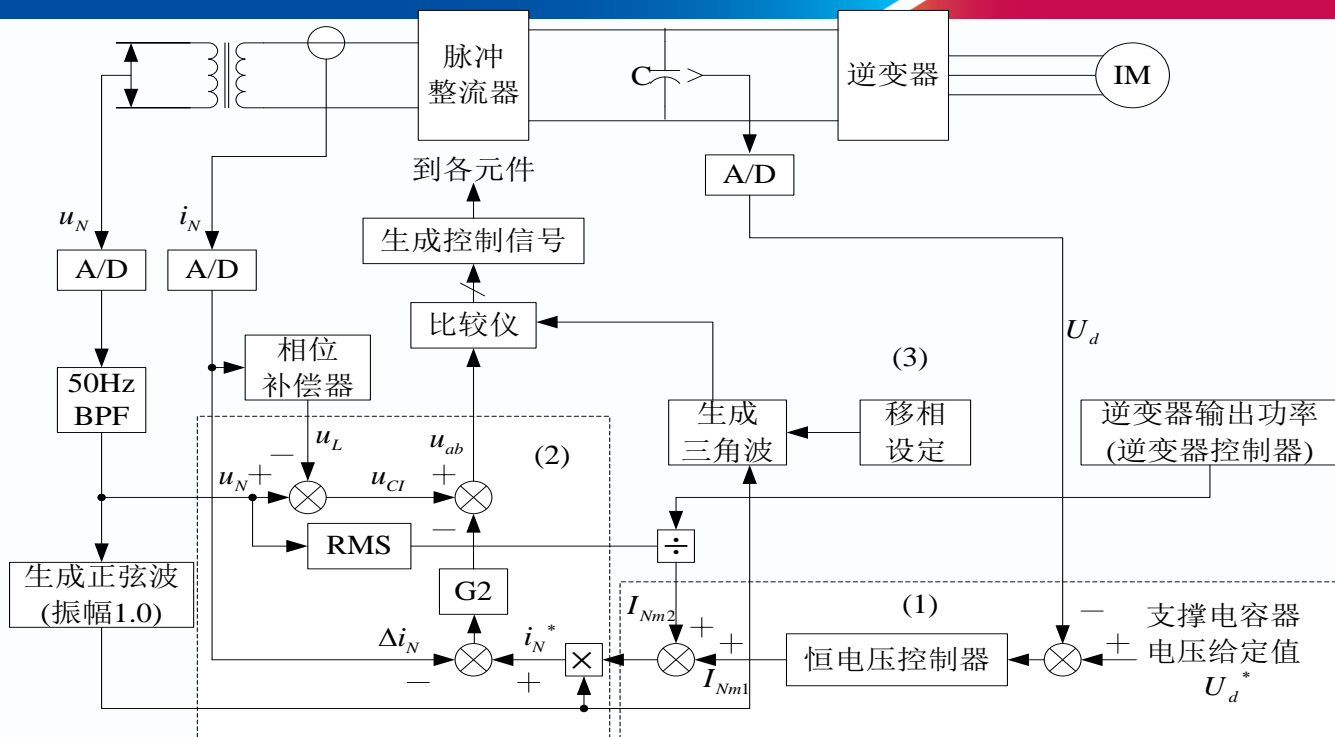
瞬态电流控制具体的数学公式：

$$\begin{cases} I_{Nm1} = K_p (U_d^* - U_d) + 1/T_i \int (U_d^* - U_d) dt \\ I_{Nm2} = 2 I_d U_d / U_{Nm} \\ I_{Nm}^* = I_{Nm1}^* + I_{Nm2}^* \\ u_{ab}(t) = u_N(t) - \omega L I_{Nm}^* \cos \omega t - R_N I_{Nm}^* \sin \omega t - K [I_{Nm}^* \sin \omega t - i_N(t)] \end{cases}$$

其中 $K_p$ 和 $T_i$ 为PI调节器的参数, $U_d^*$ 为中间直流侧电压给定值, $I_d$ 、 $U_d$ 分别为中间直流环节电流和中间直流环节电压, $K$ 为比例放大系数, $\omega$ 为网侧电压的角频率。



