

## 第1章 单环控制直流调速系统

1-1 什么叫调速范围？什么叫静差率？调速范围与静态速降和最小静差率有什么关系？如何扩大调速范围？为什么？

答：最高转速和最低转速之比叫做调速范围， $D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{n_N}{n_{\min}}$ 。

静差率是负载由理想空载增加到额定值所对应的转速降落 $\Delta n_N$ 与理想空载转速 $n_0$ 之比

$$s = \frac{\Delta n}{n_0}。$$

调速范围、静差率和额定速降之间的关系是： $D = \frac{n_N s}{\Delta n_N (1 - s)}$

只有设法减小静态速降 $\Delta n_N$ 才能扩大调速范围，减小静差率，提高转速的稳定度。

1-2 在直流调速系统中，改变给定电压能否改变电动机的转速？为什么？若给定电压不变，调整反馈电压的分压比，是否能够改变转速？为什么？

答：改变给定电压可以改变电动机的转速，因为系统对给定作用的变化响应是从；调整反馈电压的分压比可以改变转速，因为 $n = \frac{U_n^*}{\alpha}$ 。

1-3 转速负反馈系统的开环放大系数为 10，在额定负载时电动机转速降为 50r/min，如果将系统开环放大系数提高为 30，它的转速降为多少？在同样静差率要求下，调速范围可以扩大多少倍？

解： $\Delta n_N = 50 \text{ r/min}$ ， $K = 10$

$$\text{又 } \Delta n_{cl} = \frac{\Delta n_{op}}{1 + K}，\text{ 则 } \Delta n_{op} = 550 \text{ r/min}$$

$$\text{开环放大系数提高为 30，} \Delta n_{cl}' = \frac{\Delta n_{op}}{1 + K} = \frac{550}{1 + 30} = 17.74 \text{ r/min}$$

$$\text{由 } D = \frac{n_N s}{\Delta n_{cl} (1 - s)}，s \text{ 和 } n_N \text{ 不变，则 } D_2 = \frac{50}{17.74} D_1 = 2.82 D_1$$

所以，在同样静差率要求下，调速范围可以扩大 2.82 倍。

1-4 某调速系统的调速范围是 100~1000 r/min，要求  $S=5\%$ ，系统允许的静态转速降是多少？如果开环系统的静态转速降为 50 r/min，则闭环系统的开环放大系数应为多大？

$$\text{解：} D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{1000}{100} = 10$$

$$D = \frac{n_N s}{\Delta n_{cl} (1 - s)} = \frac{1000 \times 0.05}{\Delta n_{cl} \times (1 - 0.05)}，\Delta n_{cl} = 5.26 \text{ r/min}$$

$$\text{又 } \Delta n_{cl} = \frac{\Delta n_{op}}{1 + K}，\text{ 则 } K = \frac{50}{5.26} - 1 = 8.5$$

1-5 某调速系统的调速范围  $D=10$ ，额定转速  $n_N=1000 \text{ r/min}$ ，开环转速降  $\Delta n_N=200 \text{ r/min}$ ，若要求系统的静差率由 15% 减小到 5%，则系统的开环放大系数将如何变化？

$$\text{解：} \Delta n_{cl1} = \frac{n_N s}{D (1 - s)} = \frac{1000 \times 0.15}{10 \times (1 - 0.15)} = 17.65 \text{ r/min}$$

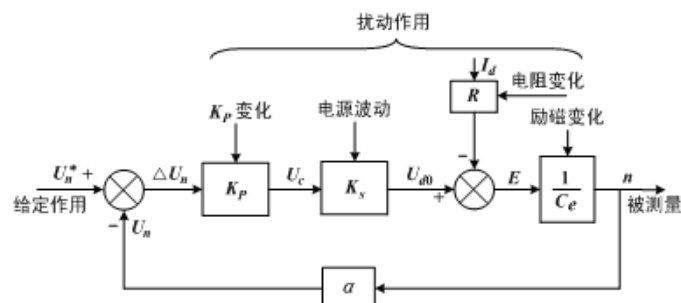
$$\Delta n_{cl2} = \frac{n_N s}{D (1 - s)} = \frac{1000 \times 0.05}{10 \times (1 - 0.05)} = 5.26 \text{ r/min}$$

$$K_1 = \frac{\Delta n_{op}}{\Delta n_{cl}} - 1 = \frac{200}{17.65} - 1 = 10.33，K_2 = \frac{\Delta n_{op}}{\Delta n_{cl}} - 1 = \frac{200}{5.26} - 1 = 37.02$$

$$\frac{K_2}{K_1} = \frac{37.02}{10.33} = 3.58, \text{ 开环放大系数扩大 } 3.58 \text{ 倍。}$$

1-6 在转速负反馈系统中，当电网电压、负载转矩、励磁电流、电枢电阻、测速发电机磁场各量发生变化时，都会引起转速的变化，问系统对它们有无调节能力？为什么？

答：见图。系统对反馈环内前向通道上的扰动作用能够调节，其它无能为力。测速发电机磁场发生变化不能调节。



1-7 积分调节器有哪些主要功能特点？采用积分调节器的转速负反馈调速系统为什么能使转速无静差？

答：积分调节器主要功能特点：（1）延缓作用；（2）积累作用；（3）记忆作用；（4）动态放大系数自动变化的作用。

在动态过程中，当  $\Delta U_n$  变化时，只要其极性不变，积分调节器的输出  $U_c$  便一直增长；只有达到  $U_n^* = U_n$ ,  $\Delta U_n = 0$  时， $U_c$  才停止上升；不到  $\Delta U_n$  变负， $U_c$  不会下降。 $\Delta U_n = 0$  时， $U_c$  并不是零，而是一个终值；如果  $\Delta U_n$  不再变化，这个终值便保持恒定而不再变化，这是积分控制的特点。因此，积分控制可以使系统在无静差的情况下保持恒速运行，实现无静差调速。

1-10 在无静差调速系统中，如果转速检测环节参数或转速给定电压发生了变化，是否会影响调速系统的稳态精度？为什么？

答：受它们的影响。因为给定电源和测速发电机的扰动系统无法克服。

因为闭环系统的运作是依靠给定的电源电压发号施令的，如果“指令”发生偏差，系统必然依令运作，偏离原来的给定值，可见系统的精度有赖于给定电源的精度，高精度系统需要高精度的给定电源。

反馈检测装置的误差也是反馈控制系统无法克服的。比如测速发电机励磁不稳定，转速反馈回路中电位器阻值在运行中变大，直流测速发电机输出电压中出现纹波等，闭环系统对这些误差引起转速的变化是无法克服的。

1-11 设某 V-M 调速系统，电动机参数为  $P_N = 2.5 \text{ kW}$ ,  $U_N = 220 \text{ V}$ ,  $I_N = 14 \text{ A}$ ,  $n_N = 1500 \text{ r/min}$ ，电动机内阻  $R_a = 2 \Omega$ ，整流装置等电阻  $R_r = 1 \Omega$ ，触发整流装置的放大系数  $K_s = 30$ 。要求调速范围  $D = 20$ ，静差率  $S \leq 8\%$ 。

（1）计算开环系统的静态速降和调速指标要求的静态速降。

（2）画出转速负反馈组成的单闭环有静差调速系统的静态结构图。

（3）调整该系统参数，使得当  $U_n^* = 10 \text{ V}$  时， $I_d = I_N$ ,  $n = 1000 \text{ r/min}$ ，计算转速反馈系数  $\alpha$ 。

