杭州电子科技大学

《电力电子技术》

第4章 交流-直流变换技术

自动化学院

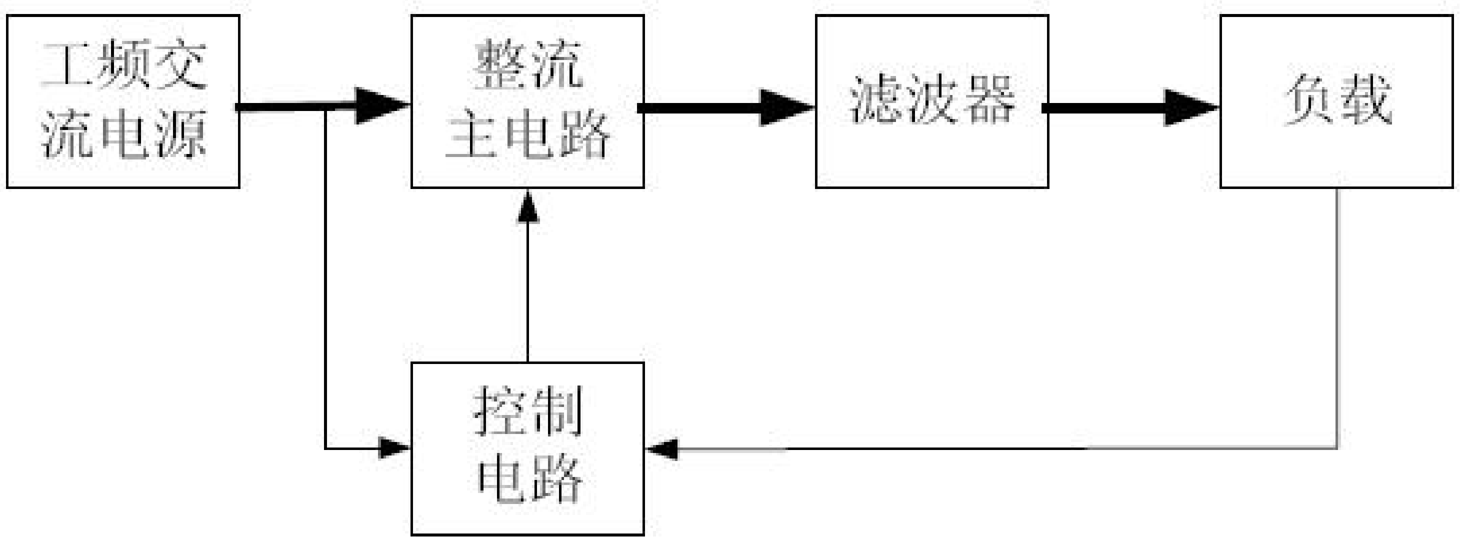
4.0 概　述

- P200 1

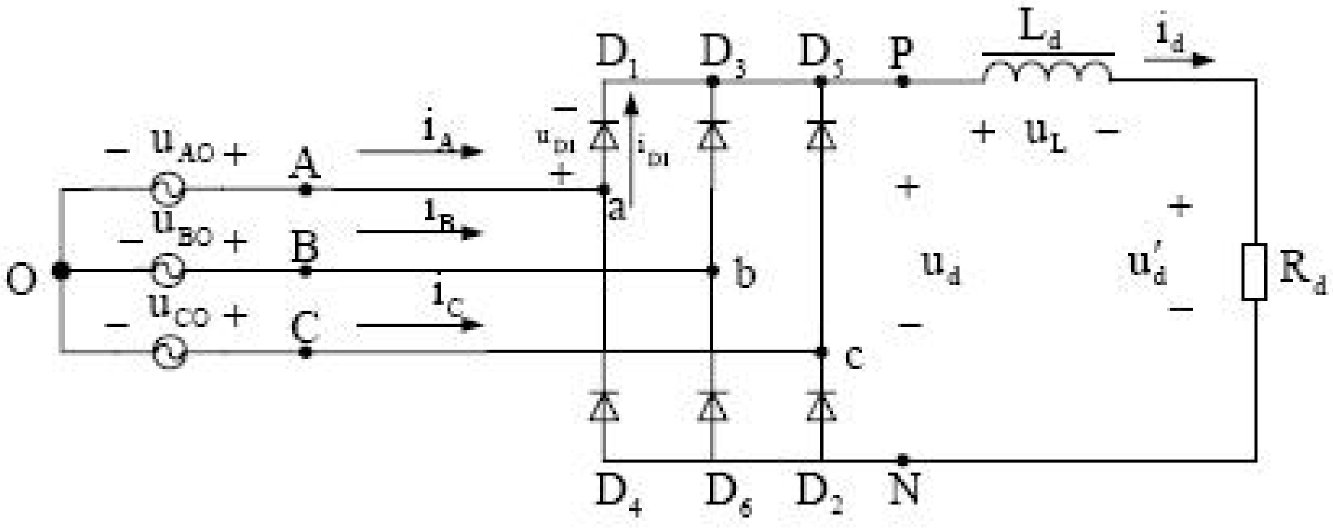
P200 2

P200 3

可控整流电路的一般结构



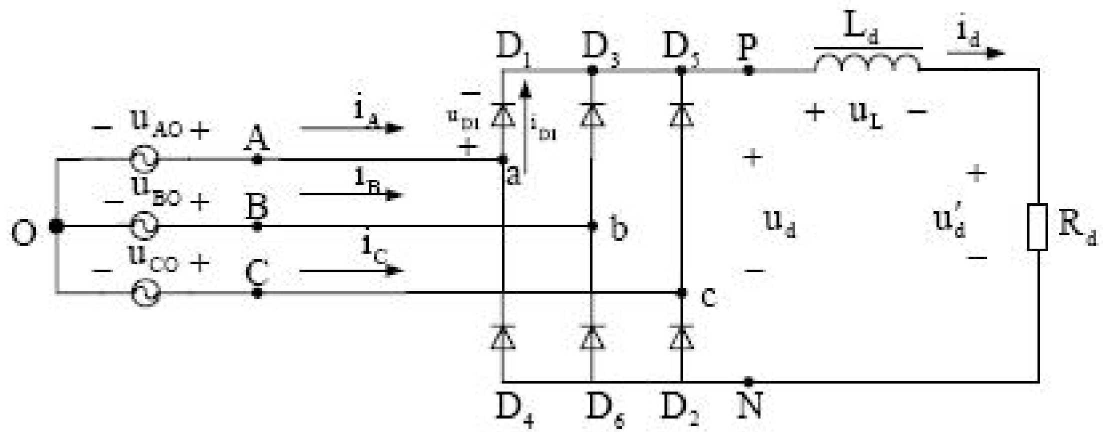
P202 2



理想条件：

p202 1

电路分析



②直流侧输出电压 $u_d=u_{PO}-u_{NO}$

$$u_{PO}=\begin{cases}u_{AO} & D_1\text{导通时}\\ u_{BO} & D_3\text{导通时}\\ u_{CO} & D_5\text{导通时}\end{cases}\qquad u_{NO}=\begin{cases}u_{AO} & D_4\text{导通时}\\ u_{BO} & D_6\text{导通时}\\ u_{CO} & D_2\text{导通时}\end{cases}$$

$$u_d=\begin{cases}u_{AB} & D_1D_6\text{导通时} & u_{BA} & D_3D_4\text{导通时}\\ u_{AC} & D_1D_2\text{导通时} & u_{CA} & D_4D_5\text{导通时}\\ u_{BC} & D_2D_3\text{导通时} & u_{CB} & D_5D_6\text{导通时}\end{cases}$$

P204 1

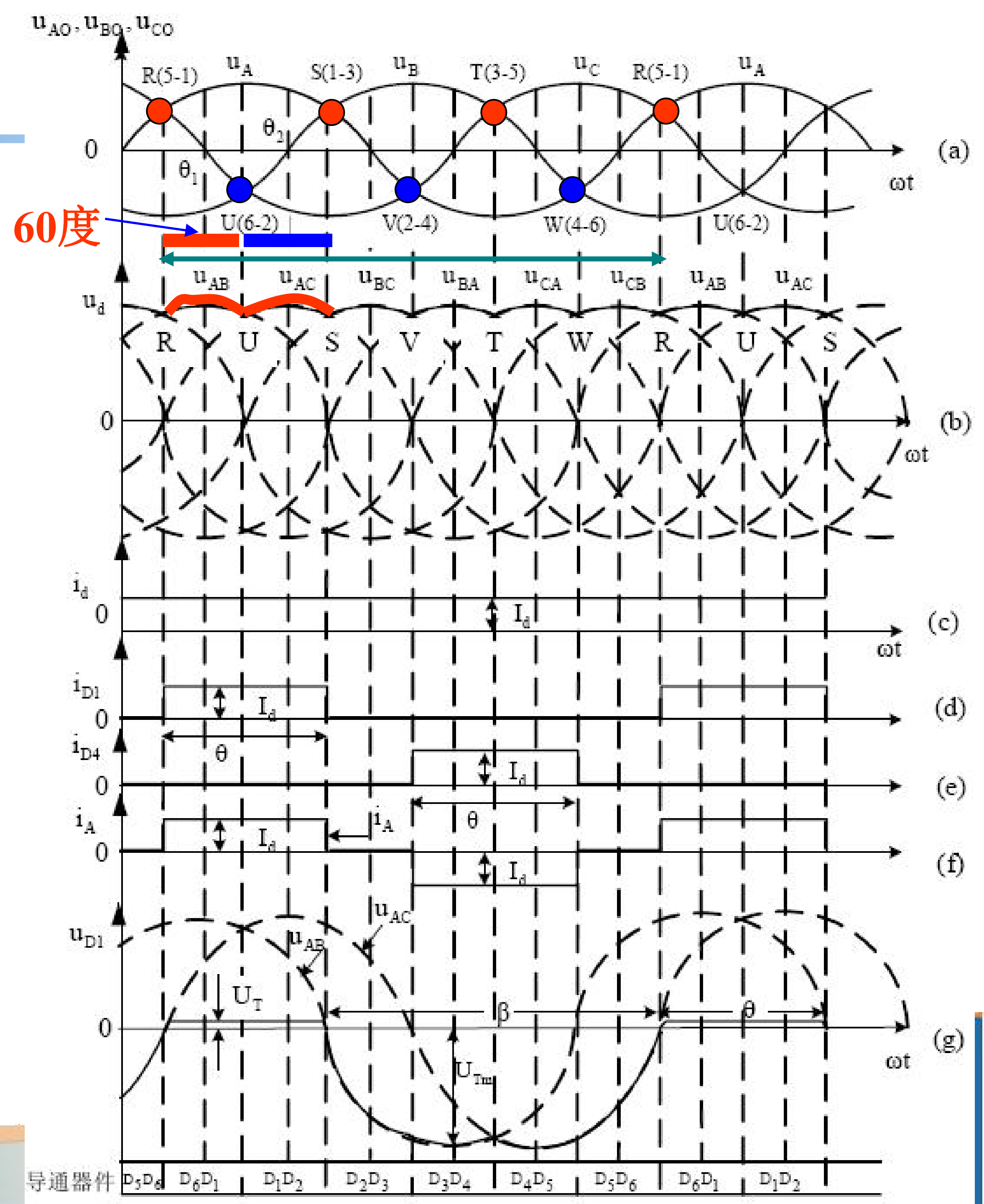
P204 2

P204 3

上管的导通顺序：RST(135)

下管的导通顺序：UVW(246)

任何时候上下只有各一只器件导通，一个周期内每一器件的导电角度:120度



主电量计算

① 整流电路输出电压平均值和谐波：

整流电路输出电压是非正弦的时间周期函数。u_d包含直流分量和多次谐波分量。

将 u_d 用傅里叶级数表示：

$$u_d = U_d + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin n\omega t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos n\omega t = U_d + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega t - \theta_n)$$

