

第1篇

直流传动控制系统

直流电动机概述

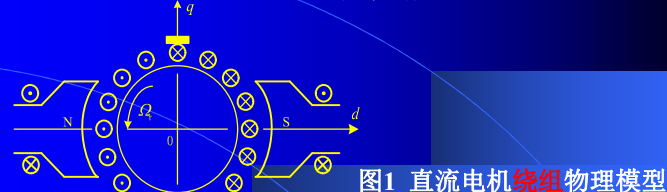


图1 直流电机绕组物理模型

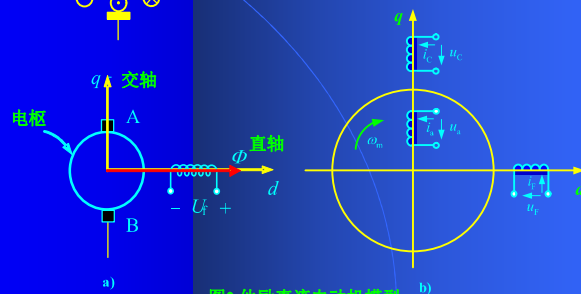


图2 他励直流电动机模型

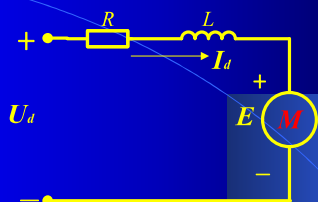


图3 直流电动机等效电路

直流电动机稳态时电压平衡方程式

$$U_d = K_e \Phi_N n + I_d R = C_e n + I_d R$$

直流电动机的稳态特性

$$n = \frac{U_d - I_d R}{K_e \Phi}$$

由上式可以看出，有三种方法调节电动机的转速：

- (1) 调节电枢供电电压 U_d ;
- (2) 减弱励磁磁通 Φ ;
- (3) 改变电枢回路电阻 R 。

(1) 调压调速 $n = \frac{U - IR}{K_e \Phi} = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{IR}{K_e \Phi} = n_0 - \Delta n$

工作条件：

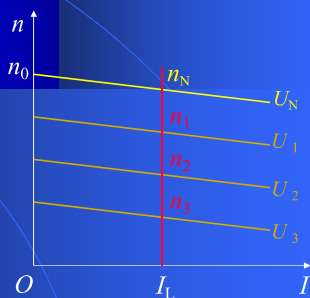
- 保持励磁 $\Phi = \Phi_N$;
- 保持电阻 $R = R_a$

调节过程：

改变电压 $U_N \rightarrow U \downarrow$
 $U \downarrow \rightarrow n \downarrow, n_0 \downarrow$

调速特性：

转速下降，机械特性曲线平行下移。



调压调速特性曲线

(2) 变电阻调速 $n = \frac{U - IR}{K_e \Phi} = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{IR}{K_e \Phi} = n_0 - \Delta n$

工作条件：

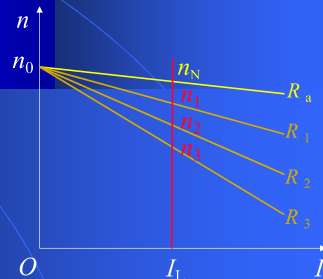
- 保持励磁 $\Phi = \Phi_N$;
- 保持电压 $U = U_N$;

调节过程：

增加电阻 $R_a \rightarrow R \uparrow$
 $R \uparrow \rightarrow n \downarrow, n_0 \text{ 不变}$;

调速特性：

转速下降，机械特性曲线变软。



调阻调速特性曲线

(3) 调磁调速

$$n = \frac{U - IR}{K_e \Phi} = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{IR}{K_e \Phi} = n_0 - \Delta n$$

工作条件:

保持电压 $U = U_N$;

保持电阻 $R = R_a$;

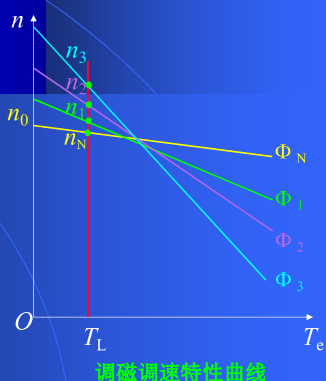
调节过程:

减小励磁 $\Phi_N \rightarrow \Phi \downarrow$

$\Phi \downarrow \rightarrow n \uparrow, n_0 \uparrow$

调速特性:

转速上升, 机械特性曲线变软。



■ 三种调速方法的性能与比较

改变电阻只能有级调速; 减弱磁通虽然能够平滑调速, 但调速范围不大, 往往只是配合调压方案, 在基速 (即电机额定转速) 以上作小范围的弱磁升速。

因此, 自动控制的直流调速系统往往以 **调压调速** 为主。

直流调速系统以调压调速为主!

第2章

开环控制的直流调速系统

内容提要

- 晶闸管整流器-直流电动机系统的工作原理及调速特性
- PWM变换器-直流电动机系统的工作原理及调速特性
- 稳态调速性能指标和开环系统存在的问题

§ 2.1 晶闸管整流器-直流电动机系统的工作原理及调速特性 (V-M系统)

2.1.1. 电路组成

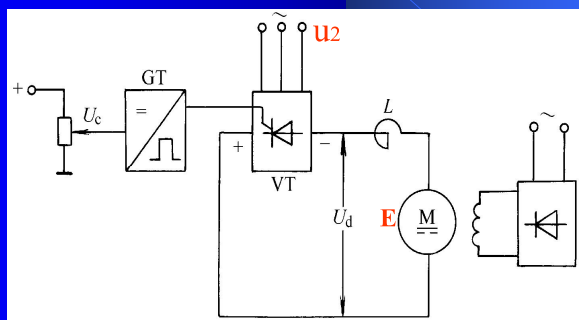


图 2-1 晶闸管可控整流器供电的直流调速系统 (V-M系统)

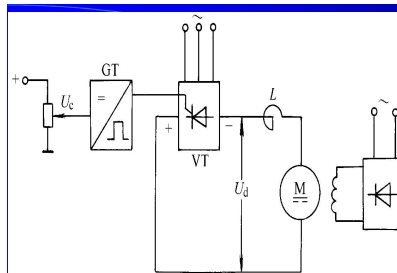


图2-2 V-M系统主电路的等效电路图

电压瞬时值表达式为:

$$u_{d0} = E + i_d R + L \frac{di_d}{dt}$$

$$u_{d0} - E = i_d R + L \frac{di_d}{dt}$$

式中

E ——电动机反电动势(V);

i_d ——整流电流瞬时值(A);

L ——主电路总电感(H);

R ——主电路总电阻(Ω);

2.1.2 V-M系统的控制过程

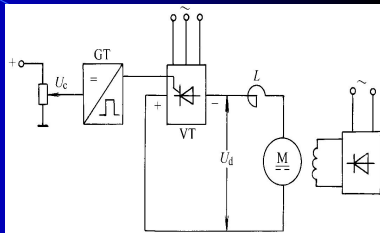
调节控制电压 U_c ,

改变触发装置GT输出脉冲的相位 α ,

改变可控整流器VT输出瞬时电压 u_d 的波形, 即改变输出的平均电压 U_d 的数值。

改变电机的转速 n

$$n = \frac{U_d - I_d R}{K_e \Phi}$$



2.1.3. 晶闸管整流输出电压

在理想情况下, U_d 和 U_c 之间呈线性关系:

$$U_{d0} = K_s U_c \quad (2-1)$$

式中, U_d ——整流输出平均电压,

U_c ——控制电压,

K_s ——晶闸管整流器放大系数。

晶闸管整流输出的电压平均值:

