

电机控制标幺化处理解析

李若尘, 子渊先生

1	电机模型标么化.....	3	2.1	理论推导	12
1.1	电压方程标么化	4	2.2	汇川对应代码	13
1.2	采样时间标么化	5	3	锁相环标么化.....	15
1.3	磁链的峰值和有效值	6	3.1	PI 标么	16
1.4	汇川对应代码	7	3.2	积分标么	17
2	电流 PI 控制器标么化	11			

1 电机模型标么化

永磁同步电机归一化模型通过在 abc 坐标系及 dqo 坐标系定义基值变量推导得到。在 abc 参考坐标系下, 令额定相电压与额定相电流的有效值为基值, 则有

$$\text{功率基值} = P_b = 3V_{b3}I_{b3} \quad (3.79)$$

式中, V_{b3} 与 I_{b3} 分别为三相电压与电流的基值。在 dq 坐标系下选择基值量用 V_b 与 I_b 表示, 其等于 abc 坐标系下相电压与电流的峰值, 即

$$V_b = \sqrt{2}V_{b3} \quad (3.80)$$

$$I_b = \sqrt{2}I_{b3} \quad (3.81)$$

因而, 功率基值定义为

$$P_b = 3V_{b3}I_{b3} = 3 \frac{V_b}{\sqrt{2}} \frac{I_b}{\sqrt{2}} = \frac{3}{2}V_bI_b \quad (3.82)$$

以转子坐标系下的模型为例说明归一化的过程。首先考虑 q 轴定子电压, 可以表示为

$$v_{qs}^r = (R_s + L_q p) i_{qs}^r + \omega_r (L_d i_{ds}^r + \lambda_{af}) \quad (3.83)$$

方程两边除以电压基值 V_b 得到归一化的表达式

$$v_{qsn}^r = \frac{v_{qs}^r}{V_b} = \frac{R_s}{V_b} i_{qs}^r + \frac{L_q}{V_b} p i_{qs}^r + \frac{\omega_r (L_d i_{ds}^r + \lambda_{af})}{V_b} \quad (\text{p. u.}) \quad (3.84)$$

1.1 电压方程标么化

将控制系统的参数标么化可降低运算过程中数据溢出的几率, 同时也增加了数据运算的精度。选电压、电流、频率作为基本基值, 则有

$$\begin{cases} U_b \\ I_b \\ f_b \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Z_b = U_b / I_b & W_b = 2\pi f_b \\ L_b = Z_b / W_b & \psi_b = U_b / W_b \\ \theta_b = 2\pi \end{cases} \quad 1.1-1$$

将电机模型等式两边同时除以电压基值 U_b

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - w_e L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + w_e (L_d i_d + \psi_r) \end{cases} \xrightarrow{1/U_b} \begin{cases} \frac{u_d}{U_b} = \frac{R_s i_d}{U_b} + L_d \frac{di_d}{dt} \frac{1}{U_b} - \frac{w_e L_q i_q}{U_b} \\ \frac{u_q}{U_b} = \frac{R_s i_q}{U_b} + L_q \frac{di_q}{dt} \frac{1}{U_b} + \frac{w_e (L_d i_d + \psi_r)}{U_b} \end{cases} \quad 1.1-2$$

将式 1.1-1 带入式 1.1-2 可分别得到 d 轴 q 轴标么化模型

$$\begin{cases} \frac{R_s i_d}{U_b} = \frac{R_s I_b i_d}{U_b I_b} = \frac{R_s}{U_b / I_b} \frac{i_d}{I_b} = \frac{R_s}{Z_b} \frac{i_d}{I_b} \\ L_d \frac{di_d}{dt} \frac{1}{U_b} = \frac{L_d I_b}{U_b} \frac{d(i_d / I_b)}{dt} = \frac{L_d}{Z_b} \frac{d(i_d / I_b)}{dt} = \frac{L_d}{L_b W_b} \frac{d(i_d / I_b)}{dt} \\ \frac{w_e L_q i_q}{U_b} = \frac{W_b L_b I_b}{U_b} \frac{w_e L_q i_q}{W_b L_b I_b} = \frac{w_e L_q i_q}{W_b L_b I_b} \end{cases} \quad 1.1-3$$