式中

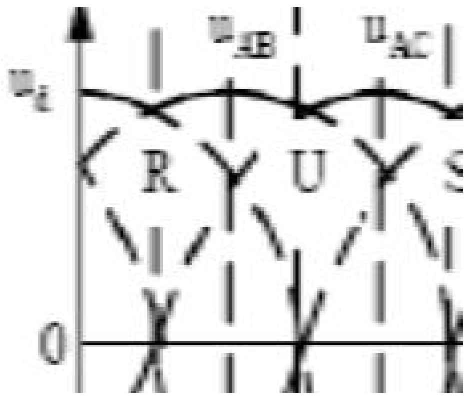
$$c_n^2 = a_n^2 + b_n^2$$

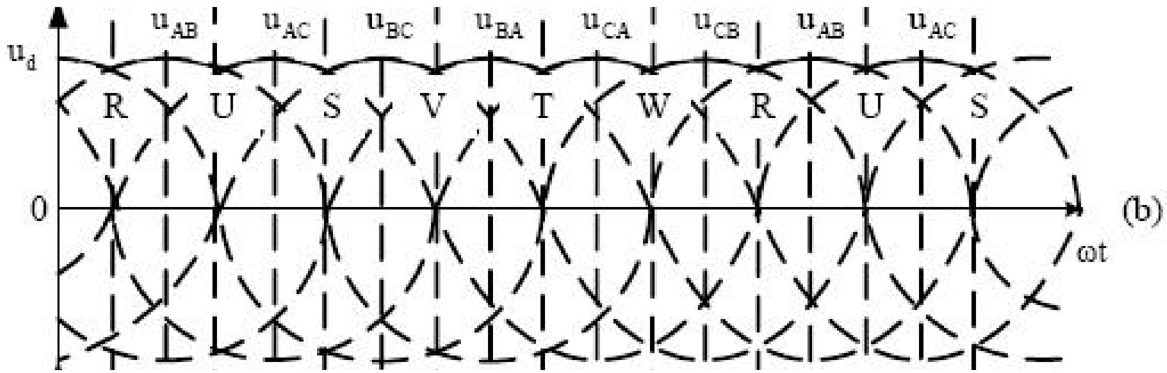
$$\theta_n = tg^{-1}\frac{a_n}{b_n}$$

$$a_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} u_d \sin n\omega t d\omega t$$

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} u_d \cos n\omega t d\omega t$$

$$U_d = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} u_d d\omega t$$





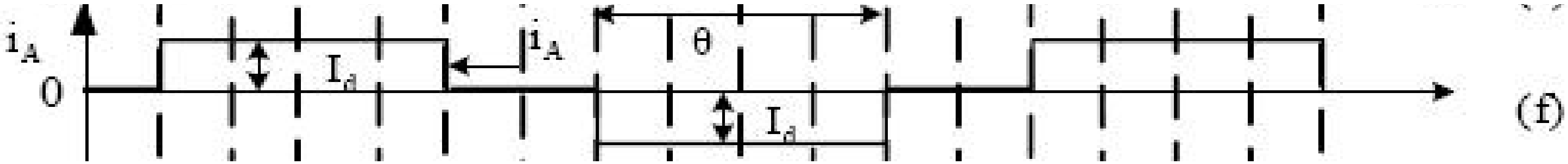
注意到各脉动区间 u_d 的变化规律相同；u_d 中不含奇次谐波；偶次谐波中最低为六次；高次谐波为六的整数倍，故上式组可改写为

$$U_d = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} u_d d\omega t = \frac{3}{\pi}\int_{\pi/6}^{\pi/2} u_{AB} d\omega t = \frac{3}{\pi}\int_{\pi/6}^{\pi/2}\sqrt{6}U_2\sin(\omega t+\frac{\pi}{6})d\omega t = \frac{3\sqrt{6}}{\pi}U_2 \tag{5.10}$$

$$a_n = \frac{6}{\pi}\int_{\pi/6}^{\pi/2}\sqrt{6}U_2\sin(\omega t+\frac{\pi}{6})\sin n\omega t d\omega t \tag{5.11}$$

$$b_n = \frac{6}{\pi}\int_{\pi/6}^{\pi/2}\sqrt{6}U_2\sin(\omega t+\frac{\pi}{6})\cos n\omega t d\omega t \tag{5.12}$$

式中 n=6k，　k=1,2,3　···



②线电流有效值：

$$I_A=\sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} i_A^2 d\omega t}$$

图 5.2(f)所示：

$$i_A=i_{D1}-i_{D4}=\begin{cases} I_d & ,\quad (\pi/6<\omega t<5\pi/6) \\ 0 & ,\quad (5\pi/6<\omega t<7\pi/6,11\pi/6<\omega t<13\pi/6) \\ -I_d & ,\quad (7\pi/6<\omega t<11\pi/6) \end{cases}$$

因此 $$I_A=\sqrt{\frac{1}{2\pi}[I_d^2\times\frac{2\pi}{3}+(-I_d)^2\times\frac{2\pi}{3}]}=\sqrt{\frac{2}{3}}I_d=0.816I_d$$

③线电流基波有效值：

利用傅里叶级数展开 i_A 可得

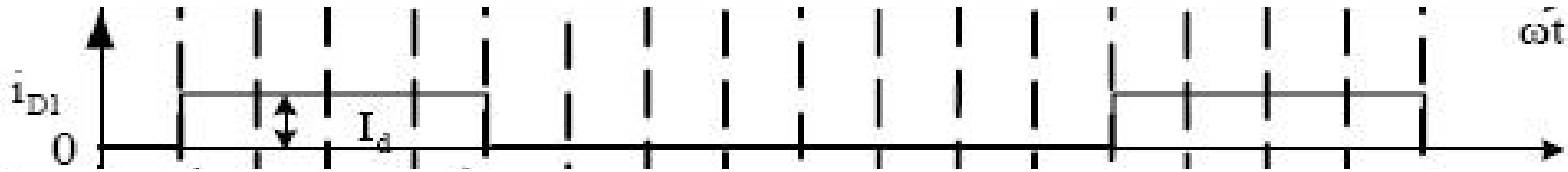
$$i_A = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d (\sin \omega t - \frac{1}{5}\sin 5\omega t - \frac{1}{7}\sin 7\omega t + \cdots + \frac{1}{n}\sin n\omega t)$$

$$= I_{A1m}\sin \omega t - I_{A5m}\sin 5\omega t - I_{A7m}\sin 7\omega t + \cdots + I_{Anm}\sin n\omega t$$

式中：

线电流基波幅值 $I_{A1m} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d$

线电流基波有效值 $I_{A1} = \frac{I_{A1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d = 0.78 I_d$



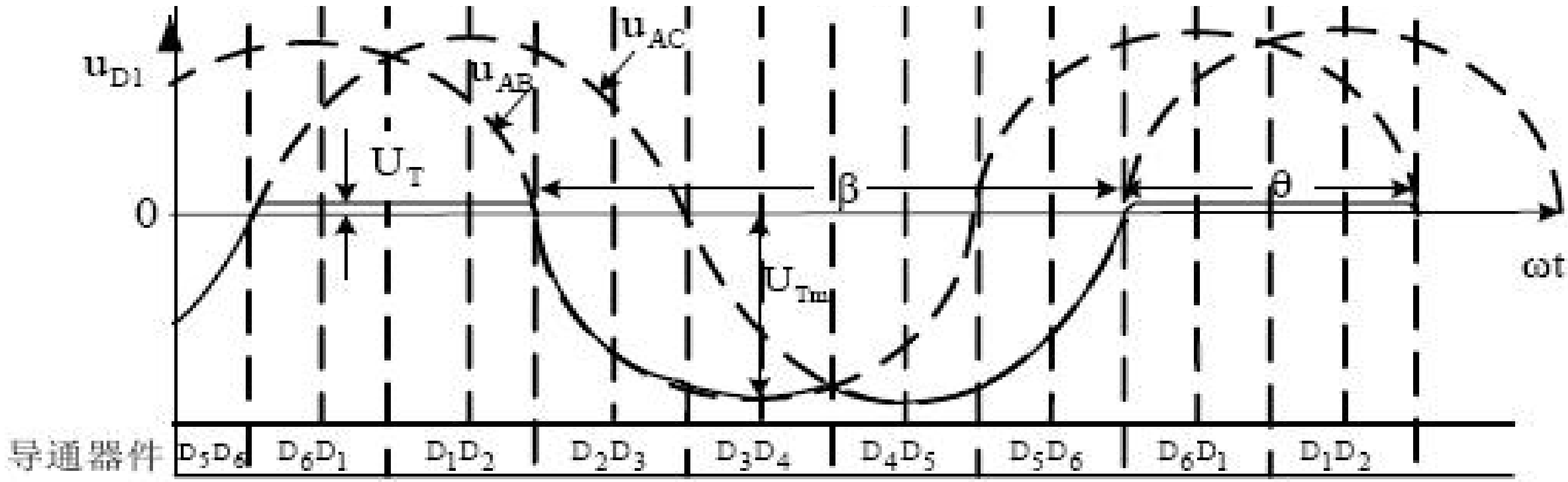
④ 二极管电流平均值（以器件 D_1 为例）：

$$I_{D0}=\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} i_{D1}d\omega t$$

图 5.2(d)所示：

$$i_{D1}=\begin{cases} I_d & ,(\pi/6<\omega t<5\pi/6) \\ 0 & ,(5\pi/6<\omega t<13\pi/6) \end{cases}$$

因此 $$I_{D0}=\frac{1}{2\pi}I_d\times\frac{2\pi}{3}=\frac{I_d}{3}$$



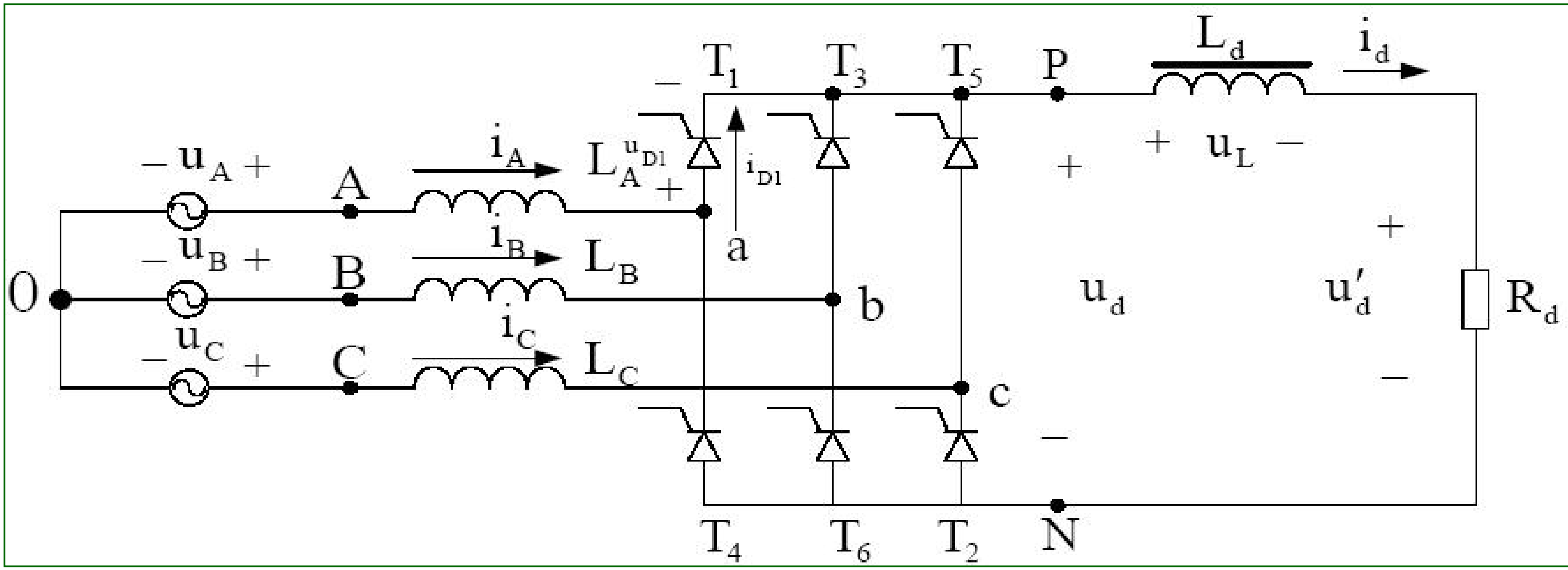
⑤ 二极管端压（以器件 D_1 为例）：

当 D_1 导通时，其端压为二极管通态电压。当 D_3 导通时，$u_{PO}=u_{BO}$，因此其端压为 u_{AB}。当 D_5 导通时，$u_{PO}=u_{CO}$，因此其端压为 u_{AC}。如图 5.2（h）所示。

$$u_{D1}=\begin{cases} U_{T0}, & D_1\text{导通时} \\ u_{AB}, & D_3\text{导通时} \\ u_{AC}, & D_5\text{导通时} \end{cases}$$

二极管端压峰值 $U_{Tm}=U_{Rm}=\sqrt{6}U_2$ （5.19）

P207 1



T_1 T_3 T_5 P L_d i_d
u_A i_A L_A u_{D1} i_{D1}
A a
u_B i_B L_B
0 B b
u_C i_C L_C
C c
u_L u_d u'_d R_d
T_4 T_6 T_2 N