- 对于一般的全控整流电路, 当电流波形连续时, 可用下式表示:

$$U_{d0} = f(\alpha)$$

$$U_{d0} = \frac{m}{\pi} U_m \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha \quad (2-3)$$

式中, α ——从自然换相点算起的触发脉冲控制角;

U_m —— $\alpha=0$ 时的整流电压波形峰值;

m ——交流电源一周内的整流电压脉波数。

表2-1不同整流电路的整流电压波峰值、脉冲数及平均整流电压 * U_2 是整流变压器二次侧额定相电压的有效值

整流电路	单相全波	三相半波	三相全波
U_m	$\sqrt{2}U_2$	$\sqrt{2}U_2$	$\sqrt{6}U_2$
m	2	3	6
U_{d0}	$0.9U_2 \cos \alpha$	$1.17U_2 \cos \alpha$	$2.34U_2 \cos \alpha$

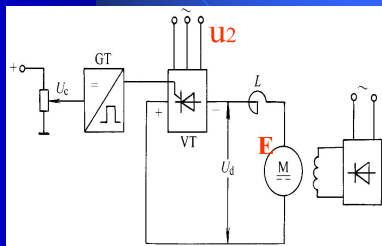
$$U_{d0} = \frac{m}{\pi} U_m \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha$$

2.1.4 电枢回路的电流波形

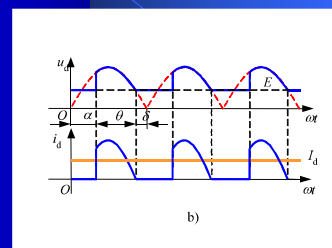
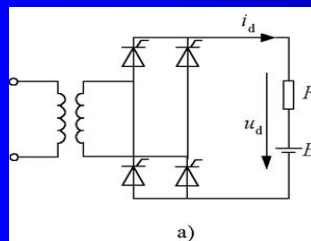
$$T_e = K_e \Phi_N I$$

- 晶闸管导通的条件:

在整流变压器二次侧额定相电压 u_2 的瞬时值大于反电动势 E 时, 晶闸管才可能被触发导通, 才会产生电枢电流。

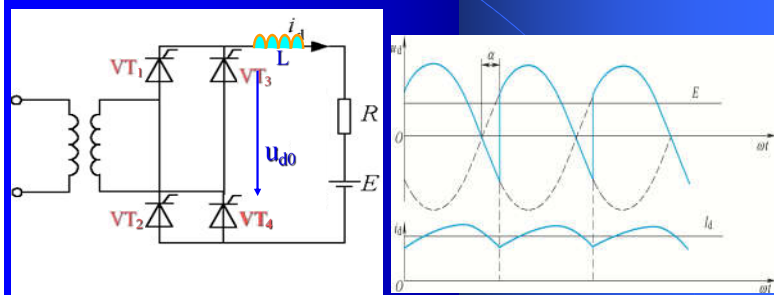


电流脉动的原因: 由于电压波形的脉动造成了电流波形的脉动



为了使电枢电流连续：要有续流电感L！

导通后如果 u_d 降低到 E 以下，靠电感作用可以维持电流 i_d 继续流通。

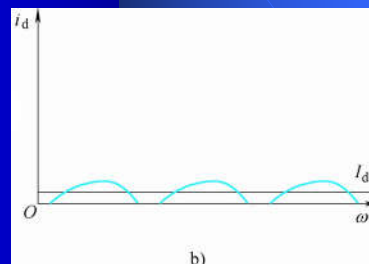
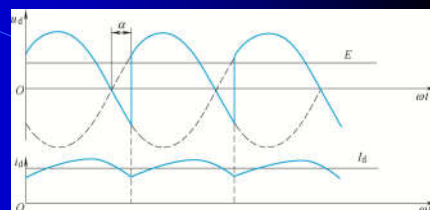


在 I_d 上升阶段，电感储能；
在 I_d 下降阶段，电感中的能量将释放出来维持电流连续。

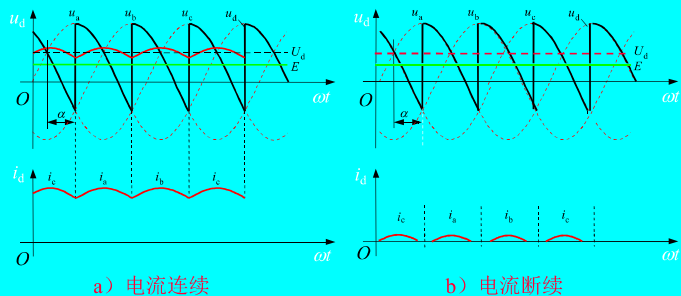
然而即使有续流电感L，

当电动机所带负载电流较小时，电感中的储能较少，

等到 i_d 下降到零时，造成电流波形断续。



•V-M系统主电路的输出



a) 电流连续

b) 电流断续

V-M系统的电流波形

抑制电流脉动和断续的措施

- ① 增加整流电路相数，或采用多重化技术；
- ② 设置电感量足够大的平波电抗器。

2.1.5 V-M系统的机械特性

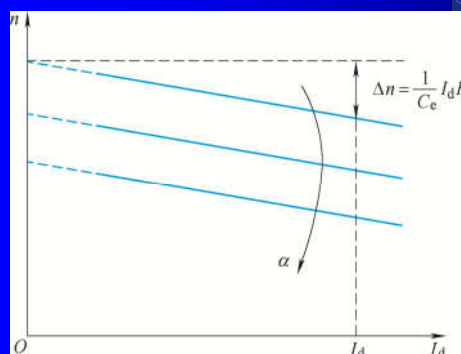
- 当电流波形连续时，V-M系统的机械特性方程式为

$$n = \frac{1}{C_e} (U_{d0} - I_d R) \quad (2-7)$$

式中， C_e ——电动机在额定磁通下的电动势系数

$$C_e = K_e \phi_N$$

$$n = \frac{1}{C_e} (U_{d0} - I_d R) \quad n = \frac{U_{d0}}{C_e} - \frac{I_d R}{C_e} = n_0 - \Delta n$$