$$\begin{cases} \frac{R_s i_q}{U_b} = \frac{R_s I_b i_q}{U_b I_b} = \frac{R_s}{Z_b} \frac{i_q}{I_b} \\ L_q \frac{di_q}{dt} \frac{1}{U_b} = \frac{L_q I_b}{U_b} \frac{d(i_q / I_b)}{dt} = \frac{L_q}{Z_b} \frac{d(i_q / I_b)}{dt} = \frac{L_q}{L_b W_b} \frac{d(i_q / I_b)}{dt} \\ \frac{w_e (L_d i_d + \psi_r)}{U_b} = \frac{W_b L_b I_b}{U_b} \frac{w_e L_d i_d}{W_b L_b I_b} + \frac{w_e \psi_r}{\psi_b W_b} = \frac{w_e L_d i_d}{W_b L_b I_b} + \frac{w_e \psi_r}{W_b \psi_b} \end{cases} \quad 1.1-4$$

$$\begin{cases} \frac{u_d}{U_b} = \frac{R_s}{Z_b} \frac{i_d}{I_b} + \frac{L_d}{L_b W_b} \frac{d(i_d / I_b)}{dt} - \frac{w_e L_q i_q}{W_b L_b I_b} \\ \frac{u_q}{U_b} = \frac{R_s}{Z_b} \frac{i_q}{I_b} + \frac{L_q}{L_b W_b} \frac{d(i_q / I_b)}{dt} + \frac{w_e L_d i_d}{W_b L_b I_b} + \frac{w_e \psi_r}{W_b \psi_b} \end{cases} \quad 1.1-5$$

以标么化的变量表示, 那么有

$$\begin{cases} u_d^* = R_s^* i_d^* + \frac{1}{W_b^*} L_d^* \frac{di_d^*}{dt} - w_e^* L_q^* i_q^* \\ u_q^* = R_s^* i_q^* + \frac{1}{W_b^*} L_q^* \frac{di_q^*}{dt} + w_e^* L_d^* i_d^* + w_e^* \psi_r^* \end{cases} \quad 1.1-6$$

1.2 采样时间标么化

式 1.1-6 可化为

$$\begin{cases} u_d^* = R_s^* i_d^* + L_d^* \frac{di_d^*}{dt / (1/W_b)} - w_e^* L_q^* i_q^* \\ u_q^* = R_s^* i_q^* + L_q^* \frac{di_q^*}{dt / (1/W_b)} + w_e^* L_d^* i_d^* + w_e^* \psi_r^* \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} u_d^* = R_s^* i_d^* + L_d^* \frac{di_d^*}{dt^*} - w_e^* L_q^* i_q^* \\ u_q^* = R_s^* i_q^* + L_q^* \frac{di_q^*}{dt^*} + w_e^* L_d^* i_d^* + w_e^* \psi_r^* \end{cases} \quad 1.2-1$$

对比可知时间可以 $1/(2*\pi*f_b)$ 为基值进行标么化。完全标么化之后, 标么模型和有名值模型在形式上可以做到统一

$$\begin{cases} u_d^* = R_s^* i_d^* + L_d^* \frac{di_d^*}{dt^*} - w_e^* L_q^* i_q^* \\ u_q^* = R_s^* i_q^* + L_q^* \frac{di_q^*}{dt^*} + w_e^* (L_d^* i_d^* + \psi_r^*) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - w_e L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + w_e (L_d i_d + \psi_r) \end{cases} \quad 1.2-2$$

那这意味着观测器本身相关的代码都不用改, 只改变电机参数、系数以及电流电压等变量即可。在实际工程中因为两套参数范围不太一样, 故采用 Q 格式定点格式数据的时候代码并不能复用。

以下讨论基于标么值模型, 变量不再以 ‘*’ 区分。由式 1.4-8 可得微分方程

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = (u_d - R_s i_d + w_e L_q i_q) \frac{1}{L_d} \\ \frac{di_q}{dt} = (u_q - R_s i_q - w_e (L_d i_d + \psi_r)) \frac{1}{L_q} \end{cases} \quad 1.2-3$$

