



杭州电子科技大学

《电力电子技术》

第5章 交流-交流变换技术



自动化学院

第5章 交流-交流变换技术

- **交流-交流变换电路**是把一种形式的交流电能变成为另一种形式交流电能的变流器电路系统，在进行交流-交流变换时，可以改变输出交流电压或电流的**幅值**、**频率**和**相数**等参数，广泛应用于交流电机调速等应用场合。
- 间接交流-交流变换电路
- 直接交流-交流变换电路
- **交流调压电路**：只改变输出交流电压或电流的幅值，而不改变它们频率的变换电路，如灯光亮度调节控制电路。

5.1 间接交流-交流变换电路

➤一般由二级构成，第一级AC/DC变流器将工频50Hz的交流电转换成直流电，再由第二级DC/AC变流器将直流电能变换为所需幅值和频率的交流输出。

分为两大类：

➤电流型交流-交流变换电路

中间直流环节为**电流源**，通常是逆变电路的直流输入侧**串联**一个大电感量的直流电抗器。

➤电压型交流-交流变换电路

中间直流环节为**电压源**，通常是逆变电路的直流输入端**并接**一个大电容量的直流电容器。

第5章 交流-交流变换技术

电流型交流-交流变换电路

➤将三相桥式整流电路和三相逆变电路级连起来构成了一个间接交流交流变换电路,如图6.1所示三相桥式整流电路的直流输出侧串联了一个较大电感值的电抗器,这样输出电流的脉动很小,可以近似看作是电流源,通常称为电流型三相桥式整流电路。当然三相桥式整流电路输出直流电流值仍然受触发角 α 控制和直流侧负载大小影响。

