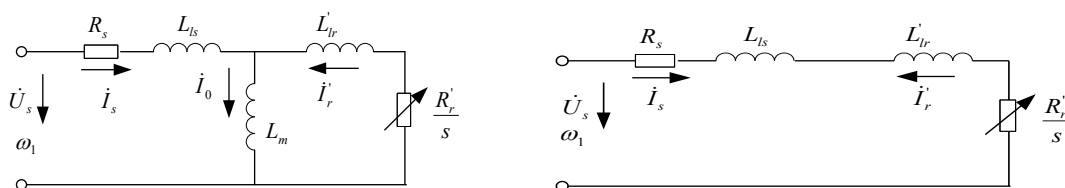


第 6 章习题解答

6-1 一台三相笼型异步电动机铭牌数据为：额定电压 $U_N = 380V$ ，额定转速 $n_N = 960r/min$ ，额定频率 $f_N = 50Hz$ ，定子绕组 Y 联接。由实验测得定子电阻 $R_s = 0.35\Omega$ ，定子漏感 $L_{ls} = 0.006H$ ，定子绕组产生气隙主磁通的等效电感 $L_m = 0.26H$ ，转子电阻 $R'_r = 0.5\Omega$ ，转子漏感 $L'_{lr} = 0.007H$ ，转子参数已折合到定子侧，忽略铁心损耗。

(1). 画出异步电动机 T 型等效电路和简化等效电路；(2). 额定运行时的转差率 s_N ，定子额定电流 I_{1N} 和额定电磁转矩；(3). 定子电压和频率均为额定值时，理想空载时的励磁电流 I_0 ；(4). 定子电压和频率均为额定值时，临界转差率 s_m 和临界转矩 T_m ，画出异步电动机的机械特性。

解：(1). 异步电动机 T 型等效电路和简化等效电路



$$(2). \text{ 额定运行时的转差率 } s_N = \frac{1000 - 960}{1000} = \frac{4}{100}$$

$$\text{根据简化等效电路, 定子额定电流 } I_{1N} = \frac{U_N / \sqrt{3}}{\sqrt{(R_s + R'_r / s_N)^2 + [\omega_1 (L_{ls} + L'_{lr})]^2}}$$

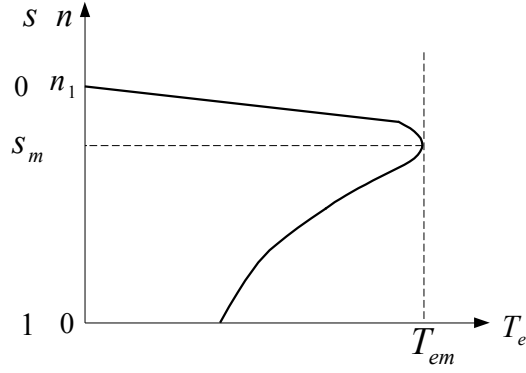
$$\text{额定电磁转矩 } T_e = \frac{3n_p}{\omega_1} I_{1N}^2 \frac{R'_r}{s_N}, \text{ 其中, } n_p = \frac{60f_N}{n_1} = \frac{60 \times 50}{1000} = 3, \quad \omega_1 = 2\pi f_N$$

$$(3). \text{ 定子电压和频率均为额定值时, 理想空载时的励磁电流 } I_0 = \frac{U_N / \sqrt{3}}{\sqrt{R_s^2 + [\omega_1 (L_{ls} + L_m)]^2}}$$

$$(4). \text{ 定子电压和频率均为额定值时, 临界转差率 } s_m = \frac{R'_r}{\sqrt{R_s^2 + \omega_1^2 (L_{ls} + L'_{lr})^2}}$$