令 dt 为采样周期 T_s , 则每一拍的电流增量为

$$\begin{cases} di_d = (u_d - R_s i_d + w_e L_q i_q) \frac{T_s}{L_d} \\ di_q = (u_q - R_s i_q - w_e (L_d i_d + \psi_r)) \frac{T_s}{L_q} \end{cases} \quad 1.2-4$$

1.3 磁链的峰值和有效值

电机模型具有统一的形式

$$\begin{cases} u_d^* = R_s^* i_d^* + L_d^* \frac{di_d^*}{dt} - \omega_e^* L_q^* i_q^* \\ u_q^* = R_s^* i_q^* + L_q^* \frac{di_q^*}{dt} + \omega_e^* (L_d^* i_d^* + \psi_r^*) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e (L_d i_d + \psi_r) \end{cases} \quad 1.3-1$$

标么模型中电机参数 R 、 L_d 、 L_q 、 ψ_r 使用标么值, 相应的输入电压、电流和角速度也使用标么值, 整个系统使用同一套基值。相应的, 如果参数都取有名值, 那么就是使用有名值模型。

γ 型接法电机线电流和相电流是一样的, 但是线电压和相电压则相差一个 $\sqrt{3}$ 。很明显, 在 dq 系模型中 u_{dq} 都是指相电压, 在实现电机模型的时候一定要使用‘相值’。电流环中输出电压 u_d 和 u_q 具有线值的含义, 因此在实现有名值模型的时候要除以 $\sqrt{3}$ 转换成相值。

本来在 dq 系中电压和电流稳定时都是直流量, 没有峰值和有效值的概念。但是由于电压和电流都是由 α - β 系中正弦量转换而来的, 取决于克拉克变换系数, 常令 dq 系中矢量幅值等于 α - β 系中电信号的峰值或者有效值, 于是 dq 系也有了区分。

从公式来看, 还不是电压和电流统一使用有效值或者峰值就可以, 还要考虑永磁链的处理。永磁链的计算公式为

$$\psi_r = \frac{1}{2\pi f} \times \frac{3}{2} k \times V_{ph} \quad 1.3-2$$

K 值取 $2/3$ 或者 $\sqrt{2}/3$, ψ_r 的值是不一样的, 实际上还是 $2\pi f \psi_r$ 这个反电势是取峰值还是有效值的区别。 $K = \sqrt{2}/3$ 时, ψ_r 取的是‘有效值’。

1.4 汇川对应代码

1.4.1 电阻标幺

取电机额定电压对应相值作为电压基值, 以电机额定电流 (线值和相值一样) 作为电流基值, 电机定子电阻标幺化处理如下

```
m_UData = ((Ulong)gMotorExtInfo.RsPm * (Ulong)gMotorInfo.Current)/gMotorInfo.Voltage;  
gMotorExtPer.Rpm = ((Ulong)m_UData * 18597)>>14;
```

代码中电阻单位为毫欧、电流单位为 0.01A、电压单位为 1V, 故

$$R_{pu} = \frac{18597 \times R_{sPm} \cdot gMotorInfo.Current}{2^{14} \times gMotorInfo.Voltage} = \frac{18597 \times R_s \times 1000 \cdot I_b \times 100}{2^{14} \times U_b \times \sqrt{3}} \quad 1.4-1$$

整理得

$$R_{pu} = \frac{18597 \times 10^5}{2^{14} \times \sqrt{3}} \cdot \frac{R_s}{U_b / I_b} = 2^{16} \cdot \frac{R_s}{U_b / I_b} = R_{spu} \times 2^{16} \quad 1.4-2$$

电机标幺值具有 Q16 格式, 因为一般情况下 U_n/I_n 还是比定子电阻大很多, 所以不用考虑溢出的问题。比如电机 $R_s = 1.500$ 、 $U_n = 17$ 、 $I_n = 1.50$ 。

1.4.2 电感标么

```

m_BaseL = ((Ulong)gMotorInfo.Votage * 3678)/gMotorInfo.Current;
m_BaseL = ((Ulong)m_BaseL * 5000)/gBasePar.FullFreq01;//Q15
m_Ulong = ((Ulong)gMotorExtInfo.LD <<14) + (m_BaseL >>1);
m_Ulong = m_Ulong / m_BaseL;
gMotorExtPer.LD = m_Ulong / 10; // 同步机 d 轴电感 Q13