稳态速降

图2-5 电流连续时V-M系统的机械特性

2.1.6 晶闸管触发和整流装置的传递函数

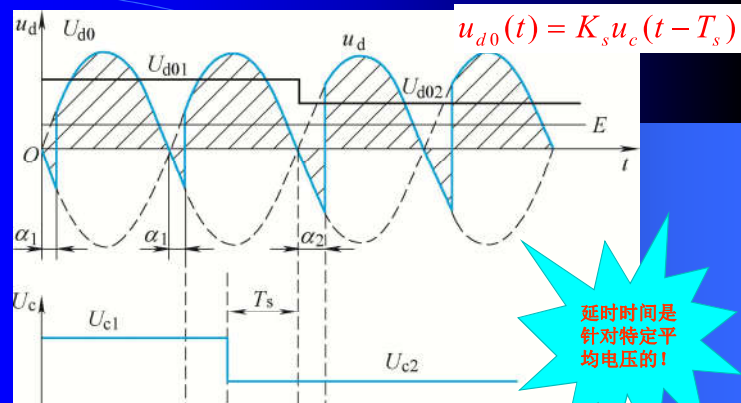
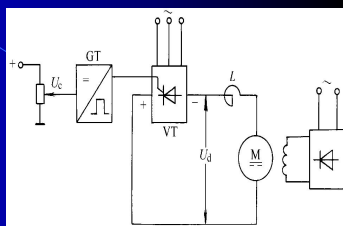
稳态关系：

$$U_{d0} = K_s U_c$$

晶闸管整流器的输入输出关系：

$$u_{d0}(t) = K_s u_c(t - T_s)$$

- 滞后作用是由晶闸管整流装置的失控时间引起的。



失控时间是个随机值。

最大失控时间是两个相邻自然换相点之间的时间，它与交流电源频率和晶闸管整流器的类型有关。

最大失控时间计算

$$T_{smax} = \frac{1}{mf} = \frac{T}{m} \quad (2-12)$$

式中， f ——交流电源频率(Hz)，

m ——一周内整流电压的脉波数。

平均失控时间

$$T_s = \frac{1}{2} T_{smax}$$

表2-2 晶闸管整流器的失控时间 ($f=50\text{Hz}$)

整流电路形式	最大失控时间 $T_{smax}(\text{ms})$	平均失控时间 $T_s(\text{ms})$
单相半波	20	10
单相桥式(全波)	10	5
三相半波	6.67	3.33
三相桥式	3.33	1.67

■ 晶闸管装置的传递函数为：

$$u_{d0}(t) = K_s u_c(t - T_s)$$

$$W_s(s) = \frac{U_{d0}(s)}{U_c(s)} = K_s e^{-T_s s} \quad (2-14)$$

传递函数的近似处理 $W_s(s) = \frac{U_{d0}(s)}{U_c(s)} = K_s e^{-T_s s}$

- 按泰勒级数展开，可得

$$W_s(s) = K_s e^{-T_s s} = \frac{K_s}{e^{T_s s}} = \frac{K_s}{1 + T_s s + \frac{1}{2!} T_s^2 s^2 + \frac{1}{3!} T_s^3 s^3 + \dots}$$

■ 依据工程近似处理的原则，可忽略高次项，把整流装置近似看作一阶惯性环节：

$$W_s(s) \approx \frac{K_s}{1 + T_s s} \quad (2-15)$$

$$U_{d0}(s) \approx \frac{K_s}{1+T_s s} U_c(s)$$

电源装置的数学模型

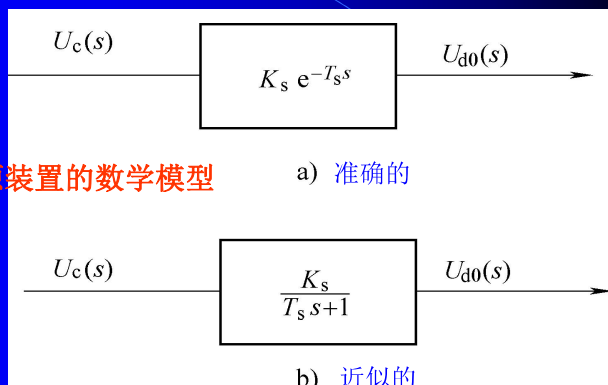
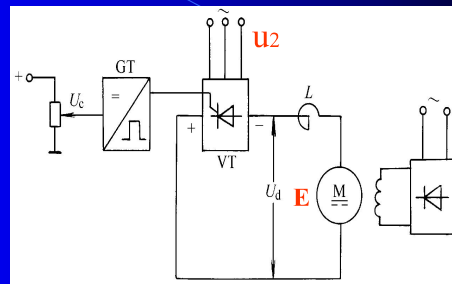


图2-9 晶闸管触发与整流装置动态结构图



这种系统电动机能否反转？



2.1.7 V-M系统的可逆运行

- 对于需要电流反向的直流电动机可逆调速系统，必须使用两组晶闸管整流装置反并联线路来实现可逆调速。
- 电动机正转时，由正组晶闸管装置VF供电；
- 反转时，由反组晶闸管装置VR供电。

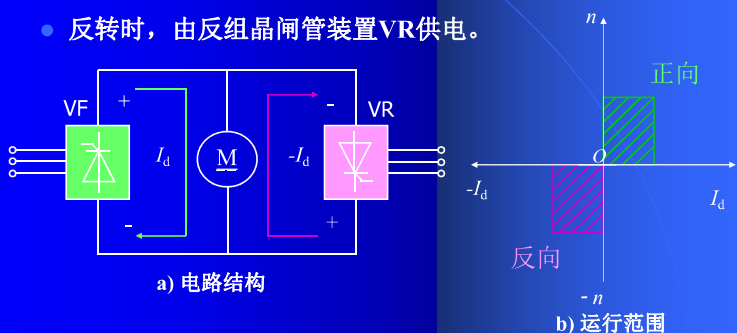
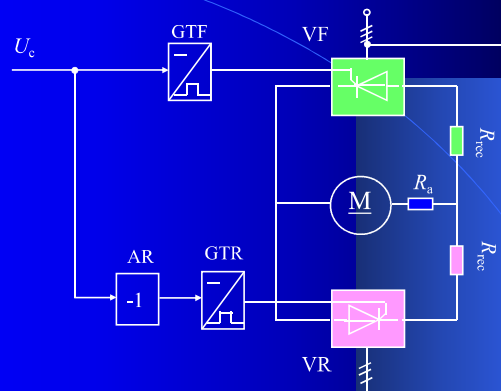


图2-10 两组晶闸管可控整流装置反并联可逆线路



GTR--正组触发装置 GTR--反组触发装置 AR--反号器

2.1.8 V-M系统中存在的问题

- 晶闸管是单向导电的，给系统的可逆运行造成困难。
- 晶闸管对过电压、过电流和过高的 du/dt 与 di/dt 都十分敏感。
- 半控整流电路谐波与无功功率引起电网电压波形畸变，殃及附近的用电设备，晶闸管的导通角变小时会使得系统的功率因数也随之减少，称之为“电力公害”。

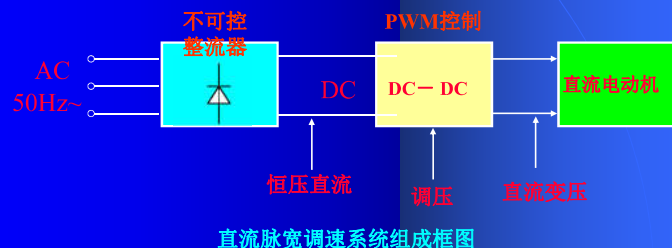
内容小结

- 由晶闸管相控整流装置供电组成的V-M系统的工作原理及特性。
- 控制过程如下：
- $U_c \longrightarrow$ 触发脉冲的相位 $\alpha \longrightarrow U_d \longrightarrow n$
可逆运行困难；

半控整流电路谐波与无功功率引起电网电压波形畸变，称之为“电力公害”。

§ 2.2 直流PWM变换器-电动机系统的工作原理及调速特性 (直流脉宽调速系统)

