

# 1 简要介绍矢量控制的基本思想？

答：以产生同样的旋转磁动势为准则，在三相坐标系上的定子交流电流  $i_A$ 、 $i_B$ 、 $i_C$ ，通过三相/两相变换可以等效成两相静止坐标系上的交流电流  $i_\alpha$ 、 $i_\beta$ ，再通过同步旋转变换，可以等效成同步旋转坐标系上的直流电流  $i_m$  和  $i_t$ 。

如果观察者站到铁心上与坐标系一起旋转，他所看到的便是一台直流电机，可以控制使交流电机的转子总磁通  $\Phi_r$  就是等效直流电机的磁通，则 M 绕组相当于直流电机的励磁绕组， $i_m$  相当于励磁电流，T 绕组相当于伪静止的电枢绕组， $i_t$  相当于与转矩成正比的电枢电流。

既然异步电机经过坐标变换可以等效成直流电机，那么，模仿直流电机的控制策略，得到直流电机的控制量，经过相应的坐标反变换，就能够控制异步电机了。

由于进行坐标变换的是电流（代表磁动势）的空间矢量，所以这样通过坐标变换实现的控制系统就叫作矢量控制系统。

# 1 在转速、电流双闭环直流调速系统中，转速给定信号 U 未改变，若增大转速反馈系数 $\alpha$ ，系统稳定后转速反馈电压是增加还是减少？为什么？转速是增加还是减少？为什么？

答：系统稳定后转速反馈电压  $u_n$  不变。因为稳态时， $u_n^* = u_n$ 。

转速是减少的，因为  $n = \frac{u_n^*}{\alpha}$ ，增大转速反馈系数  $\alpha$ ， $n$  减少。

# 2 在转速、电流双闭环直流调速系统中。试阐明电网电压发生变化时，会引起转速的变化，问系统对此有无调节能力？为什么？

解：（1）当电网电压发生变化时，系统对此有调节能力。因为  $U_s \uparrow \rightarrow U_{d0} \uparrow \rightarrow I_d \uparrow \rightarrow U_i \uparrow \rightarrow \Delta U_i \downarrow \rightarrow U_c \downarrow \rightarrow U_{d0} \downarrow \rightarrow I_d \downarrow$ 。

# 1 简要介绍 T 法数字测速的基本原理。

答：工作原理：

计数器记录来自 CPU 的高频脉冲  $f_0$ ；

PLG 每输出一个脉冲，中断电路向 CPU 发出一次中断请求；

CPU 响应  $INT_n$  中断，从计数器中读出计数值  $M_2$ ，并立即清零，重新计数。

$$n = \frac{60f_0}{ZM_2}$$

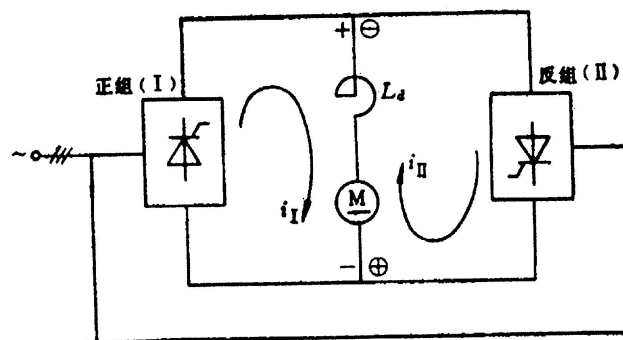
# 2 采用单组晶闸管装置供电的 V-M 系统在下放重物时，分析电动机、晶闸管装置的工作状态？为什么？

答：晶闸管装置逆变状态：放下重物

$$\alpha > 90^\circ, U_{d0} < E, n < 0$$

电动机处于反向制动状态： $u_d^-$ ； $I_d^+$ 。由电动机向电网回馈能量

# 3 分析下图的工作原理。



答：两组晶闸管装置组成的直流可逆调速系统。

正组晶闸管装置与电动机构成负载回路，工作在一四象限；

反组晶闸管装置与电动机构成负载回路，工作在二三象限；

# 2 在转速、电流双闭环直流调速系统中。试阐明负载发生变化时，会引起转速的变化，问系统对此有无调节能力？为什么？

解：（1）当负载发生变化时，系统对此有调节能力。

因为  $I_d \uparrow \rightarrow n \downarrow \rightarrow \Delta U_n \uparrow \rightarrow U_i^* \uparrow \rightarrow I_d \uparrow \rightarrow n \uparrow$