# 两电平脉冲整流器的瞬态电流控制



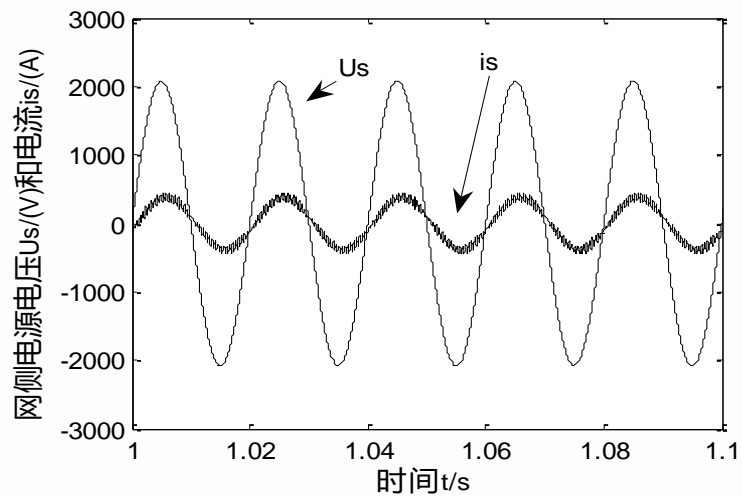
瞬态直接电流控制原理图

- 由上图可知，瞬态电流控制为双闭环控制系统，因此，对于某一参数变动时，控制系统具有自动校正调节功能，最终达到稳态平衡。

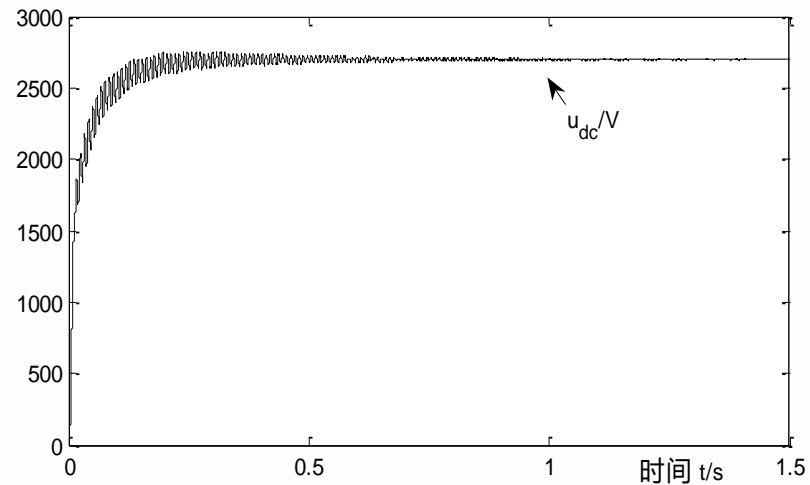


# 仿真结果

## 1、牵引工况下



网侧电压与电流波形

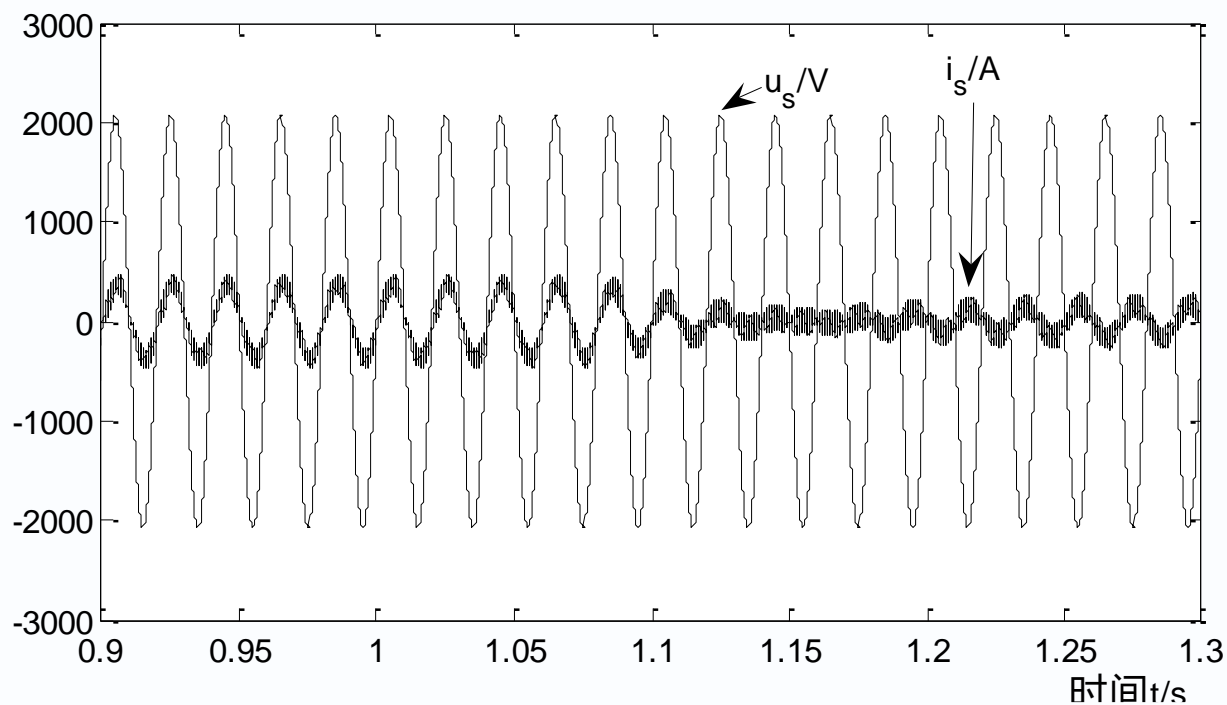


直流侧电压波形