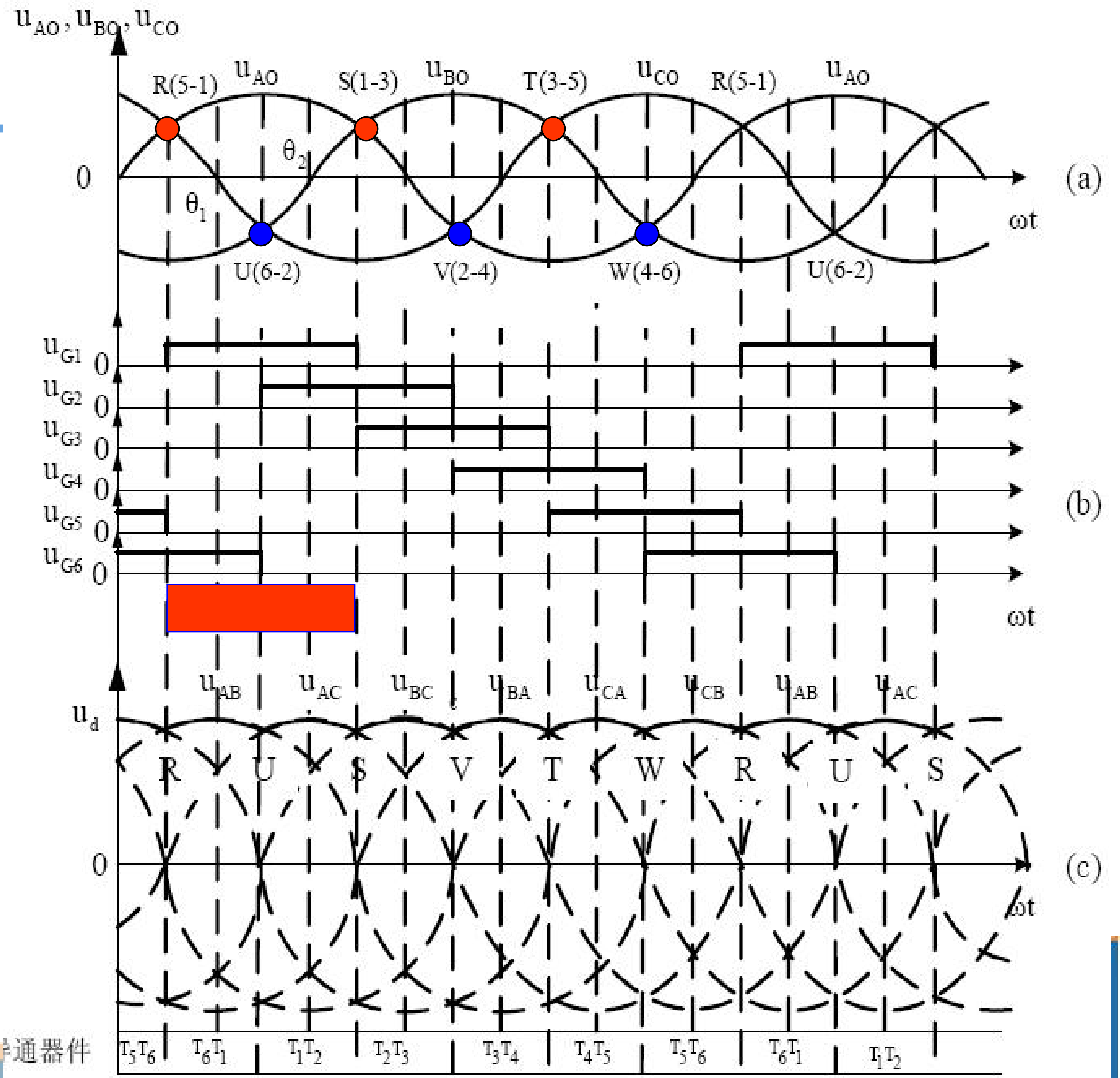
Labc=0

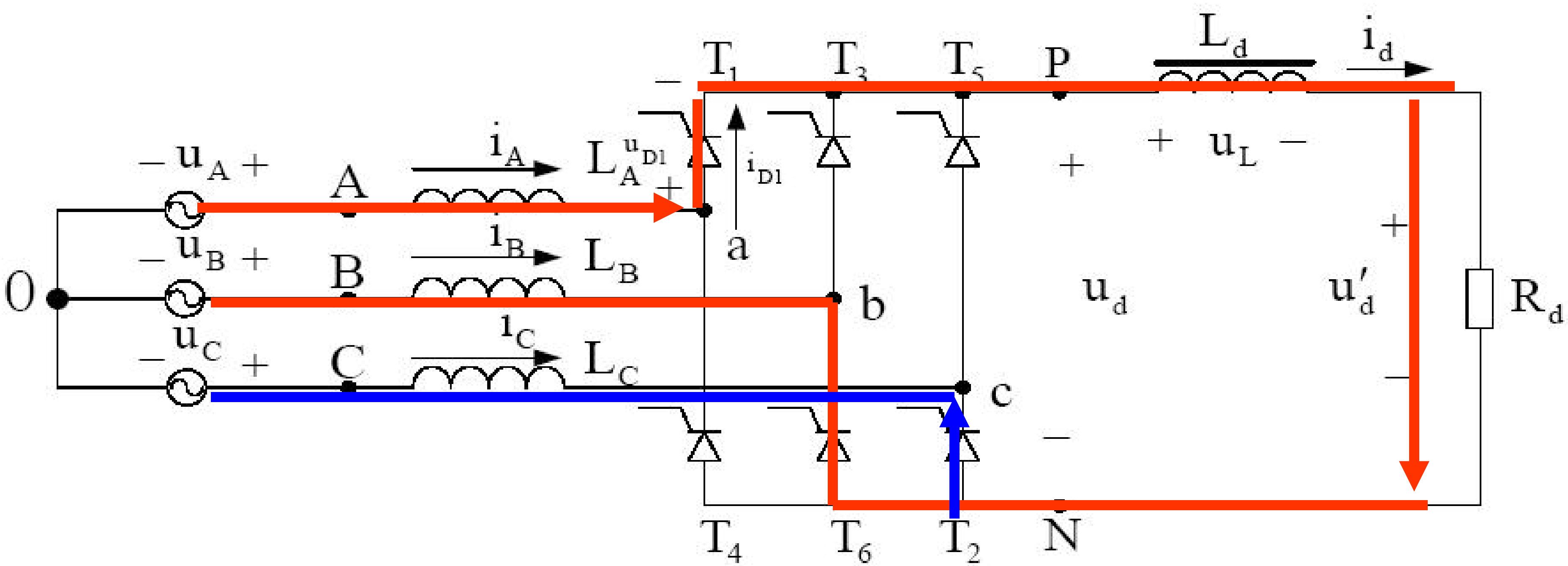
P208 1

P208 2

$$\alpha = 0$$

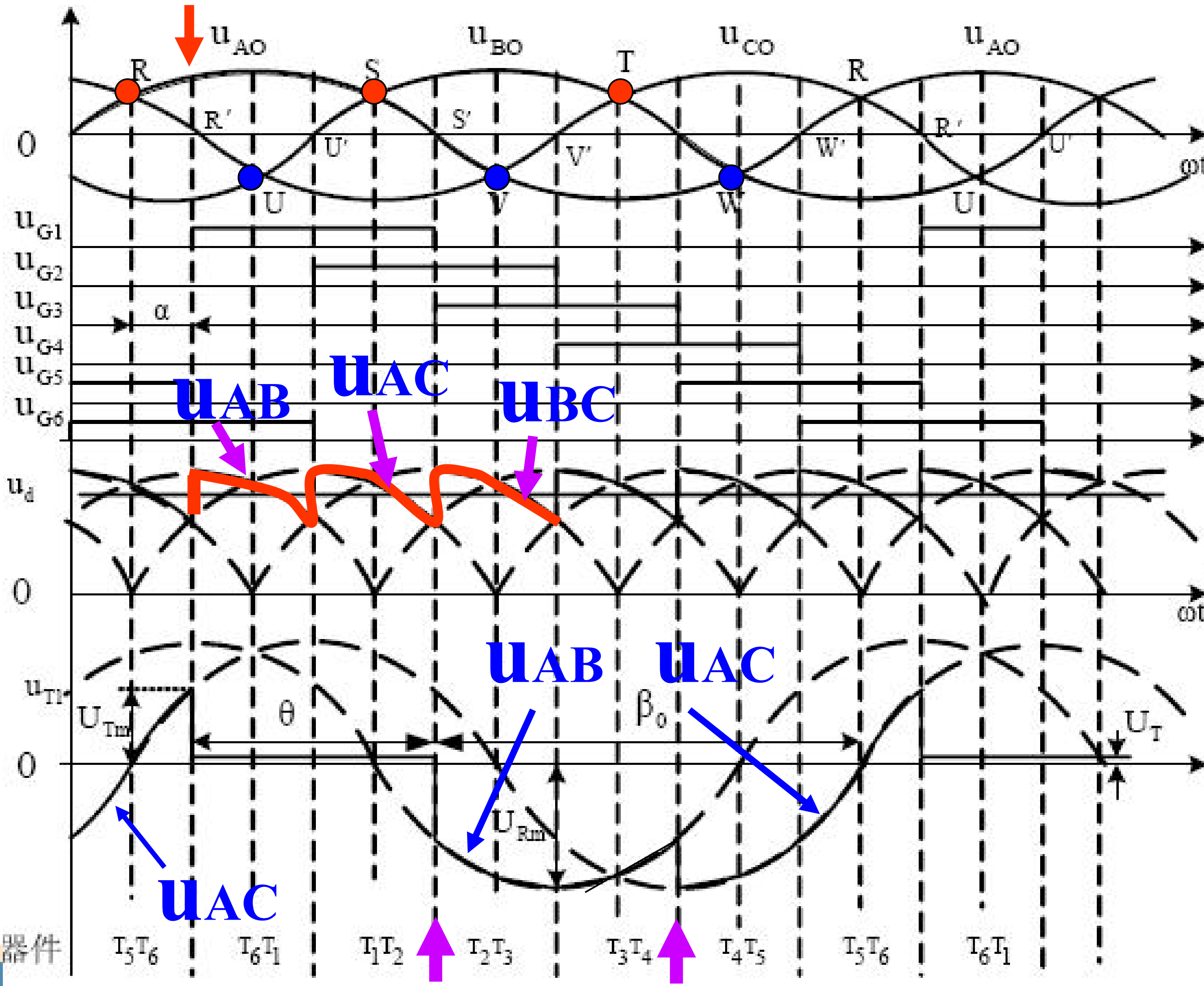
P209 1





电流路经 各导通120度

$$\alpha = \pi / 6$$



u_{AO}
u_{BO}
u_{CO}
u_{AO}
R
S
T
R
R'
S'
U'
V'
W'
R'
U'
U
V
W
U
0
ωt
u_{G1}
u_{G2}
u_{G3}
u_{G4}
u_{G5}
u_{G6}
α
u_{AB}
u_{AC}
u_{BC}
u_d
0
ωt
u_{T1}
U_{Tm}
θ
β_0
U_T
0
U_{Rm}
u_{AB}
u_{AC}
u_{AC}
器件
T_5T_6
T_6T_1
T_1T_2
T_2T_3
T_3T_4
T_4T_5
T_5T_6
T_6T_1

输出平均电压Ud

30度 u_{AB}

$$U_d = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} u_d d\omega t = \frac{3}{\pi}\int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/2+\alpha} \sqrt{6}U_2 \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) d\omega t$$