1 简要介绍转差频率控制规律？

答：转差频率控制的规律是：

（1）在  $\omega_s \leq \omega_{sm}$  的范围内，转矩  $T_e$  基本上与  $\omega_s$  成正比，条件是气隙磁通不变。

（2）在不同的定子电流值时，按带补偿的恒压频比关系  $U_s = f(\omega_1, I_s)$  控制定子电压和频率，就能保持气隙磁通  $\Phi_m$  恒定。

2 简要介绍 M/T 法数字测速的基本原理。

■ 答：工作原理：

T0 定时器控制采样时间；

M1 计数器记录 PLG 脉冲；

M2 计数器记录时钟脉冲。

$$n = \frac{60M_1}{ZT_t} = \frac{60M_1 f_0}{ZM_2} \text{ r/min}$$

3 采用单组晶闸管装置供电的 V-M 系统带起重机类型负载时，分析第四象限电动机、晶闸管装置的工作状态？为什么？

答：晶闸管装置逆变状态：放下重物

$$\alpha > 90^\circ, U_d0 < E, n < 0$$

电动机处于反向制动状态： $u_d^-$ ； $I_d^+$ 。由电动机向电网回馈能量

2 在转速、电流双闭环直流调速系统中。试阐明测速发电机的励磁发生变化时，会引起转速的变化，问系统对此有无调节能力？

为什么？

解：（1）当测速发电机的励磁发生变化时，系统对此无调节能力。

因为反馈控制系统对被反馈环所包围且位于前向通道上的干扰具有调节作用。测速发电机的励磁干扰位于反馈通道。系统对此

无调节能力。（或者  $n = \frac{u_n^*}{\alpha}$ ， $\alpha$  改变，转速会发生变化。）

1. 三相异步电机应如何通过坐标变换等效成直流电机？

答：三相电机的电流  $i_A, i_B, i_C$ ，通过三相——二相变换，可以等效成两相静止坐标系下的交流电流  $i_{\alpha 1}, i_{\beta 1}$ ；再通过按转

子磁场定向的旋转变换，可以等效成同步旋转坐标系下的直流电流  $i_{m1}, i_{t1}$ 。 $i_{m1}$  相当于励磁电流， $i_{t1}$  相当于与转矩成正比的电枢电流，从而构成直流电机。

2. 在转速单闭环调速系统中，当电动机励磁电流发生变化时系统是否有调节作用，为什么？（4分）

答：（1）当电动机励磁电流发生变化时，系统对此有调节能力。因为电动机励磁电流的干扰被反馈环所包围且位于前向通道上，系统对此干扰有调节能力。（或者  $ce \uparrow \rightarrow n \downarrow \rightarrow U_n \downarrow \rightarrow \Delta U_n \uparrow \rightarrow U_c \uparrow \rightarrow U_d \uparrow \rightarrow n \uparrow$ 。）

3. 在转速单闭环系统中，改变给定电压能否改变电动机的转速？为什么？如果给定电压不变，调节测速反馈电压的分压比是否能够改变转速？为什么？

答：（1）改变给定电压能改变电动机的转速。因为  $n = \frac{kpk_s U_n^*}{ce(1+k)} - \frac{RI_d}{ce(1+k)}$ ， $n$  随  $U_n^*$  得变化而变化。

（2）如果给定电压不变，调节测速反馈电压的分压比能够改变转速。因为  $\alpha$  改变，则  $k$  随之改变，故转速也会发生改变。

4. 数字测速有哪几种方法，各适合什么场合？

答：数字测速有三种方法：M 法、T 法、M/T 法。

M 法测速在高速段分辨率强；M 法测速只适用于高速段；T 法测速在低速段分辨率强，T 法测速适用于低速段。M/T 法测速可在较宽的转速范围内，具有较高的测速精度。

5.  $\alpha = \beta$  配合控制可逆调速系统运行在第一象限，分析此时电动机、正组装置、反组装置的工作状态？为什么？（6 分）

答：（1）电动机处于正向电动状态。因为在第一象限， $n+$ ， $I_d+$ 。

（2）正组装置处于整流状态。因为  $\alpha_f < 90^\circ, |U_{dor}| > |E|$ ，正组装置处于整流状态且流过负载电流。

（3）反组装置处于待逆变状态。因为  $\alpha_r > 90^\circ$ ，且反组装置只有环流，处于等待状态。

2. 在转速单闭环调速系统中，当转速反馈系数  $\alpha$  发生变化时系统是否有调节作用，为什么？

答：（1）当转速反馈系数  $\alpha$  发生变化时，系统对此无调节能力。因为如果干扰被反馈环所包围且位于前向通道上，系统对此干扰有调节能力。反馈系数  $\alpha$  的干扰位于反馈通道上，系统对此无调节能力。

