

可控整流技术的应用举例

10.1 晶闸管直流电动机系统

10.1.1 工作于整流状态时

10.1.2 工作于有源逆变状态时

10.1.3 直流可逆电力拖动系统

10.1.1 工作于整流状态时

■ 晶闸管可控整流装置带直流电动机负载，称为晶闸管直流电动机系统，是直流拖动系统中主要的一种，也是可控整流装置的主要用途之一

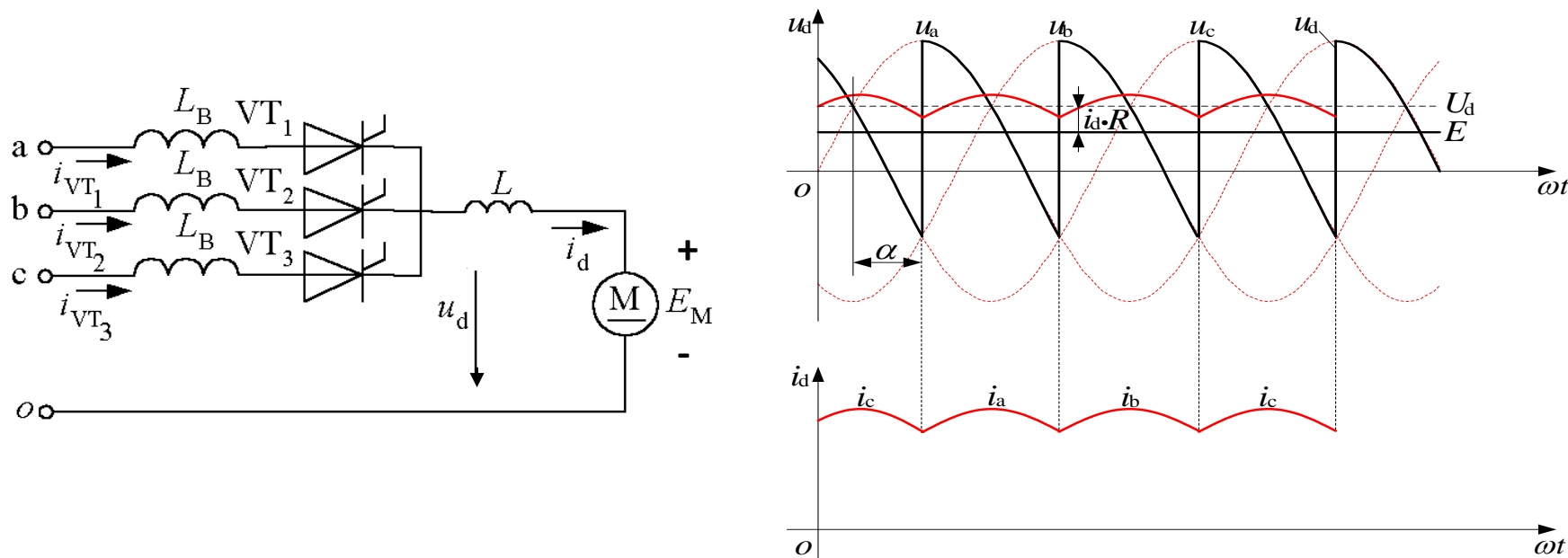


图10-1 三相半波带电动机负载
且加平波电抗器时的电压电流波形

■ 直流电动机负载除本身有电阻、电感外，还有反电动势 E ，为减小转矩脉动，通常在电枢回路串联平波电抗器，保证电流在较大范围内连续。

10.1.1 工作于整流状态时

■ 电动机工作于稳态时，由于电动机有较大机械惯量，其转速和反电动势都基本无脉动，此时整流回路电压方程为：

$$U_d = E_M + R_\Sigma I_d + \Delta U \quad (10-1)$$

■ 在电动机负载电路中，电流由负载转矩所决定，当电动机的负载较轻时，对应的负载电流也小，在小电流情况下，特别在低速时，由于电感的储能减小，往往不足以维持电流连续，从而出现电流断续现象。