$$= \frac{3\sqrt{6}}{\pi}U_2 \cos\alpha = U_{d0}\cos\alpha$$

式中 $U_{d0} = (3\sqrt{6}/\pi)U_2$

结论：调节控制角可以改变 Ud＝ 0～Ud0 或＝－Ud0～0

分界点： $\alpha = \pi/2$

整流或逆变

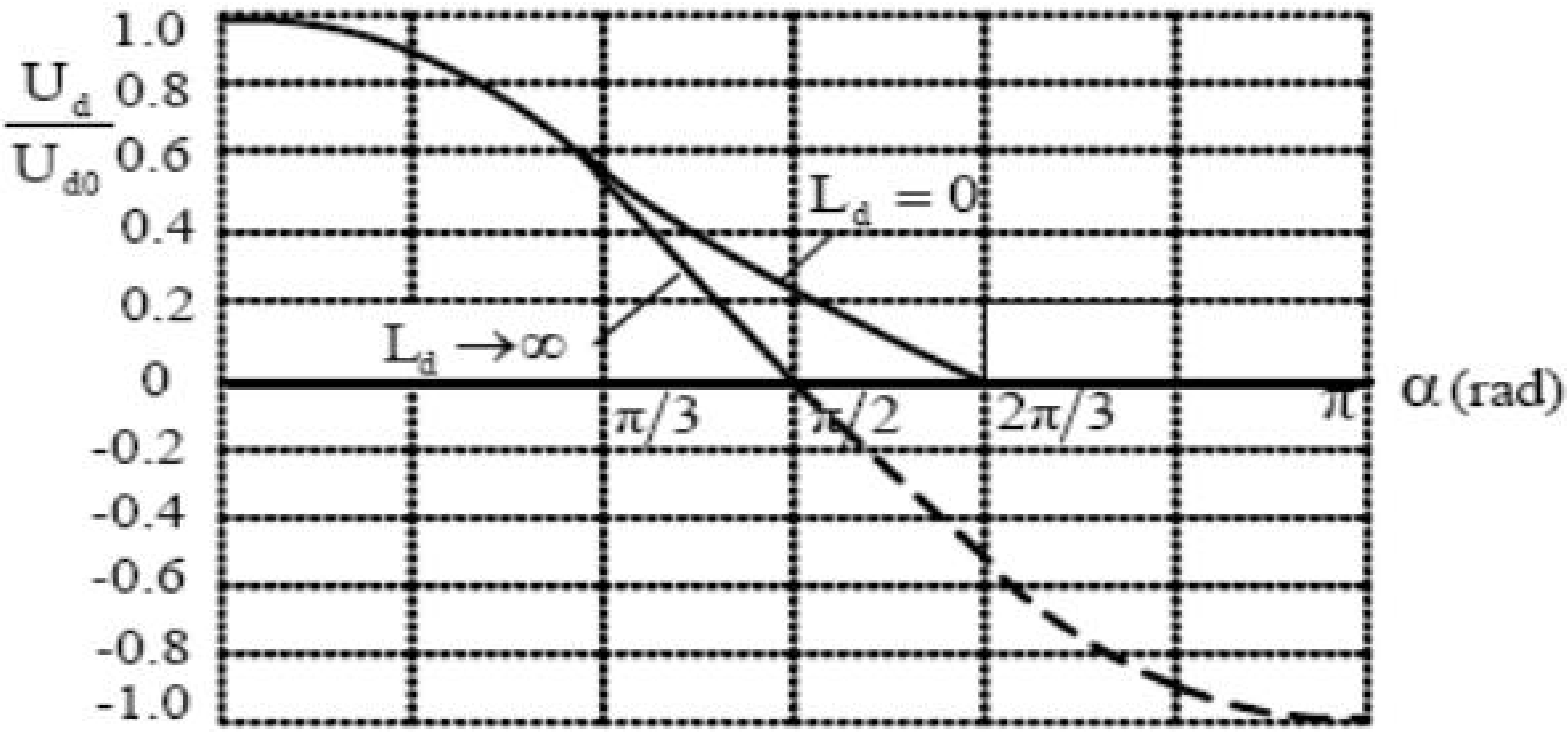


图 5.8 三相桥式整流电路的控制特性

P211 1

5.2.2 负载性质对整流电路性能的影响

5.2.2.1 纯阻性负载（L_d=0）

电流连续时，Ud波形与电感Ld无穷大下情况一样。

由于 L_d=0，输出电压 u_d' 中谐波含量明显增加。

$\alpha = \pi / 3$ rad 是电流连续的临界状态

当 $\alpha > \pi / 3$ rad 时，电流出现断续

$\alpha = \pi / 3$

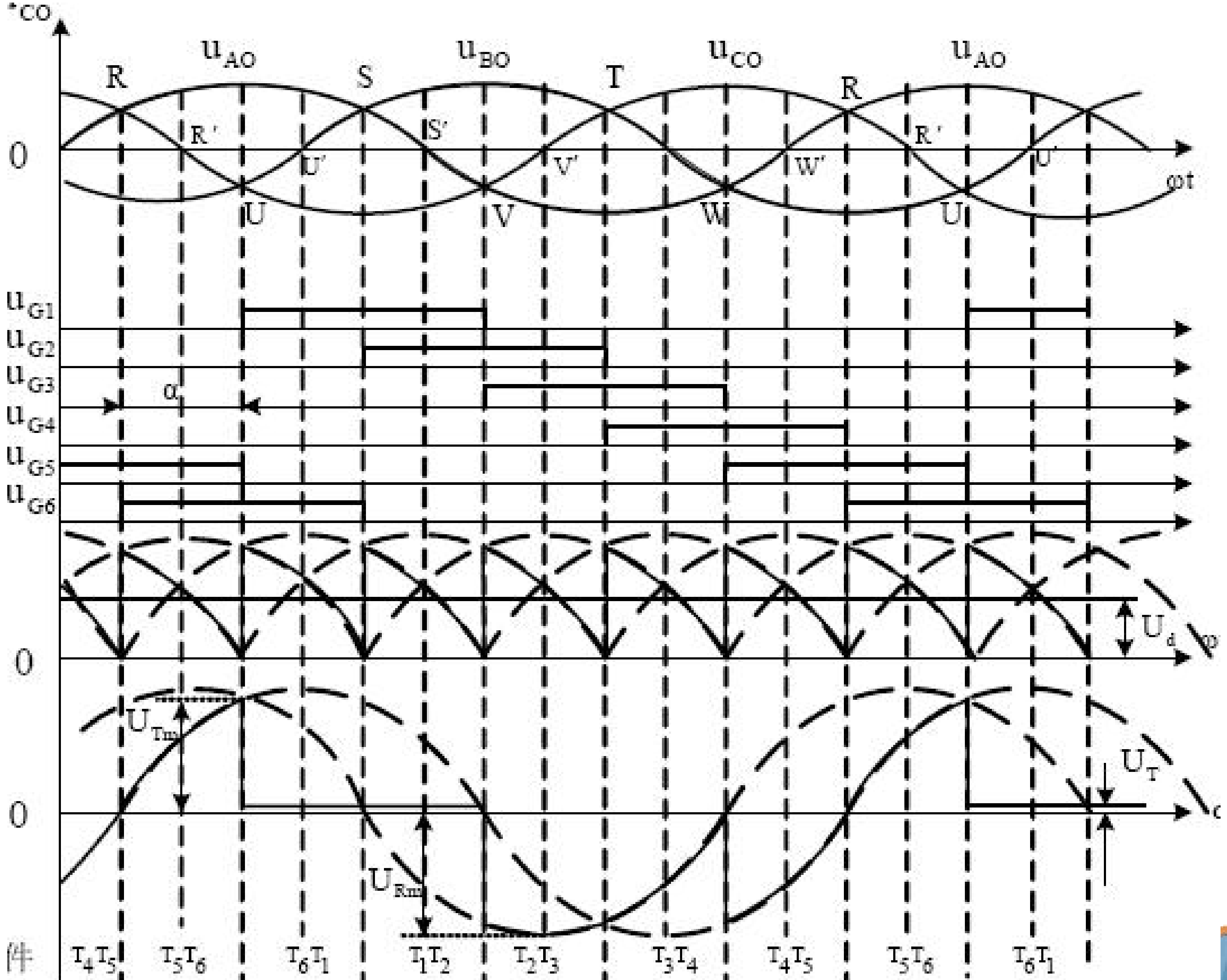


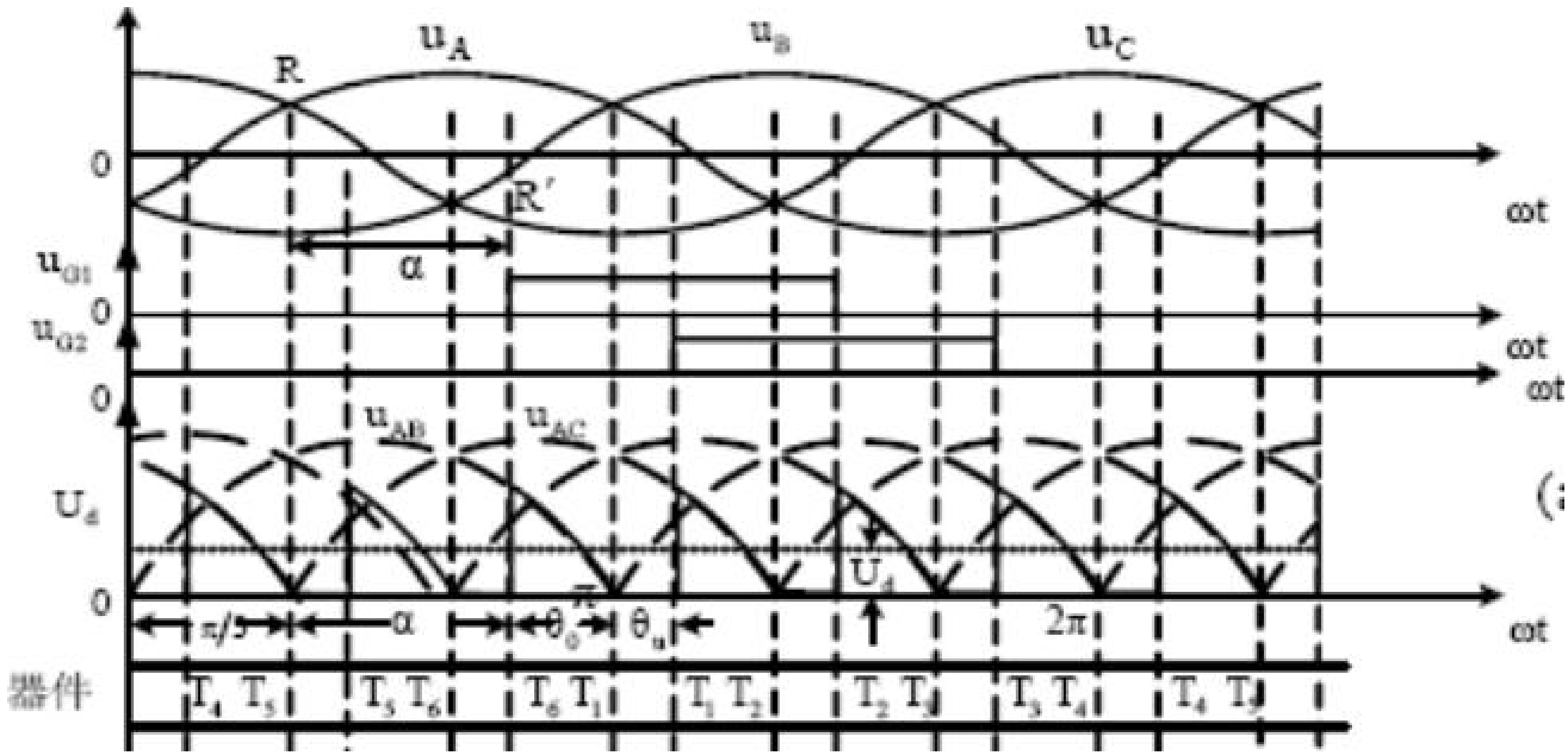
图 5.7 $\alpha = \pi / 3$ rad 时的电路波形

Ld=0

零界连续

UNIVERSITY

$\alpha > \pi/3$



Ld=0

断续

$\alpha > \pi / 3$

$$u_{\mathrm{d}} = u'_{\mathrm{d}} = \begin{cases} u_{\mathrm{AB}} = \sqrt{6}U_2 \sin\omega t & (\pi/3+\alpha < \omega t < \pi) \\ 0 & (\pi < \omega t < \pi + \theta_u) \end{cases}$$

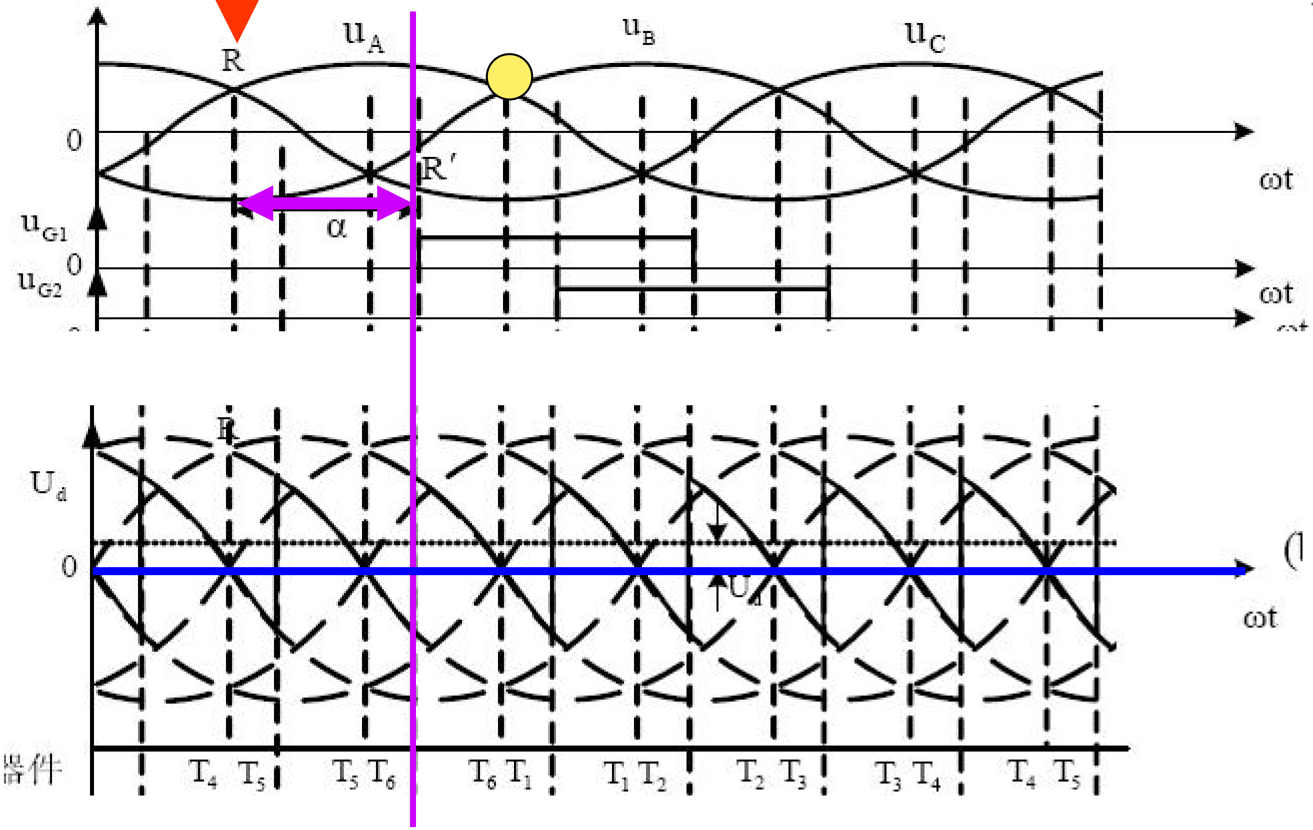
输出电压平均值

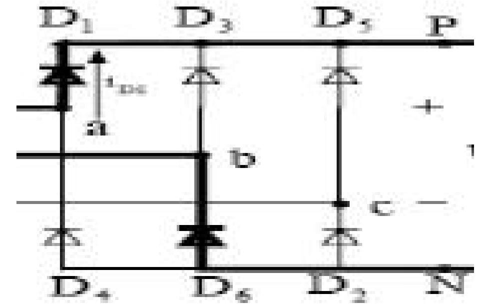
$$U_{\mathrm{d}} = \frac{3}{\pi}\int_{\pi/3+\alpha}^{\pi} \sqrt{6}U_2 \sin\omega t d\omega t = U_{\mathrm{d0}}[1+\cos(\frac{\pi}{3}+\alpha)]$$