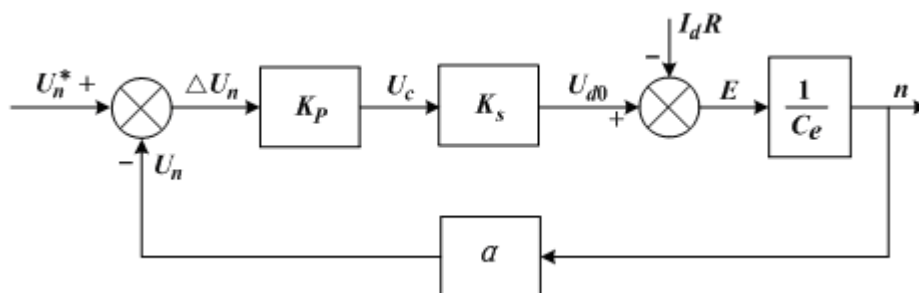
（4）计算所需放大器放大倍数。

$$\text{解：（1） } C_e = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{220 - 14 \times 2}{1500} = 0.128, \quad \Delta n_{op} = \frac{I_N R}{C_e} = \frac{14 \times (2 + 1)}{0.128} = 328.125$$

$$\Delta n_{cl} = \frac{n_N S}{D(1-S)} \leq \frac{1500 \times 0.08}{20 \times (1 - 0.08)} = 6.52 \text{ (r/min)}$$

$$K = \frac{\Delta n_{op}}{\Delta n_{cl}} - 1 \geq \frac{328.125}{6.52} - 1 = 49.3$$

（2）单闭环有静差调速系统的静态结构图：



$$(3) \alpha \approx \frac{U_{nm}^*}{n_N} = \frac{10}{1000} = 0.01 \text{ (V min/r)}$$

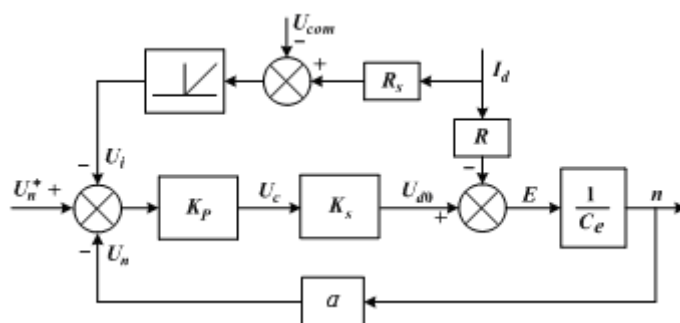
$$(4) K_P = \frac{K}{\alpha K_S / C_e} \geq \frac{49.3}{0.01 \times 30 / 0.128} = 21.03$$

1-12 某调速系统如图 1-8 所示, 已知数据如下: 电动机的  $P_N=30 \text{ kW}$ ,  $U_N=220\text{V}$ ,  $I_N=160\text{A}$ ,  $n_N=1000\text{r/min}$ ,  $R_a=0.1\Omega$ , 整流装置内阻  $R_r=0.3\Omega$ ,  $K_S=40$ , 额定转速时给定电压  $U_n^*=12\text{V}$ , 主回路电流最大时电流反馈电压整定为  $10\text{V}$ 。

调速系统要求是  $D=40$ ,  $S \leq 0.1$ , 堵转电流  $I_{db1}=1.5I_N$ , 截止电流  $I_{dcr}=1.1I_N$ 。

- (1) 试画出调速系统静态结构图。
- (2) 计算转速反馈系数。
- (3) 计算放大器的放大系数  $K_P$  及其参数  $R_0$  和  $R_1$ 。
- (4) 计算稳压管的稳压值。

解: (1) 调速系统静态结构图:



$$(2) \alpha \approx \frac{U_{nm}^*}{n_N} = \frac{12}{1000} = 0.012 \text{ (V min/r)}$$

$$(3) C_e = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{220 - 160 \times 0.1}{1000} = 0.204, \quad \Delta n_{op} = \frac{I_N R}{C_e} = \frac{160 \times (0.1 + 0.3)}{0.204} = 313$$

$$\Delta n_{cl} = \frac{n_N S}{D(1-S)} \leq \frac{1000 \times 0.1}{40 \times (1-0.1)} = 2.78 \text{ (r/min)}$$

$$K = \frac{\Delta n_{op}}{\Delta n_{cl}} - 1 \geq \frac{313}{2.78} - 1 = 111.6$$

$$K_P = \frac{K}{\alpha K_S / C_e} \geq \frac{111.6}{0.012 \times 40 / 0.204} \approx 48, \quad R_1 = K_P R_0 = 48 \times 20 = 960 \text{ k}\Omega$$

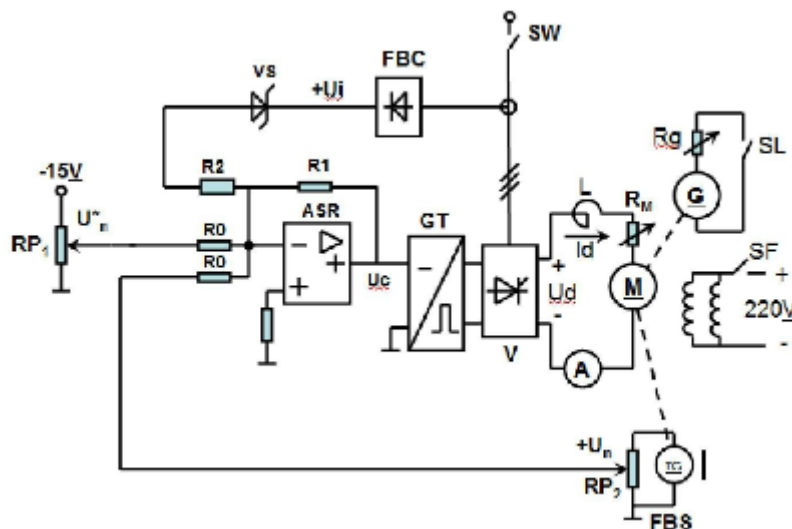
$$(4) \beta = \frac{U_{im}}{I_{dm}} = \frac{10}{1.5 \times 160} = 0.0417$$

$$U_{br} = \beta \times I_{dcr} = \beta \times 1.1 I_N = 0.0417 \times 1.1 \times 160 = 7.33 \text{ V}$$

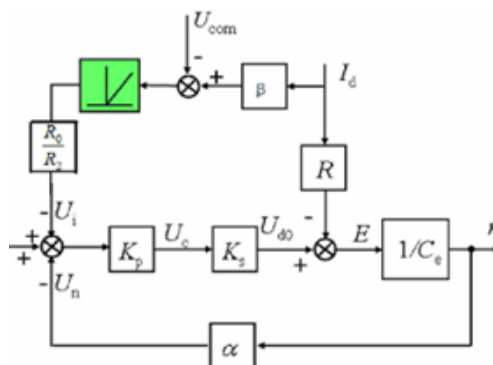
1-13 某调速系统原理图如图 1-26 所示，已知数据如下：直流电动机  $P_N=18\text{kW}$ ， $U_N=220\text{V}$ ， $I_N=94\text{A}$ ， $n_N=1000\text{r/min}$ ， $R_a=0.15\Omega$ ，整流装置内阻  $R_r=0.3\Omega$ ，触发整流环节的放大倍数  $K_s=40$ 。最大给定电压  $U_n^*=15\text{V}$ ，当主电路电流达到最大值时，整定电流反馈电压  $U_{im}=10\text{V}$ 。