3. 什么是环流？采用配合控制的环流是怎样产生的？

答：采用两组晶闸管反并联的可逆 V-M 系统，如果两组装置的整流电压同时出现，便会产生不流过负载而直接在两组晶闸管之间流通的短路电流，称作环流。

采用配合控制已经消除了直流平均环流，但是，由于晶闸管装置的输出电压是脉动的，造成整流与逆变电压波形上的差异，仍会出现瞬时电压的情况，从而仍能产生瞬时的脉动环流。

4. 在转速、电流双闭环调速系统稳态运行时，两个调节器的输入偏差电压和输出电压各是多少？为什么？

答：（1）两个调节器的输入偏差电压均为零。因为稳态运行电流和转速均无偏差。

（2）转速调节器的输出电压  $u_i^* = \beta I_{dl}$

$$\text{电流调节器的输出电压 } u_c = \frac{c_e n + I_d R}{k_s} = \frac{c_e u_n^* / \alpha + I_{dl} R}{k_s}$$

5.  $\alpha = \beta$  配合控制可逆调速系统运行在第三象限，分析此时电动机、正组装置、反组装置的工作状态？为什么？

答：（1）电动机处于反向电动状态。因为在第三象限， $n-$ ， $I_d-$ 。

（2）反组装置处于整流状态。因为  $\alpha_r < 90^\circ, |U_{dor}| > |E|$ ，反组装置处于整流状态且流过负载电流。

（3）正组装置处于待逆变状态。因为  $\alpha_f > 90^\circ$ ，且正组装置只有环流，处于等待状态。

6. 在转速、电流双闭环调速系统中，两个调节器均采用 PI 调节器。当 ASR 输出达到  $U_{im}^* = 8V$  时，主电路电流达到最大电流 80A。

当负载电流由 40A 增加到 70A 时，试问：

（1） $U_i^*$  应如何变化？

（2） $U_c$  如何变化？

（3） $U_c$  值由哪些条件决定？

解：(1)  $\beta = \frac{8}{80} = 0.1 \text{ v/A}$

$$u_i^* = \beta I_d = \beta I_{dl}$$

$U_i^*$  从 4v 增加到 7v。

(2)  $U_c$  增加。

$$(3) \quad u_c = \frac{c_e n + I_d R}{k_s} = \frac{c_e u_n^* / \alpha + I_{dl} R}{k_s}, \quad U_c \text{ 由 } n \text{ 和 } I_d \text{ 决定 (或者由 } U_n^* \text{ 和 } I_{dl} \text{ 决定)}。$$

1. 什么是静态环流？什么是动态环流？

答：**静态环流**——两组可逆线路在一定控制角下稳定工作时出现的环流。**动态环流**——仅在可逆 V-M 系统处于过渡过程中出现的环流。

4. 在转速单闭环调速系统中，当电枢电阻  $R_a$  发生变化时系统是否有调节作用，为什么？（6 分）

答：(1) 当电枢电阻  $R_a$  发生变化时，系统对此有调节能力。因为电枢电阻  $R_a$  的干扰被反馈环所包围且位于前向通道上，系统对此干扰有调节能力。（或者  $R_a \uparrow \rightarrow n \downarrow \rightarrow U_n \downarrow \rightarrow \Delta U_n \uparrow \rightarrow U_c \uparrow \rightarrow U_d \uparrow \rightarrow n \uparrow$ 。）

5.  $\alpha = \beta$  配合控制可逆调速系统运行在第四象限，分析此时电动机、正组装置、反组装置的工作状态？为什么？

答：(1) 电动机处于反向制动状态。因为在第四象限， $n -$ ， $I_d +$ 。

(2) 正组装置处于逆变状态。因为  $\alpha_f > 90^\circ, |U_{dof}| < |E|$ ，正组装置处于逆变状态且流过负载电流。

(3) 反组装置处于待整流状态。因为  $\alpha_r < 90^\circ$ ，且反组装置只有环流，处于等待状态。

6. 为什么用积分控制的调速系统是无静差的？在转速单闭环调速系统中，当积分调节器的输入偏差电压  $\Delta U = 0$  时，调节器的输出电压是多少？它取决于哪些因素？