# 仿真结果

## 2、牵引工况向再生工况切换

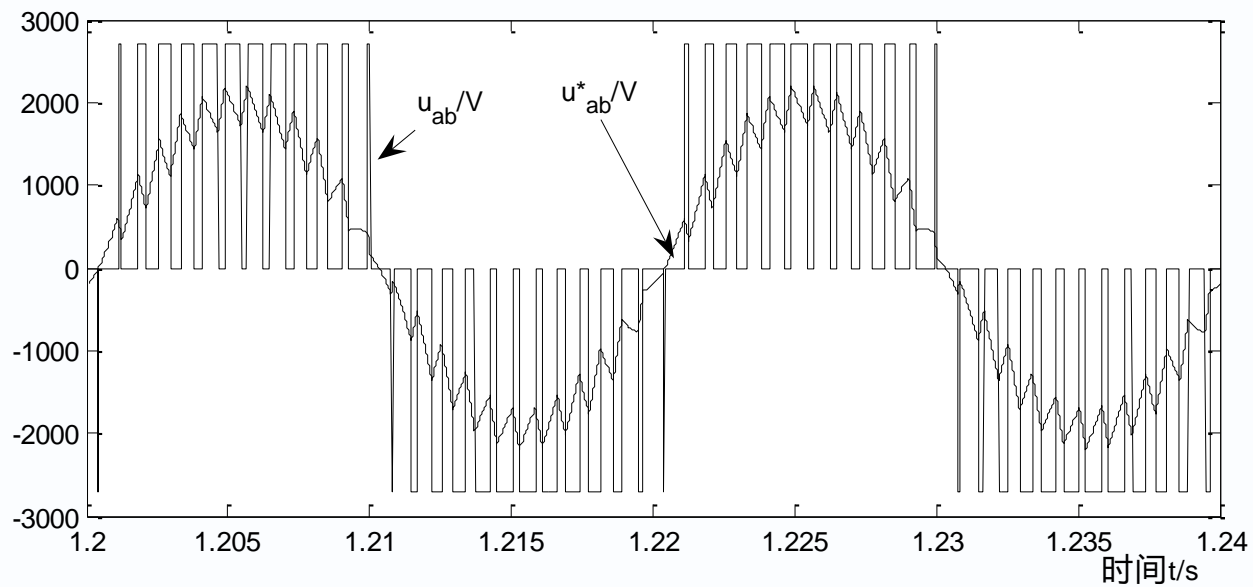


网侧电压与电流波形



# 仿真结果

## 3、牵引工况下

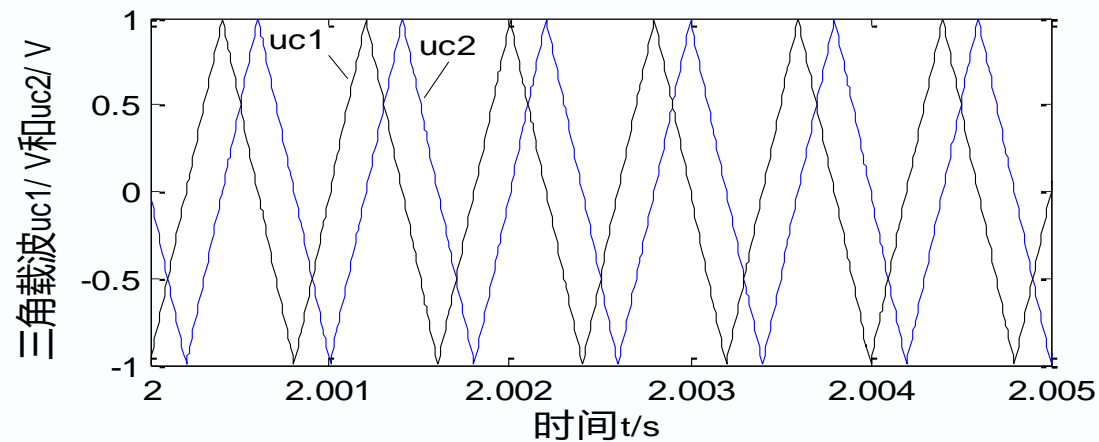
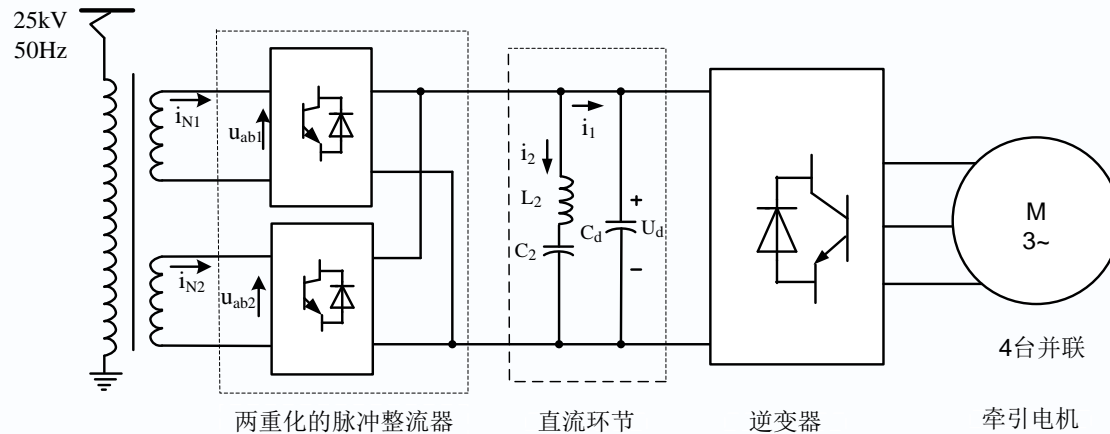


网侧输入端电压 $U_{ab}$ 波形



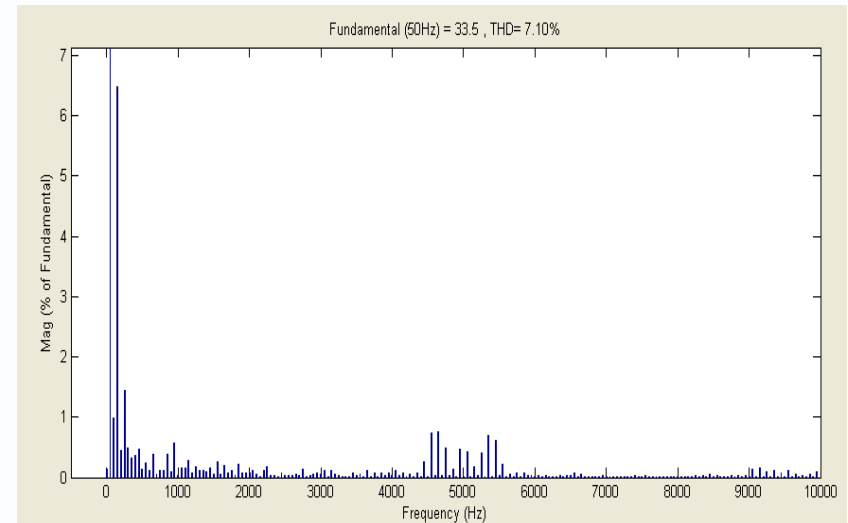
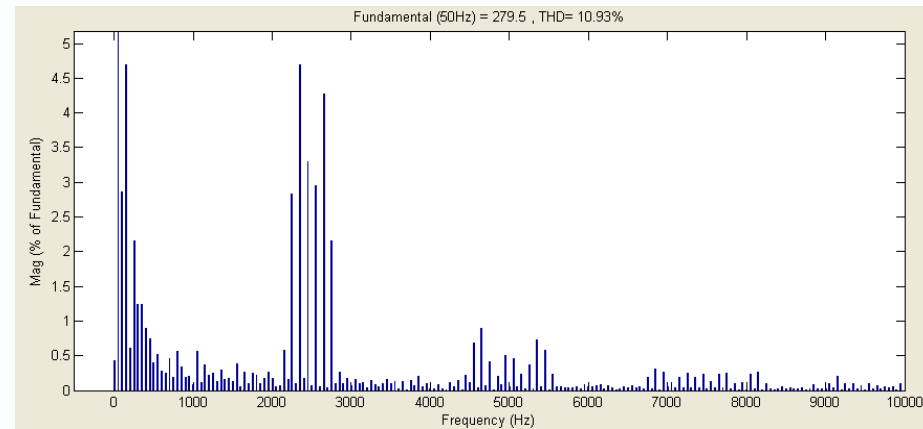
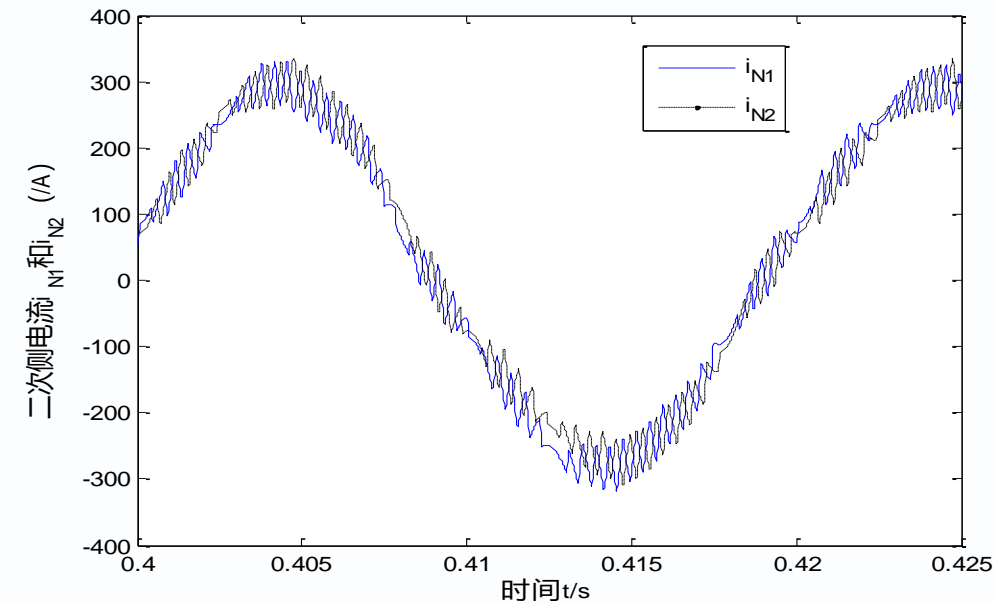