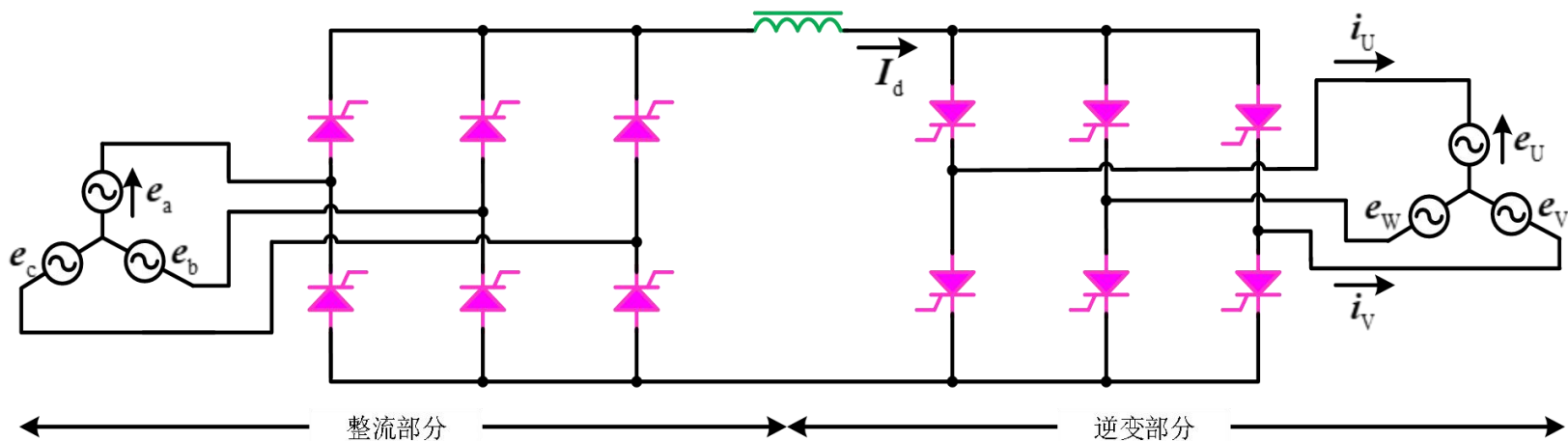


图6.1 电流型交流-交流变换电路

第5章 交流-交流变换技术

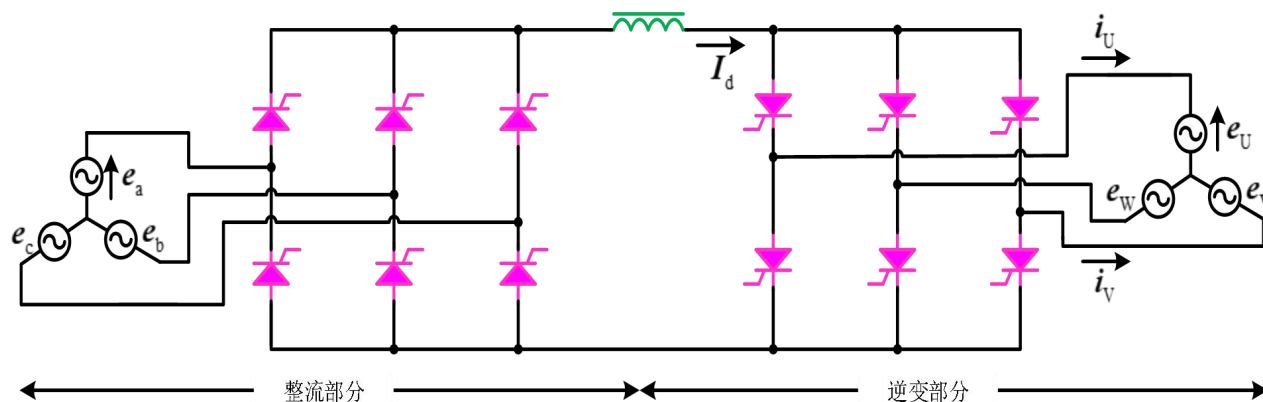


图6.1 电流型交流-交流变换电路

三相逆变电路的触发引前角： $\delta = 180^\circ - \alpha$ ($90^\circ < \alpha < 180^\circ$)

满足： $\delta_{\min} < \delta < 90^\circ$ $\delta_{\min} \geq \gamma + \varepsilon(\omega t_q) + \theta \approx 30^\circ \sim 35^\circ$

整个电路输入的有功/无功功率为：

$$P = \sqrt{3}EI \cos \alpha$$

$$Q = \sqrt{3}EI \sin \alpha$$

E为输入交流线电压的有效值，
I为输入交流电流的有效值

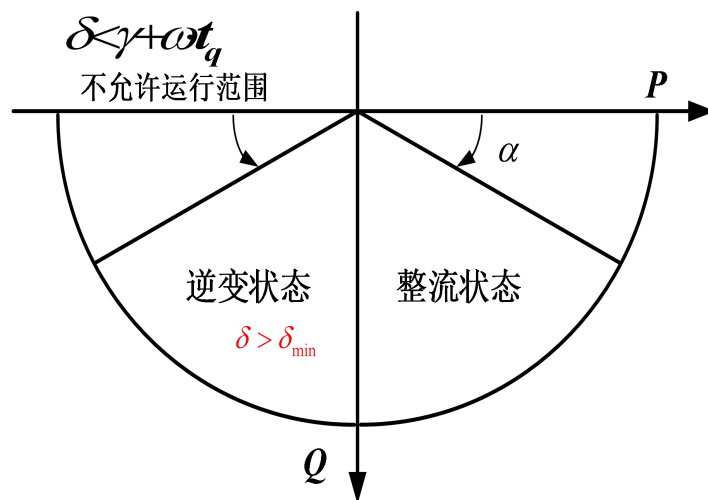


图6.2 电流型变流器的有功功率与无功功率的控制特性

➤三相变流器无论工作在整流或逆变状态，均要从交流侧吸收无功功率。因此，实际应用时在电流型交流-交流变换电路的输入和输出两侧均需要安装**补偿电容器**，以补偿无功功率，同时兼有高次谐波的滤波功能。