设计指标：要求系统满足调速范围  $D=20$ ，静差率  $S\leq 10\%$ ，堵转电流  $I_{dbl}=1.5I_N$ ，截止电流  $I_{dcr}=1.1I_N$ 。

- (1) 试画出调速系统静态结构图。
- (2) 计算转速反馈系数。
- (3) 计算放大器的放大系数  $K_P$ 。
- (4) 计算电阻  $R_1$  的数值（放大器输入电阻  $R_0=20\text{k}\Omega$ ）。
- (5) 计算电阻  $R_2$  的数值和稳压管 VS 的击穿电压值。



解：(1) 调速系统静态结构图：



$$(2) \alpha = \frac{U_{nm}^*}{n_N} = \frac{15}{1000} = 0.015$$

(3)

$$C_e = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{220 - 94 \times 0.15}{1000} = 0.2059 \text{ V} \cdot \text{min} / \text{r}$$

$$\Delta n_{op} = \frac{I_N R}{C_e} = \frac{94 \times (0.15 + 0.3)}{0.2059} = 205.44 \text{ r} / \text{min}$$

$$\Delta n_{cl} = \frac{n_N S}{D(1-S)} = \frac{1000 \times 0.1}{20 \times (1-0.1)} = 5.56 \text{ (r/min)}$$

$$K = \frac{\Delta n_{op}}{\Delta n_{cl}} - 1 = \frac{205.44}{5.56} - 1 = 35.979, \text{ 取 } K=36$$

$$K_p = \frac{K}{\alpha K_s / C_e} = \frac{36}{0.015 \times 40 / 0.2059} = 12.354, \text{ 取 } K_p=13$$

(4) 取  $R_0 = 20K$ , 则  $R_1 = K_p R_0 = 13 \times 20K = 260K$

(5)

$$I_{dbl} = 1.5I_N = 1.5 \times 94 = 141A$$

$$I_{dcr} = 1.1I_N = 1.1 \times 94 = 103.4A$$

$$\beta = U_{im} / I_{dm} = 10 / 141 = 0.071V / A$$

$$U_{VS} = I_{dcr} \times \beta = 0.071 \times 103.4 = 7.33V$$

由静态结构图可以得到 ( $K_i = R_0 / R_2$ ):

$$\begin{aligned} n &= K_p K_s U_n^* / C_e (1+K) - K_p K_s K_i (\beta I_d - U_{VS}) / C_e (1+K) - I_d R / C_e (1+K) \\ &= K_p K_s (U_n^* + K_i U_{VS}) / C_e (1+K) - (K_p K_s K_i \beta + R) I_d / C_e (1+K) \end{aligned}$$

堵转时, 有  $n=0$ ,  $I_d = I_{dbl}$

$$I_{dbl} = K_p K_s (U_n^* + K_i U_{VS}) / (K_p K_s K_i \beta + R) \approx (U_n^* + K_i U_{VS}) / K_i \beta \quad (\text{忽略 } R)$$

$$\text{即: } (U_n^* + K_i U_{VS}) / K_i = \beta I_{dbl} = 10$$

$$U_n^* = 15, \quad U_{VS} = 7.33, \text{ 代入,}$$

$$15 + 7.33K_i = 10K_i, \quad K_i = 15 / 2.67 = 5.618$$

$$K_i = R_0 / R_2, \quad R_2 = R_0 / K_i = 20K / 5.618 = 3.56K, \text{ 取 } R_2 = 3.6K$$

## 第 2 章 多环控制直流调速系统

2-1 在转速、电流双闭环调速系统中，若要改变电动机的转速，应调节什么参数？改变转速调节器的放大系数行不行？改变触发整流装置的放大系数行不行？改变转速反馈系数行不行？

答：改变电动机的转速，应调节给定电压  $U_n^*$ 。改变转速调节器的放大系数和触发整流装置的放大系数不可以。改变转速反馈系数  $\alpha$  可以。

2-2 在转速、电流双闭环调速系统中，转速调节器在动态过程中起什么作用？电流调节器起什么作用？

答：1. 转速调节器的作用

(1) 转速调节器是调速系统的主导调节器，它能使转速  $n$  很快地跟随给定电压  $U_n^*$  的变化，稳态时可减小转速误差，如果采用 PI 调节器，则可实现无静差。

(2) 对负载变化起抗扰作用。

(3) 其输出限幅值决定电动机允许的最大电流。

2. 电流调节器的作用

(1) 作为内环的调节器，在转速外环的调节过程中，它的作用是使电流紧紧跟随其给定电压  $U_i^*$ （即外环调节器的输出量）的变化。

(2) 对电网电压的波动起及时抗扰的作用。

(3) 在转速动态过程中，保证获得电机允许的最大电流，从而加快动态过程。

(4) 当电机过载甚至堵转时，限制电枢电流的最大值，起快速的自动保护作用。一旦故障消失，系统立即自动恢复正常。这个作用对系统的可靠运行来说是十分重要的。

2-3 转速、电流双闭环调速系统起动过程的 3 个阶段中，转速调节器是不是都在起调节作用？电流调节器呢？

答：恒流升速阶段转速调节器不起调节作用；电流调节器 3 个阶段均起作用。

2-6 在转速、电流双闭环调速系统中，转速调节器与电流调节器为什么采用 PI 调节器？它们的输出限幅如何整定？

答：为了获得良好的静态和动态性能，通常转速调节器 ASR 和电流调节器 ACR 均采用 PI 调节器，两个调节器的输出均带有限幅。

转速调节器 (ASR) 的输出限幅值： $U_{im}^* = \beta I_{dm}$

电流调节器 (ACR) 的输出限幅值： $U_{cm} = \frac{U_{d0}}{K_s} = \frac{C_e n_N + I_{dm} R}{K_s}$

2-9 转速、电流双闭环调速系统稳态运行时，转速调节器与电流调节器输入偏差各为多大？

答：系统稳定运行时，两个调节器都不饱和，它们的输入偏差电压都是零。

2-10 转速、电流双闭环调速系统的转速调节器在哪些情况下会出现饱和？电流调节器在启动过程中能否饱和？为什么？

答：转速调节器在启动过程的恒流升速阶段、电动机突然失磁、转速反馈突然断线等情况下会出现饱和。电流调节器在启动过程中不能饱和：启动时，ACR 应保证获得电机允许的最大电流  $I_{dm}$  恒定，从而加快转速动态过程。

2-11 在转速、电流双闭环调速系统中，两个调节器 ASR、ACR 均采用 PI 调节器。已知参数  $U_N=220V$ ， $I_N=20A$ ， $n_N=1000r/min$ ，电枢回路总电阻  $R=1\Omega$ ，设  $U_{nm}^* = U_{im}^* = U_{cm}^* = 10V$ ，电枢回路最大电流  $I_{dm}=40A$ ，触发整流装置的放大系数  $K_s=40$ 。试求如下问题。

(1) 电流反馈系数  $\beta$  和转速反馈系数  $\alpha$ ；

(2) 当电动机在最高转速发生堵转时的  $U_{d0}$ 、 $U_i^*$ 、 $U_i$ 、 $U_c$  值。

解：(1) 电流反馈系数  $\beta = \frac{U_{im}^*}{I_{dm}} = \frac{10}{40} = 0.25$

$$\text{转速反馈系数 } \alpha = \frac{U_{nm}^*}{n_N} = \frac{10}{1000} = 0.01$$

(2) 电机在最高转速发生堵转时, 转速为  $n = 0$ , 则

$$U_{d0} = C_e n + I_{dm} R = 40 \times 1 = 40V$$

$$\text{ASR 输出电压为 } U_i^* = U_{im}^* = 10V, \text{ 则 } U_i = -10V$$

$$\text{ACR 输出电压为 } U_{ct} = \frac{U_{d0}}{K_s} = \frac{40}{40} = 1V$$

2-12 在转速、电流双闭环调速系统中, 出现电网电压波动与负载扰动时, 哪个调节器起主要作用?