10.1.1 工作于整流状态时

■ 电流连续时电动机的机械特性

◆ 三相半波电流连续时的电动机机械特性

☞ 直流电动机的反电动势为

$$E_M = C_e \phi n$$

☞ 反电动势特性方程为

$$E_M = 1.17U_2 \cos \alpha - R_\Sigma I_d - \Delta U$$

☞ 转速与电流的机械特性关系式为

$$n = \frac{1.17U_2 \cos \alpha}{C_e \phi} - \frac{R_\Sigma I_d + \Delta U}{C_e \phi}$$

☞ 三相桥式电路的机械特性为

$$n = \frac{2.34U_2 \cos \alpha}{C_e \phi} - \frac{R_\Sigma}{C_e \phi} I_d$$

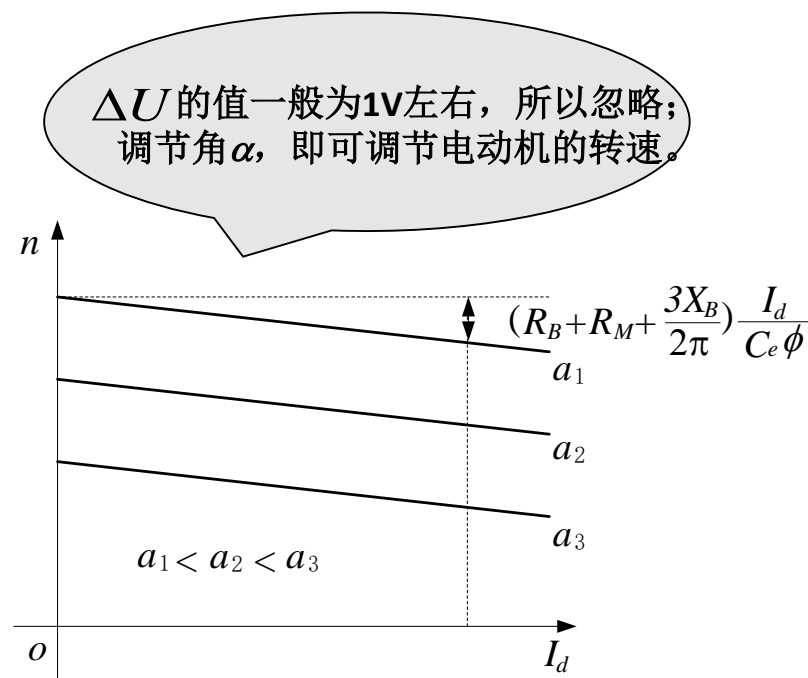


图10-2 三相半波电流连续时
以电流表示的电动机机械特性

10.1.1 工作于整流状态时

■ 电流断续时电动机的机械特性

◆ 由于整流电压是一个脉动的直流电压，当电动机的负载减小时，致使电流断续，此时电动机的机械特性也就呈现出非线性。

◆ 电流断续时机械特性的特点

☞ 以 $\alpha=60^\circ$ 时为例， $\sqrt{2}U_2$ 才是理想空载电势。

☞ 在电流断续情况下， $\alpha \leq 60^\circ$ 时电动机空载反电动势都是 $\sqrt{2}U_2$ ；当 $\alpha > 60^\circ$ 以后，空载反电动势将由 $\sqrt{2}U_2 \cos(\alpha - \pi/3)$ 决定。