# 5.4 脉冲整流器的多重化



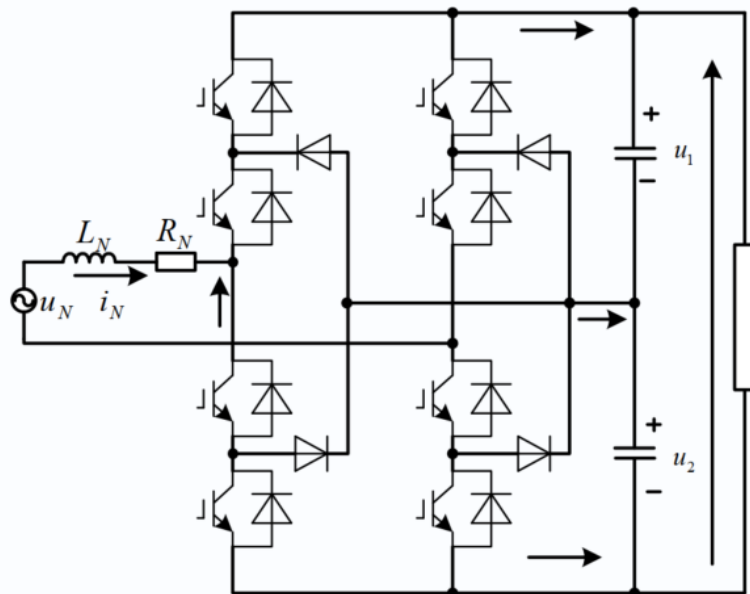


# 5.4 脉冲整流器的多重化

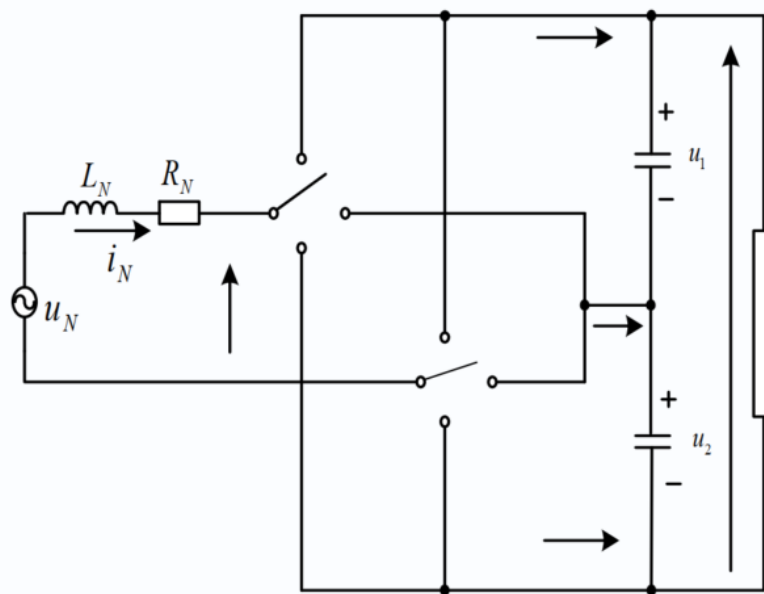




## 5.5 三电平脉冲整流器



主电路



等效开关电路

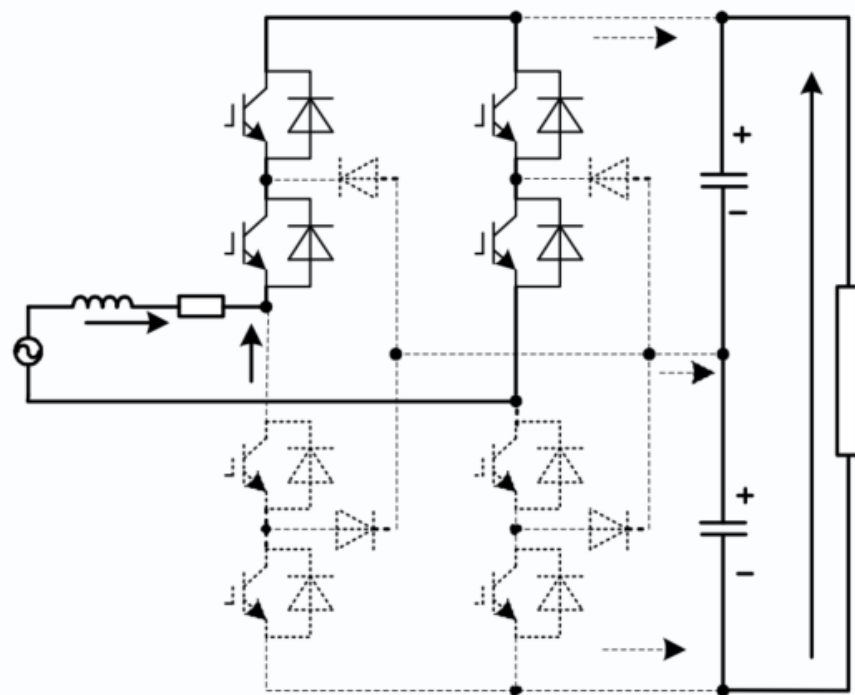
- 电路共有 $3^2 = 9$ 种开关组合，  
对应主电路有9种工作模式



# 三电平脉冲整流器开关工作模式

## 工作模式1( $S_A=1$ , $S_B=1$ ):

- 开关管 $T_{a1}$ ,  $T_{a2}$ ,  $T_{b1}$ 和 $T_{b2}$ 导通,  $T_{a3}$ ,  $T_{a4}$ ,  $T_{b3}$ 和 $T_{b4}$ 关断, 网侧端电压 $u_{ao}=u_1$ ,  $u_{bo}=u_1$ ,  $u_{ab}=0$ 。如果网侧电源电压 $u_N>0$ , 则网侧电流 $i_N$ 增大, 电容 $C_1$ 和 $C_2$ 通过负载电流放电。