第5章 交流-交流变换技术

电压型交流-交流变换电路

➤电压型交流-交流变换电路工作在**变压、变频**方式时，广泛应用于交流电动机的变频调速装置；工作在**恒频、恒压**方式时，则广泛应用于逆变电源、UPS电源。

➤整流器由**二极管整流电路+直流侧电容滤波**构成

➤虽存在交流侧谐波和电磁兼容问题，但由于**成本低、可靠性高**而广泛应用于小功率电机调速中。

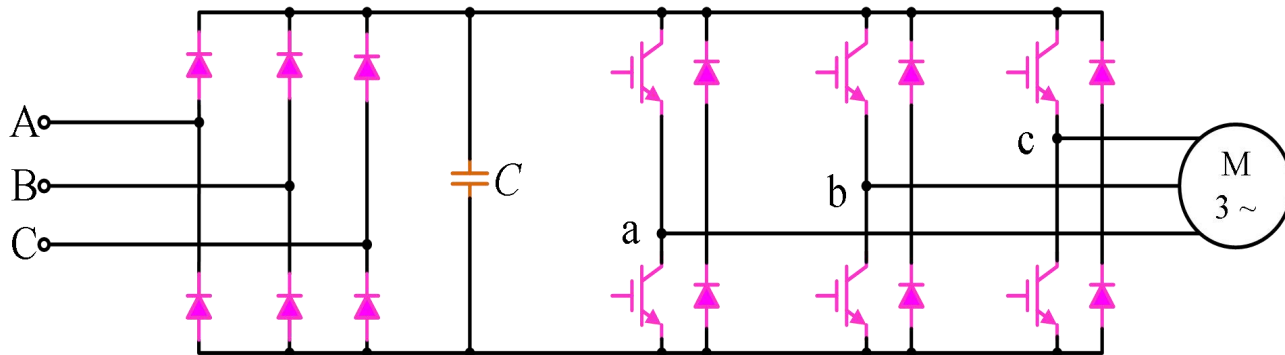


图6.3(a) 二极管整流电路+PWM逆变电路

第5章 交流-交流变换技术

- AC-DC整流器采用三相PWM整流电路
- 输入电流近似正弦波，功率因数接近1，具有较好的电磁兼容性能，且可实现能量双向传输，适用于中、大功率应用场合。

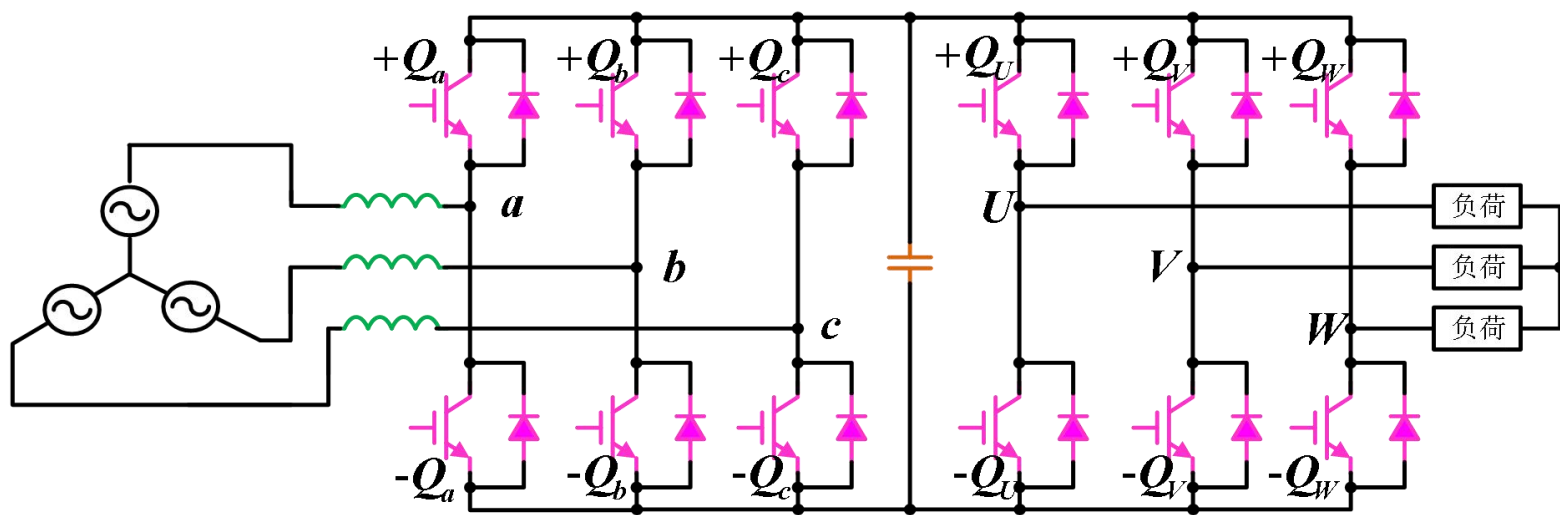