答: 转速调节器对负载变化起抗扰作用; 电流调节器对电网电压波动起及时抗扰作用。

2-13 试从下述几方面来比较双闭环调速系统和带电流截止负反馈的单闭环调速系统。

(1) 静特性。(2) 动态限流特性。(3) 起动快速性。(4) 抗负载扰动性能。(5) 抗电源电压波动的性能。

答: (1) 调速系统的静态特性一样。

(2) 动态限流性能, 双闭环调速系统好。

(3) 起动的快速性, 双闭环调速系统好。

(4) 抗负载扰动的性能, 双闭环调速系统好。

(5) 抗电源电压波动的性能, 双闭环调速系统好。

2-14 某反馈控制系统已校正成典型 I 型系统, 已知时间常数  $T=0.1s$ , 要求阶跃响应超调量  $\sigma \leq 10\%$ 。

(1) 求系统的开环增益。

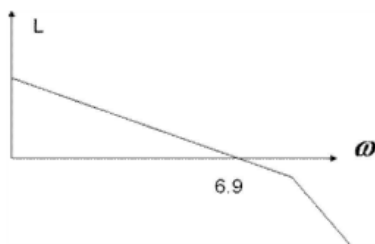
(2) 计算过渡过程时间  $t_s$  和上升时间  $t_r$ 。

(3) 绘出开环对数幅频特性。如果要求上升时间  $t_r < 0.25s$ , 则  $K=?$   $\sigma=?$

解: (1) 因为  $\sigma \% = 10\%$ , 由表 2-2, 知  $KT = 0.69, T = 0.1$ , 所以,  $K = 6.9$

(2) 由表 2-2, 知  $t_r = 3.3T = 3.3 \times 0.1 = 0.33s$   $t_s = 6T = 6 \times 0.1 = 0.6s$

(3) 若要求  $t_r < 0.25s$ , 由表 2-2 知,  $KT = 1$ , 所以  $K = 10$ , 此时  $\sigma \% = 16.3\%$



2-15 有一个系统, 其控制对象的传递函数为  $W_{obj}(s) = \frac{K_1}{\tau s + 1} = \frac{10}{0.01s + 1}$ , 要求设计一个无静差系统, 在阶跃输入下系统超调量  $\sigma \leq 5\%$  (按线性系统考虑)。试对该系统进行动态校正, 决定调节器结构, 并选择其参数。

解: 采用  $\frac{k_i}{s}$  进行串联校正

$$\begin{aligned} \text{因为, } W(s) &= \frac{10}{0.01s + 1} \times \frac{k_i}{s} \\ &= \frac{10k_i}{s(0.01s + 1)} \end{aligned}$$

所以  $T = 0.01s = \tau$

又因为  $KT = 0.5$ ，所以  $k_i = 5$

2-16 有一个闭环系统，其控制对象的传递函数为  $W_{obj}(s) = \frac{K_1}{s(Ts + 1)} = \frac{10}{s(0.02s + 1)}$ ，要求

校正为典型 II 型系统，在阶跃输入下系统超调量  $\sigma \leq 30\%$ （按线性系统考虑）。试决定调节器结构，并选择其参数。

解：采用 PI 调节器。

$$W(s) = \frac{10}{s(0.02s + 1)} \times k_p \frac{\tau s + 1}{\tau s} = \frac{10k_p(\tau s + 1)}{\tau s^2(0.02s + 1)}$$

因为  $\sigma\% \leq 30\%$ ，由表 2-6 可知， $h = 7$ 。

又  $T = 0.02$ ，所以  $\tau = hT = 7 \times 0.02 = 0.14$

$$K = \frac{h+1}{2h^2T^2} = \frac{10k_p}{\tau} = 204，\text{所以 } k_p = 2.86$$

2-17 调节对象的传递函数为  $W_{obj}(s) = \frac{18}{(0.25s + 1)(0.005s + 1)}$ ，要求用调节器分别将其校正为典型 I 型和 II 型系统，求调节器的结构与参数。

$$\text{解： } W(s) = \frac{18}{(0.25s + 1)(0.005s + 1)}$$

校正成典型 I 系统： $W(s) = \frac{18K_p}{\tau s(0.005s + 1)}$ ， $\tau = 0.25$ ，采用 PI 调节器

$$KT = 0.5, T = 0.005, \text{则 } K = 100$$

$$K = \frac{18K_p}{\tau} = \frac{18K_p}{0.25} = 100，\text{则 } K_p = 1.39$$

$$\begin{aligned} \text{校正成典型 II 系统： } W(s) &= \frac{18}{0.25s(0.005s + 1)} \times \frac{K_p(\tau s + 1)}{\tau s} \\ &= \frac{18K_p(\tau s + 1)}{0.25\tau s^2(0.005s + 1)} \quad \text{采用 PI 调节器} \end{aligned}$$

$$\text{则 } T = 0.005, \tau = hT = 5 \times 0.005 = 0.025$$

$$K = \frac{h+1}{2h^2T^2} = \frac{6}{2 \times 5^2 \times 0.005^2} = 4800$$

$$K = \frac{18K_p}{0.5\tau} = \frac{18K_p}{0.5 \times 0.025} = 4800，\text{则 } K_p = 1.67$$

2-18 某三相零式晶闸管供电的转速、电流双闭环调速系统，其基本数据如下。

直流电动机： $P_N = 60\text{kW}$ ， $U_N = 220\text{V}$ ， $I_N = 305\text{A}$ ， $n_N = 1000\text{r/min}$ ，电动势系数  $C_e = 0.2\text{V} \cdot \text{min/r}$ ，主回路总电阻  $R = 0.18\Omega$ 。

晶闸管整流装置放大系数： $K_s = 30$ 。

电磁时间常数： $T_l = 0.012\text{s}$ 。

机电时间常数： $T_m = 0.12\text{s}$ 。

反馈滤波时间常数： $T_{oi} = 0.0025\text{s}$ ， $T_{on} = 0.015\text{s}$ 。

额定转速时的给定电压： $(U_n^*)_N = 15\text{V}$ 。

调节器饱和输出电压： $12\text{V}$ 。

系统的动、静态指标：稳态无静差，调速范围  $D = 10$ ，电流超调量  $\sigma_i \leq 5\%$ ，空载起动到



额定转速时的转速超调量  $\sigma_n \leq 10\%$ 。试求如下问题。

- (1) 确定电流反馈系数  $\beta$  (假设起动电流限制在 330 A 以内) 和转速反馈系数  $\alpha$ 。
- (2) 试设计电流调节器 ACR, 计算其参数  $R_i$ 、 $C_i$ 、 $C_{oi}$ 。画出其电路图, 调节器输入回路电阻  $R_0=40\text{k}\Omega$ 。
- (3) 设计转速调节器 ASR, 计算其参数  $R_n$ 、 $C_n$ 、 $C_{on}$ , ( $R_0=40\text{k}\Omega$ )。
- (4) 计算电动机带 40% 额定负载起动到最低转速时的转速超调量  $\sigma_n$ 。
- (5) 计算空载起动到额定转速的时间。