答：在稳态运行时，转速偏差电压  $\Delta U_n$  必为零。如果  $\Delta U_n$  不为零，则  $U_c$  继续变化，就不是稳态了。

$$U_c = \frac{U_{d0}}{K_s} = \frac{C_e n + I_d R}{K_s} = \frac{C_e U_n^* / \alpha + I_{dL} R}{K_s}$$

调节器的输出电压取决于转速给定电压和负载电流。

1. 简述转速、电流双闭环系统中电流调节器的作用？

答：(1) 作为内环的调节器，在外环转速的调节过程中，它的作用是使电流紧紧跟随其给定电压（即外环调节器的输出量）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。

4. 在采用 PI 调节器的转速单闭环调速系统中。试阐明电动机励磁电流发生变化时，会引起转速的变化，问系统对此有无调节能力？为什么？系统稳定后，转速能否重新调节到原来的转速值，为什么？

答：(1) 当励磁电流发生变化时，系统对此有调节能力。因为  $I_f \downarrow \rightarrow C_e \downarrow \rightarrow n \uparrow \rightarrow U_n \uparrow \rightarrow U_c \downarrow \rightarrow U_{d0} \downarrow \rightarrow n \downarrow$ 。

(2) 系统稳定后，转速能重新调节到原来的转速值，因为采用 PI 调节器， $\Delta U = 0$ ，即  $n = \frac{U_n^*}{\alpha}$ ， $U_n^*$ ， $\alpha$  不变，则  $n$  不

变。

2. 在采用 PI 调节器的转速单闭环调速系统中。试阐明给定电源发生变化时，会引起转速的变化，问系统稳定后，转速能否重新调节到原来的转速值，为什么？

答：系统稳定后，转速不能重新调节到原来的转速值，因为采用 PI 调节器， $\Delta U=0$ ，即  $n = \frac{U_n^*}{\alpha}$ ， $\alpha$  不变， $U_n^*$  改变，则  $n$  发生改变。

3. 试回答三相异步电机应如何通过坐标变换等效成直流电机？

答：三相电机的电流  $i_A, i_B, i_C$ ，通过三相——二相变换，可以等效成两相静止坐标系下的交流电流  $i_{\alpha 1}, i_{\beta 1}$ ；再通过按转子磁场定向的旋转变换，可以等效成同步旋转坐标系下的直流电流  $i_{m1}, i_{t1}$ 。 $i_{m1}$  相当于励磁电流， $i_{t1}$  相当于与转矩成正比的电枢电流，从而构成直流电机。

4. 笼型异步电动机变压变频调速系统在基频以下调速时，常采用什么控制方式？在基频以上调速时又采用何种控制方式？

答：笼型异步电动机变压变频调速系统在基频以下调速时，常采用三种电压-频率协调控制方式：恒压频比控制（ $U_s/\omega_1$ ）、恒  $E_g/\omega_1$  控制、恒  $E_r/\omega_1$  控制。在基频以上调速时又采用弱磁恒功率调速控制方式。

2. 在采用 PI 调节器的转速双闭环调速系统中。试阐明负载减小时，转速的自动调节过程。系统稳定后，转速能否重新调节到原来的转速值，为什么？

解：（1）当负载减小时，系统对此有调节能力。因为负载减小， $n \uparrow \rightarrow U_n \uparrow \rightarrow \Delta U_n \downarrow \rightarrow U_i^* \downarrow \rightarrow i_d \downarrow \rightarrow n \downarrow$ 。

（2）系统稳定后，转速能重新调节到原来的转速值，因为采用 PI 调节器， $\Delta U=0$ ，即  $n = \frac{U_n^*}{\alpha}$ ， $U_n^*, \alpha$  不变，则  $n$  不变。

- 2、采用单组晶闸管装置供电的 V-M 系统在提升重物时，分析电动机、晶闸管装置的工作状态？为什么？

答：晶闸管装置整流状态：提升重物， $\alpha < 90^\circ$ ， $U_d0 > E$ ， $n > 0$

电动机处于正向电动状态： $u_d+$ ； $i_d+$ 。由电网向电动机提供能量。

- 1、笼型异步电动机变压变频调速系统在基频以下调速时，常采用哪几种电压-频率协调控制方式？在基频以上调速时又采用何种控制方式？

答：笼型异步电动机变压变频调速系统在基频以下调速时，常采用三种电压-频率协调控制方式：恒压频比控制（ $U_s/\omega_1$ ）、恒  $E_g/\omega_1$  控制、恒  $E_r/\omega_1$  控制。在基频以上调速时又采用弱磁恒功率调速控制方式。