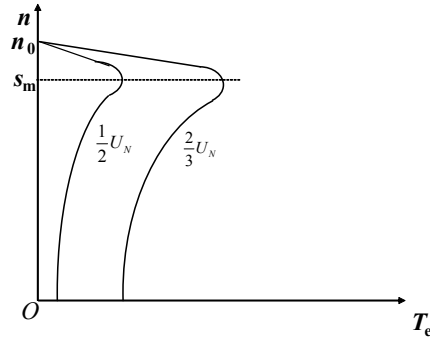
$$\text{和临界转矩 } T_{em} = \frac{3n_p \left(\frac{U_N}{\sqrt{3}}\right)^2}{2\omega_1 \left[R_s + \sqrt{R_s^2 + \omega_1^2 (L_{ls} + L'_{lr})^2} \right]}$$

异步电动机的机械特性



6-2 异步电动机参数如 6-1 题所示，画出调压调速在 $\frac{1}{2}U_N$ 和 $\frac{2}{3}U_N$ 时的机械特性，计算临界转差率 s_m 和临界转矩 T_m ，分析气隙磁通的变化，在额定电流下的电磁转矩，分析在恒转矩负载和风机类负载两种情况下，调压调速的稳定运行范围。

解：调压调速在 $\frac{1}{2}U_N$ 和 $\frac{2}{3}U_N$ 时的机械特性



$$\text{临界转差率 } s_m = \frac{R'_r}{\sqrt{R_s^2 + \omega_1^2 (L_{ls} + L'_{lr})^2}}$$

$$\frac{1}{2}U_N \text{ 时, 临界转矩 } T_{em} = \frac{3n_p \left(\frac{U_N}{2\sqrt{3}}\right)^2}{2\omega_1 \left[R_s + \sqrt{R_s^2 + \omega_1^2 (L_{ls} + L'_{lr})^2} \right]}$$

$$\text{气隙磁通 } \Phi_m \approx \frac{\frac{U_N}{2\sqrt{3}}}{4.44 f_1 N_s k_{Ns}}$$

$$\frac{2}{3}U_N \text{ 时, 临界转矩 } T_{em} = \frac{3n_p \left(\frac{2}{3\sqrt{3}}U_N\right)^2}{2\omega_1 \left[R_s + \sqrt{R_s^2 + \omega_1^2 (L_{ls} + L'_{lr})^2} \right]}$$

$$\text{气隙磁通 } \Phi_m \approx \frac{\frac{2}{3\sqrt{3}}U_N}{4.44 f_1 N_s k_{Ns}}$$

带恒转矩负载 T_L 工作时，稳定工作范围为 $0 < s < s_m$ ，带风机类负载运行，调速范围 $0 < s < 1$ 。

6-3 异步电动机参数如 6-1 题所示，若定子每相绕组匝数 $N_s = 125$ ，定子基波绕组系数 $k_{N_s} = 0.92$ ，定子电压和频率均为额定值。求：(1). 忽略定子漏阻抗，每极气隙磁通量 Φ_m 和气隙磁通在定子每相中异步电动势的有效值 E_g ；(2). 考虑定子漏阻抗，在理想空载和额定负载时的 Φ_m 和 E_g ；(3). 比较上述三种情况下， Φ_m 和 E_g 的差异，并说明原因。

解：(1). 忽略定子漏阻抗， $\frac{U_N}{\sqrt{3}} \approx E_g = 4.44 f_{1N} N_s k_{N_s} \Phi_m$

(2). 考虑定子漏阻抗，在理想空载时同 (1)

额定负载时，根据简化等效电路，定子额定电流 $\dot{I}_N = \frac{\dot{U}_N}{\kappa_s + R'_r / s_N + j\omega_1(L_{1s} + L'_{1r})}$

$\dot{I}_N = \frac{E_g}{\sqrt{3}(R_s + j\omega_1 L_{1s})}$ ； $\Phi_m = \frac{E_g}{4.44 f_{1N} N_s k_{N_s}}$