解: (1)  $\alpha = \frac{U_{nm}^*}{n_{\max}} = \frac{15}{1000} = 0.015$        $\beta = \frac{U_{im}^*}{I_{dm}} = \frac{12}{330} = 0.036$

(2) ①确定时间常数

$$T_s=0.0033\text{s}; T_{oi}=0.0025\text{s}; T_{\Sigma i}=T_s+T_{oi}=0.0058\text{s}。$$

②选择电流调节器结构

要求  $\sigma_i \leq 5\%$ , 按典型 I 型系统设计电流调节器。用 PI 型电流调节器。 $W_{ACR}(s) = k_i \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s}$

③计算电流调节器参数

$$\tau_i = T_l = 0.012\text{s}, K_l T_{\Sigma i} = 0.5, K_l = \frac{0.5}{T_{\Sigma i}} = \frac{0.5}{0.0058} = 86.2 \text{ s}^{-1}$$

$$K_i = \frac{K_l \tau_i R}{K_s \beta} = \frac{86.2 \times 0.012 \times 0.18}{30 \times 0.036} = 0.1724$$

④检验等效条件

$$\omega_{ci} = K_l = 86.2 \text{ s}^{-1}$$

$$\frac{1}{3T_s} = \frac{1}{3 \times 0.0033} = 101.01 \text{ s}^{-1} > \omega_{ci} = 86.2 \text{ s}^{-1}$$

$$3\sqrt{\frac{1}{T_m T_l}} = 3 \times \sqrt{\frac{1}{0.12 \times 0.012}} = 79.06 \text{ s}^{-1} < \omega_{ci} = 86.2 \text{ s}^{-1}$$

$$\frac{1}{3\sqrt{T_s T_{oi}}} = \frac{1}{3} \times \sqrt{\frac{1}{0.0033 \times 0.0025}} = 116.05 \text{ s}^{-1} > \omega_{ci} = 86.2 \text{ s}^{-1}$$

满足近似等效条件。

⑤计算调节器电阻和电容

取  $R_0=40\text{k}\Omega$ , 则

$$R_i = K_i R_0 = 0.1724 \times 40 \text{ k}\Omega = 6.896 \text{ k}\Omega, \text{ 取 } 7 \text{ k}\Omega$$

$$C_i = \frac{\tau_i}{R_i} = \frac{0.012}{7 \times 10^3} = 1.7 \times 10^{-6} \text{ F} = 1.7 \mu\text{F}, \text{ 取 } 2.0 \mu\text{F}$$

$$C_{oi} = \frac{4T_{oi}}{R_0} = \frac{4 \times 0.0025}{40 \times 10^3} = 0.25 \times 10^{-6} \text{ F} = 0.25 \mu\text{F}, \text{ 取 } 0.3 \mu\text{F}$$

按上述参数, 电流环可达到的动态跟随性能指标为  $\sigma_i = 4.3\% < 5\%$ , 满足设计要求。

(3) ①确定时间常数

$$\frac{1}{K_l} = 2T_{\Sigma i} = 2 \times 0.0058 = 0.0116\text{s}; T_{on} = 0.015\text{s}; T_{\Sigma n} = \frac{1}{K_l} + T_{on} = 0.0116 + 0.015 = 0.0266$$

②选择转速调节器结构

按无静差要求, 选用 PI 调节器,  $W_{ASR}(s) = k_n \frac{\tau_n s + 1}{\tau_n s}$ 。

### ③计算转速调节器参数

按跟随和抗扰性能都较好的原则, 取  $h=5$ , 则

$$\tau_n = hT_{\Sigma n} = 5 \times 0.0266 = 0.133s$$

$$K_N = \frac{h+1}{2h^2 T_{\Sigma n}^2} = \frac{5+1}{2 \times 5^2 \times 0.0266^2} = 169.6$$

$$k_n = \frac{(h+1)\beta C_e T_m}{2h\alpha R T_{\Sigma n}} = \frac{6 \times 0.036 \times 0.2 \times 0.12}{10 \times 0.015 \times 0.18 \times 0.0266} = 7.218$$

### ④检验等效条件

$$\text{转速环截止角频率为 } \omega_{cn} = \frac{K_N}{\omega_1} = K_N \tau_n = 169.6 \times 0.133 = 22.56 s^{-1}$$

$$\frac{1}{3} \sqrt{\frac{K_I}{T_{\Sigma i}}} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{86.2}{0.0058}} = 40.64 s^{-1} > \omega_{cn}$$

$$\frac{1}{3} \sqrt{\frac{K_I}{T_{on}}} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{86.2}{0.015}} = 25.27 s^{-1} > \omega_{cn}$$

满足近似等效条件

### ⑤校核转速超调量

当  $h=5$  时, 查表得  $\Delta C_{\max} / C_b \% = 81.2\%$

$$\lambda = \frac{I_{dm}}{I_N} = \frac{330}{305} = 1.08, z = 0, \Delta n_N = \frac{I_N R}{C_e} = \frac{305 \times 0.18}{0.2} = 274.5 r/min$$

$$\sigma_n \% = 81.2\% \times 2 \times 1.08 \times \frac{274.5}{1000} \times \frac{0.0266}{0.12} = 10.7\% > 10\%$$

转速超调量的检验结果表明, 上述设计不符合要求, 因此需重新设计。

按  $h=3$  速度调节器参数确定如下:

$$\tau_n = hT_{\Sigma n} = 3 \times 0.0266 = 0.0798s$$

$$K_N = \frac{h+1}{2h^2 T_{\Sigma n}^2} = \frac{3+1}{2 \times 3^2 \times 0.0266^2} = 314.07$$

$$k_n = \frac{(h+1)\beta C_e T_m}{2h\alpha R T_{\Sigma n}} = \frac{4 \times 0.036 \times 0.2 \times 0.12}{6 \times 0.015 \times 0.18 \times 0.0266} = 8.02$$

检验等效条件

$$\text{转速环截止角频率为 } \omega_{cn} = \frac{K_N}{\omega_1} = K_N \tau_n = 314.07 \times 0.0798 = 25.06 s^{-1}$$

$$\frac{1}{3} \sqrt{\frac{K_I}{T_{\Sigma i}}} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{86.2}{0.0058}} = 40.64 s^{-1} > \omega_{cn}$$

$$\frac{1}{3} \sqrt{\frac{K_I}{T_{on}}} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{86.2}{0.015}} = 25.27 s^{-1} > \omega_{cn}$$

满足近似等效条件

转速超调量检验:

当  $h=3$  时, 查表得  $\Delta C_{\max} / C_b \% = 72.2\%$

$$\sigma_n \% = 72.2 \% \times 2 \times 1.08 \times \frac{274.5}{1000} \times \frac{0.0266}{0.12} = 9.49 \% < 10\%$$