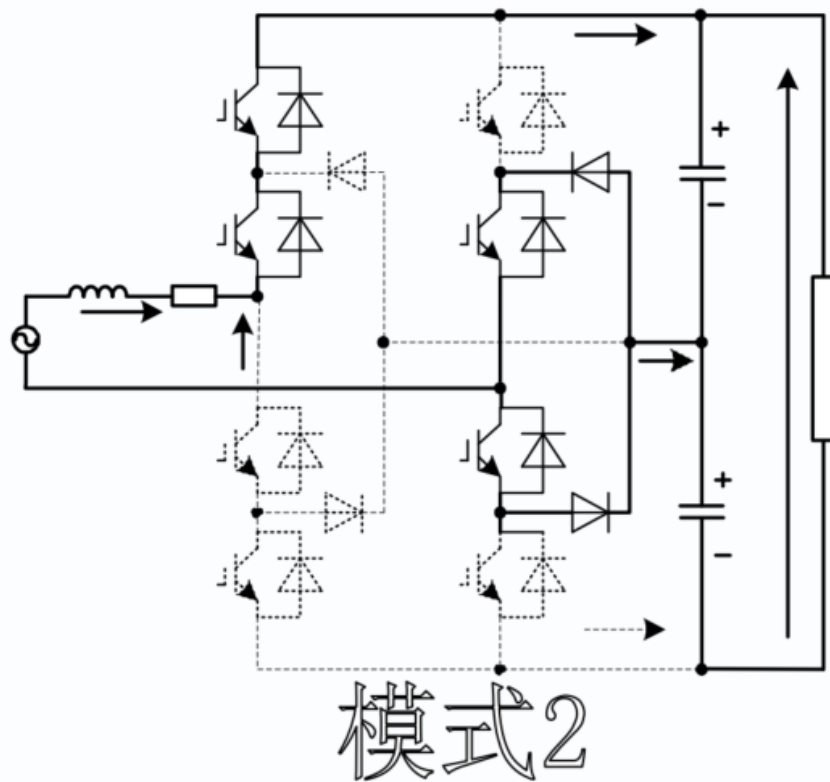
模式1



# 三电平脉冲整流器开关工作模式

## 工作模式2( $S_A=1$ , $S_B=0$ ):

- 开关管 $T_{a1}$ ,  $T_{a2}$ ,  $T_{b2}$ 和 $T_{b3}$ 导通,  $T_{a3}$ ,  $T_{a4}$ ,  $T_{b1}$ 和 $T_{b4}$ 关断。
- 网侧端电压 $u_{ao}=u_1$ ,  $u_{bo}=0$ ,  $u_{ab}=u_1$ 。如果正向电源电压 $u_N$ 大于(或小于)直流侧电压 $U_d$ 的一半, 则网侧电流 $i_N$ 增大(或减小), 网侧电流对电容 $C_1$ 进行充电, 而电容 $C_2$ 通过负载电流放电。

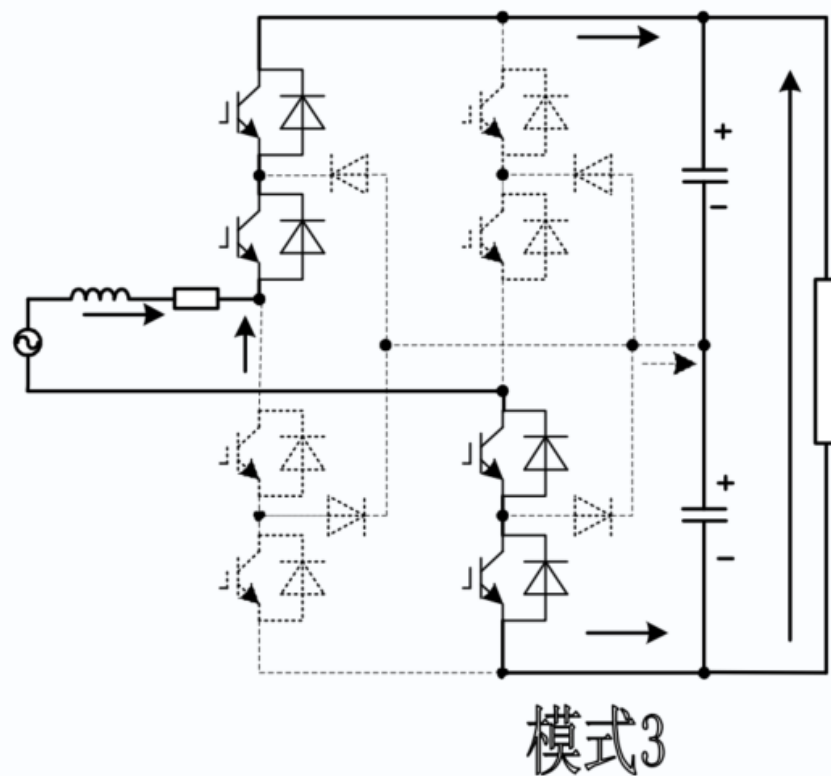




# 三电平脉冲整流器开关工作模式

## 工作模式3(SA=1, SB=-1):

- 开关管 $T_{a1}, T_{a2}, T_{b3}$ 和 $T_{b4}$ 导通， $T_{a3}, T_{a4}, T_{b1}$ 和 $T_{b2}$ 关断。
- 网侧端电压 $u_{ao}=u_1$ ， $u_{bo}=-u_2$ ， $u_{ab}=u_1+u_2$ 。由于是boost升压变换器，则有 $|u_N| < u_1+u_2$ ，所以正向网侧电流 $i_N$ 减小，正向网侧电流对电容 $C_1$ 和 $C_2$ 充电。

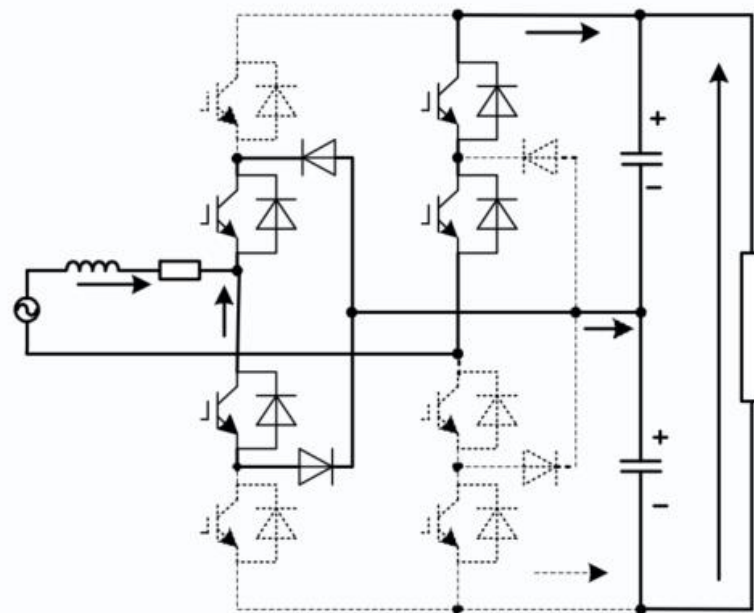




# 三电平脉冲整流器开关工作模式

## 工作模式4(SA=0, SB=1):

- 开关管 $T_{a2}$ ,  $T_{a3}$ ,  $T_{b1}$ 和 $T_{b2}$ 导通,  $T_{a1}$ ,  $T_{a4}$ ,  $T_{b3}$ 和 $T_{b4}$ 关断。
- 网侧端电压 $u_{ao}=0$ ,  $u_{bo}=u_1$ ,  $u_{ab}=-u_1$ 。如果反向的电源电压 $u_N$ 大于(或小于)直流侧电压 $U_d$ 的一半, 则网侧电流 $i_N$ 减小(或增大), 反向网侧电流对电容 $C_1$ 进行充电, 而电容 $C_2$ 通过负载电流放电。