(3). 忽略定子漏阻抗时，不考虑定子漏阻抗压降，理想空载时，定子漏阻抗压降等于零，两者相同。考虑定子漏阻抗时，定子漏阻抗压降使得 Φ_m 和 E_g 减小。

6-4 接上题，(1). 计算在理想空载和额定负载时的定子磁通 Φ_{ms} 和定子每相绕组感应电动势 E_s ；(2). 转子磁通 Φ_{mr} 和转子绕组中的感应电动势（折合到定子边） E_r ；(3). 分析与比较在额定负载时， Φ_m 、 Φ_{ms} 和 Φ_{mr} 的差异， E_g 、 E_s 和 E_r 的差异，并说明原因。

解：(1). 定子磁通 Φ_{ms} 和定子每相绕组感应电动势 E_s

理想空载时， $I_1 = 0$ ，忽略励磁电流（下同）， $E_s = \frac{U_N}{\sqrt{3}}$ ， $\Phi_{ms} = \frac{E_s}{4.44 f_{1N} N_s k_{N_s}}$

额定负载时，根据简化等效电路，定子额定电流 $\dot{I}_N = \frac{\dot{U}_N}{\kappa_s + R'_r / s_N + j\omega_1(L_{1s} + L'_{1r})}$

$\dot{I}_N = \frac{E_s}{\sqrt{3} R_s}$ ； $\Phi_m = \frac{E_s}{4.44 f_{1N} N_s k_{N_s}}$

理想空载和额定负载时的

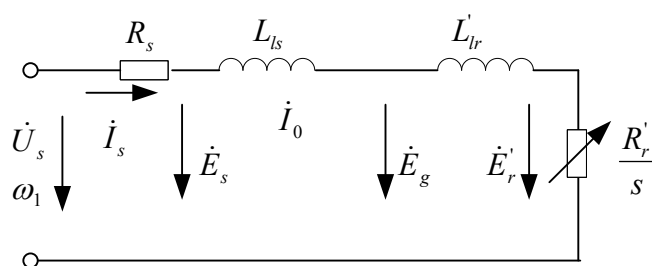
(2). 转子磁通 Φ_{mr} 和转子绕组中的感应电动势（折合到定子边） E_r ；

理想空载时， $I_1 = 0$ ， $E_r = \frac{U_N}{\sqrt{3}}$ ， $\Phi_{mr} = \frac{E_r}{4.44 f_{1N} N_s k_{Ns}}$

额定负载时，根据简化等效电路，定子额定电流 $I_1 = \frac{U}{\sqrt{3} [\kappa_s + R'_r / s_N + j\omega_1 (L_{ls} + L'_{lr})]}$

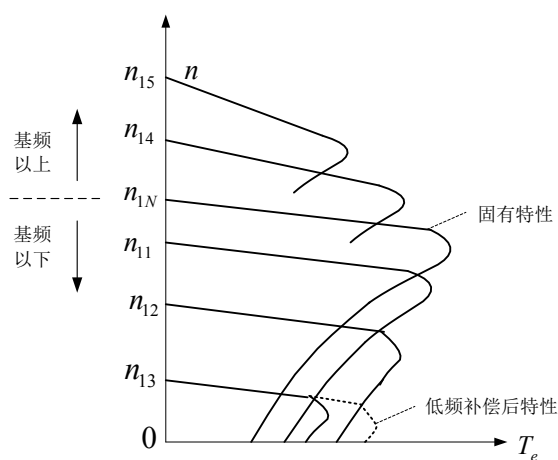
$I_1 = \frac{E_r}{\sqrt{3} [R_s + R'_r / s_N + j\omega_1 (L_{ls} + L'_{lr})]}$ ； $\Phi_{mr} = \frac{E_r}{4.44 f_{1N} N_s k_{Ns}}$