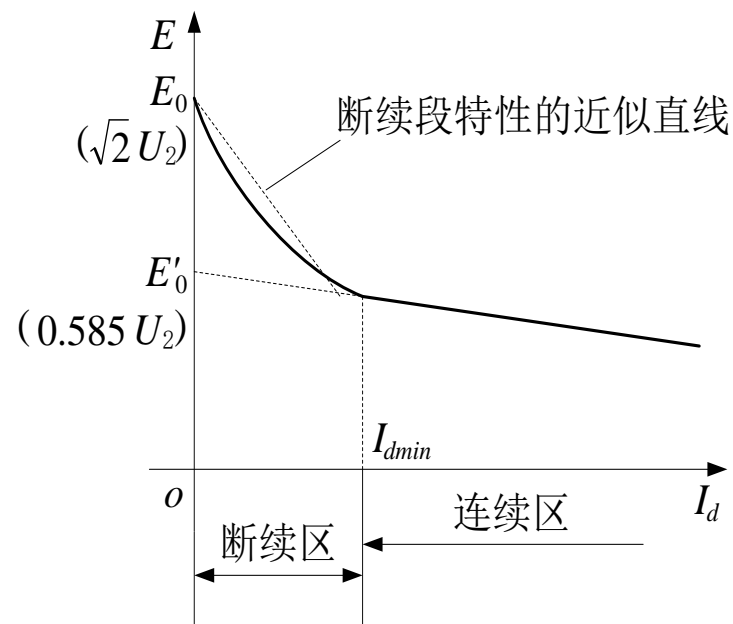


图10-3 电流断续时电动势的特性曲线

10.1.1 工作于整流状态时

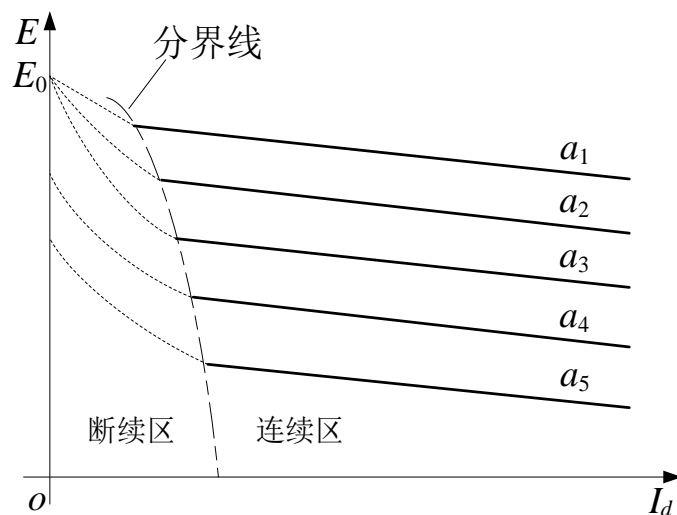


图10-4 考虑电流断续时不同 α 时
反电动势的特性曲线
 $\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 < 60^\circ$, $\alpha_5 > \alpha_4 > 60^\circ$

✎ 当电流断续时：

1. 电动机的理想空载转速抬高；
2. 在电流断续区内电动机的机械特性变软。
3. 随着 α 的增加，进入断续区的电流值加大。

10.1.1 工作于整流状态时

◆ 电流断续时电动机机械特性:

$$E_M = \sqrt{2}U_2 \cos \varphi \frac{\sin(\frac{\pi}{6} + \alpha + \theta - \varphi) - \sin(\frac{\pi}{6} + \alpha - \varphi)e^{-\theta \operatorname{tg} \varphi}}{1 - e^{-\theta \operatorname{tg} \varphi}}$$

$$n = \frac{E_M}{C'_e} = \frac{\sqrt{2}U_2 \cos \varphi}{C'_e} \times \frac{\sin(\frac{\pi}{6} + \alpha + \theta - \varphi) - \sin(\frac{\pi}{6} + \alpha - \varphi)e^{-\theta \operatorname{tg} \varphi}}{1 - e^{-\theta \operatorname{tg} \varphi}}$$

$$I_d = \frac{3\sqrt{2}U_2}{2\pi Z \cos \varphi} \left[\cos(\frac{\pi}{6} + \alpha) - \cos(\frac{\pi}{6} + \alpha + \theta) - \frac{C'_e}{\sqrt{2}U_2} \theta n \right]$$

式中, $\varphi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\omega L}{R}$, $Z = \sqrt{R^2 + L^2}$, L 为回路总电感。