```

首先求电感基值

$$m_BaseL = \frac{3678 \times 5000 \times gMotorInfo.Votage}{gBasePar.FullFreq01 \cdot gMotorInfo.Current} = \frac{3678 \times 5000 \times U_b \times \sqrt{3}}{f_b \times 100 \cdot I_b \times 100} \quad 1.4-3$$

整理得

$$m_BaseL = \frac{3678 \times 5000 \times \sqrt{3} \times 2\pi}{100 \times 100} \cdot \frac{U_b}{2\pi f_b \cdot I_b} = 3678 \times \sqrt{3} \pi \cdot \frac{Z_b}{W_b} = 3678 \times \sqrt{3} \pi \cdot L_b \quad 1.4-4$$

省略代码中四舍五入的处理, 电感量单位为 uH, 故变量 m_Ulong 满足

$$m_Ulong = \frac{2^{14} \times gMotorExtInfo.LD}{3678 \times \sqrt{3} \pi \cdot L_b} = \frac{2^{14} \times L_d \times 10^6}{3678 \times \sqrt{3} \pi \cdot L_b} = \frac{2^{14} \times 10^6}{3678 \times \sqrt{3} \pi} L_{dpu} = 100 \times 2^{13} L_{dpu} \quad 1.4-5$$

最后除以 10

$$gMotorExtPer.LD = \frac{m_Ulong}{10} = \frac{100 \times 2^{13} \times L_{dpu}}{10} = 10 \times 2^{13} \times L_{dpu} \quad 1.4-6$$

电感经过上述代码处理之后, 除了 Q13 格式外还有个系数 10, 比较突兀, 可能是处理有问题。直观上看一下电感标么, 令 $U_n = 17$ 、 $I_n = 1.50$ 、 $f_n = 220\text{Hz}$ 、 $L_d = 600\text{uH}$, 电感标么值数值上还是比较小的

$$\begin{cases} L_b = \frac{U_b}{2\pi f_b \cdot I_b} = \frac{17}{2\pi \times 220 \times 1.5} = 0.0082 \\ L_d = 600\text{uH} \end{cases} \Rightarrow L_{pu} = \frac{6 \times 10^{-4}}{0.0082} = 0.0732 \quad 1.4-7$$

变量 $gMotorExtPer.LD$ 具有 Q13 格式, 令 L_d 、 L_b 为带 SI 单位的有名值, 那么有

$$gMotorExtPer.LD = \frac{L_d}{L_b} \times 2^{13} (SI) \quad 1.4-8$$

两边同乘以 10, 于是

$$10 \times gMotorExtPer.LD = 10 \times \frac{L_d}{L_b} \times 2^{13} = \frac{m_Ulong}{m_BaseL} \quad 1.4-9$$

将变量 m_Ulong 带入式 1.4-9, 并省略四舍五入的计算, 那么有

$$10 \times \frac{L_d}{L_b} \times 2^{13} = \frac{(gMotorExtInfo.LD \ll 14) + (m_BaseL \gg 1)}{m_BaseL} = \frac{gMotorExtInfo.LD}{m_BaseL} \times 2^{14} \quad 1.4-10$$

变量 $gMotorExtPer.LD$ 的单位应该是 μH , 于是可化为

$$10 \times \frac{L_d}{L_b} \times 2^{13} = \frac{gMotorExtInfo.LD / 10^6 \cdot 10^6}{m_BaseL} \times 2^{14} \Rightarrow 5 \times \frac{1}{L_b} = \frac{10^6}{m_BaseL} \quad 1.4-11$$

将 L_b 展开并整理, 得

$$m_BaseL = \frac{10^6 L_b}{5} = \frac{10^6}{5} \frac{U_b}{2\pi f_b \cdot I_b} \quad 1.4-12$$

其中有

$$\begin{cases} U_b = \frac{gMotorInfo.Voltage}{\sqrt{3}} \\ I_b = \frac{gMotorInfo.Current}{100} \\ f_b = \frac{gBasePar.FullFreq01}{100} \end{cases} \quad 1.4-13$$