I $U_{\mathrm{d0}} = (3\sqrt{6}/\pi)U_2$ 。

感性负载L为有限值

$\alpha > \pi/3$





CCM

Ud(t)出现<0

$$u_d = u_L + u_d^{'} = L_d \frac{di_d}{dt} + i_d R_d$$

5.2.3 换流过程的影响

1.L*abc*≠*0*

电流叠流期

2.T通断需要时间

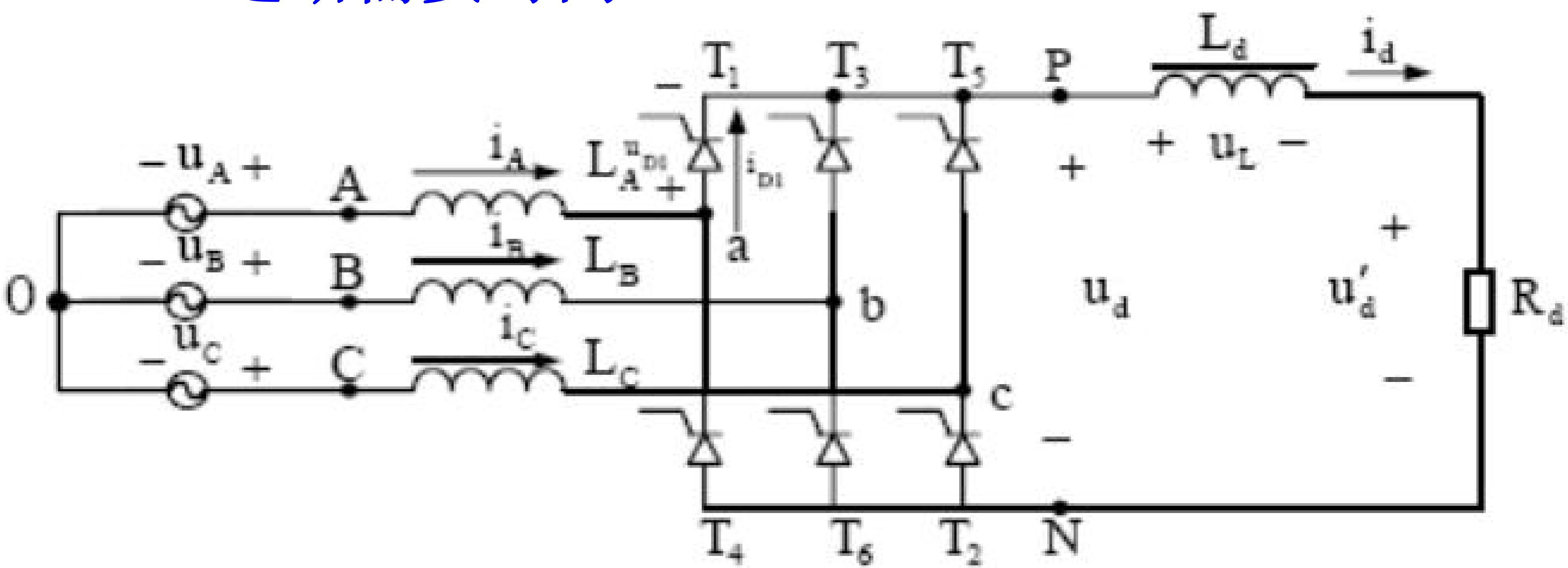
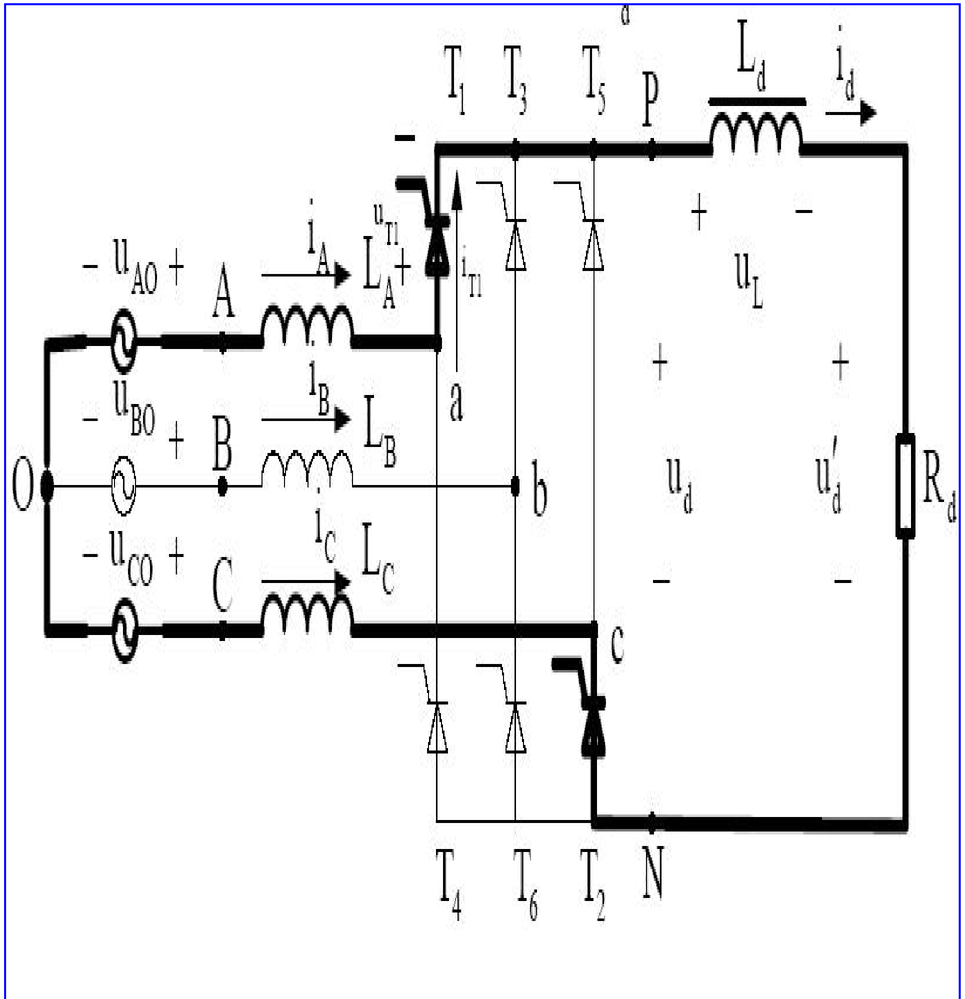


图 5.4 晶闸管三相桥式整流电路

换流过程分析

初始状态

$$
\begin{cases}
i_{T1}(\alpha) = I_d \\
i_{T3}(\alpha) = 0 \\
i_{T2}(\alpha) = i_{T1}(\alpha) \\
u_{BA}(\alpha) = \sqrt{6}U_2 \sin\alpha
\end{cases}
$$



(a)

换流过程分析

ωt=α+，p217 1

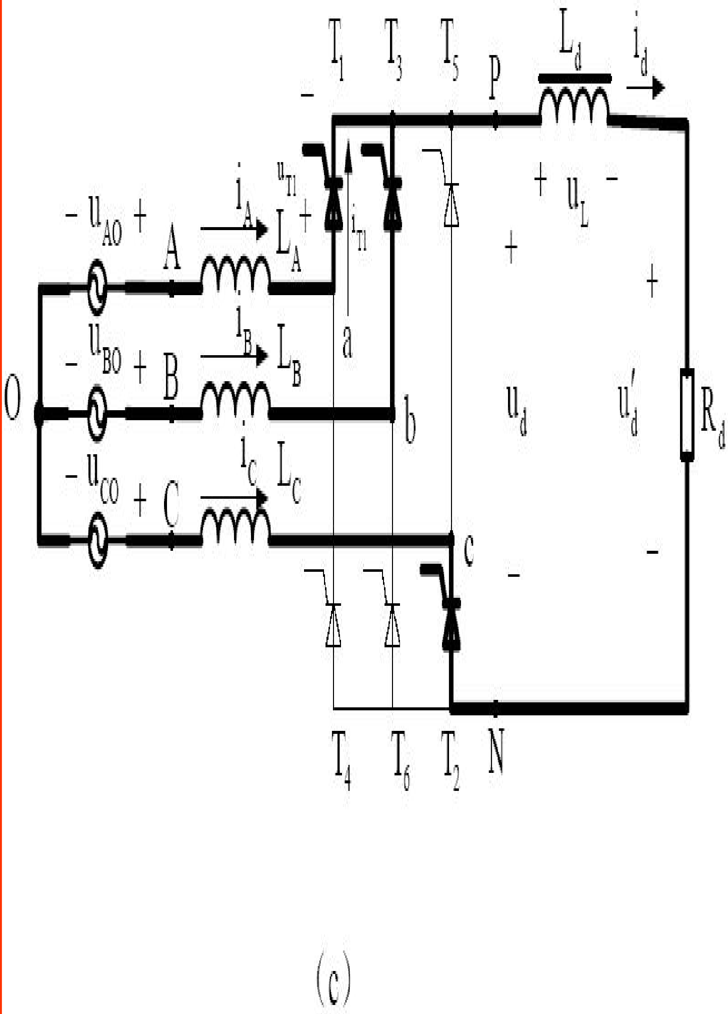
$$i_{T1}=i_{T1}(\alpha)-i=I_d-i,\quad i_{T3}=i$$

$$u_{BA}=\sqrt{6}U_2\sin\omega t=u_{LB}-u_{LA}=L_B\frac{di}{dt}-L_A\frac{d(I_d-i)}{dt}=2L_K\frac{di}{dt}$$

解出

$$i=\int_\alpha^{\omega t}\frac{u_{BA}}{2\omega L_K}\,d\omega t+i(\alpha)=\frac{\sqrt{6}U_2}{2\omega L_K}\int_\alpha^{\omega t}\sin\omega t\,d\omega t+0$$

$$=\frac{\sqrt{6}U_2}{2\omega L_K}(\cos\alpha-\cos\omega t)=I_m(\cos\alpha-\cos\omega t)$$