图6.3(b) 双PWM变流器

第5章 交流-交流变换技术

- 单相整流器由二极管整流电路+Boost电路构成
- 输入端具有单相功率因数校正功能，具有较好的电磁兼容性，一般适合于中、小功率的应用场合。

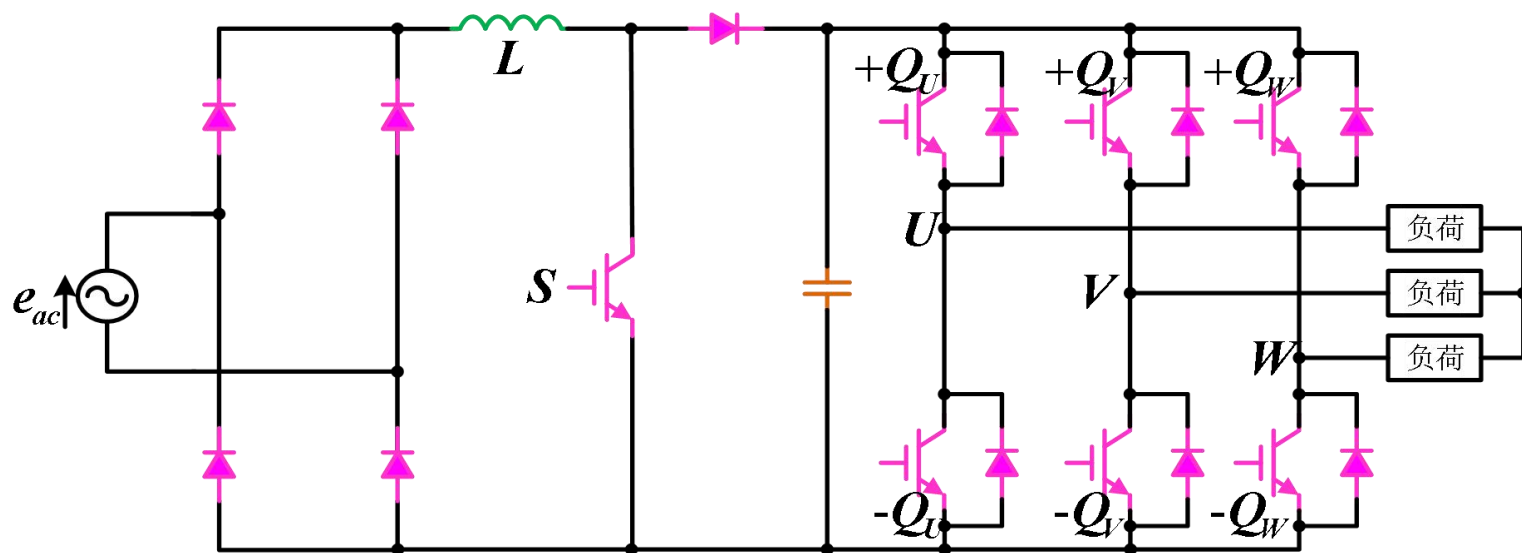


图6.3(c) 单相PFC电路+逆变电路

5.3 交流调压电路

- 把两个晶闸管反并联后串联在交流电路中，在每半个工频周波内通过对晶闸管开通相位的控制，可方便地调节输出电压的有效值，即通过对晶闸管触发角的控制来实现交流电压值的调节，这种电路称之为交流调压电路。
- 交流调压电路不改变交流电的频率。
- 交流调压电路广泛用于灯光亮度调节及异步电动机的软启动，也可应用于在电力系统中实现对无功功率的连续调节与控制。
- 交流调压电路可分为单相交流调压电路和三相交流调压电路。