转速超调量的检验结果表明, 上述设计符合要求。

⑥计算调节器电阻和电容

取  $R_0=40\text{k}\Omega$ , 则

$$R_n = K_n R_0 = 8.02 \times 40 = 320.8 \text{ k}\Omega, \text{ 取 } R_n=320\text{k}\Omega$$

$$C_n = \frac{\tau_n}{R_n} = \frac{0.0798 \times 10^3}{320} = 0.25 \mu\text{F}, \text{ 取 } C_n=0.2\mu\text{F}$$

$$C_{on} = \frac{4T_{on}}{R_0} = \frac{4 \times 0.015 \times 10^3}{40} = 1.5 \mu\text{F}, \text{ 取 } C_{on}=1\mu\text{F}$$

$$(4) \sigma_n = 2 \left( \frac{\Delta C_{\max}}{C_b} \right) (\lambda - z) \frac{\Delta n_N}{n^*} \frac{T_{\Sigma n}}{T_m}$$

$$\lambda = \frac{I_{dm}}{I_N} = \frac{330}{305} = 1.08, z = 0.4$$

$$\Delta n_N = \frac{I_N R}{C_e} = \frac{305 \times 0.18}{0.2} = 274.5 \text{ r/min}$$

$$D = \frac{n_N}{n^*}, n^* = \frac{n_N}{D} = \frac{1000}{10} = 100 \text{ r/min}$$

$$\text{查表, } h=3, \frac{\Delta C_{\max}}{C_b} = 0.722 \text{ 所以,}$$

$$\sigma_n = 2 \times 0.722 \times (1.08 - 0.4) \times \frac{274.5}{100} \times \frac{0.027}{0.12} \times 100 \% = 60.6 \%$$

$$(5) t_2 \approx \frac{C_e T_m n_N}{(I_{dm} - I_{dL}) R} = \frac{0.2 \times 0.12 \times 1000}{(330 - 0) \times 0.18} = 0.404 \text{ s}$$

2-19 有一转速、电流双闭环调速系统, 采用三相桥式整流电路, 已知电动机参数:  $P_N=550\text{kW}$ ,  $U_N=750\text{V}$ ,  $I_N=775\text{A}$ ,  $n_N=375\text{r/min}$ ,  $C_e=1.92\text{V} \cdot \text{min/r}$ , 电枢回路总电阻  $R=0.12\Omega$ , 允许电流过载倍数  $\lambda=1.5$ , 触发整流装置的放大系数  $K_s=75$ , 电磁时间常数  $T_l=0.03\text{s}$ , 机电时间常数  $T_m=0.09\text{s}$ , 电流反馈滤波时间常数  $T_{oi}=0.002\text{s}$ , 转速反馈滤波时间常数  $T_{on}=0.02\text{s}$ 。设调节器输入输出电压  $U_{nm}^* = U_{im}^* = U_{cm}^* = 12\text{V}$ , 调节器输入电阻  $R_0=40\text{k}\Omega$ 。

设计指标: 稳态无静差, 电流超调量  $\sigma_i \leq 5\%$ , 空载起动到额定转速时的转速超调量  $\sigma_n \leq 10\%$ 。电流调节器已按典型 I 型系统设计, 并取参数  $KT=0.5$ 。试求如下问题。

(1) 选择转速调节器结构, 并计算其参数。

(2) 计算电流环的截止角频率  $\omega_{ci}$  和转速环的截止角频率  $\omega_{cn}$ , 并考虑它们是否合理。

解: (1) 采用 PI 调节器,  $W_{ASR}(s) = k_n \frac{\tau_n s + 1}{\tau_n s}$

$$T_{\Sigma i} = T_s + T_{oi} = 0.00167 + 0.002 = 0.00367 \text{ s}$$

$$\sigma_i \leq 5\%, \text{ 取 } K_l T_{\Sigma i} = 0.5, \text{ 则 } K_l = \frac{0.5}{T_{\Sigma i}} = 136.24$$

$$T_{\Sigma n} = \frac{1}{K_I} + T_{on} = \frac{1}{136.24} + 0.02 = 0.02734 s$$

按跟随和抗扰性能都较好的原则，取  $h=5$ ，则  $\tau_n = hT_{\Sigma n} = 5 \times 0.02734 = 0.1367 s$

$$K_N = \frac{h+1}{2h^2 T_{\Sigma n}^2} = \frac{5+1}{2 \times 5^2 \times 0.02734^2} = 160.54$$

$$\beta = \frac{U_{im}^*}{I_{dm}} = \frac{12}{1.5 \times 775} = 0.0103, \quad \alpha = \frac{U_{nm}^*}{n_N} = \frac{12}{375} = 0.032$$

$$k_n = \frac{(h+1)\beta C_e T_m}{2h\alpha R T_{\Sigma n}} = \frac{6 \times 0.0103 \times 1.92 \times 0.09}{10 \times 0.032 \times 0.12 \times 0.02734} = 10.17$$

转速超调量检验：

当  $h=5$  时，查表得  $\Delta C_{\max} / C_b \% = 81.2\%$

$$\lambda = 1.5, z = 0, \quad \Delta n_N = \frac{I_N R}{C_e} = \frac{775 \times 0.12}{1.92} = 48.4375 r/min$$

$$\sigma_n \% = 81.2\% \times 2 \times 1.5 \times \frac{48.4375}{375} \times \frac{0.02734}{0.09} = 9.56\% < 10\%$$

转速超调量的检验结果表明，**上述设计符合要求。**

计算调节器电阻和电容：

取  $R_0=40k\Omega$ ，则

$$R_n = K_N R_0 = 10.17 \times 40 = 406.8 k\Omega, \text{ 取 } R_n=400k\Omega$$

$$C_n = \frac{\tau_n}{R_n} = \frac{0.1367 \times 10^3}{320} = 0.34 \mu F, \text{ 取 } C_n=0.3\mu F$$

$$C_{on} = \frac{4T_{on}}{R_0} = \frac{4 \times 0.02 \times 10^3}{40} = 2 \mu F, \text{ 取 } C_{on}=2\mu F$$

$$(2) \textcircled{1} \omega_{ci} = K_I = 136.2$$

$$\frac{1}{3T_s} = \frac{1}{3 \times 0.0017} = 196.1 s^{-1} > \omega_{ci}=136.2 s^{-1}$$

$$3\sqrt{\frac{1}{T_m T_l}} = 3 \times \sqrt{\frac{1}{0.09 \times 0.03}} = 57.74 s^{-1} < \omega_{ci}=136.2 s^{-1}$$

$$3\sqrt{\frac{1}{T_s T_{oi}}} = 3 \times \sqrt{\frac{1}{0.0017 \times 0.002}} = 180.8 s^{-1} > \omega_{ci}=136.2 s^{-1}$$

满足近似等效条件

$$\textcircled{2} \omega_{cn} = K_N \tau_n = 160.54 \times 0.1367 = 21.95$$

$$\frac{1}{3}\sqrt{\frac{K_I}{T_{\Sigma i}}} = \frac{1}{3}\sqrt{\frac{136.2}{0.0037}} = 63.95 s^{-1} > \omega_{cn}$$

$$\frac{1}{3}\sqrt{\frac{K_I}{T_{on}}} = \frac{1}{3}\sqrt{\frac{136.2}{0.02}} = 27.5 s^{-1} > \omega_{cn}$$

满足近似等效条件

### 第3章直流电机可逆调速及直流斩波调速系统

3-1. 环流分为哪几类？有什么优缺点？

答：环流分为两大类：静态环流和动态环流。静态环流又分为直流平均环流和瞬时脉动环流。

优点：在保证晶闸管安全工作的前提下，适度的环流能使晶闸管-电动机系统在空载或轻载时保持电流连续，避免电流断续对系统性能的影响。可逆系统中的少量环流，可以保证电流无换向死区，加快过渡过程。