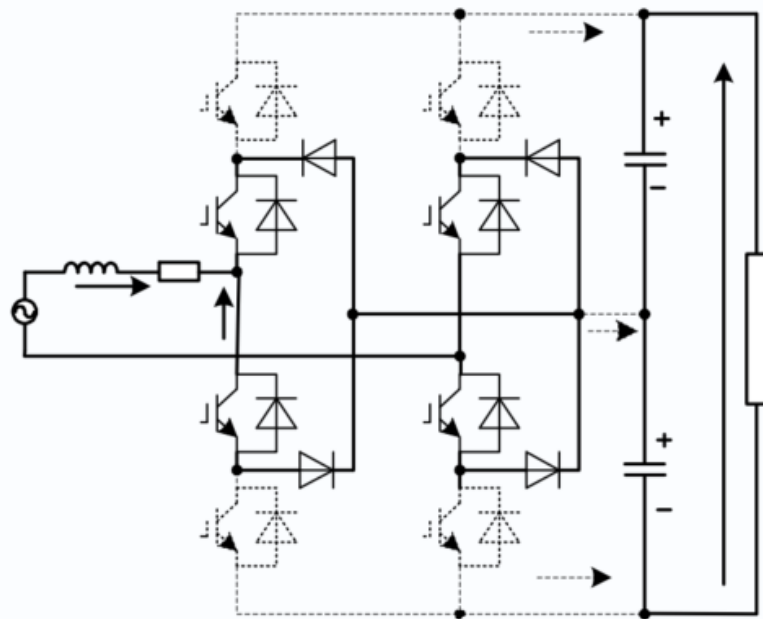
模式4



# 三电平脉冲整流器开关工作模式

## 工作模式5(SA=0, SB=0):

- 开关管 $T_{a2}$ ,  $T_{a3}$ ,  $T_{b2}$ 和 $T_{b3}$ 导通,  $T_{a1}$ ,  $T_{a4}$ ,  $T_{b1}$ 和 $T_{b4}$ 关断
- 网侧端电压 $u_{ao}=0$ ,  $u_{bo}=0$ ,  $u_{ab}=0$ 。如果网侧电源电压 $u_N > 0$ , 则正向网侧电流 $i_N$ 增大, 电容 $C_1$ 和 $C_2$ 通过负载电流放电。



模式5

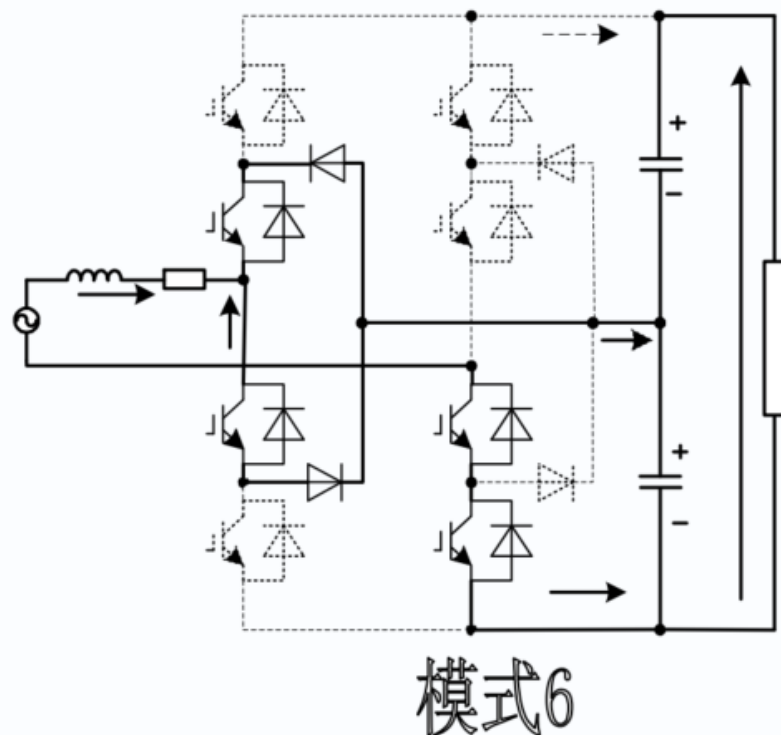




# 三电平脉冲整流器开关工作模式

## 工作模式6( $SA=0$ , $SB=-1$ ):

- 开关管 $T_{a2}$ ,  $T_{a3}$ ,  $T_{b3}$ 和 $T_{b4}$ 导通,  $T_{a1}$ ,  $T_{a4}$ ,  $T_{b1}$ 和 $T_{b2}$ 关断
- 网侧端电压 $u_{ao}=0$ ,  $u_{bo}=-u_2$ ,  $u_{ab}=u_2$ 。如果正向电源电压 $u_N$ 大于(或小于)直流侧电压 $U_d$ 的一半, 则网侧电流 $i_N$ 增大(或减小), 网侧电流对电容 $C_2$ 进行充电, 而电容 $C_1$ 通过负载电流放电。

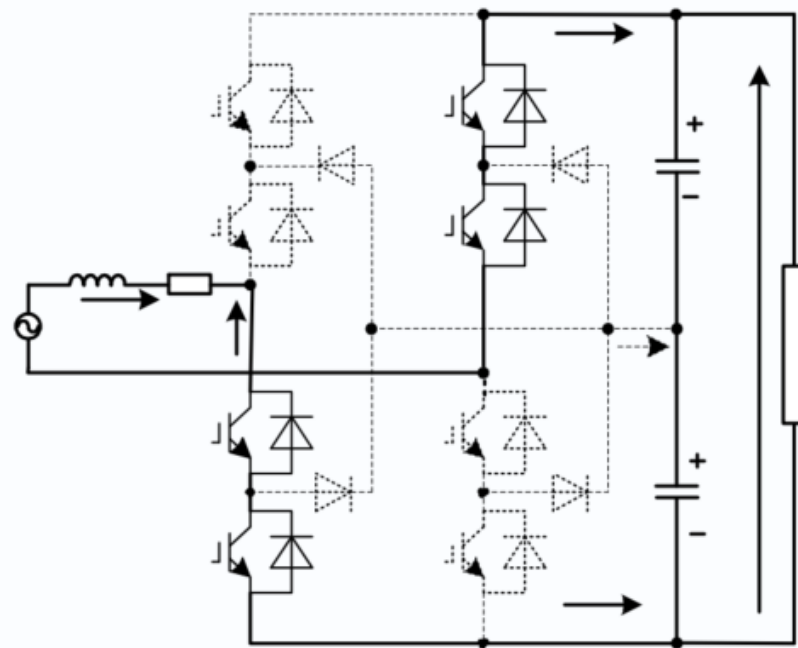




# 三电平脉冲整流器开关工作模式

工作模式7(SA=-1, SB=1):