将式 1.4-13 带入式 1.4-12 得

$$m_BaseL = \frac{10^6}{5} \frac{100 \times 100}{2\pi \times \sqrt{3}} \frac{gMotorInfo.Voltage}{gBasePar.FullFreq01 \cdot gMotorInfo.Current} \quad 1.4-14$$

整理常数项

$$m_BaseL = 9.99 \times \frac{3678 \times 5000 \times gMotorInfo.Voltage}{gBasePar.FullFreq01 \cdot gMotorInfo.Current} \quad 1.4-15$$

这里也有个 10 的系数。

于是, 从正反两面进行推导, 电感标么化的结果都是理论结果的 10 倍, 后续电流模型的推导可以证明这个 10 倍的系数不应该存在。(可能是因为电感的单位是 $10\mu H$)

1.4.3 磁链标么

在 dq 坐标系, 永磁链产生的反电势为 (相电压)

$$V_{emf} = 2\pi f \cdot \psi_r \quad 1.4-16$$

令此时三相电压信号峰峰值为 V_{lpp} , 则相电压峰值为

$$V_{ph} = V_{lpp} / 2 / \sqrt{3} \quad 1.4-17$$

相电压经过克氏变换, 在两相静止坐标系内电压信号峰值变为

$$V_m = \frac{3}{2} k V_{ph} \quad 1.4-18$$

由于 park 变换不改变矢量长度, 故式 1.4-18 与式 1.4-16 相等, 于是

$$\frac{3}{2} k V_{ph} = 2\pi f \cdot \psi_r \Rightarrow \psi_r = \frac{1}{2\pi f} \times \frac{3}{2} k \times V_{ph} \quad 1.4-19$$

磁链基值和电压基值关系密切

$$\psi_b = \frac{U_b}{2\pi f_b} \Rightarrow U_b = 2\pi f_b \cdot \psi_b \quad 1.4-20$$

于是磁链的标么化可以由反电势标么化实现, 以频率基值对应的反电势除以电压基值即可, 辨识反电势时将频率做相应的转换即可

$$V_{emfb} / U_b = \frac{2\pi f_b \cdot \psi_r}{2\pi f_b \cdot \psi_b} = \frac{\psi_r}{\psi_b} \quad 1.4-21$$

处理磁链标么化的代码如下

```
m_Ulong = ((Long)gMotorExtInfo.BemfVolt <<12) / (gMotorInfo.Voltage *10); //Q12
gMotorExtPer.FluxRotor = (m_Ulong << 15) / gMotorInfo.FreqPer; //Q12
```

其中变量 gMotorExtInfo.BemfVolt 为 0.1V 精度的额定频率对应的反电势线电压有效值, 这个电压应该是在对拖时可以用电压表、示波器等量得到的实实在在的线电压。

取克拉克变换系数 $k = \sqrt{2}/3$, 由式 1.4-19 可得反电势对应的线电压有效值, 满足

$$\frac{3}{2} k V_{ph} = \frac{3}{2} \times \frac{\sqrt{2}}{3} V_{ph} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_{ph} = 2\pi f \cdot \psi_r \Rightarrow \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} V_{ph} = \sqrt{3} \times 2\pi f \cdot \psi_r \quad 1.4-22$$

以电机额定电压进行标么化

$$m_Ulong = \frac{gEstBemf.BemfVolt \times 2^{12}}{10 \times gMotorInfo.Voltage} = \frac{2^{12}}{10 \times \sqrt{3} U_b} 10 \times \sqrt{3} \times 2\pi f_n \cdot \psi_r = \frac{2^{12}}{U_b} 2\pi f_n \cdot \psi_r \quad 1.4-23$$

再由额定频率转换为频率基值

$$gMotorExtPer.FluxRotor = \frac{2^{15}}{gMotorInfo.FreqPer} \frac{2\pi f_n \psi_r}{U_b} \times 2^{12} = \frac{2^{15}}{f_n / f_b \times 2^{15}} \frac{2\pi f_n \psi_r}{U_b} \times 2^{12} = \frac{2\pi f_b \psi_r}{U_b} \times 2^{12} \quad 1.4-24$$