10.1.2 工作于有源逆变状态时

■ 电流连续时电动机的机械特性

◆ 电压平衡方程式为

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

◆ 逆变时由于 $U_d = -U_{d0} \cos \beta$ ， E_M 反接，得

$$E_M = -(U_{d0} \cos \beta + I_d R_\Sigma)$$

电动机机械特性方程式：

$$n = -\frac{1}{C_e} (U_{d0} \cos \beta + I_d R_\Sigma)$$

◆ 上式的负号表示逆变时电动机的转向与整流时相反；**调节 β 即可改变电动机的运行转速。**

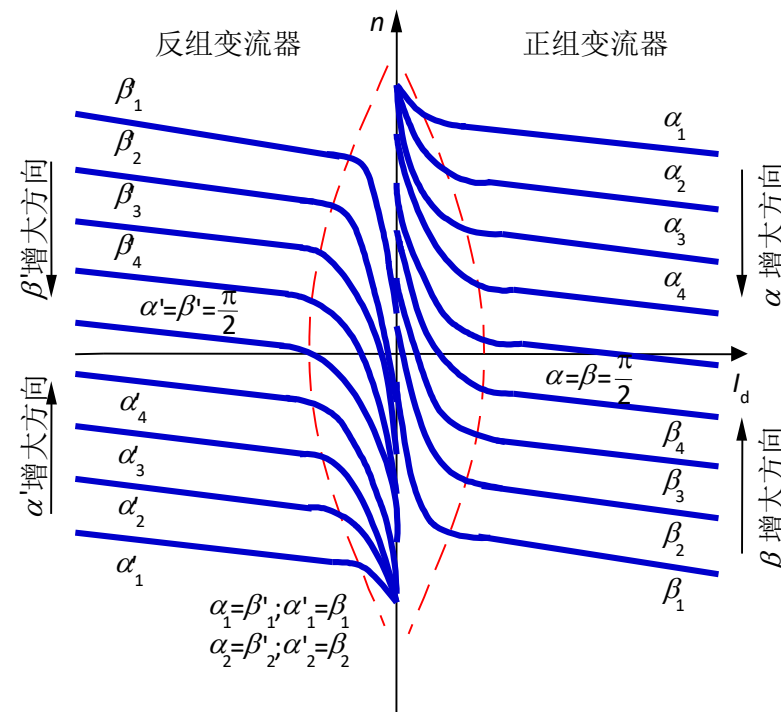


图10-5 电动机在四象限中的机械特性

10.1.2 工作于有源逆变状态时

■ 电流断续时电动机的机械特性

◆ 电动机机械特性可由下面三个式子准确地得出

$$E_M = \sqrt{2}U_2 \cos \varphi \frac{\sin\left(\frac{7\pi}{6} - \beta + \theta - \varphi\right) - \sin\left(\frac{7\pi}{6} - \beta - \varphi\right)e^{-\theta \operatorname{ctg} \varphi}}{1 - e^{-\theta \operatorname{ctg} \varphi}} \quad (10-13)$$

$$n = \frac{E_M}{C'_e} = \frac{\sqrt{2}U_2 \cos \varphi}{C'_e} \times \frac{\sin\left(\frac{7\pi}{6} - \beta + \theta - \varphi\right) - \sin\left(\frac{7\pi}{6} - \beta - \varphi\right)e^{-\theta \operatorname{ctg} \varphi}}{e^{-\theta \operatorname{ctg} \varphi}} \quad (10-14)$$

$$I_d = \frac{3\sqrt{2}U_2}{2\pi Z \cos \varphi} \left[\cos\left(\frac{7\pi}{6} - \beta\right) - \cos\left(\frac{7\pi}{6} - \beta + \theta\right) - \frac{C'_e}{\sqrt{2}U_2} \theta n \right] \quad (10-15)$$