- 全控型电力电子器件问世以后,就出现了采用**脉冲宽度调制的高频开关控制方式**,形成了脉宽调制变换器-直流电动机调速系统,简称**直流脉宽调速系统**,或直流PWM调速系统。

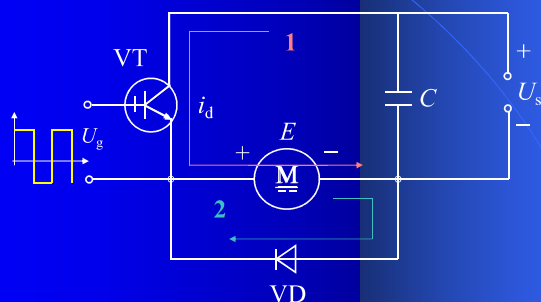


- PWM变换器**的作用是:用脉冲宽度调制的方法,把恒定的直流电源电压调制**成频率一定、宽度可变的脉冲电压序列**,从而可以改变平均输出电压的大小,以调节电动机转速。
- PWM变换器电路有多种形式**,总体上可分为**不可逆与可逆两大类**。

2.2.1 不可逆直流脉宽调速系统

1 简单直流脉宽调速系统

• 主电路结构



(a) 电路原理图

图2-10 简单的不可逆PWM变换器-直流电动机系统

• 工作状态与波形

在一个开关周期内:

- 当 $0 \leq t < t_{on}$ 时, U_g 为正, VT 导通, 电源电压通过 VT 加到电动机电枢两端, 即 $u_d = U_s$

- 当 $t_{on} \leq t < T$ 时, U_g 为负, VT 关断, 电枢失去电源, 经 VD 续流, 此时 $u_d = 0$

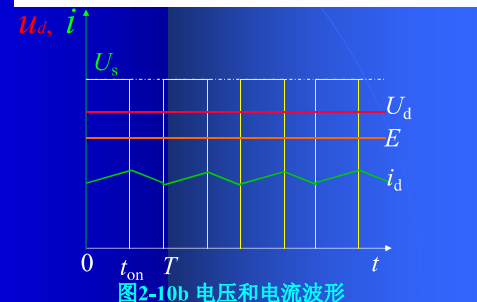
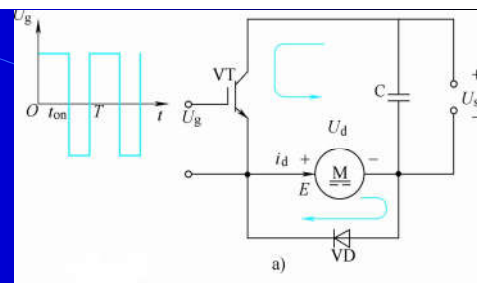


图2-10b 电压和电流波形

在一个开关周期内, 电枢两端的平均电压为:

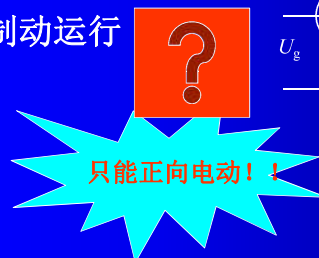
$$U_d = \frac{t_{on}}{T} U_s = \rho U_s \quad (2-17)$$

即: 改变**占空比** $\rho (0 \leq \rho \leq 1)$, 即可实现直流电动机的调压调速。

令 $\gamma = \frac{U_d}{U_s}$ 为**PWM电压系数**, 则在不可逆PWM变换器中

$$\gamma = \rho \quad (2-20)$$

能否实现电动机的制动运行



- 不可逆直流脉宽调速系统不允许电流反向,
- 续流二极管 VD 的作用只是为 i_d 提供一个续流的通道。如果实现电动机的制动, 必须为其提供反向电流通道。

2 有制动电流通路的不可逆直流脉宽调速系统

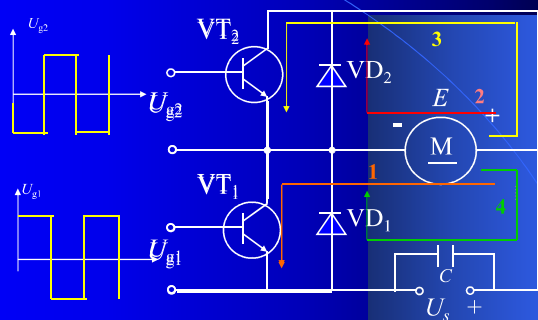
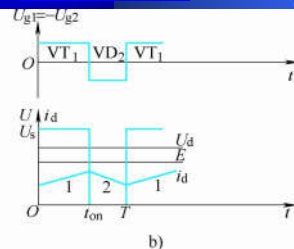
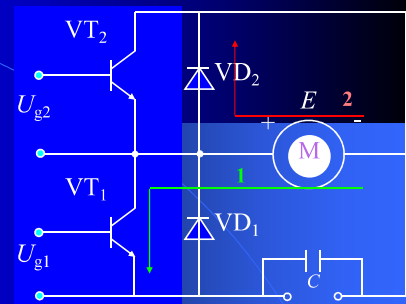


图2-12a 系统原理图

(1) 一般电动状态:

- 一个开关周期内:
- 在 $0 \leq t < t_{on}$ 期间, VT_1 导通, VT_2 关断。电流 i_d 沿图中的回路1流通。
- 在 $t_{on} \leq t < T$ 期间, VT_1 关断, i_d 沿回路2经二极管 VD_2 续流。
- VT_1 和 VD_2 交替导通, VT_2 和 VD_1 始终关断。



(2) 制动状态:

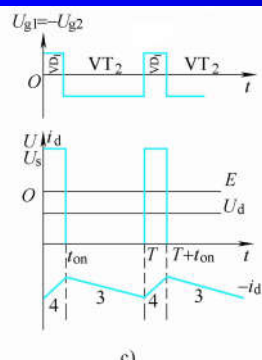
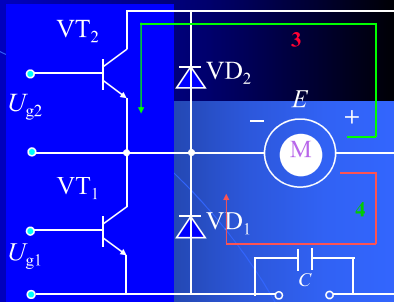
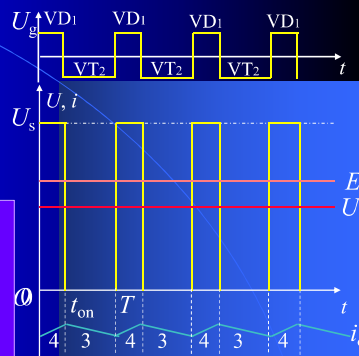
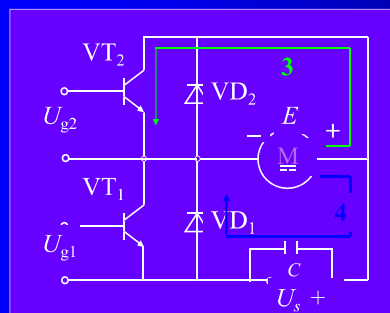