(3). 额定负载时， $\Phi_{ms} > \Phi_m > \Phi_{mr}$ ， $E_s > E_g > E_r$ ，离电机输入端远的反电势小。

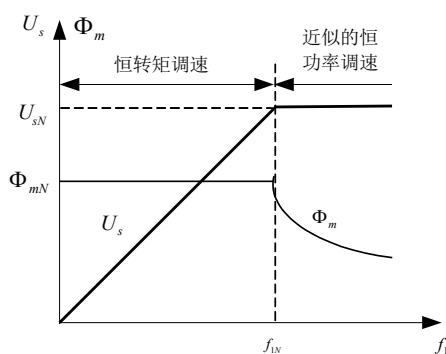


6-5 按基频以下和基频以上，分析电压频率协调的控制方式，画出（1）恒压恒频正弦波供电时异步电动机的机械特性；（2）基频以下电压-频率协调控制时异步电动机的机械特性；（3）基频以上恒压变频控制时异步电动机的机械特性；（4）画出电压频率特性曲线 $U = f(f)$ 。

解：（1）恒压恒频正弦波供电时异步电动机的机械特性；（2）基频以下电压-频率协调控制时异步电动机的机械特性；（3）基频以上恒压变频控制时异步电动机的机械特性；



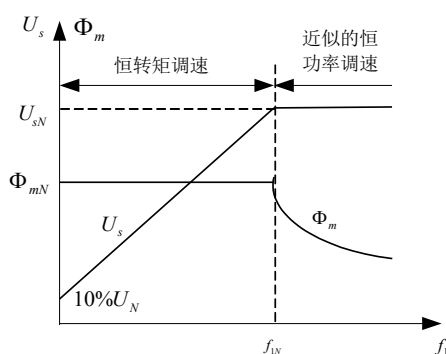
（4）电压频率特性曲线



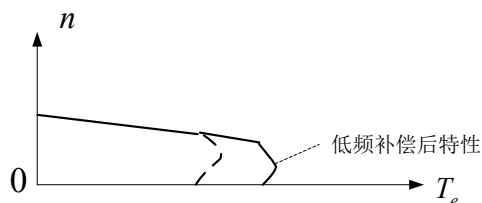
6-6 异步电动机参数同 6-1 题，逆变器输出频率 f 等于额定频率 f_N 时，输出电压 U 等于额定电压 U_N 。考虑低频补偿，当频率 $f = 0$ ，输出电压 $U = 10\%U_N$ 。(1) 求出基频以下，电压频率特性曲线 $U = f(f)$ 的表达式，并画出特性曲线；(2) 当 $f = 5\text{Hz}$ 时，比较补偿与不补偿的机械特性曲线，两种情况下的临界转矩 $T_{e\max}$ 。

解：(1) 基频以下，电压频率特性曲线

$$U = f(f) = \left(\frac{0.9}{f_N} f + 0.1\right)U_N$$



(2) 补偿与不补偿的机械特性曲线，两种情况下的临界转矩 T_{em}



当 $f = 5\text{Hz}$ 时，补偿后电压 $U = f(5) = \left(\frac{0.9}{50} 5 + 0.1\right)U_N = 0.19U_N$

$$\text{临界转矩 } T_{em} = \frac{3n_p \left(0.19 \frac{U_N}{\sqrt{3}}\right)^2}{2 \times 2\pi \times 5 \left[R_s + \sqrt{R_s^2 + \omega_1^2 (L_{ls} + L_{lr}')^2} \right]}$$

$$\text{不补偿 } U = f(5) = \frac{5}{50} U_N = 0.1 U_N$$

$$\text{临界转矩 } T_{em} = \frac{3n_p(0.1\frac{U_N}{\sqrt{3}})^2}{2 \times 2\pi \times 5 \left[R_s + \sqrt{R_s^2 + \omega_1^2 (L_{ls} + L_{lr}')^2} \right]}$$

6-7 异步电动机基频下调速时，气隙磁通 Φ_m 、定子磁通 Φ_{ms} 和转子磁通 Φ_{mr} 受负载的变换而变化，要保持恒定需采用电流补偿控制。写出保持三种磁通恒定的电流补偿控制的相量表达式，若仅采用幅值补偿是否可行，比较两者的差异。