第5章 交流-交流变换技术

单相交流调压电路-阻性负载

➤ 为减少输出谐波，
应使正负半周的触发角 α 相等。

➤ 触发角 α 的移相范围：
 $0 \leq \alpha \leq \pi$

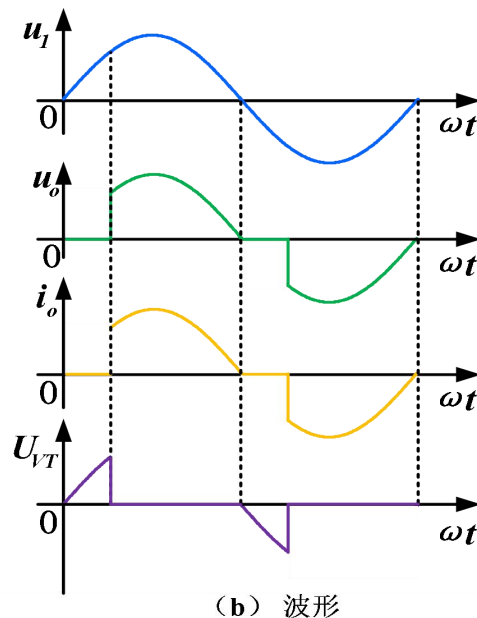
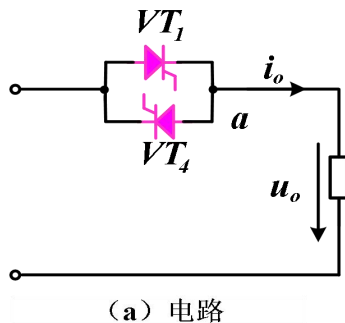


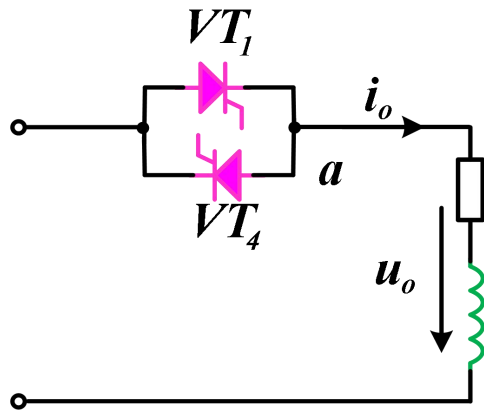
图6.12 电阻性负载单相交流调压电路及波形

第5章 交流-交流变换技术

单相交流调压电路-感性负载

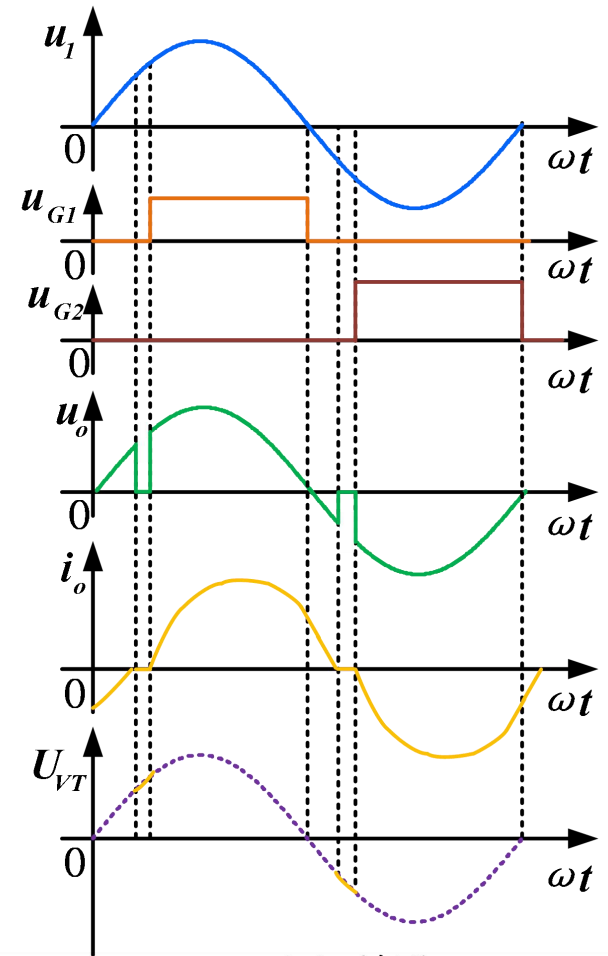
负载阻抗角：

$$\varphi = \arctan \frac{\omega L}{R}$$



(a) 电路

图6.13 感性负载单相交流调压电路及波形



(b) 波形

感性负载下稳态时触发控制角的移相范围：

$$\varphi \leq \alpha \leq \pi$$

单相交流调压电路-感性负载

设在正半周，触发角 α 时刻开通晶闸管VT1，负载电流 i_o 应满足如下微分方程式：

$$L \frac{di_o}{dt} + Ri_o = u_i$$

其中输入电压 $u_i = \sqrt{2}U_m \sin \omega t$ 。负载电流 i_o 初始条件为 $i_o(\alpha) = 0$

解微分方程得到

$$i_o(\omega t) = \frac{\sqrt{2}U_m}{Z} \left[\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{\frac{\alpha - \omega t}{\tan \varphi}} \right] \quad \alpha \leq \omega t \leq \alpha + \theta$$