将电压基值展开, 得到 Q12 格式的磁链标么值

$$gMotorExtPer.FluxRotor = \frac{2\pi f_b \psi_r}{U_b} \times 2^{12} = \frac{2\pi f_b \psi_r}{2\pi f_b \psi_b} \times 2^{12} = \frac{\psi_r}{\psi_b} \times 2^{12} \quad 1.4-25$$

值得一提的是, 如此处理得到的永磁链具有‘相值’的涵义, 正好和电压、电流信号一致。

2 电流 PI 控制器标么化

2.1 理论推导

电流环 PI 控制器, 其输入为电流偏差, 输出为控制电压, 易知其传递函数为

$$\frac{u_d}{\Delta i_d} = k_p + \frac{k_i}{s} \quad 2.1-1$$

电压和电流已经标么化的基值了, 式 2.1-1 可化为

$$\frac{u_d / u_b \cdot u_b}{\Delta i_d / i_b \cdot i_b} = \frac{u_d / u_b}{\Delta i_d / i_b} \cdot \frac{u_b}{i_b} = \frac{u_{pu}}{\Delta i_{pu}} \cdot \frac{u_b}{i_b} = k_p + \frac{k_i}{s} \quad 2.1-2$$

进一步地

$$\frac{u_{pu}}{\Delta i_{pu}} = \frac{i_b}{u_b} \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) = \frac{i_b}{u_b} k_p + \frac{i_b}{u_b} k_i \frac{1}{s} \quad 2.1-3$$

经过标么化之后, PI 参数变为

$$\begin{cases} k_{pu} = \frac{i_b}{u_b} k_p \\ k_{ipu} = \frac{i_b}{u_b} k_i \end{cases} \quad 2.1-4$$

如果 PI 控制器是规范使用自动控制原理设计的, 那么 k_p 和 k_i 和电机电阻和电感参数有关, 标么化处理之后可以电阻取其标么值, 但电感并非如此。

2.2 汇川对应代码

SVPWM 线性区输出线电压峰值为

$$v = \alpha \frac{\sqrt{3}}{2} U_{dc} \quad 2.2-1$$

调制系数 alpha 可以取到 $2/\sqrt{3}=1.15$, 对应的线电压有效值为 $U_{dc}/\sqrt{2}$ 。软件中母线电压变量单位为 0.1V, 需要转换单位; 最大输出电压以电机额定电压为基值进行标么化, 以 Q12/Q24 格式表示:

$$v_{max} = \frac{U_{dc}/10}{\sqrt{2}} / v_{mot} * Q_{12} \quad 2.2-2$$

```
data1 = ((long)gUDC.uDCFilter * 2316L)>>15; // Udc/sqrt(2)/10
pm_maxout_vol = (data1<<12)/gMotorInfo.Voltage;
maxu = (long)pm_maxout_vol<<12;
minu = -maxu;
```

电流偏差是以电机额定电流为基值的标么值, 具有 Q12 的格式; pm_integral_d 受[maxu,minu]限制, 故积分量具有 Q24 格式; 计算积分增量时有(pm_error_id * pm_ki_d >> 4), 可见积分增益 ki 具有 24+4-12=16 的格式。由计算积分增量的方式可以看出代码所实现的是并联结构 PI 控制器, 同时积分增益中隐含了控制周期参数, 是上一节提到的所谓的新积分增益。

```
pm_error_id = pm_ref_id - gIMTQ12.M;
pm_integral_d = pm_integral_d + (pm_error_id * pm_ki_d >> 4); //Q24,28-4
pm_integral_d = __IQsat(pm_integral_d, maxu, minu);
```

计算比例部分, 因为比例部分可以和 Q24 格式的积分部分相加, 故可以认为比例增益是具有 24-12=Q12 格式的数据。

```
data1 = (pm_integral_d + pm_error_id * pm_kp_d)>>12;
data1 = __IQsat(data1, pm_maxout_vol, -pm_maxout_vol);
pm_ud = data1;
```

由猫不狗比原理可知, 电压 pm_ud 也是以电机额定电压(线电压)为基值的 Q12 格式数据, 不带小数点! 并且 ud 本身也带有“线值”的内涵。给 ACR 控制器的输出赋予“线电压有效值”的涵义具有现实的好处, 因为评价输出电压的大小更多的是和电机额定电压进行比较, 而后者最常见的形式就是线电压有效值。从本质上来讲, ud 和 uq 应该是 d 相和 q 相的相电压。