解：（1）. 定子磁通 Φ_{ms} 恒定的电流补偿控制的相量表达式

$$\dot{U}_s = R_s \dot{I}_1 + \dot{E}_s$$

（2）. 气隙磁通 Φ_m 恒定的电流补偿控制的相量表达式

$$\dot{U}_s = (R_s + j\omega_1 L_{ls}) \dot{I}_1 + \dot{E}_g$$

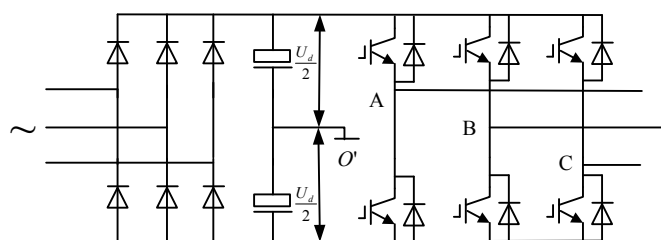
（3）. 转子磁通 Φ_{mr} 恒定的电流补偿控制的相量表达式

$$\dot{U}_s = (R_s + j\omega_1 L_{ls}) \dot{I}_1 + \dot{E}_g + \dot{U}_r$$

精确的补偿应该是幅值补偿和相位补偿，考虑实现方便的原因，也可仅采用幅值补偿。

6-8 两电平 PWM 逆变器主回路，采用双极性调制时，用“1”表示上桥臂开通，“0”表示上桥臂关断，共有几种开关状态，写出其开关函数。根据开关状态写出其电压空间矢量表达式，画出空间电压矢量图。

解：两电平 PWM 逆变器主回路：



采用双极性调制时，忽略死区时间影响，用“1”表示上桥臂开通，“0”表示下桥臂开通，逆变器输出端电压：

$$u_x = \begin{cases} \frac{U_d}{2} & S_x = 1 \\ -\frac{U_d}{2} & S_x = 0 \end{cases}$$

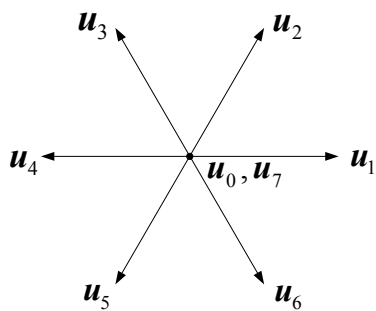
$$u_x = \frac{U_d}{2}(2S_x - 1),$$

以直流电源中点 O' 为参考点

$$\mathbf{u}_s = (u_A + u_B e^{j\gamma} + u_C e^{j2\gamma})$$

	S_A	S_B	S_C	u_A	u_B	u_C	\mathbf{u}_s
\mathbf{u}_0	0	0	0	$-\frac{U_d}{2}$	$-\frac{U_d}{2}$	$-\frac{U_d}{2}$	0
\mathbf{u}_1	1	0	0	$\frac{U_d}{2}$	$-\frac{U_d}{2}$	$-\frac{U_d}{2}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_d$
\mathbf{u}_2	1	1	0	$\frac{U_d}{2}$	$\frac{U_d}{2}$	$-\frac{U_d}{2}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_d e^{j\frac{\pi}{3}}$
\mathbf{u}_3	0	1	0	$-\frac{U_d}{2}$	$\frac{U_d}{2}$	$-\frac{U_d}{2}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_d e^{j\frac{2\pi}{3}}$
\mathbf{u}_4	0	1	1	$-\frac{U_d}{2}$	$\frac{U_d}{2}$	$\frac{U_d}{2}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_d e^{j\pi}$
\mathbf{u}_5	0	0	1	$-\frac{U_d}{2}$	$-\frac{U_d}{2}$	$\frac{U_d}{2}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_d e^{j\frac{4\pi}{3}}$
\mathbf{u}_6	1	0	1	$\frac{U_d}{2}$	$-\frac{U_d}{2}$	$\frac{U_d}{2}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_d e^{j\frac{5\pi}{3}}$
\mathbf{u}_7	1	1	1	$\frac{U_d}{2}$	$\frac{U_d}{2}$	$\frac{U_d}{2}$	0