当电流断续时电动机的机械特性不仅和**逆变角**有关，而且和**电路参数**、**导通角**等有关系。

10.1.3 直流可逆电力拖动系统

■ 直流可逆电力拖动系统

◆ 电路结构：根据电动机所需的运转状态来决定哪一组变流器工作及状态：整流或逆变

◆ 四象限运行时的工作情况

☞ 第I象限：正转，电动机作电动运行，正组工作在整流状态， $\alpha_1 < \pi/2$ ， $E_M < U_{d\alpha}$

☞ 注：下标中有 α 表示整流，有 β 表示逆变；下标1表示正组可控整流电路，下标2表示反组可控整流电路。

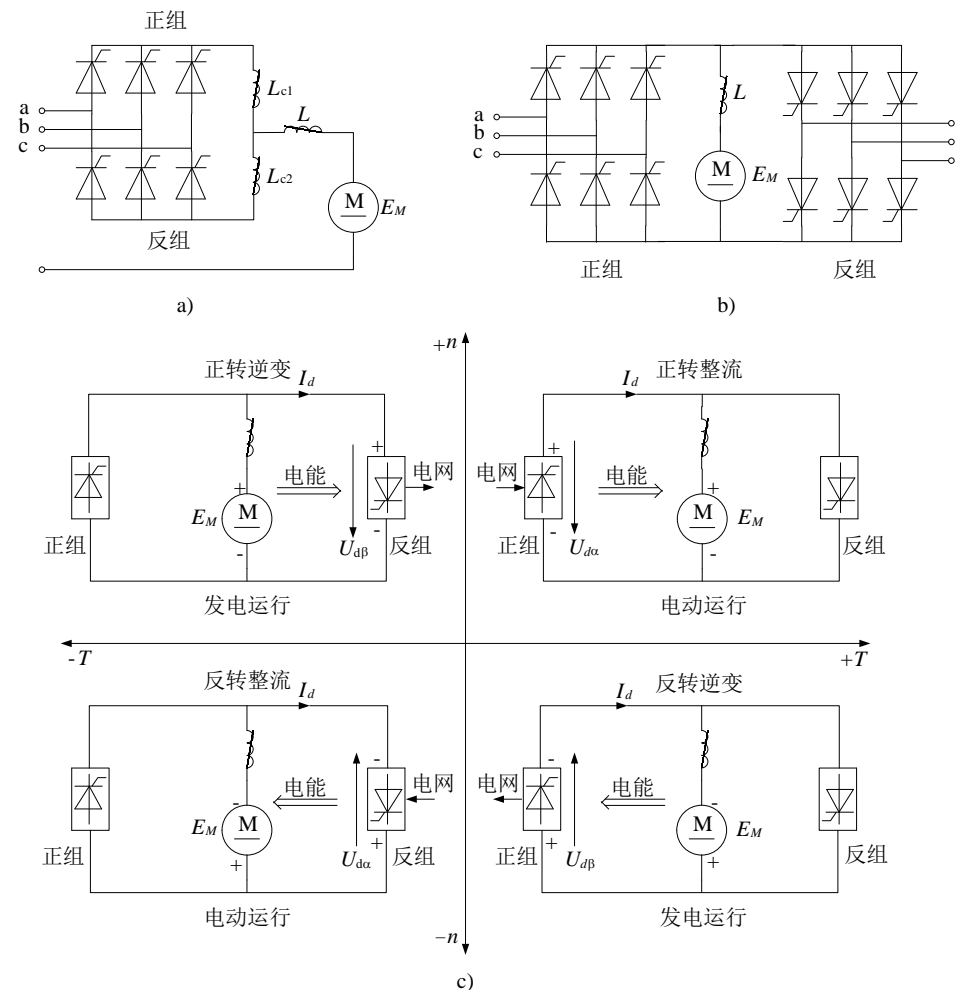


图10-6 两组变流器的反并联可逆线路

10.1.3 直流可逆电力拖动系统

第II象限：正转，电动机作发电运行，反组工作在逆变状态， $\beta_2 < \pi/2 (\alpha_2 > \pi/2)$ ， $E_M > U_{d\beta}$

第III象限：反转，电动机作电动运行，反组工作在整流状态， $\alpha_2 < \pi/2$ ， $E_M < U_{d\alpha}$ 。

第IV象限：反转，电动机作发电运行，正组工作在逆变状态， $\beta_1 < \pi/2 (\alpha_1 > \pi/2)$ ， $E_M > U_{d\beta}$ 。