式中 $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ ， θ 为晶闸管导通角

第5章 交流-交流变换技术

单相交流调压电路-感性负载

利用边界条件 $\omega t = \alpha + \theta$ 时, $i_o(\alpha + \theta) = 0$, 可求得晶闸管导通角 θ

$$\sin(\alpha + \theta - \varphi) = \sin(\alpha - \varphi) e^{\frac{-\theta}{\tan \varphi}}$$

当 $\alpha = \phi$ 时, $\theta = \theta_m = \pi$,
 输出电流 i_o 临界连续;
 当 $\alpha < \phi$ 时, $\theta \equiv \pi$,
 负载电流连续, $I_O = U_m / Z$,
 输出电流和电压失调;
 当 $\alpha > \phi$ 时, $\theta < \pi$,
 负载电流断续, 输出电流和电压可调。

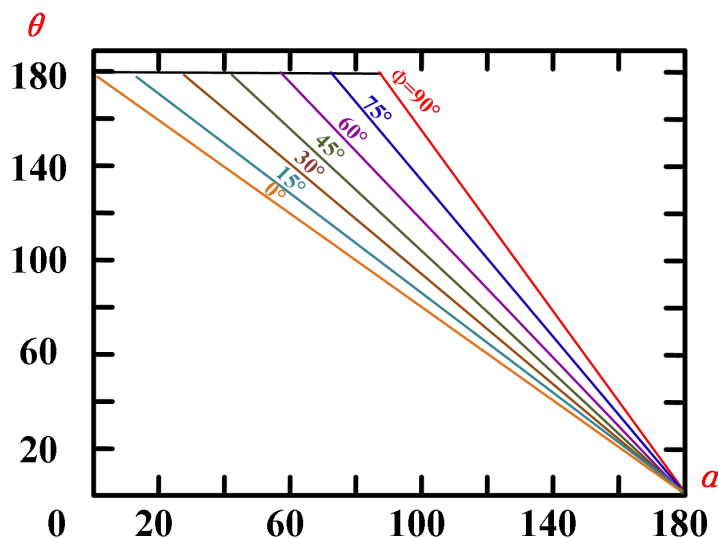


图6-14 以阻抗角 ϕ 为参量, 触发角 α 和导通角 θ 的关系

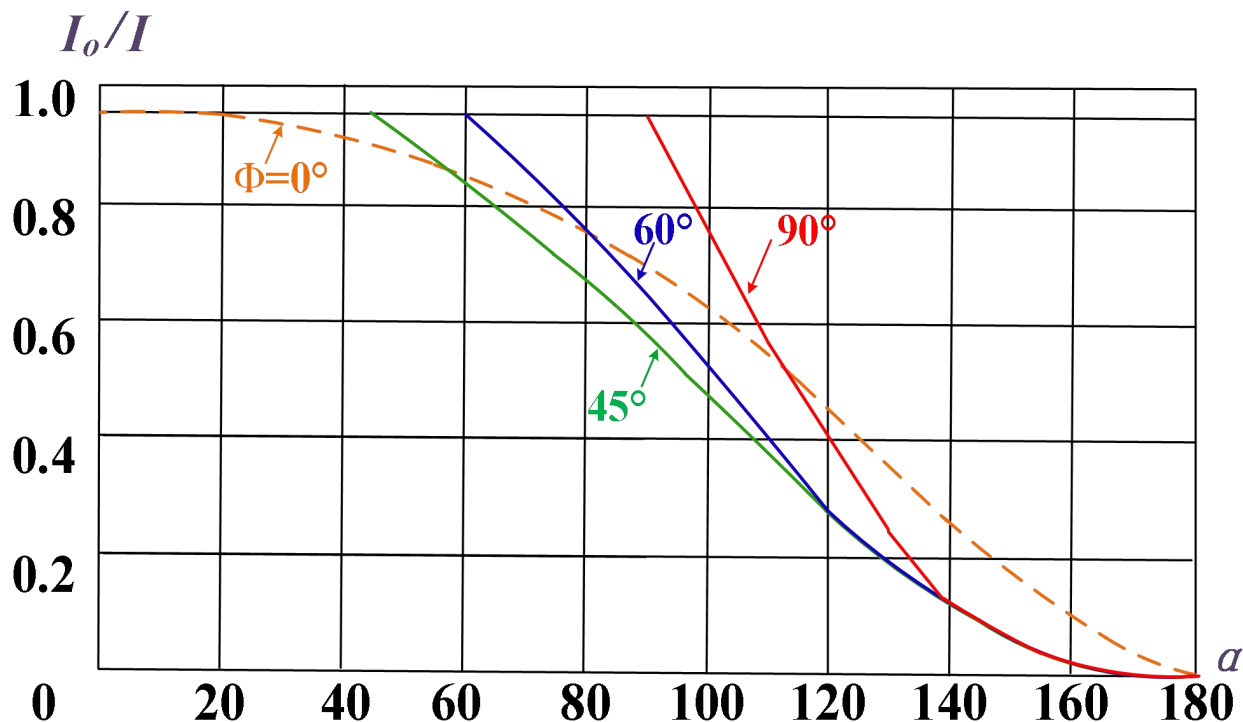
输出电压有效值：