图2-12a 有制动电流通路的不可逆PWM变频器

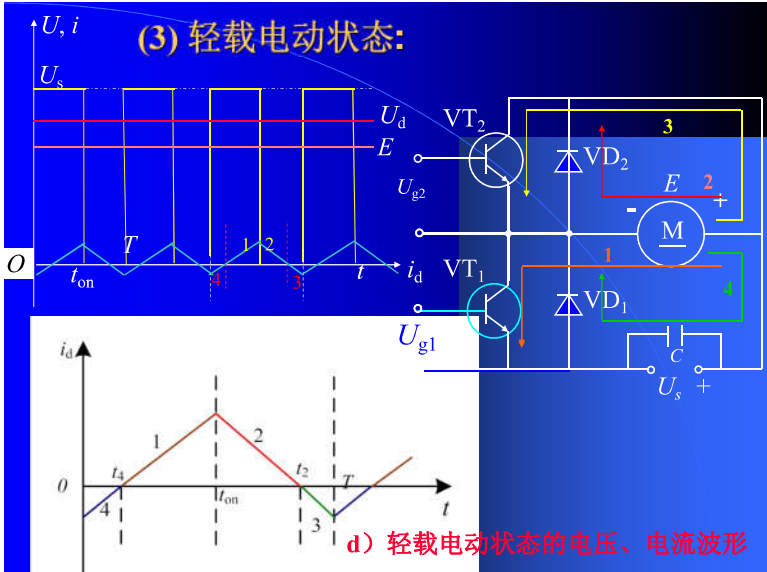


- 因此, 在制动状态中, VT_2 和 VD_1 轮流导通, 而 VT_1 始终是关断的。



c) 制动状态的电压、电流波形

(3) 轻载电动状态:

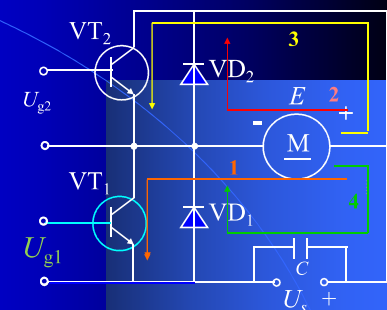


d) 轻载电动状态的电压、电流波形

轻载电动状态:

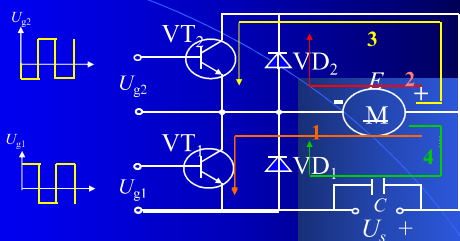
一个周期分成四个阶段:

- 第1阶段, VT_1 导通, 电流 i_d 沿回路1流通;
- 第2阶段, VD_2 续流, 电流 i_d 沿回路2流通;
- 第3阶段, VT_2 导通, 电流 $-i_d$ 沿回路3流通
- 第4阶段, VD_1 续流, 电流 $-i_d$ 沿回路4流通



电动机能否反向运行?

小结



- **不可逆**是因为平均电压 U_d 始终大于零，电流虽然能够反向，而电压和转速仍不能反向。
- **如果要求转速反向**，需要再增加VT和VD，构成可逆的直流脉宽调速系统。

2.2.2 可逆直流脉宽调速系统

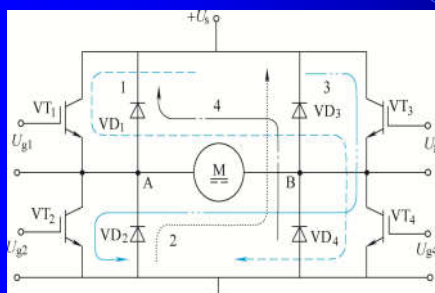


图2-13 桥式可逆PWM变换器电路

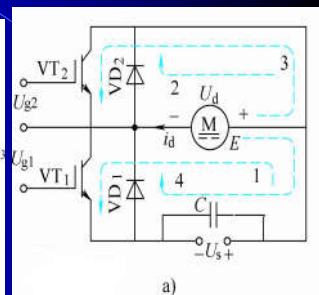
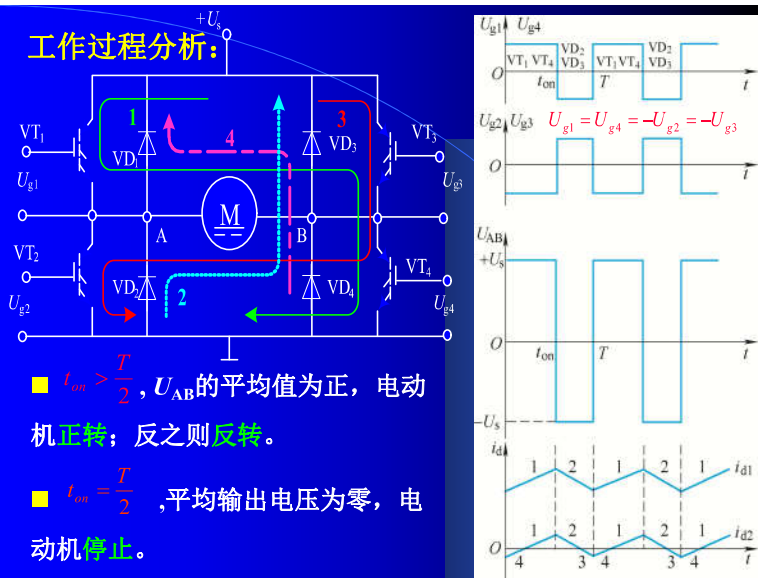
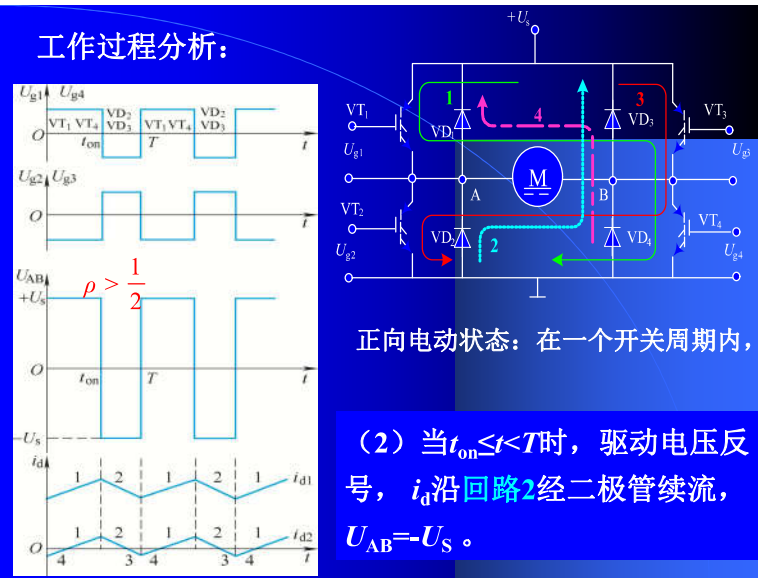


图2-12 有制动电流续流不可逆PWM变换器-普通电动机系统

工作过程分析:



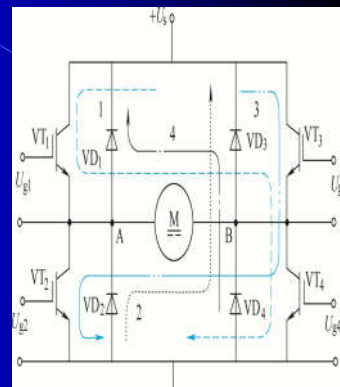
工作过程分析:



- 双极式控制的桥式可逆PWM变换器有下列**优点**：
- (1) 电流一定连续；
- (2) 可使电动机在四象限运行；
- (3) 电动机停止时有微振电流，能消除静摩擦死区；
- (4) 低速平稳性好，系统的调速范围大；

- 双极式控制方式的**不足**之处是：

- 在工作过程中，4个开关器件可能都处于开关状态，开关损耗大，而且在切换时可能发生上、下桥臂直通事故，为了防止直通，在上、下桥臂的驱动脉冲之间，应**设置逻辑延时环节**。



2.2.3 直流脉宽调速系统的机械特性

1) 电压平均值方程

$$\gamma U_s = RI_d + E = RI_d + C_e n \quad (2-25)$$

平均电压 $U_d = \gamma U_s$

平均电流 I_d

转速 $n = \frac{E}{C_e}$

2) 机械特性

机械特性方程式为

$$n = \frac{\gamma U_s}{C_e} - \frac{R}{C_e} I_d = n_0 - \frac{R}{C_e} I_d \quad (2-26)$$

用转矩表示为 $T_e = K_m \Phi_N I_d$

$$n = \frac{\gamma U_s}{C_e} - \frac{R}{C_e C_m} T_e = n_0 - \frac{R}{C_e C_m} T_e \quad (2-27)$$

式中, $C_m = K_m \Phi_N$ ——电动机在额定磁通下的转矩系数;

$$n_0 = \frac{\gamma U_s}{C_e} \quad \text{——理想空载转速, 与电压系数成正比。}$$

$$n = \frac{\gamma U_s}{C_e} - \frac{R}{C_e C_m} T_e = n_0 - \frac{R}{C_e C_m} T_e$$

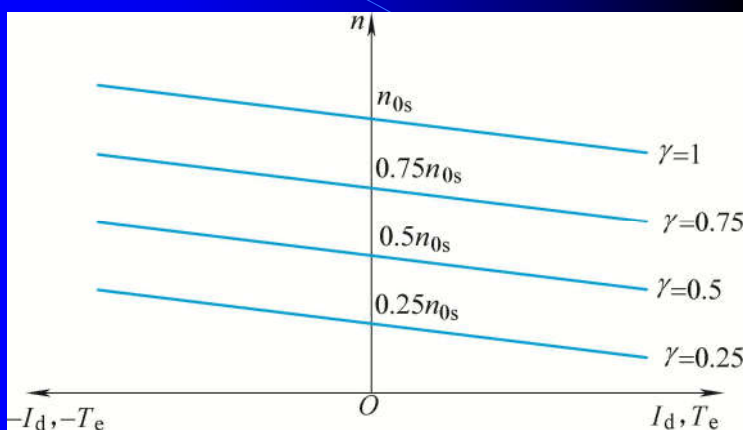


图2-15 直流PWM调速系统（电流连续）的机械特性

2.2.4 PWM控制器与变换器的动态数学模型

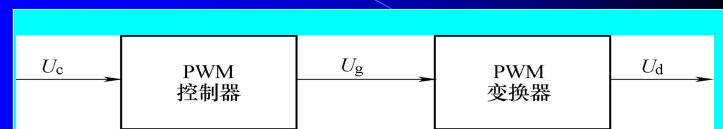


图2-16 PWM控制器与变换器框图

● 传递函数为 $W_s(s) = \frac{U_d(s)}{U_c(s)} = K_s e^{-T_s s} \quad (2-28)$

式中: K_s ——PWM装置的放大系数

T_s ——PWM装置的延迟时间,

● 近似的传递函数:

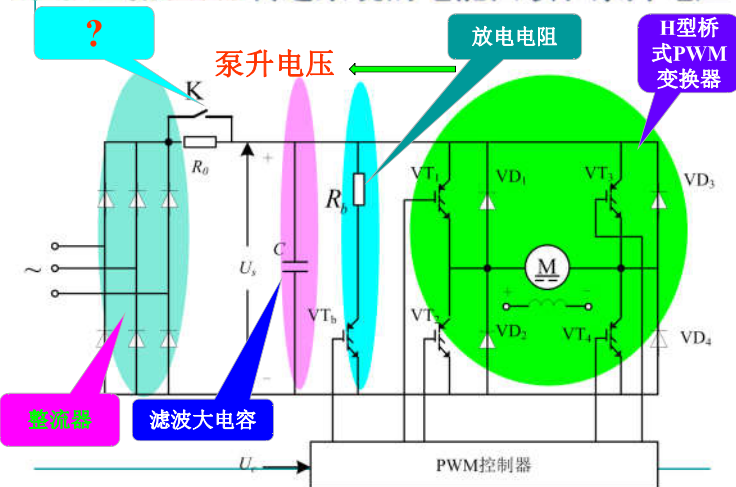
$$W_s(s) \approx \frac{K_s}{T_s s + 1} \quad (2-29)$$

2.2.5 直流PWM调速系统的电能回馈和泵升电压

- PWM变换器的直流电源通常由交流电网经不可控的二极管整流器产生, 并采用大电容C滤波, 以获得恒定的直流电压。
- 当电动机工作在回馈制动状态时, 电能不可能通过整流装置送回交流电网, 只能向滤波电容充电,
- 形成直流PWM变换器-电动机系统特有的电能回馈问题。

- 对滤波电容充电的结果造成直流侧电压升高, 称作“泵升电压”。
- 系统在制动时释放的动能将表现为电容储能的增加,
- 要适当地选择电容的电容量, 或采取其它措施, 以保护电力电子开关器件不被泵升电压击穿。

2.2.5 直流PWM调速系统的电能回馈和泵升电压



与V-M系统相比，PWM调速系统在很多方面有较大的优越性：

- (1) 主电路线路简单，需用的功率器件少；
- (2) 开关频率高，电流容易连续，谐波少，电机损耗及发热都较小；
- (3) 低速性能好，稳速精度高，调速范围宽，可达1:10000左右；
- (4) 若与快速响应的电机配合，则系统频带宽，动态响应快，动态抗扰能力强；

(5) 功率开关器件工作在开关状态，导通损耗小，当开关频率适当时，开关损耗也不大，因而装置效率较高；

(6) 直流电源采用不可控整流时，电网功率因数比相控整流器高。

直流PWM调速系统的应用日益广泛，特别在中、小容量的高动态性能系统中，已经完全取代了V-M系统。

内容回顾

- V-M调速系统
- 直流脉宽调速系统

直流PWM调速系统的应用日益广泛，特别在中、小容量的调速系统中，已经完全取代了V-M系统。

§ 2.3 稳态调速性能指标和开环系统存在的问题

§ 2.3.1 转速控制的要求和稳态调速性能指标

● 1 调速系统转速控制的要求：

- (1) **调速**——在一定的最高转速和最低转速范围内调节转速；(调速范围要大)
- (2) **稳速**——以一定的精度在所需转速上稳定运行，在各种干扰下不允许有过大的转速波动；(稳速精度高)；
- (3) **加、减速**——频繁起、制动的设备要求加、减速尽量快；不宜经受剧烈速度变化的机械则要求起、制动尽量平稳。(加减速要快，起制动要平稳)