缺点：环流的存在会显著地加重晶闸管和变压器负担，消耗无用功率，环流太大时甚至会损坏晶闸管，为此必须予以抑制。

3-5  $\alpha = \beta$  配合控制可以消除直流平均环流，为什么还需要环流电抗器？

答：由于整流器电压和逆变器电压瞬时值不相等从而产生瞬时脉动环流。在环流回路串入环流电抗器，可以抑制瞬时脉动环流。

3-10. 试简述瞬时脉动环流及其抑制方法。

答：由于整流器电压和逆变器电压瞬时值不相等从而产生瞬时脉动环流。在环流回路串入环流电抗器，可以抑制瞬时脉动环流。

3-11. 两组晶闸管反并联调速时为什么要限制最小逆变角  $\beta_{\min}$  ？

答：为了防止晶闸管装置在逆变状态工作中逆变角  $\beta$  太小而导致环流失败，出现“逆变颠覆”，必须在控制电路中进行限幅，形成最小逆变角  $\beta_{\min}$  保护。

3-13 无环流逻辑控制环节的任务是什么？

答：当需要切换到正组晶闸管工作时，封锁反组触发脉冲而开放正组脉冲，当需要切换到反组工作时，封锁正组而开放反组。

3-15. 试分析逻辑无环流直流调速系统正向电动和制动时晶闸管的状态。

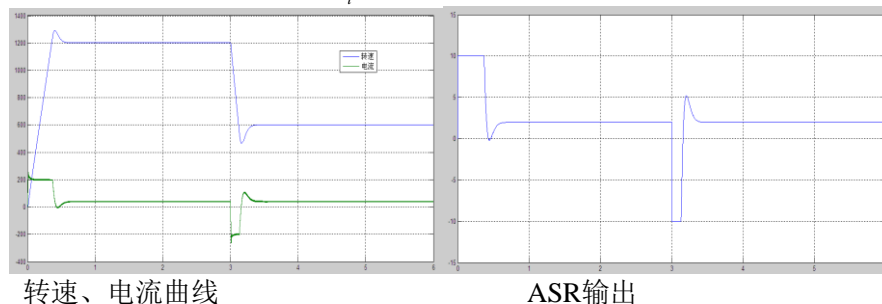
答：正向电动：VF 整流；VR 封锁。

正向制动：本组逆变阶段，VF 逆变回馈电能，封锁它组；它组反接制动状态，VR 整流，封锁正组；它组回馈制动阶段，VR 逆变回馈电能，封锁正组。

3-17. 一个逻辑无环流调速系统在某一速度稳定工作时，速度给定信号  $U_n^* = 8V$ ，速度调节器 ASR 输出  $U_i^* = -4V$ ，现在突然把  $U_n^*$  由  $8V$  降至  $4V$ ，稳定后速度调节器输出  $U_i^* = ?$  试分析此过程逻辑切换装置是否改变？为什么？在这种情况下（ $U_n^*$  由  $8V$  降至  $4V$ ），系统中晶闸管经过几种状态？

答：稳态运行时， $U_i^* = U_i = \beta I_d = \beta I_{dL}$ ，ASR 的输出量  $U_i^*$  是由负载电流  $I_{dL}$  决定的。

所以，稳定后速度调节器输出仍然为  $U_i^* = -4V$ 。

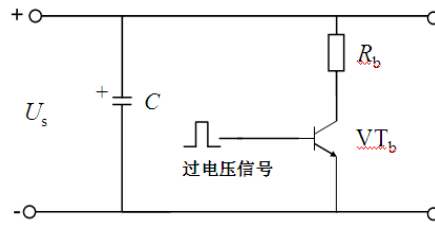


此过程逻辑切换装置发生改变：因为正向制动开始时  $U_i^*$  极性由负变正，且检测到了零电平信号；正向制动结束时  $U_i^*$  极性由正变负，且检测到了零电平信号。

$U_n^*$  由  $8V$  降至  $4V$ ，为正向减速过程。首先进入本组逆变阶段，VF 逆变回馈电能，封锁它组；它组反接制动状态，VR 整流，封锁正组；它组回馈制动阶段，VR 逆变回馈电能，封锁正组。当  $-I_d$  反向过 0 后，封锁反组，开放正组，VF 整流，电机电动运行。

3-24. 如何限制泵升电压？

答：采用泵升电压抑制电路：



开关器件  $VT_b$  在泵升电压达到允许数值时接通，镇流电阻  $R_b$  消耗掉部分动能。

## 第 4 章 MATLAB 简介及直流调速系统仿真

4-2. 在直流调速系统仿真中，常用到 PI 模块、Synchronized 6-Pluse Generator 模块、Discrete PWM Generator 模块等，试说明这些模块的作用。

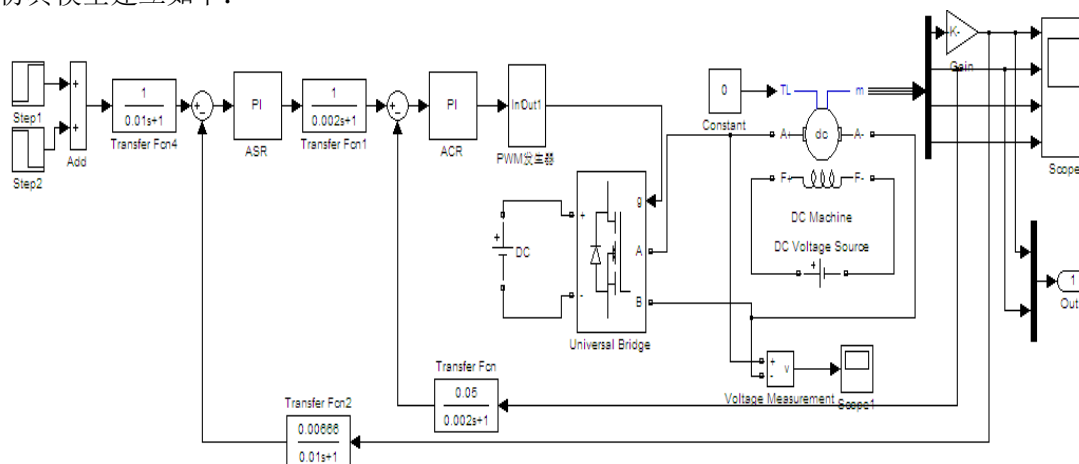
答：PI 模块：用于转速、电流的比例积分控制。

Synchronized 6-Pluse Generator 模块：为整流桥提供相位可控的六路触发脉冲。

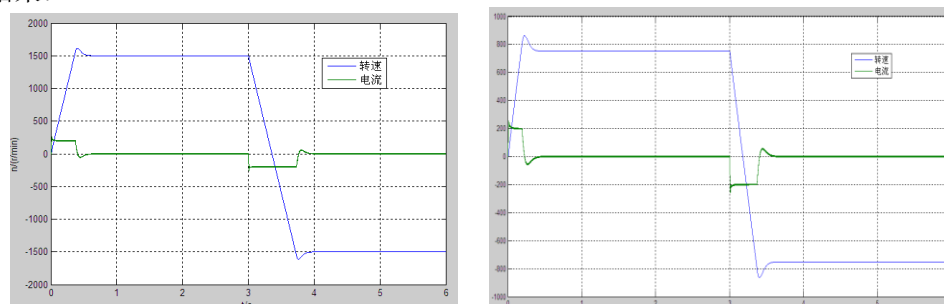
Discrete PWM Generator 模块：生成 PWM 波形。

4-4. 双闭环直流脉宽可逆调速系统定量仿真中，试改变不同给定信号，仿真出转速结果。  
仿真实例：给定数据如下：直流电动机：220V，136A，1460r/min， $C_e=0.132\text{V}\cdot\text{min}/\text{r}$ ，允许过载倍数  $\lambda=1.5$ ；晶闸管装置放大系数  $K_s=40$ ；电枢回路总电阻  $R=0.5\Omega$ ； $T_l=0.03\text{ s}$ ， $T_m=0.075\text{ s}$ ； $\beta=0.05\text{ V}/\text{A}$  ( $\approx 10\text{V}/1.5I_N$ )。  $\alpha=0.0067\text{ V}\cdot\text{min}/\text{r}$  ( $\approx 10\text{V}/n_N$ )，电流滤波时间常数  $T_{oi}=0.002\text{ s}$ ，转速滤波时间常数  $T_{on}=0.01\text{ s}$ 。