HANGZHOU DIANZI UNIVERSITY

换流过程分析

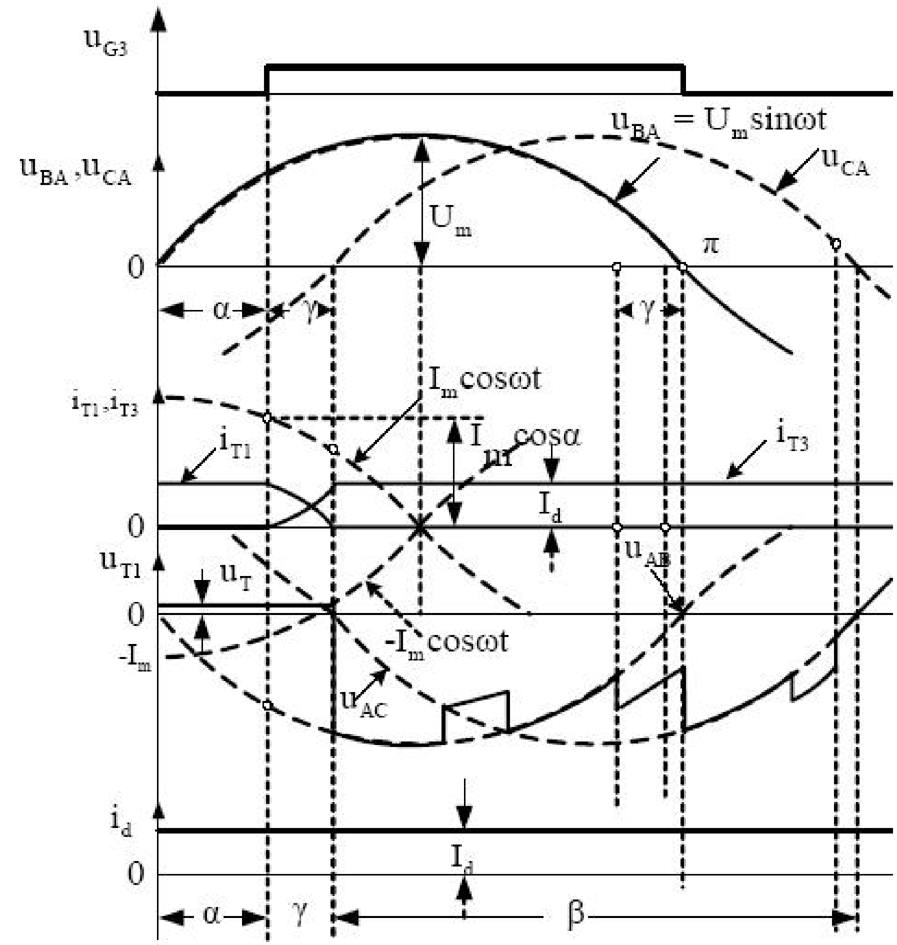
式（5.36）中

$$I_m = \frac{\sqrt{6}U_2}{2\omega L_K}$$

因此

$$i_{T3} = i = I_m(\cos\alpha - \cos\omega t)$$

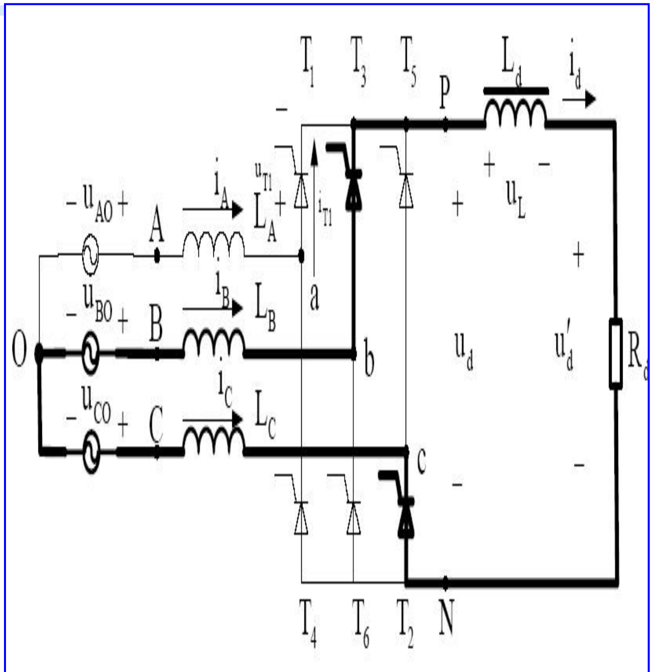
$$i_{T1} = i_{T1}(\alpha) - i = I_d - I_m(\cos\alpha - \cos\omega t)$$



P218 1

换流过程分析

P218 2
P219 1



(b)

当 $\omega t=\alpha+\gamma$ 时，$i_{T3}=I_d$，

$$i_{T3}=I_d=I_m[\cos\alpha-\cos(\alpha+\gamma)]$$

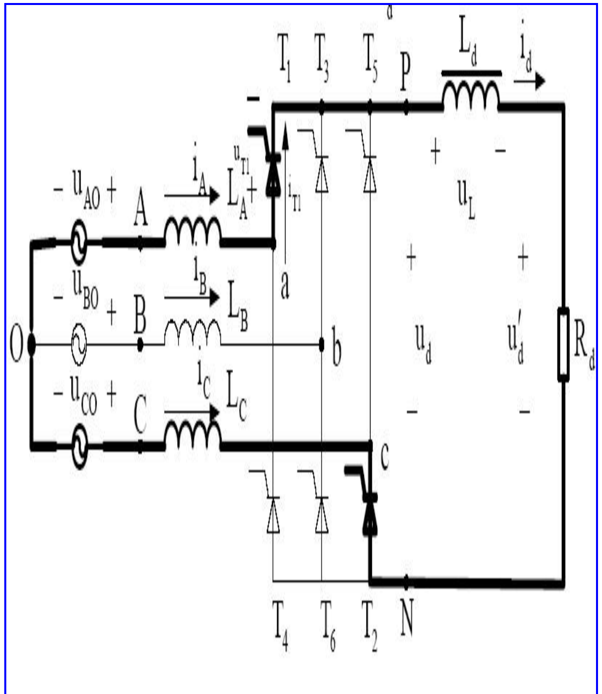
叠流角

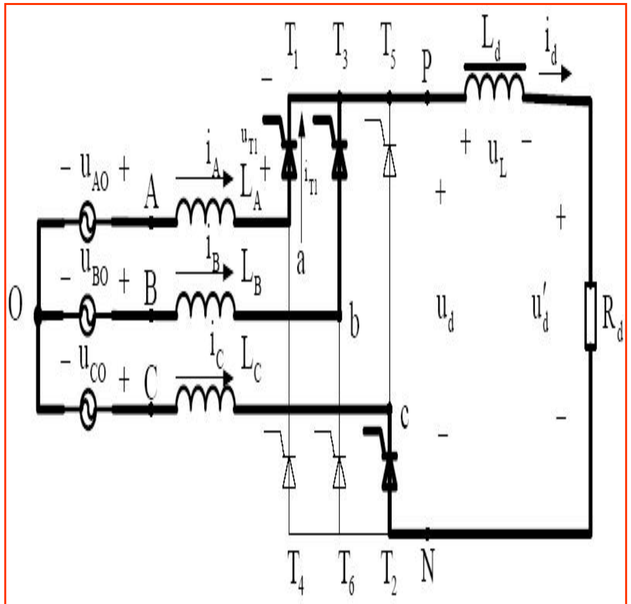
$$\gamma=\arccos[\cos\alpha-I_d/I_m]-\alpha$$

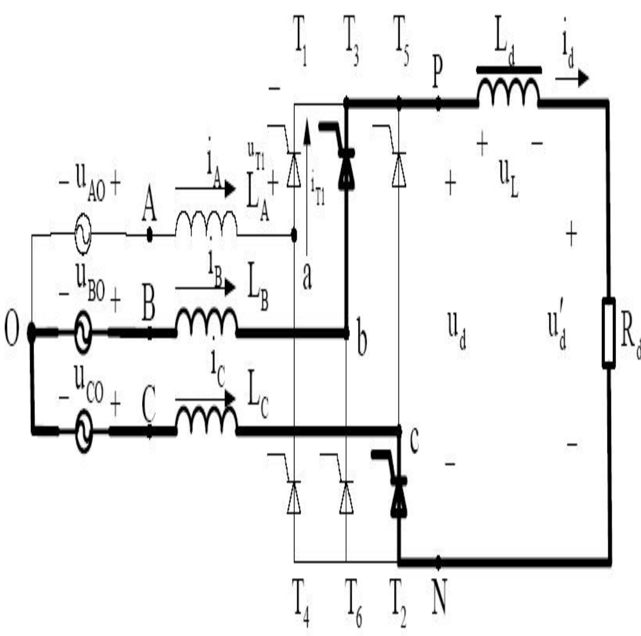
当控制角 $\alpha=0$ 时，

$$\gamma=\gamma_0=\arccos(1-I_d/I_m)$$

换流过程


(a)


(c)


(b)