2 稳态调速性能指标

(1) 调速范围

- 生产机械要求电动机提供的最高转速 n_{max} 和最低转速 n_{min} 之比称为调速范围，用字母 D 表示，即

$$D = \frac{n_{max}}{n_{min}} \quad (2-31)$$

n_{max} 和 n_{min} 是电动机在额定负载时的最高和最低转速，

- 对于少数负载很轻的机械，也可用实际负载时的最高和最低转速。

(2) 静差率 s

- 当系统在某一转速下运行时，负载由理想空载增加到额定值所对应的转速降落 Δn_N 与理想空载转速 n_0 之比

$$s = \frac{\Delta n_N}{n_0} \quad (2-32)$$

- 用百分数表示 $s = \frac{\Delta n_N}{n_0} \times 100\% \quad (2-33)$

■ 静差率 s 越小越好， s 越小电机工作越平稳。

当调速时，转速越小，静差率越大。
若最低转速的静差率符合要求，则最大转速时的静差率也符合要求。

例如：在1000r/min时降落10r/min，只占1%；在100r/min时同样降落10r/min，就占10%；如果在只有10r/min时，再降落10r/min，就占100%，这时电动机已经停止转动，转速全部降落完了。

因此，调速范围和静差率这两项指标并不是彼此孤立的，必须同时提才有意义。调速系统的静差率指标应以最低速时所能达到的数值为准。

调速范围为：
$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{n_N}{n_{\min}}$$

将 $n_{\min} = \frac{(1-s)\Delta n_N}{s}$ 代入上面的式子得

$$D = \frac{n_N s}{\Delta n_N (1-s)} \quad (2-34)$$

(2-34) 式表示调压调速系统的调速范围、静差率和额定速降之间所应满足的关系。

(3) 静差率与机械特性硬度的区别 $s = \frac{\Delta n_N}{n_0} \times 100\%$

静差率和机械特性硬度的区别：

一般调压调速系统在不同转速下的机械特性是互相平行的。对

- 特性 a 和 b 的硬度相同， a 和 b 额定速降相同，
- 特性 a 和 b 的静差率不相同。

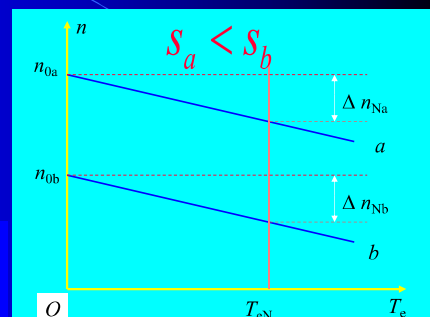


图2-14 不同转速下的静差率

(4) 调速范围、静差率和额定速降之间的关系

设：电机额定转速 n_N 为最高转速，转速降落为 Δn_N ，则按照上面分析的结果，该系统的静差率应该是最低速时的静差率，即

$$s = \frac{\Delta n_N}{n_{0\min}} = \frac{\Delta n_N}{n_{\min} + \Delta n_N}$$

于是，最低转速为

$$n_{\min} = \frac{\Delta n_N}{s} - \Delta n_N = \frac{(1-s)\Delta n_N}{s}$$

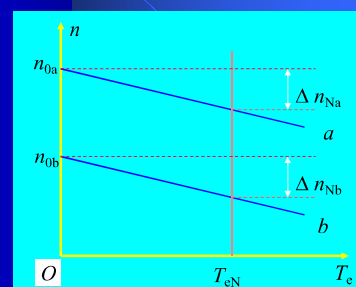


图2-14 不同转速下的静差率

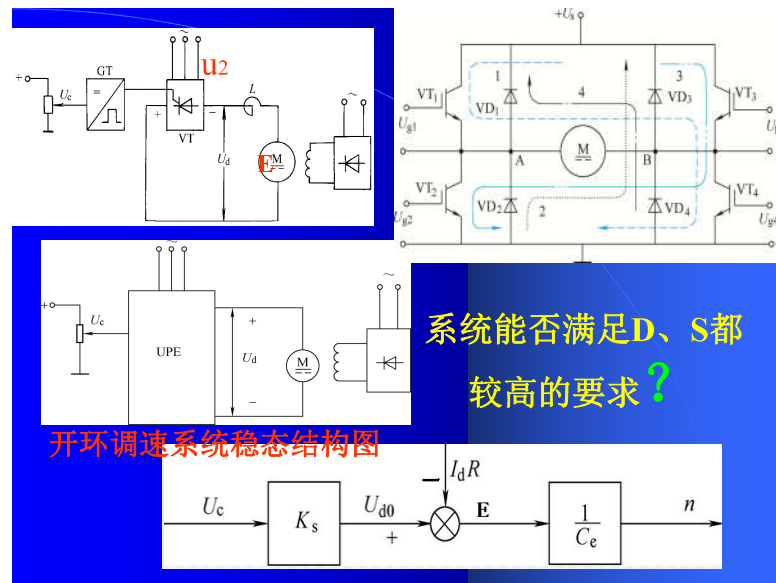
- 结论：
$$D = \frac{n_N s}{\Delta n_N (1-s)}$$

对于同一个调速系统， Δn_N 值一定， $n = \frac{rU_s}{C_s} - \frac{R}{C_s} I_s = n_0 - \frac{R}{C_s} I_s$ 即机械特性的硬度是一样的，但静差率 s 是不一样的。

- 如果对静差率要求越严，即要求的 s 值越小，系统能够允许的调速范围 D 也越小。
- 一个调速系统的调速范围，是指在最低速时还能满足所需静差率的转速可调范围。

§ 2.3.2 开环直流调速系统及存在的问题

- 开环调速系统：即不带反馈控制的直流调速系统。
- 调节控制电压 U_c 就可以改变电动机的转速。
- 晶闸管整流器和PWM变换器都是可控的直流电源，用UPE来统一表示可控直流电源。



例题2-1

- 某直流调速系统电动机额定转速为 $n_N=1430\text{r/min}$ ，额定速降 $\Delta n_N=115\text{r/min}$ ，
 - (1) 当要求静差率 $s \leq 30\%$ 时，允许多大的调速范围？
 - (2) 如果要求静差率 $s \leq 20\%$ ，则调速范围是多少？
 - (3) 如果希望调速范围达到10，所能满足的静差率是多少？

解：

- (1) 在要求 $s \leq 30\%$ 时，允许的调速范围为：

$$D = \frac{n_N s}{\Delta n_N (1-s)} = \frac{1430 \times 0.3}{115 \times (1-0.3)} = 5.3$$

- (2) 若要求 $s \leq 20\%$ ，则允许的调速范围只有：

$$D = \frac{1430 \times 0.2}{115 \times (1-0.2)} = 3.1$$

- (3) 若调速范围达到10，则静差率只能是：

$$s = \frac{D \Delta n_N}{n_N + D \Delta n_N} = \frac{10 \times 115}{1430 + 10 \times 115} = 0.446 = 44.6\%$$