- 1、某一调速系统，测得的最高转速特性为  $n_{0\max} = 1500 \text{ r/min}$ ，最低转速特性为  $n_{0\min} = 150 \text{ r/min}$ ，带额定负载的速度降落  $\Delta n_N = 15 \text{ r/min}$ ，且不同转速下额定速降  $\Delta n_N$  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大？

解

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{n_{0\max} - \Delta n_N}{n_{0\min} - \Delta n_N} = \frac{1500 - 15}{150 - 15} = 11$$

$$s = \frac{\Delta n}{n_{0\min}} = \frac{15}{150} = 10\%$$

- 2、转速单环调速系统，如果测速发电机的励磁发生了变化，系统有无克服这种干扰的能力？为什么？

答：没有，因为反馈控制系统只对反馈环所包围的前向通道上的扰动起抑制作用，而测速机励磁不是。

- 3、 $\alpha = \beta$  配合控制可逆调速系统运行在第二象限，分析此时电动机、正组装置、反组装置的工作状态？为什么？

答：（1）电动机处于正向制动状态。因为在第二象限， $n+$ ， $i_d-$ 。

(2) 正组装置处于待整流状态。因为  $\alpha_f < 90^\circ$ ，正组装置只有环流，处于等待状态。

(3) 反组装置处于逆变状态。因为  $\alpha_r > 90^\circ, |U_{dor}| < |E|$ ，且反组装置处于逆变状态且流过负载电流。

2、在转速负反馈调节系统中，当电动机励磁电流、测速发电机励磁各量发生变化时，都会引起转速的变化，问系统对于上述各量有无调节能力？为什么？

答：系统对于电动机励磁电流有调节能力。因为它们在前向通道中，对于测速发电机励磁发生变化，没有调节能力。因为它不在闭环系统的前向通道中。

1、转速单环调速系统，改变给定电压能否改变电动机的转速？为什么？如果给定电压不变，调节测速反馈电压的分压比是否能够改变转速？为什么？（4分）

$$n = \frac{k_p k_s U_n^*}{C_e (1+k)} - \frac{R I_d}{C_e (1+k)}$$

答：1) 能。因为

2) 能。因为转速和反馈电压比有关。

2、什么叫环流？并举例二种抑制或消除环流的方法？

答：采用两组晶闸管反并联的可逆 V-M 系统，如果两组装置的整流电压同时出现，便会产生不流过负载而直接在两组晶闸管之间流通的短路电流，称作环流。消除环流的方法：逻辑控制无环流系统，错位控制无环流系统。

1. 正弦波电压供电时，电压—频率协调控制有几种？各有什么特点？

答：电压—频率协调控制有三种：恒压频比（ $U_s / \omega l = \text{Constant}$ ）控制、恒  $E_g / \omega l$  控制、恒  $E_r / \omega l$  控制。

(1) 恒压频比（ $U_s / \omega l = \text{Constant}$ ）控制最容易实现，它的变频机械特性基本上是平行下移，硬度也较好，能够满足一般的调速要求，但低速带载能力有些差强人意，须对定子压降实行补偿。

(2) 恒  $E_g / \omega l$  控制是通常对恒压频比控制实行电压补偿的标准，可以在稳态时达到  $\Phi_{rm} = \text{Constant}$ ，从而改善了低速性能。但机械特性还是非线性的，产生转矩的能力仍受到限制。

(3) 恒  $E_r / \omega l$  控制可以得到和直流他励电机一样的线性机械特性，按照转子全磁通  $\Phi_{rm}$  恒定进行控制，即得

$$E_r / \omega l = \text{Constant}$$

而且，在动态中也尽可能保持  $\Phi_{rm}$  恒定是矢量控制系统的目标，当然实现起来是比较复杂的。

4. 在无静差转速单闭环调速系统中，当供电电网电压发生变化时系统是否有调节作用，为什么？系统稳定后，转速能否重新调节到原来的转速值，为什么？（4分）

解：(1) 当电网电压发生变化时，系统对此有调节能力。因为  $U_s \uparrow \rightarrow U_{do} \uparrow \rightarrow n \uparrow \rightarrow U_n \uparrow \rightarrow U_c \downarrow \rightarrow U_{do} \downarrow \rightarrow n \downarrow$ 。