空间电压矢量图：



6-9 当三相电压分别为 u_{AO} 、 u_{BO} 、 u_{CO} ，如何定义三相定子电压空间矢量 \mathbf{u}_{AO} 、 \mathbf{u}_{BO} 、 \mathbf{u}_{CO}

和合成矢量 \mathbf{u}_s ，写出他们的表达式。

解：A, B, C 为定子三相绕组的轴线，定义三相电压空间矢量：

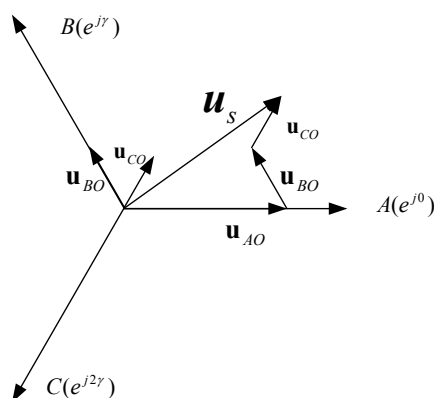
$$\mathbf{u}_{AO} = u_{AO}$$

$$\mathbf{u}_{BO} = u_{BO} e^{j\gamma}$$

$$\mathbf{u}_{CO} = u_{CO} e^{j2\gamma}$$

合成矢量：

$$\mathbf{u}_s = \mathbf{u}_{AO} + \mathbf{u}_{BO} + \mathbf{u}_{CO} = u_{AO} + u_{BO} e^{j\gamma} + u_{CO} e^{j2\gamma}$$



6-10 忽略定子电阻的影响，讨论定子电压空间矢量 \mathbf{u}_s 与定子磁链 $\boldsymbol{\psi}_s$ 的关系，当三相电压

u_{AO} 、 u_{BO} 、 u_{CO} 为正弦对称时，写出电压空间矢量 \mathbf{u}_s 与定子磁链 $\boldsymbol{\psi}_s$ 的表达式，画出各自的运动轨迹。

解：用合成空间矢量表示的定子电压方程式：

$$\mathbf{u}_s = R_s \mathbf{i}_s + \frac{d\boldsymbol{\psi}_s}{dt}$$

忽略定子电阻的影响，

$$\mathbf{u}_s \approx \frac{d\boldsymbol{\psi}_s}{dt}$$

$$\Delta\boldsymbol{\psi}_s \approx \int \mathbf{u}_s dt,$$

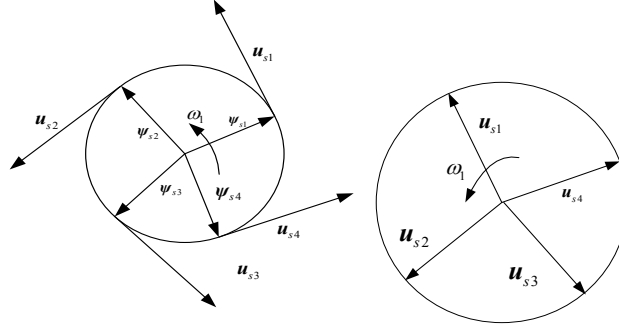
即电压空间矢量的积分为定子磁链的增量。

当三相电压为正弦对称时，定子磁链旋转矢量

$$\psi_s = \psi_s e^{j(\omega_1 t + \varphi)}$$

电压空间矢量：

$$\mathbf{u}_s \approx \omega_1 \psi_s e^{j(\omega_1 t + \frac{\pi}{2} + \varphi)}$$