- 例题2-2 某龙门刨床工作台拖动采用直流电动机，其额定数据如下：60kW、220V、305A、1000r/min，采用V-M系统，主电路总电阻 $R=0.18\Omega$ ，电动机电动势系数 $C_e=0.2V$ 。如果要求调速范围 $D=20$ ，静差率5%，系统的额定速降最多能有多少？
- 采用开环调速系统能否满足这个要求？

解： 当电流连续时，V-M系统的额定速降为：

$$\Delta n_N = \frac{I_{dN} R}{C_e} = \frac{305 \times 0.18}{0.2} \text{ r/min} = 275 \text{ r/min}$$

开环系统机械特性连续段在额定转速时的静差率为

$$s_N = \frac{\Delta n_N}{n_N + \Delta n_N} = \frac{275}{1000 + 275} = 0.216 = 21.6\%$$

这已大大超过了5%的要求，更不必谈调到最低速了。

如果要求 $D = 20$, $s \leq 5\%$, 则由式(2-34)可知

$$\Delta n_N = \frac{n_N s}{D(1-s)} \leq \frac{1000 \times 0.05}{20 \times (1-0.05)} r/min = 2.63 r/min$$

由上例可以看出, 开环调速系统的额定速降是275 r/min, 而生产工艺的要求却只有2.63 r/min, 相差百倍!

由此可见, 开环调速系统已不能满足要求, 需采用反馈控制的闭环调速系统来解决这个问题。

作业题

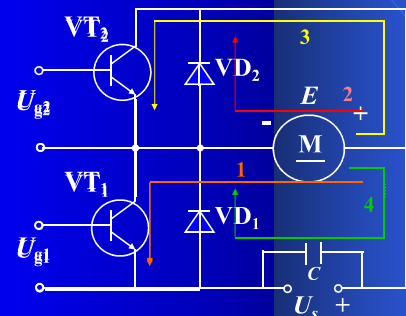
- 思考题
- 2-1, 2-10
- 习题
- 2-1, 2-3, 2-5

P26 2-1. 直流电动机有哪几种调速方法? 各有什么特点?

- 三种调速方法:
- (1) 改变电阻: 变电阻只能有级调速。
- (2) 弱磁调速: 虽然能够平滑调速, 但调速范围不大。
- (3) 调节电枢供电电压 U_d : 可实现大范围平滑调速。

直流调速系统以调压调速为主!

2-2 直流PWM变换器主电路中反并联二极管有何作用? 如果二极管断路会产生什么后果?



习题:

2-3 某一调速系统, 在额定负载下, 最高转速为 $n_{0\max} = 1500 r/min$

最低转速为 $n_{0\min} = 150 r/min$ 带额定负载时的速度降落 $\Delta n_N = 15 r/min$

且在不同转速下额定速降不变, 试问系统能够达到的调速范围有多大? 系统允许的静差率是多少?

解: 1) 调速范围

$$n_{\max} = n_{0\max} - \Delta n_N = 1500 - 15 = 1485 \quad n_{\min} = n_{0\min} - \Delta n_N = 150 - 15 = 135$$

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = 1485 / 135 = 11$$

(2) 静差率

$$s = \Delta n_N / n_0 = 15 / 150 = 10\%$$

2-5 某龙门刨床工作台采用V-M调速系统。已知直流电动机

$$P_N = 60 kW, U_N = 220 V, I_N = 305 A, n_N = 1000 r/min$$

主电路总电阻 $R = 0.18 \Omega$, $C_e = 0.2 V \cdot min/r$, 求:

- (1) 当电流连续时, 在额定负载下的转速降落 Δn_N 为多少?
- (2) 开环系统机械特性连续段在额定转速时的静差率 s_N 为多少?
- (3) 若要满足 $D=20$, $s \leq 5\%$ 的要求, 额定负载下的转速降落 Δn_N 又为多少?

解: (1) $\Delta n_N = I_N \times R / C_e = 305 \times 0.18 / 0.2 = 274.5 r/min$

$$(2) \quad s_N = \Delta n_N / n_0 = 274.5 / (1000 + 274.5) = 21.5\%$$

$$(3) \quad \Delta n = n_N s / [D(1-s)] = 1000 \times 0.05 / [20 \times 0.95] = 2.63 r/min$$

2-9 有一V-M调速系统：电动机参数 $P_N=2.2\text{kW}$, $U_N=220\text{V}$, $I_N=12.5\text{A}$, $n_N=1500\text{ r/min}$, 电枢电阻 $R_a=1.5\Omega$, 电枢回路电抗器电阻 $R_L=0.8\Omega$, 整流装置内阻 $R_{\text{rec}}=1.0\Omega$, 触发整流环节的放大倍数 $K_s=35$ 。要求系统满足调速范围 $D=20$, 静差率 $S\leq 10\%$ 。

(1) 计算开环系统的静态速降 Δn_{op} 和调速要求所允许的闭环静态速降 Δn_{cl} 。

(2) 采用转速负反馈组成闭环系统，试画出系统的原理图和静态结构图。

(3) 调整该闭环系统参数，使当 $U_n^*=15\text{V}$ 时， $I_d=I_N$, $n=n_N$ ，则转速负反馈系数 α 应该是多少？

(4) 计算放大器所需的放大倍数。

解：(1)

$$n_N = (U_N - I_N \times R_a) / C_e$$

$$\Rightarrow C_e = (220 - 12.5 \times 1.5) / 1500 = 201.25 / 1500 = 0.134 \text{ V} \cdot \text{min} / \text{r}$$

$$n = (U_{d0} - I_d \times R_\Sigma) / C_e$$

$$\text{稳态时: } \Delta n_{\text{op}} = I_N \times R_\Sigma / C_e = 12.5 \times 3.3 / 0.134 = 307.836 \text{ r} / \text{min}$$

$$\Delta n_N = n_N s / (D(1-s)) = 1500 \times 10\% / (20 \times 90\%) = 8.33 \text{ r} / \text{min}$$

$$\text{所以, } \Delta n_{\text{cl}} = 8.33 \text{ r} / \text{min}$$

(2) 原理图和静态结构图如教材中图2-18, 2-19

$$(3) \quad K = (\Delta n_{\text{op}} / \Delta n_{\text{cl}}) - 1 = 307.836 / 8.33 - 1 = 35.955$$

$$n = (K_p K_s U_n^* - I_d R) / (C_e (1+K)) = [K U_n^* / \alpha (1+K)] - [I_d R / (C_e (1+K))]$$

$$1500 = [35.955 \times 15 / \alpha (1+35.955)] - [12.5 \times 3.3 / (0.134 (1+35.955))]$$

$$\Rightarrow \alpha = 0.0096 \text{ V} \cdot \text{min} / \text{r}$$

$$(4) \text{ 可以求得 } K_p = \frac{K * C_e}{K_s * \alpha} = \frac{35.955 * 0.134}{35 * 0.0096} = 14.34$$

(3)/(4)也可以用粗略算法：

$$U_n^* \approx U_n = \alpha n \quad \alpha = \frac{U_n^*}{n} = \frac{15}{1500} = 0.01$$

$$K_p = K C_e / K_s \alpha \quad K_p = 35.955 \times 0.134 / (35 \times 0.01) = 13.76$$