- 开关管 $T_{a3}$ ,  $T_{a4}$ ,  $T_{b1}$ 和 $T_{b2}$ 导通,  $T_{a1}$ ,  $T_{a2}$ ,  $T_{b3}$ 和 $T_{b4}$ 关断
- 网侧端电压 $u_{ao} = -u_2$ ,  $u_{bo} = u_1$ ,  $u_{ab} = -u_1 - u_2$ 。反向网侧电流 $i_N$ 减小, 反向网侧电流对电容 $C_1$ 和 $C_2$ 进行充电。



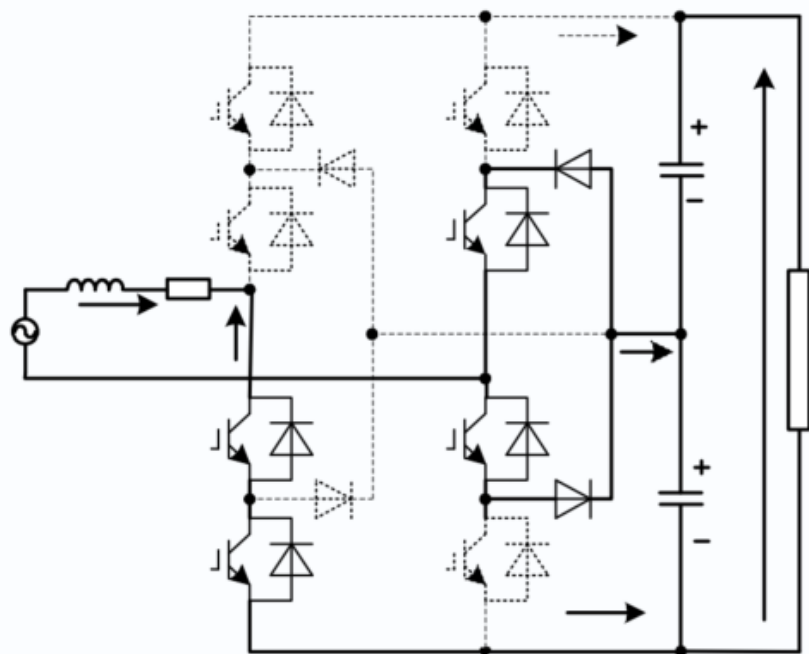
模式7



# 三电平脉冲整流器开关工作模式

工作模式8( $SA=-1$ ,  $SB=0$ ):

- 开关管 $T_{a3}$ ,  $T_{a4}$ ,  $T_{b2}$ 和 $T_{b3}$ 导通,  $T_{a1}$ ,  $T_{a2}$ ,  $T_{b1}$ 和 $T_{b4}$ 关断
- 网侧端电压 $u_{ao}=-u_2$ ,  $u_{bo}=0$ ,  $u_{ab}=-u_2$ 。如果反向的电源电压 $u_N$ 大于(或小于)直流侧电压 $U_d$ 的一半, 则网侧电流 $i_N$ 减小(或增大); 反向网侧电流对电容 $C_2$ 进行充电, 而电容 $C_1$ 通过负载电流放电。



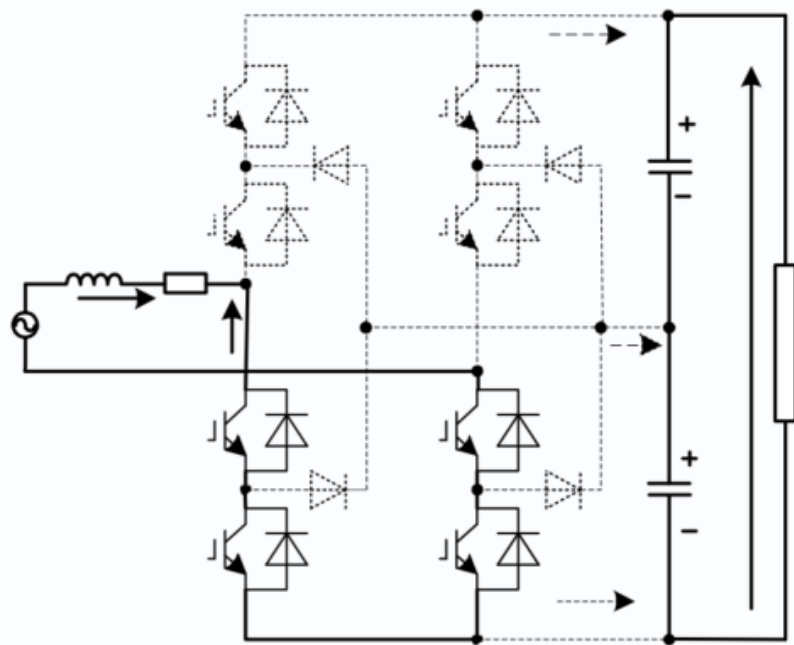
模式8



# 三电平脉冲整流器开关工作模式

工作模式9 ( $SA=-1$ ,  $SB=-1$ ):

- 开关管 $T_{a3}$ ,  $T_{a4}$ ,  $T_{b3}$ 和 $T_{b4}$ 导通,  $T_{a1}$ ,  $T_{a2}$ ,  $T_{b1}$ 和 $T_{b2}$ 关断
- 网侧端电压 $u_{ao}=-u_2$ ,  $u_{bo}=-u_2$ ,  $u_{ab}=0$ 。如果网侧电源电压 $u_N>0$ , 则正向网侧电流 $i_N$ 增大, 电容 $C_1$ 和 $C_2$ 通过负载电流放电。



模式9



# 三电平脉冲整流器的优点

- 每一个功率器件所承受的关断电压仅为直流侧电压的一半。这样在相同的情况下，直流电压就可以提高一倍，容量也可以提高一倍。
- 在同样的开关频率及控制方式下，三电平四象限脉冲整流器输出电压或电流的谐波大大小于两电平四象限脉冲整流器，因此它的总谐波失真THD也要远小于两电平四象限脉冲整流器。
- 三电平四象限脉冲整流器输入侧的电流波形即使在开关频率很低时，也能保证一定的正弦度。