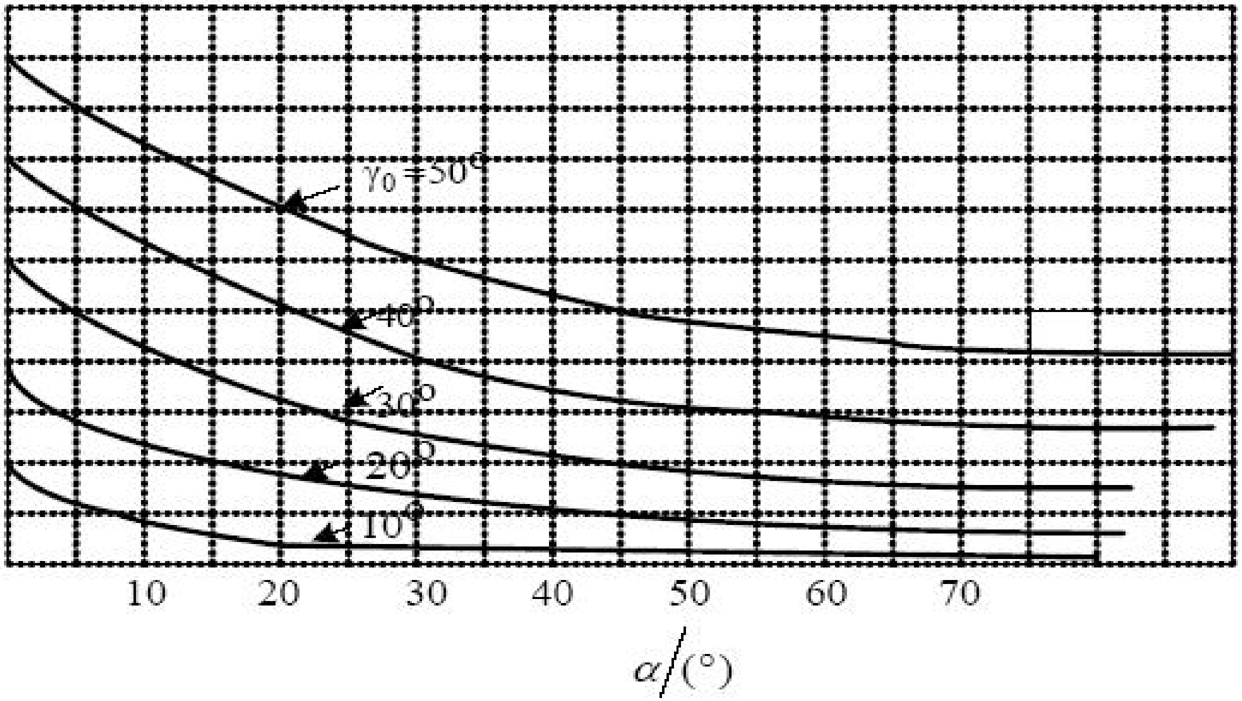


图 5.14　叠流角 γ 与控制角 α 之间的关系

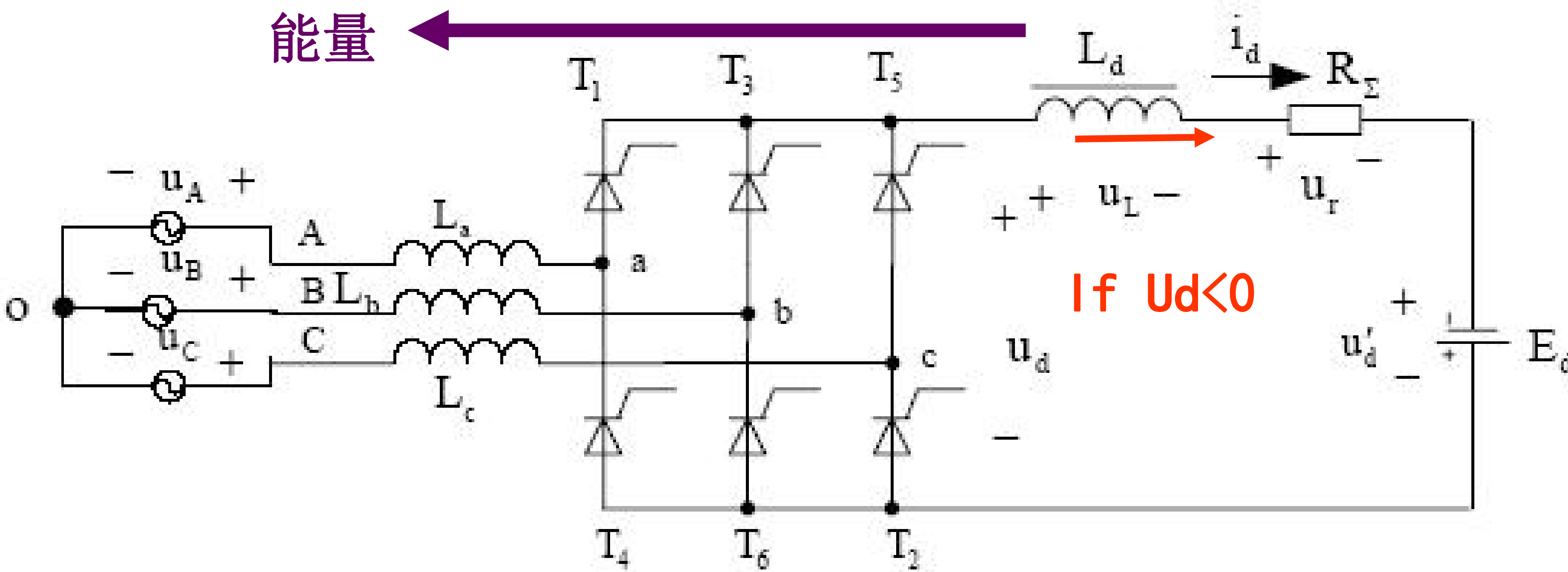
在 $\alpha < \pi/2$ 的范围内，γ 随 α 的增大而减小

换流电流的变化率与换流期中换流电压有关

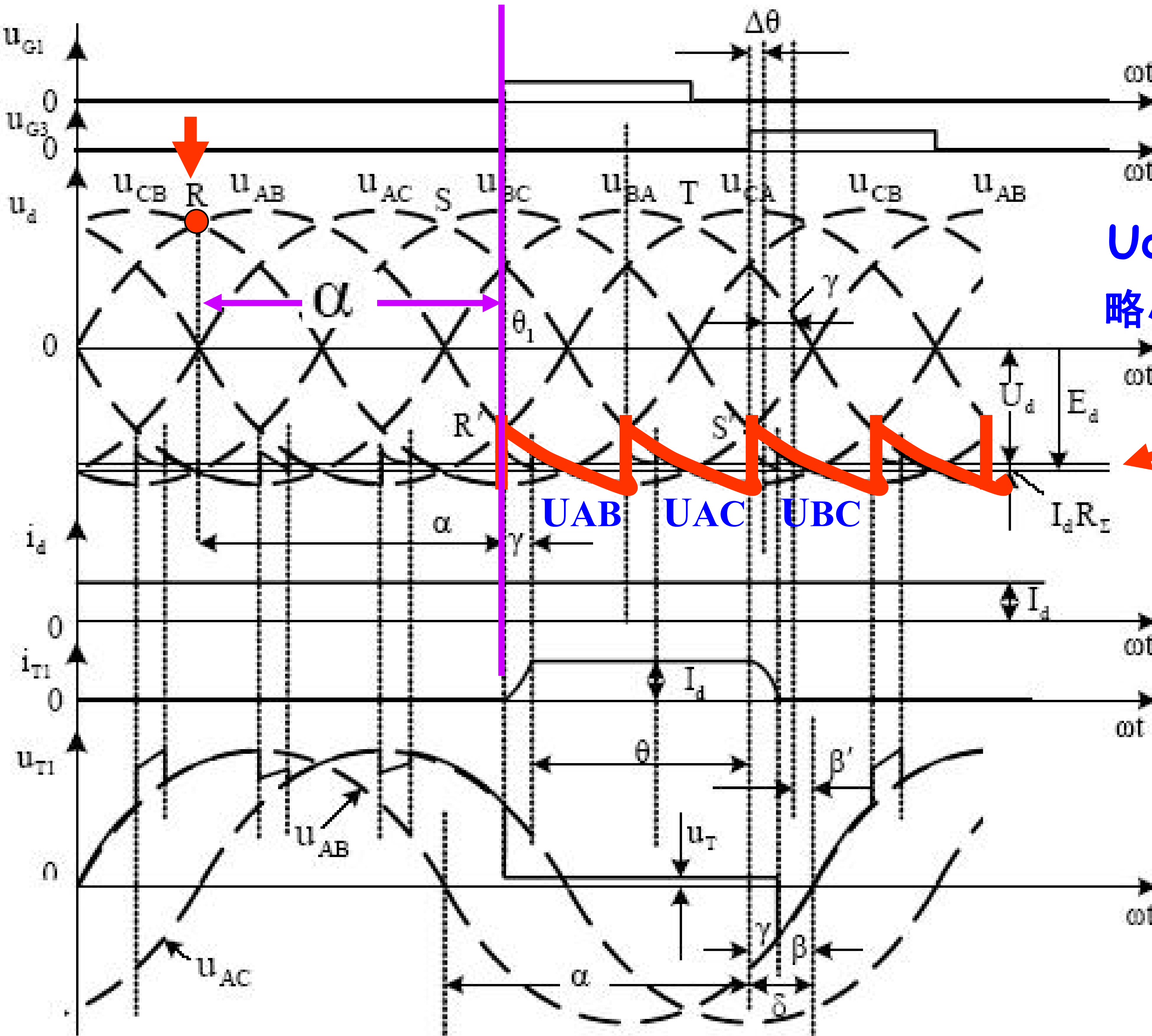
换流电压高时，换流电流的变化率大，则叠流角 γ 小

4.2.4 有源逆变

P223 1



$\alpha = 150^0$



P225 1

$$E_d = I_d R_\Sigma - U_d$$

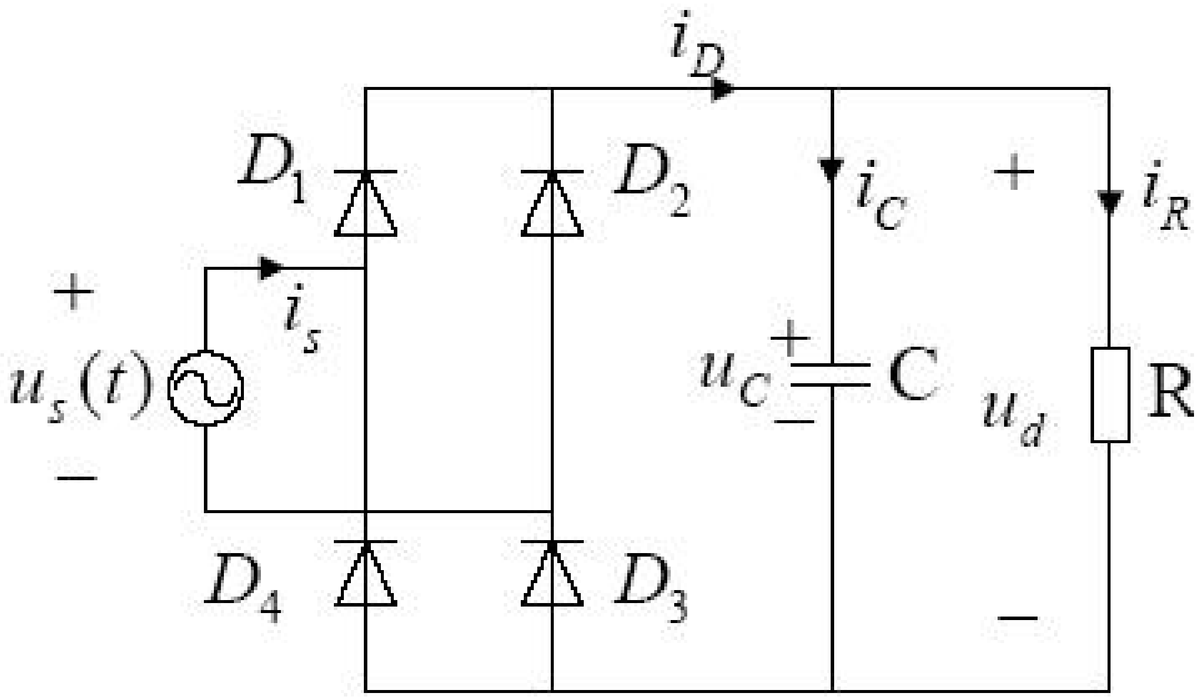
$$I_d = \frac{E_d + U_d}{R_\Sigma} = \frac{E_d + U_{d0}\cos\alpha}{R_\Sigma}$$

P226 1

P226 2

图 5.19

5.3 电容滤波的不控整流电路



单相桥式不控整流带电容滤波的整流电路

C很大，以使电容C两端的电压脉动不大

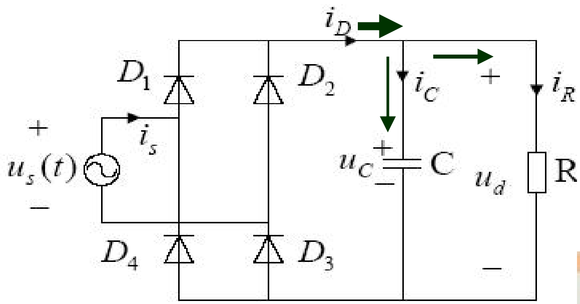
1. D1 D3 导通模式

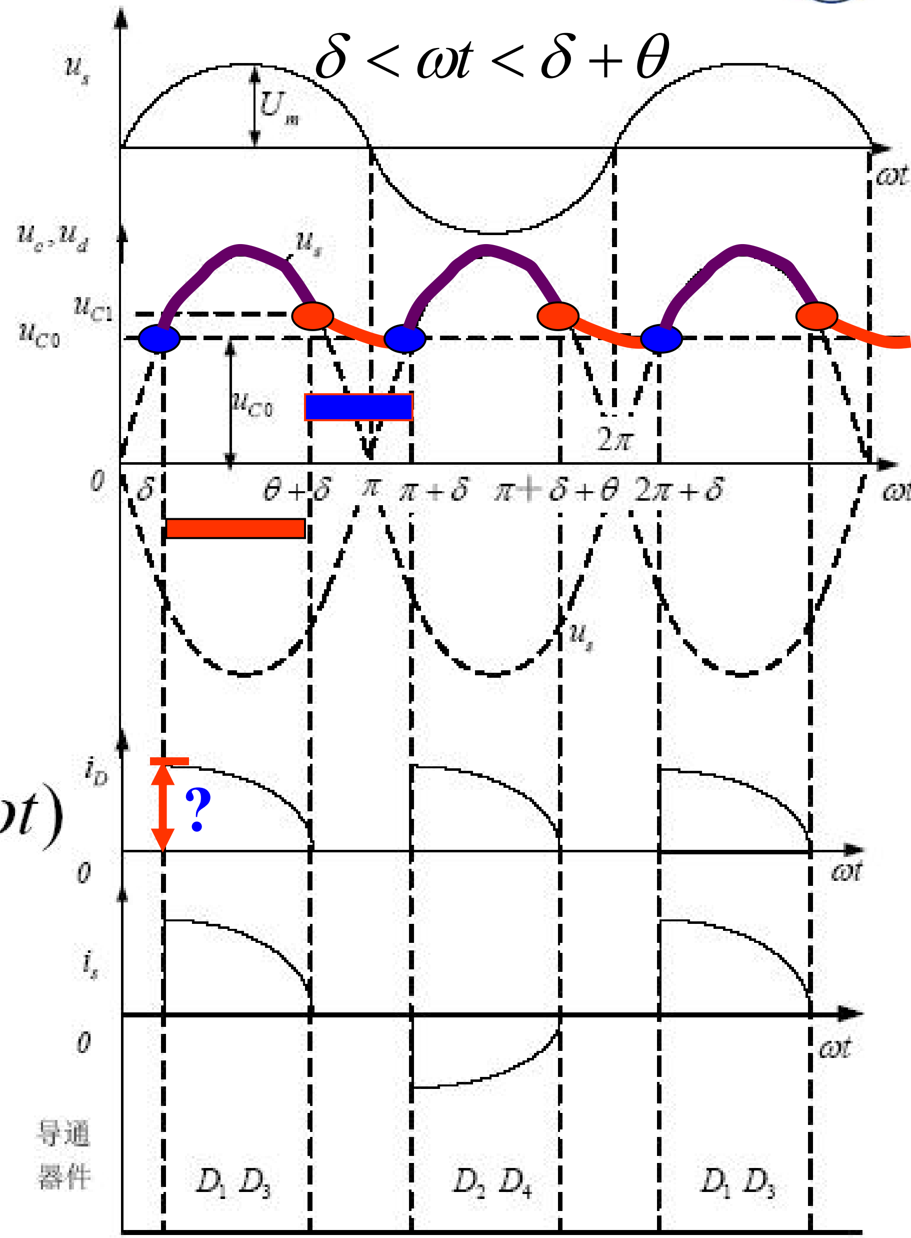
$$u_{\mathrm{s}}(\omega t)=U_{\mathrm{m}}\sin(\omega t)=$$

$$u_{\mathrm{d}}=u_{\mathrm{C}}=U_{\mathrm{C0}}+\frac{1}{C}\int_0^t i_{\mathrm{C}}dt$$

$$\omega t=\delta \text{时} \quad U_{\mathrm{S0}}=U_{\mathrm{C0}}=$$
$$=U_{\mathrm{d0}}=U_{\mathrm{m}}\sin\delta$$

$$i_{\mathrm{C}}=C\frac{du_{\mathrm{C}}}{dt}=C\frac{du_{\mathrm{s}}}{dt}=U_{\mathrm{m}}\omega C\cos(\omega t)$$