$$\begin{aligned} U_o &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\theta} (\sqrt{2}U_2 \sin \omega t)^2 d\omega t} \\ &= U_m \sqrt{\frac{\theta}{\pi} + \frac{1}{2\pi} [\sin 2\alpha - \sin(2\alpha + 2\theta)]} \end{aligned}$$

输出电流有效值：

$$I_o = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\theta} \left\{ \frac{\sqrt{2}U_2}{Z} [\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi)e^{\frac{\alpha - \omega t}{\tan \varphi}}] \right\}^2 d\omega t}$$

输出电流有效值与触发角的关系：

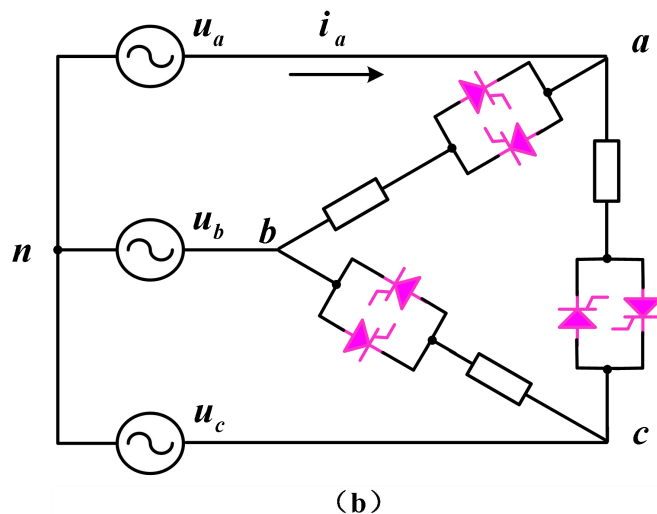
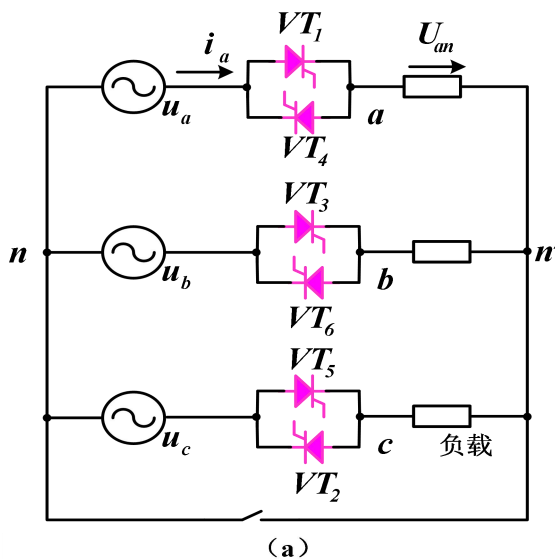


可知，当 $\alpha < \varphi$ 时，负载电流连续，触发角失去对输出的控制。

因此，为实现对输出的控制，触发角 α 应为： $\varphi \leq \alpha \leq \pi$

第5章 交流-交流变换技术

三相交流调压电路



- 星形联接电路（三相三线与三线四线两种）
- 三相四线电路工作时，各单相调压电路输出的3的整数倍次谐波是同相位的，将全部流过零线并叠加，因此零线中流过的3的整数倍次谐波电流是各相的三倍。当触发角为90度时，零线电流和各相电流的有效值基本接近。