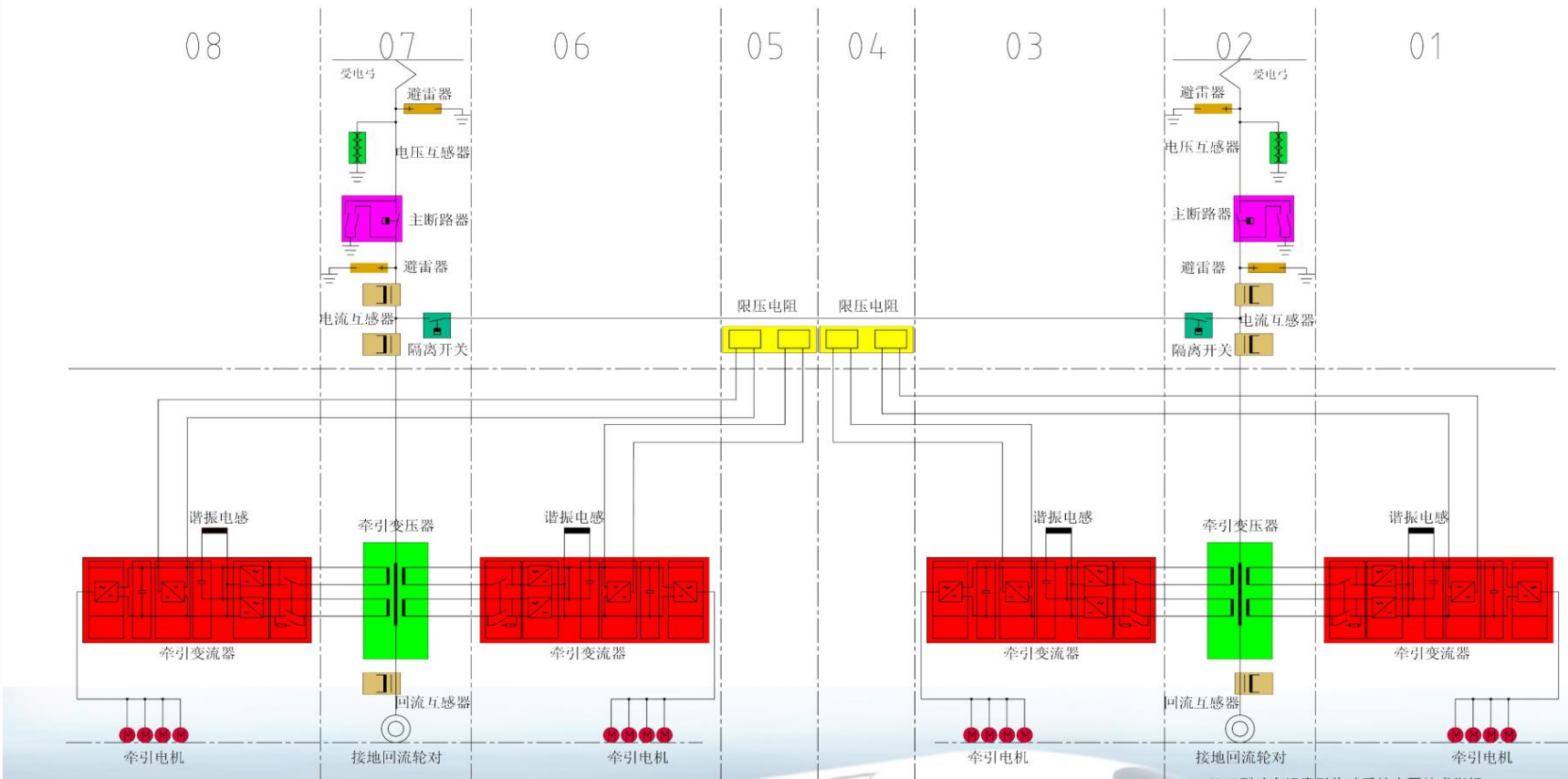




# 5.6 中间直流回路

CRH<sub>3</sub> 型动车组技术系列挂图

牵引系统原理图



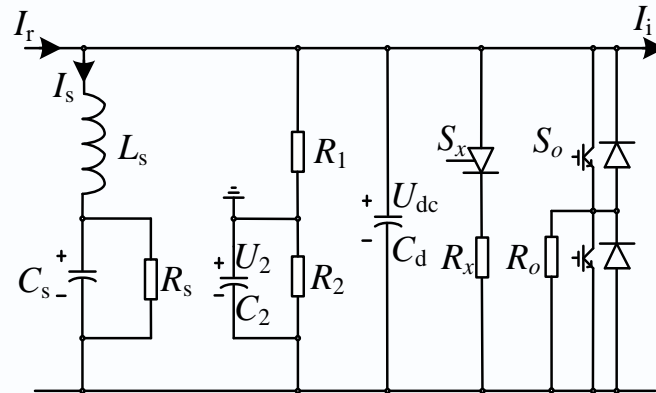
CRH3型动车组牵引传动系统主要技术指标

序号	技术指标	指标值
1	额定工作网压	交流25KV
2	轮周最大牵引功率	8800KW
3	轮轴最大再生制动功率	8000KW
4	启动牵引力	300KN
5	传动比	2.793
6	中间直流环节电压(牵引时)	2700-3600V



# 5.6 中间直流回路

## 中间直流回路电路



## 中间直流回路数学模型:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_s}{dt} \\ \frac{du_s}{dt} \\ \frac{dU_2}{dt} \\ \frac{dU_{dc}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_s} & 0 & \frac{1}{L_s} \\ \frac{1}{C_s} & -\frac{1}{C_s R_s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C_2} & \frac{1}{R_1 C_2} \\ -\frac{1}{C_d} & 0 & \frac{1}{R_1 C_d} & -\frac{1}{R_1 C_d} - \frac{S_x}{R_x C_d} - \frac{S_o}{R_o C_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ u_s \\ U_2 \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{I_r - I_i}{C_d} \end{bmatrix}$$



## 5.6 中间直流回路分析

中间直流回路输入电压电流定义为：

$$u_N = \sqrt{2}U_N \cos(\omega_{\text{net}} t)$$

$$i_N = \sqrt{2}I_N \cos(\omega_{\text{net}} t + \phi)$$

单相脉冲整流器的输入输出功率：

$$P_{\text{in}} = u_N i_N = U_N I_N \cos \phi + U_N I_N \cos(2\omega_{\text{net}} t + \phi)$$

$$P_{\text{out}} = U_{\text{dc}} I_{\text{dc}} + C_d U_{\text{dc}} \frac{d\tilde{u}_{\text{dc}}}{dt}$$

假设脉冲整流器的功率损耗可以忽略不计，则输入输出功率相等。

$$\tilde{u}_{\text{dc}} = \frac{U_N I_N \sin(2\omega_{\text{net}} t + \phi)}{2\omega_{\text{net}} C_d U_{\text{dc}}}$$

$$\tilde{u}_{\text{dc}} = \frac{I_{\text{dc}} \sin(2\omega_{\text{net}} t + \phi)}{2\omega_{\text{net}} C_d \cos \phi}$$





**本章结束！**