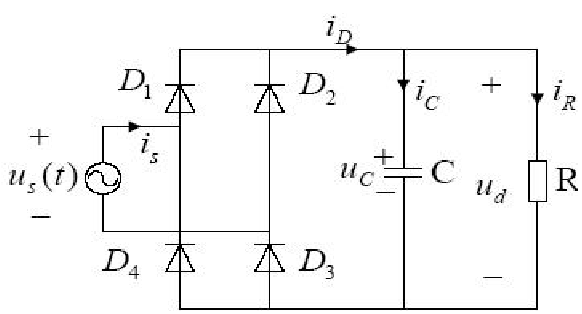


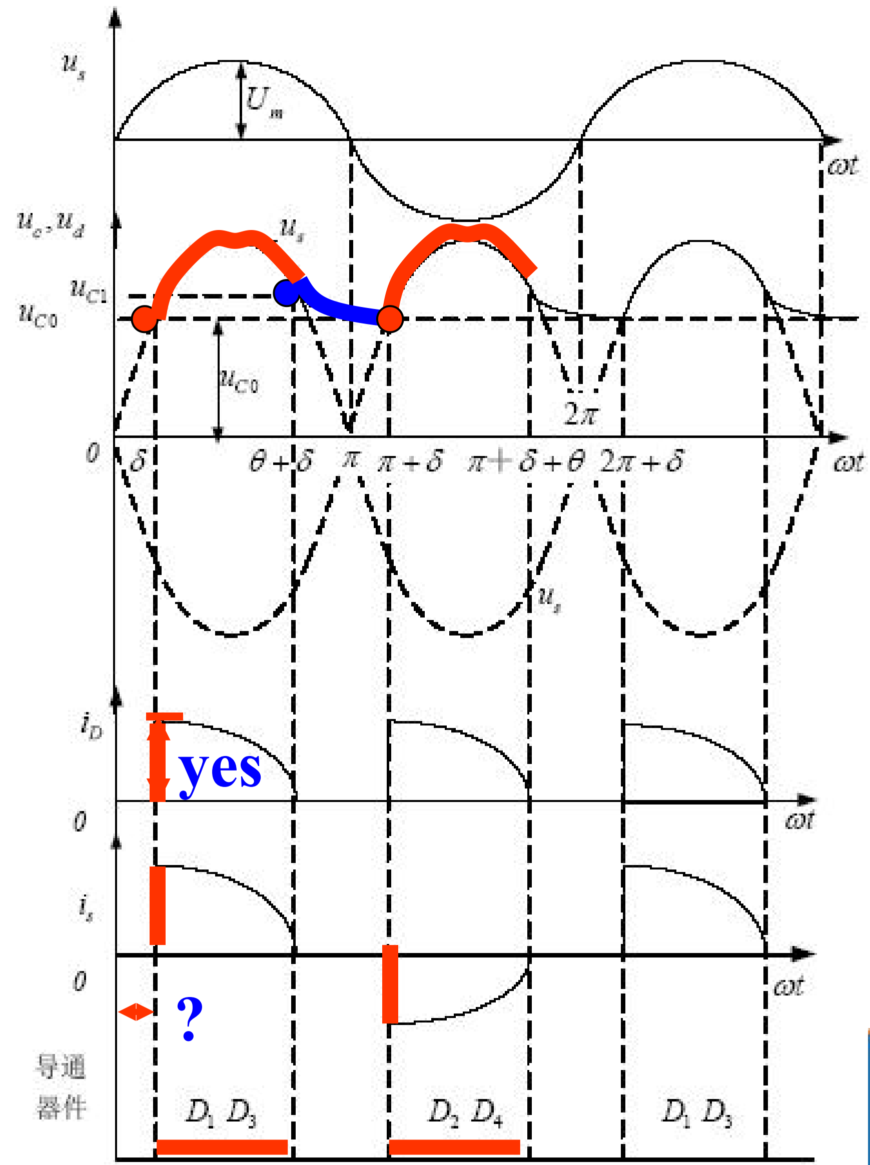


负载电流

$$i_{\mathrm{R}}=\frac{u_{\mathrm{d}}}{R}=\frac{u_{\mathrm{s}}}{R}=\frac{U_{\mathrm{m}}}{R}\sin(\omega t)$$

$$i_{\mathrm{D}}=i_{\mathrm{C}}+i_{\mathrm{R}}=U_{\mathrm{m}}\omega C\cos(\omega t)+\frac{U_{\mathrm{m}}}{R}\sin(\omega t)$$





求解导通角：

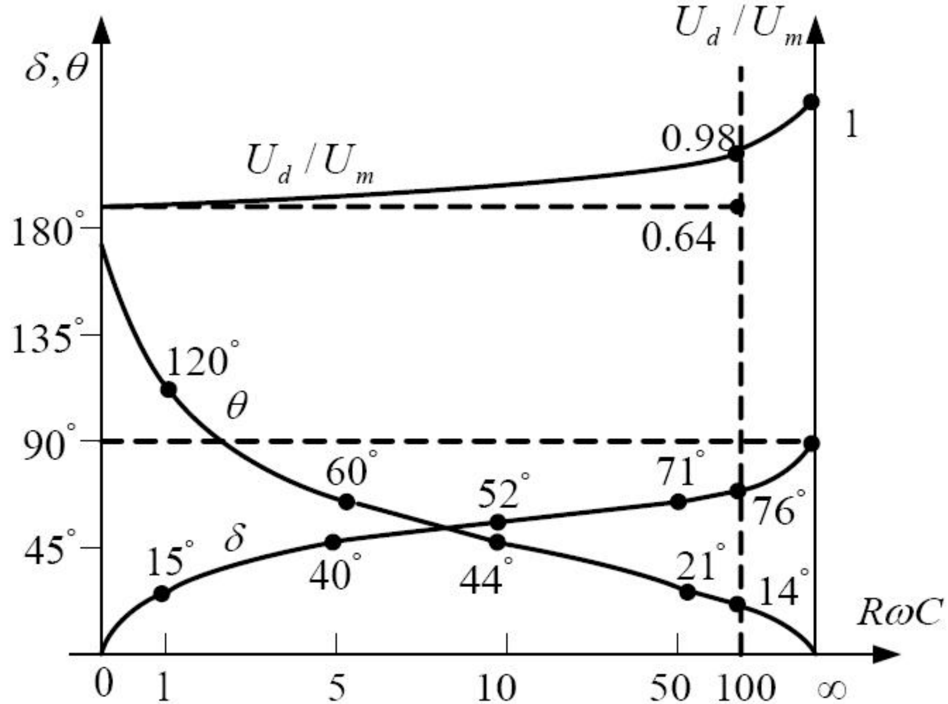
$$\tan(\delta+\theta)=-R\omega C$$

$$\theta=\pi-\delta-\arctan(R\omega C)$$

$$\sin(\delta+\theta)=R\omega C/\sqrt{1+(R\omega C)^2}$$

RC越大，导通角越小，起始角接近90度处，整流输出直流电压越高。

当RC无穷大时：*Ud*=*Um*，导通角接近零度

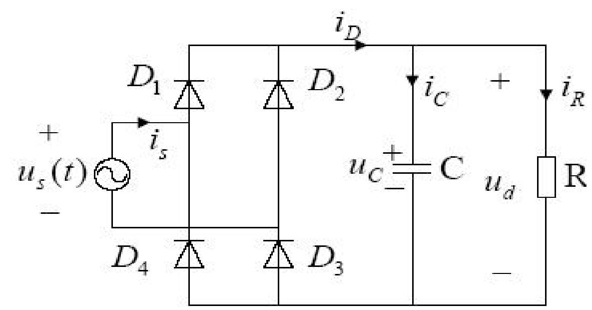


2. 二极管均截止模式（$\theta+\delta \le \omega t \le \pi+\delta$）

在 $\omega t=\theta+\delta$ 时 $i_{\mathrm{D}}=0$，二极管 D_1、D_3 截止

电容 C 向负载 R 供电 U_{C1} 开始按指数规律下降

$$u_{\mathrm{C}}=u_{\mathrm{d}}=U_{\mathrm{m}}\sin(\delta+\theta)e^{-\frac{\omega t-\theta-\delta}{R\omega C}}$$



整流波形的周期为 π，当 $\omega t=\pi+\delta$

u_C 应该衰减到 $\omega t=\delta$ 时的 U_{C0}

$$U_{\mathrm{m}}\sin(\delta)=U_{\mathrm{m}}\sin(\delta+\theta)e^{-\frac{\omega t-\theta}{R\omega C}}=U_{\mathrm{m}}\frac{R\omega C}{\sqrt{1+(R\omega C)^2}}e^{-\frac{\arctan(R\omega C)+\delta}{R\omega C}}$$

$$U_{\mathrm{m}}\sin(\delta)=U_{\mathrm{m}}\sin(\delta+\theta)e^{-\frac{\omega t-\theta}{R\omega C}}$$

$$=U_{\mathrm{m}}\frac{R\omega C}{\sqrt{1+(R\omega C)^2}}e^{-\frac{\arctan(R\omega C)+\delta}{R\omega C}}$$

得：

求出起始导电角 δ

$$\frac{R\omega C}{\sqrt{1+(R\omega C)^2}}e^{-\frac{\arctan(R\omega C)+\delta}{R\omega C}}=\sin\delta$$

输出电压为

$$U_\mathrm{d}=\frac{1}{\pi}\int_{\delta}^{\theta+\delta}U_\mathrm{m}\sin(\omega t)\mathrm{d}(\omega t)+\frac{1}{\pi}\int_{\theta+\delta}^{\pi+\delta}U_\mathrm{m}\sin(\theta+\delta)e^{-\frac{\omega t-\theta-\delta}{R\omega C}}\mathrm{d}(\omega t)$$

$$=\frac{2U_\mathrm{m}}{\pi}\sin\frac{\theta}{2}\left[\sin(\delta+\frac{1}{2}\theta)+R\omega C\cos(\delta+\frac{1}{2}\theta)\right]$$

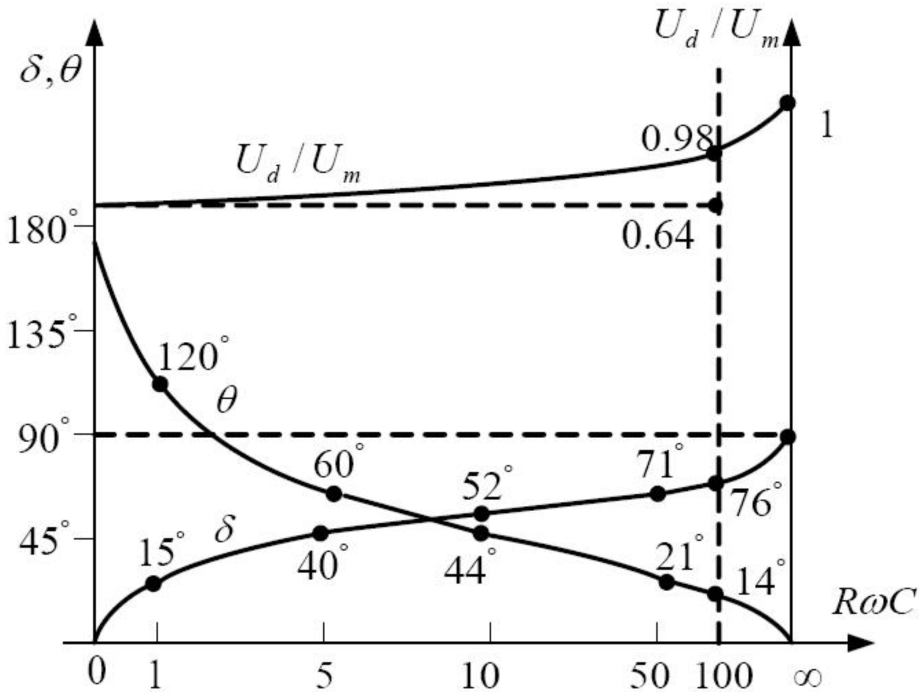


表 5.1 起始导电角 δ、导电角 θ、U_d/U_m 与 $R\omega C$ 函数关系

$R\omega C$	0（$C=0$，电阻负载）	1	5	10	40	100	500	∞（空载）
δ°	0	14.5	40.3	51.7	69	75.3	83.7	90
θ°	180	120.5	61	44	22.5	14.3	5.4	0
U_d/U_m	0.64	0.68	0.83	0.90	0.96	0.98	0.99	1

若 $C=0$，电阻性负载，由（5.67），（5.71）和（5.72）式得到

$$\delta=0^\circ,\ \theta=180^\circ,\ U_d=2/\pi\cdot U_m=0.64U_m$$

若 $R=\infty$，空载，则

$$\delta=90^\circ,\ \theta=0^\circ,\ U_d=U_m$$

考虑电源变压器漏感和引线漏感 L_S 或直流侧电感 L_d

P231 1