支路控制的三角形联结电路

➤如果三相对称，负载电流中3的整数倍次谐波的相位和大小都相同，所以在负载构成的三角形回路中流动，而不出现在线电流中。

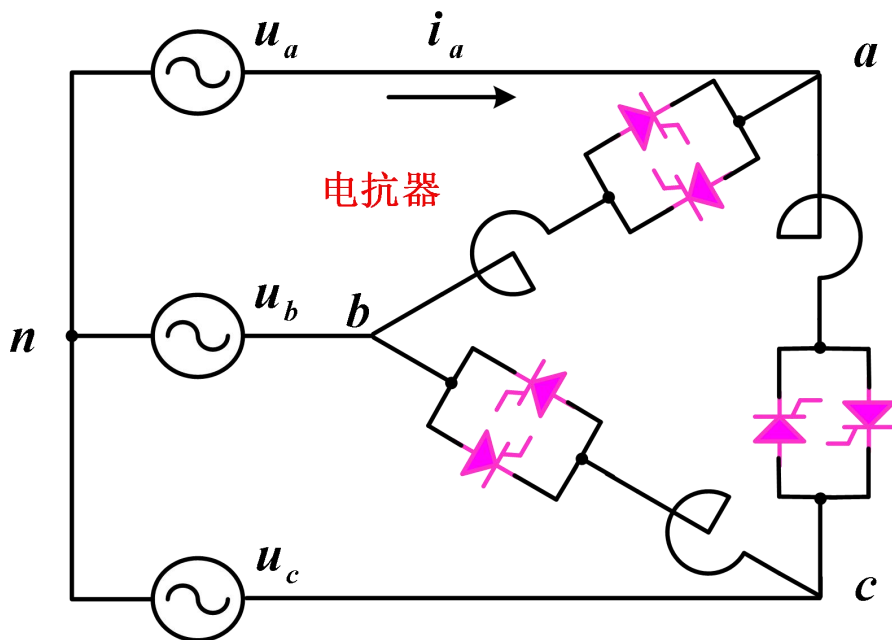


图6.17 晶闸管控制电抗器 (TCR)

典型应用：

➤ **晶闸管控制电抗器**：触发移相范围为 $90\sim 180$ 度，调节从电网吸收的无功功率。

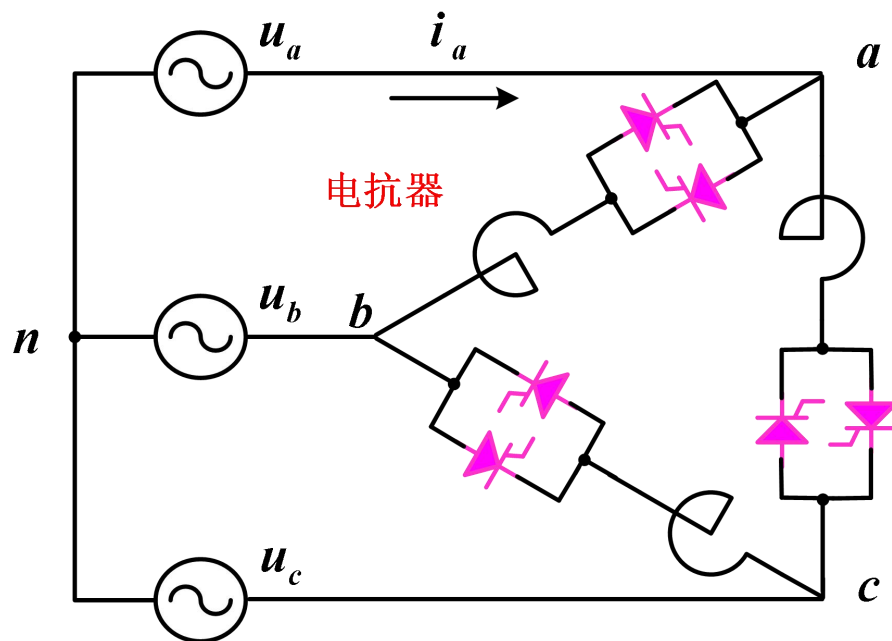


图6.17 晶闸管控制电抗器（TCR）

➤ **静止无功补偿装置**：再配以固定电容器，实现容性到感性的连续调节无功电流。