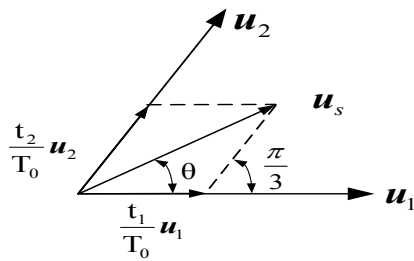


6-11 采用电压空间矢量 PWM 调制方法，若直流电压 u_d 恒定，如何协调输出电压与输出频率的关系。

解：直流电压恒定则六个基本电压空间矢量的幅值一定，

$$\text{输出频率 } \omega_1 \downarrow, \begin{cases} \text{开关周期 } T_0 = \frac{\pi}{3N\omega_1} \uparrow, \\ \mathbf{u}_s \downarrow, \because \mathbf{u}_s = \mathbf{u}_1 + \frac{t_2}{T_0} \mathbf{u}_2 = \frac{t_1}{T_0} U_d + \frac{t_2}{T_0} U_d e^{j\frac{\pi}{3}}, \frac{t_1}{T_0} \downarrow, \frac{t_2}{T_0} \downarrow \end{cases}$$

$\therefore t_1 \downarrow, t_2 \downarrow, T - t_1 - t_2 \uparrow$ ，零矢量作用时间增加，所以插入零矢量可以协调输出电压与输出频率的关系。



6-12 两电平 PWM 逆变器主回路的输出电压矢量是有限的，若期望输出电压矢量 \mathbf{u}_s 的幅值小于直流电压 u_d ，空间角度 θ 任意，如何用有限的 PWM 逆变器输出电压矢量来逼近期望的输出电压矢量。

解：两电平 PWM 逆变器有六个基本空间电压矢量，这六个基本空间电压矢量将电压空间矢量分成六个扇区，根据空间角度 θ 确定所在的扇区，然后用扇区所在的两个基本空间电压矢量

分别作用一段时间等效合成期望的输出电压矢量。

6-13 在转速开环变压变频调速系统中需要给定积分环节，论述给定积分环节的原理与作用。

解：由于系统本身没有自动限制起制动电流的作用，因此，频率设定必须通过给定积分算法产生平缓的升速或降速信号，

6-14 论述转速闭环转差频率控制系统的控制规律，实现方法以及系统的优缺点。

解：转差频率控制的规律为：

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

(2) 在不同的定子电流值时，按图 5-43 的 $U_s = f(\omega_1, I_s)$ 函数关系控制定子电压和频率，就能保持气隙磁通 Φ_m 恒定。

转差频率控制系统的优点是：转差角频率 ω_s^* 与实测转速 ω 相加后得到定子频率 ω_1^* ，在调速过程中，实际频率 ω_1 随着实际转速 ω 同步地上升或下降，加、减速平滑而且稳定。同时，由于在动态过程中转速调节器 ASR 饱和，系统以对应于 $\omega_{s\max}$ 的最大转矩 $T_{e\max}$ 起、制动，并限制了最大电流 $I_{s\max}$ ，保证了在允许条件下的快速性。

转差频率控制系统的缺点是：转差频率控制系统是基于异步电动机稳态模型的， $U_s = f(\omega_1, I_s)$ 函数关系中只抓住了定子电流的幅值，转速检测信号不准确或存在干扰都以正反馈的形式传递到频率控制信号上来。

6-15 用题 6.1 参数计算，转差频率控制系统的临界转差频率 ω_{sm} ，假定系统最大的允许转差频率 $\omega_{s\max} = 0.9\omega_{sm}$ ，试计算起动时定子电流。

解：转差频率控制系统的临界转差频率 $\omega_{s\max} < \omega_{sm} = \frac{R_r}{L_{lr}}$

$$\text{起动时定子电流 } I_{s\max} = \frac{E_g / \omega_1}{\sqrt{\left(\frac{R_r'}{\omega_{s\max}}\right)^2 + L_{lr}'^2}}, \text{ 其中 } \dot{i}_s = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(R_s + j\omega_1 L_{1s}) \cdot}$$