(2) 系统稳定后，转速能重新调节到原来的转速值，因为采用 PI 调节器， $\Delta U=0$ ，即  $n = \frac{U_i}{\alpha}$ ， $U_n^*, \alpha$  不变，则  $n$  不变。

3. 在转速、电流双闭环调速系统中，两个调节器均采用 PI 调节器。当电网电压突然减低时，分析系统的自动调节过程？系统重新进入稳态后，转速调节器的输入偏差电压  $\Delta U_n$  是否为零？为什么？

解：双闭环系统中，由于增设了电流内环，电压波动可以通过电流反馈得到比较及时的调节，不必等它影响到转速以后才能反馈回来，抗扰性能大有改善。

当电网电压突然减低时， $U_s \downarrow \rightarrow U_{do} \downarrow \rightarrow I_d \downarrow \rightarrow U_i \downarrow \rightarrow U_c \uparrow \rightarrow U_{do} \uparrow \rightarrow I_d \uparrow$ 。

系统重新进入稳态后，转速调节器的输入偏差电压  $\Delta U_n$  等于零。因为  $\Delta U_n$  大于零，电枢电流增加，电机加速，因为  $\Delta U_n$  小于零，电枢电流减小，电机减速，都不是稳态。

1. 什么叫环流？环流可分为哪几种环流？如何抑制环流？（5分）

答：采用两组晶闸管反并联的可逆 V-M 系统，如果两组装置的整流电压同时出现，便会产生不流过负载而直接在两组晶闸管之间流通的短路电流，称作环流。环流可分为静态环流和动态环流。为了防止直流平均环流的产生，需要采取必要的措施，比如：采用配合控制的策略，使一组晶闸管装置工作在整流状态，另一组则工作在逆变状态。

3. 采用单组晶闸管装置供电的 V-M 系统在提升重物时, 分析电动机、晶闸管装置的工作状态? 为什么? (10 分)

答: 晶闸管装置整流状态: 提升重物,  $\alpha < 90^\circ$ ,  $U_{d0} > E$ ,  $n > 0$

电动机处于正向电动状态:  $u_{d+}$ ;  $I_{d+}$ 。由电网向电动机提供能量。

1. V-M 系统需要快速回馈制动时, 为什么必须采用可逆线路?

答: 当电动机需要回馈制动时, 由于电机反电动势的极性未变, 要回馈电能必须产生反向电流, 而反向电流是不可能通过 VF 流通的。这时, 可以利用控制电路切换到反组晶闸管装置 VR, 并使它工作在逆变状态。

2. 简要介绍 M 法数字测速的基本原理。

答: 工作原理:

由计数器记录 PLG 发出的脉冲信号;

定时器每隔时间  $T_c$  向 CPU 发出中断请求  $INT_t$ ;

CPU 响应中断后, 读出计数值  $M_1$ , 并将计数器清零重新计数;

根据计数值  $M$  计算出对应的转速值  $n$ 。

$$n = \frac{60M_1}{ZT_c}$$

2. 在转速、电流双闭环调速系统中, 两个调节器均采用 PI 调节器。当系统带额定负载运行时, 转速反馈线突然断线, 分析系统的动态调节过程? 系统重新进入稳态后, 电流调节器的输入偏差电压  $\Delta U_i$  是否为零? 写出  $U_i^*$ ,  $U_c$ ,  $I_d$  及  $n$  的稳态表达式 (采用三相桥式整流电路)? (10 分)

答: (1) 若转速反馈线突然断线, 则 ASR 输入端有  $U_n = 0$ , 于是 ASR 饱和, 故  $U_i^* = U_{im}^*$ 。

(2)  $U_c$  上升到  $U_{cm}$ , ACR 也饱和,  $U_d = U_{dm}$ ,  $I_d$  上升, 电动机加速,  $n$  上升,  $E$  上升, 最后使  $I_d$  回降到  $I_{dn}$ , 系统稳定下来。

(3) 系统重新进入稳态后, 电流调节器的输入偏差电压  $\Delta U_i$  不为零。

(4) 稳态时,  $U_i^* = U_{im}^*$ ,  $U_c = U_{cm}$ ,  $I_d = I_{dn}$ ,  $n = \frac{U_{dm} - I_{dn}}{ce}$