最后再强调一遍, 当前软件中电流环 PI 控制器比例增益 Kp 为 Q12 格式数据, 积分增益 Ki 是 Q16 格式的“新”积分增益。

以浮点类型有名值实现 PI 控制, 那么有

$$v_k = \Delta i_k \cdot k_p + \Delta i_k \cdot k_i T_s + (v_{k-1} - \Delta i_{k-1} \cdot k_p) \quad 2.2-3$$

其中, 输出 vk 是实际输出电压, delta_i 是实际的电流偏差。当对数据进行标么化并用 Q 格式表示时, 令输出电压和电流偏差满足

$$\begin{aligned} v_{pu} &= \frac{v_k}{v_b} \times 2^{24} = \frac{v_k}{v_{mot}} \times 2^{24} \\ \Delta i_{pu} &= \frac{\Delta i_k}{i_b} \times 2^{12} = \frac{\Delta i_k}{i_{mot}} \times 2^{12} \end{aligned} \quad 2.2-4$$

计算积分增量时得到的是以电机额定电压为基值的 Q24 格式表示的原始积分增量, 即满足

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_{pu} &= \Delta i_{pu} \cdot k_{ipu} / 2^4 = \frac{\Delta x}{v_{mot}} \times 2^{24} \\ \Delta x &= \Delta i_k \cdot k_i T_s \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{\Delta i_k}{i_{mot}} \times 2^{12} \cdot k_{ipu} = \frac{\Delta i_k \cdot k_i T_s}{v_{mot}} \times 2^{28} \quad 2.2-5$$

可推出在标么值系统下, 积分增益满足

$$k_{ipu} = (k_i T_s) \cdot \frac{i_{mot}}{v_{mot}} \times 2^{16} \quad 2.2-6$$

可以看到, 除了 Q16 格式化以外, k_{ipu} 还隐含了电机的额定电流和额定电压。
同样地, 计算比例控制量时满足

$$\left. \begin{aligned} y_{pu} &= \Delta i_{pu} \cdot k_{ppu} / 2^{12} = \frac{y}{v_{mot}} \times 2^{12} \\ y &= \Delta i_k \cdot k_p \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Delta i_{pu} \cdot k_{ppu} / 2^{12} = \frac{\Delta i_k \cdot k_p}{v_{mot}} \times 2^{12} \quad 2.2-7$$

可推出采用标么值时, 比例增益满足

$$k_{ppu} = k_p \cdot \frac{i_{mot}}{v_{mot}} \times 2^{12} \quad 2.2-8$$

综上所述, 使用标么化系统实现 PI 控制时, PI 参数也隐含地经历了标么化, 而不仅仅是执行了 Q 格式化那么简单。

$$\left\{ \begin{aligned} k_{ppu} &= k_p \cdot \frac{i_{mot}}{v_{mot}} \times 2^{12} \\ k_{ipu} &= (k_i T_s) \cdot \frac{i_{mot}}{v_{mot}} \times 2^{16} \end{aligned} \right. \quad 2.2-9$$