仿真模型建立如下：



仿真结果：



## 第 5 章 交流调压调速系统

5-1 异步电动机从定子传入转子的电磁功率  $P_{em}$  中，有一部分是与转差率成正比的转差功率  $P_s$ ，根据对  $P_s$  处理方式的不同，可把交流调速系统分成哪几类？举例说明。

答：（1）转差功率消耗型调速系统：转差功率全部转化成热能而被消耗掉。

特点：系统的效率低，结构简单。调压调速、绕线式异步电动机转子串电阻调速、电磁转差离合器调速系统属于此类。

（2）转差功率回馈型调速系统——转差功率的少部分被消耗掉，大部分通过变流装置回馈给电网或者转化为机械能予以利用。

特点：效率较高。串级调速属该类系统。

（3）转差功率不变型调速系统——调速过程中，转差功率基本不变。

特点：效率最高。变极调速、变频调速系统属于此类。

5-2 异步电动机改变定子电压调速和直流电动机改变电枢电压调速是不是性质相同的两种调速方式？为什么？

答：异步电机闭环变压调速系统不同于直流电机闭环变压调速系统的地方是：

（1）电动机的额定转矩  $T_{en}$  设定为  $\frac{1}{2}T_{emax}$  左右，定义最大转矩  $T_{emax}$  与额定转矩  $T_{en}$  之比为

$\lambda_M = \frac{T_{emax}}{T_{en}}$ 。  $\lambda_M$  称为过载倍数，它表示电动机在短时间内允许超过额定负载的能力。如果

让异步电动机带动接近于  $T_{emax}$  的负载长时间运行，就会使电动机因过热而损坏。

（2）异步电动机的工作区域，一般只能在  $0 \sim s_m$  范围内，在该范围内转矩可以近似看成和转差率成正比，故称为机械特性的线性段，大于  $s_m$  部分则称为机械特性的非线性段。静特性左右两边都有极限，不能无限延长。它们是额定电压  $U_{sN}$  下的机械特性和最小输出电压  $U_{smin}$  下的机械特性。当负载变化时，如果电压调节到极限值，闭环系统便失去控制能力，系统的工作点只能沿着极限开环特性变化。

（3）在机械特性曲线上，转速为零时所对应的起始转矩为  $T_q$ ，且  $s=1$ ，电机刚开始启动，此时启动电流很大，可达电机额定电流的 4~7 倍，但启动转矩却不大。

直流电动机启动时，要减小启动转矩，以防启动转矩太大，造成机械冲击，损伤设备。减小启动转矩，也就减小了启动电流。异步电动机启动时，则存在两方面的问题，一要解决启动电流的问题，二要解决启动转矩不足的矛盾。

5-5 当忽略电动机定子损耗和转子轴上损耗后，试写出异步电动机调压调速系统效率的近似表达式，并说明调压调速系统适用于何种特性的负载，为什么？

答：若忽略其它损耗，则电动机的效率为

$$\eta = \frac{P_0}{P_1} \approx \frac{P_M}{P_2} = \frac{n}{n_0} = 1 - s$$

讨论：

1) 恒转矩负载时：有  $T_e = T_L$  不变；因  $f_1$  不变，故  $n_0$  不变，电磁功率  $P_2$  也不变。随着转速的降低，转差功率  $sP_2$  增大，效率降低。

2) 风机泵类负载时：有  $T_e = T_L = K n^2$ ， $T_e$ 、 $P_2$  随转速以平方速率下降，尽管低速时， $s$  增大，但总的转差功率  $P_s = sP_2$  下降，损耗变小。

故调压调速系统适合于风机、水泵等设备的调速节能。



## 第6章 交流异步电动机变压变频调速系统

6-3.为什么调频调速时电压也要随之改变？当基频以上调速时，电动机电压是否也要改变？为什么？

答：仅通过改变频率  $f_1$  来改变电动机转速时，如果电压  $U_s$  保持不变，就会使每极气隙磁通  $\Phi_m$  发生改变，在设计电动机时，主磁通的额定值一般都选择在临界饱和点。所以当在额定频率  $f_{1N}$  以下调频而不改变电压  $U_s$  时，会使主磁通过饱和，励磁电流急剧升高，导致绕组过热而损坏电动机。当在额定频率以上调频时，会使主磁通太弱，没有充分利用电动机的铁心，且使得电动机转矩减小。因此，在实际调频调速时，应该尽量保持主磁通不变。

所以，在通过改变频率  $f_1$  进行调速时，电压  $U_s$  或  $E_g$  也应相应地进行改变，以达到主磁通  $\Phi_m$  近似恒定的目的。

在基频以上调速时，频率应该从  $f_{1N}$  往上调，但定子电压  $U_s$  却不能增大，这是因为电动机设计时都是以电动机额定电压为目标的，如果频率增大而相应地增大电动机电压，可能会使电动机损坏。因此在基频以上调速时，定子电压必须保持不变。这将迫使磁通与频率成反比降低，相当于直流电动机弱磁升速的情况。

6-16.直流电动机数学模型比交流电动机数学模型简单的主要原因是什么

答：直流电机的磁通由励磁绕组产生，可以在电枢合上电源以前建立起来而不参与系统的动态过程（弱磁调速时除外），因此它的动态数学模型只是一个单输入和单输出系统。

6-17 坐标变换的原则是什么？

答：（1）坐标变换前后功率保持不变

（2）坐标变换前后磁动势保持不变

6-19 试写出从两相旋转坐标系变换到三相静止坐标系的变换公式。

$$C_{2r/3s} = C_{3s/2r}^{-1} = C_{3s/2r}^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\varphi - 120^\circ) & -\sin(\varphi - 120^\circ) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\varphi + 120^\circ) & -\sin(\varphi + 120^\circ) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

6-20.异步电动机矢量控制的 M、T 轴是如何定义的？M 轴相对于定、转子是静止的还是旋转的？若是相对旋转，则其相对于定、转子的转速各是多少？

答：规定 d 轴取在转子磁链  $\psi_r$  的轴线上，称为 M 轴，超前于它  $90^\circ$  的 q 轴则称为 T 轴，这样的以同步转速  $\omega_{dqs} = \omega_1$  在空间旋转的二相坐标系就是 M、T 坐标系。M 轴相对于定、转子是旋转的，且相对定子的转速为  $\omega_1$ ，相对转子的转速为  $\omega_s$ 。