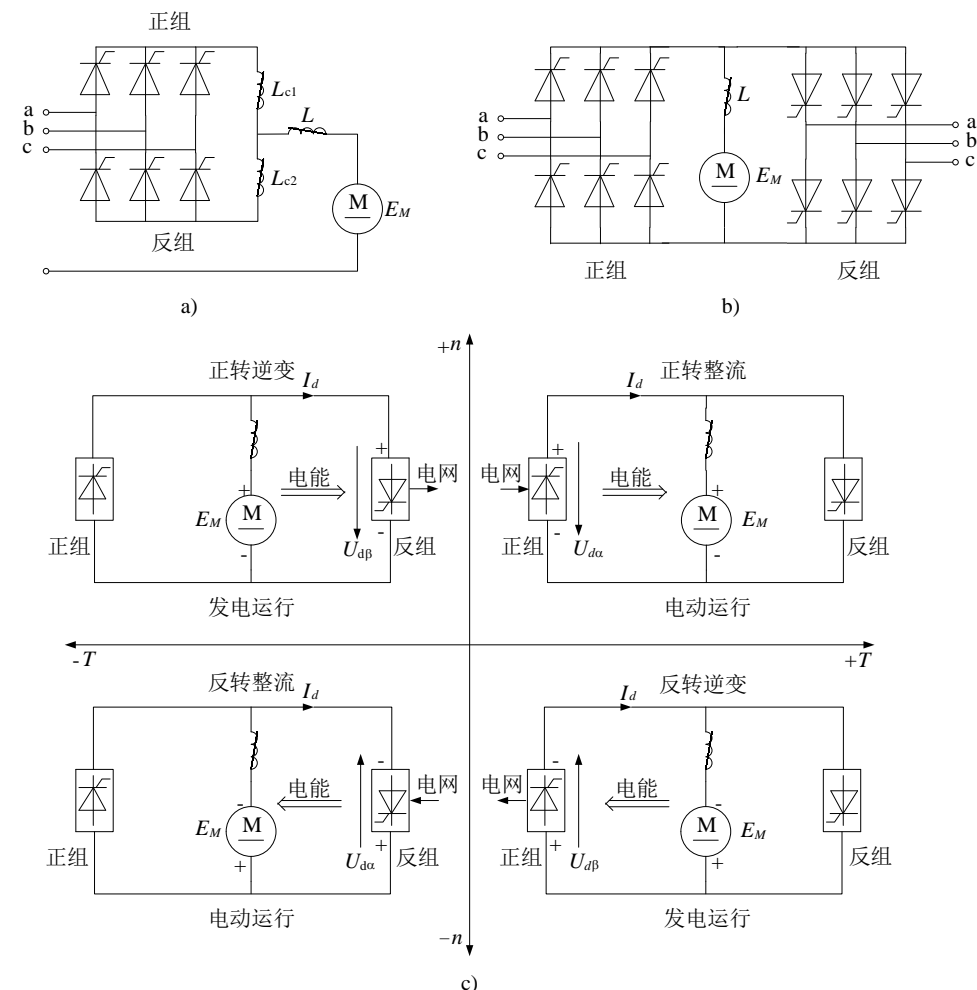


图10-6 两组变流器的反并联可逆线路

10.1.3 直流可逆电力拖动系统

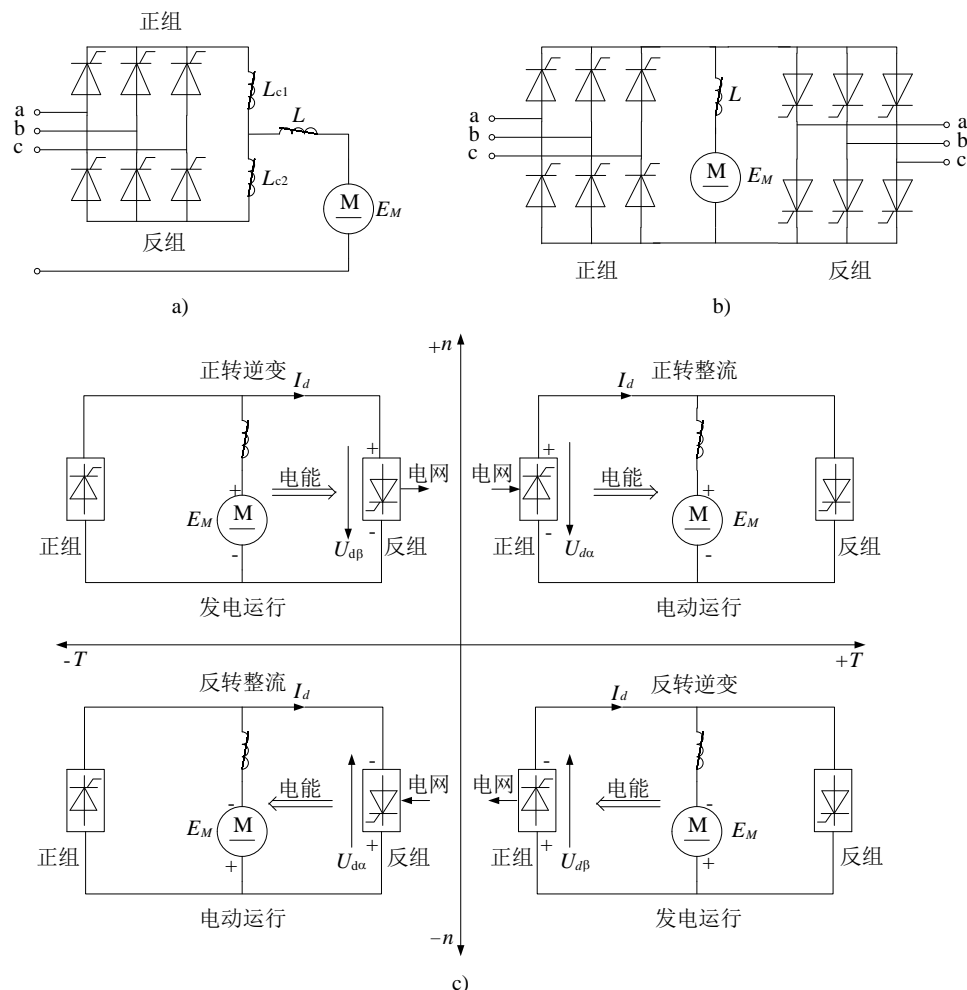


图10-6 两组变流器的反并联可逆线路

◆ 直流可逆拖动系统，能实现**正反向运转**，还能实现**回馈制动**。

✎ 由正转到反转的过程

✓ 从正组切换到反组工作，反组在逆变状态下工作，电动机进入第II象限作正转发电运行，电磁转矩变成制动转矩，机械能逆变回馈电网

✓ 改变反组的逆变角 β ，由小变大直至 $\beta = \pi/2$ ($n=0$)，继续增大 β ，即 $\alpha < \pi/2$ ，反组将转入整流状态，电动机开始反转进入第III象限，作电动运行

✎ 电动机从反转到正转，其过程则由第III象限经第IV象限最终运行在第I象限。

10.1.3 直流可逆电力拖动系统

◆ 根据对环流的不同处理方法，反并联可逆电路分为：**配合控制有环流**（即 $\alpha=\beta$ 工作制）、**可控环流**、**逻辑控制无环流**和**错位控制无环流**等

☞ 对于 $\alpha=\beta$ 配合控制的有环流可逆系统，对正、反两组变流器同时输入触发脉冲，并严格保证 $\alpha=\beta$ 的配合控制关系，**两组变流器的输出电压平均值相等，极性相抵，没有直流环流**；但输出电压瞬时值不等，会产生**脉动环流**，为防止环流使电源短路，必须串入**环流电抗器**，如图10-6 a) 中的 L_{C1} 和 L_{C2}

☞ **逻辑无环流可逆系统**不设置环流电抗器，两组桥在任何时刻只有一组投入工作（另一组关断），所以在两组桥之间就不存在环流；变流器之间的切换过程由逻辑单元控制，故称为逻辑控制无环流系统。