上式**错误!未找到引用源。**可以看作是对电阻进行了标么化处理, 处理之后就不会出现 RL 数值较大时 PI 参数数值上特别大的情况。

3 锁相环标么化

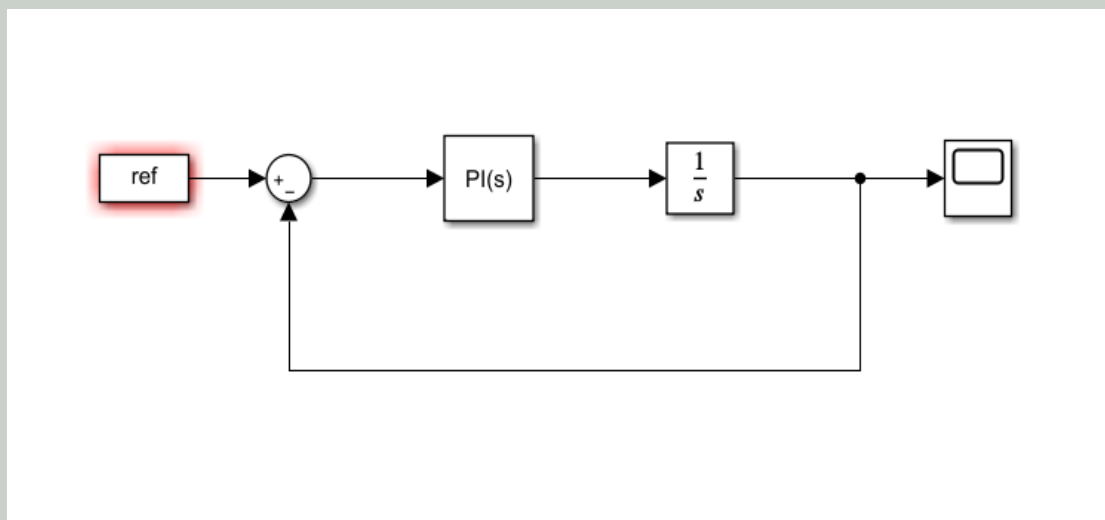


图 2.2-1 PLL 框图

锁相环主要由一个 PI 控制器和一个积分器构成, 输出转速和角度两个量, 所以标么化需要分两个阶段进行处理。

3.1 PI 标么

锁相环 PI 输入为角度偏差, 输出为角速度, 其传递函数为

$$\frac{w}{\Delta\theta} = k_p + \frac{k_i}{s} \quad 3.1-1$$

角速度和角度标么基值为

$$\begin{cases} w_b = 2\pi f_b \\ \theta_b = \pi \end{cases} \quad 3.1-2$$

于是, 式 3.1-3 可化为

$$\frac{w}{\Delta\theta} = \frac{w/w_b}{\Delta\theta/\theta_b} \cdot \frac{w_b}{\theta_b} = \frac{w_{pu}}{\Delta\theta_{pu}} \cdot \frac{2\pi f_b}{\pi} = \frac{w_{pu}}{\Delta\theta_{pu}} \cdot 2f_b = k_p + \frac{k_i}{s} \quad 3.1-4$$

进一步地

$$\frac{w_{pu}}{\Delta\theta_{pu}} \cdot 2f_b = k_p + \frac{k_i}{s} \Rightarrow \frac{w_{pu}}{\Delta\theta_{pu}} = \frac{1}{2f_b} k_p + \frac{1}{2f_b} k_i \frac{1}{s} \quad 3.1-5$$

经过标么化之后, PI 参数变为

$$\begin{cases} k_{pu} = \frac{1}{2f_b} k_p \\ k_{ipu} = \frac{1}{2f_b} k_i \end{cases} \quad 3.1-6$$

也就是说, 如果想要 PI 输出为标么化的角速度, 那么 PI 参数就要按照式 3.1-7 进行处理, 尽管形式上看起来十分怪异。

3.2 积分标幺

对角速度积分得到角度, 其传递函数为

$$\frac{\theta}{w} = \frac{1}{s} \quad 3.2-1$$

角速度和角度标幺基值为

$$\begin{cases} w_b = 2\pi f_b \\ \theta_b = \pi \end{cases} \quad 3.2-2$$

于是, 式 3.2-3 可化为

$$\frac{\theta / \theta_b}{w / w_b} \cdot \frac{\theta_b}{w_b} = \frac{\theta_{pu}}{w_{pu}} \cdot \frac{\theta_b}{w_b} = \frac{1}{s} \quad 3.2-4$$

进一步地

$$\frac{\theta_{pu}}{w_{pu}} \cdot \frac{\theta_b}{w_b} = \frac{1}{s} \Rightarrow \frac{\theta_{pu}}{w_{pu}} = \frac{w_b}{\theta_b} \cdot \frac{1}{s} = \frac{2\pi f_b}{\pi} \cdot \frac{1}{s} = 2f_b \cdot \frac{1}{s} \quad 3.2-5$$

标幺化之后, 积分增益由 1 变为 $2 \cdot f_b$ 。

实践表明, 如果不采用上述方式进行标幺化, 那么锁相环 PLL 压根无法稳定, 也从侧面证明了上述标幺化处理过程的正确性。