



哈爾濱工業大學(深圳)
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY, SHENZHEN

自动控制实践 A 实验报告

专业： 自动化

班级： 自动化 1 班

姓名： 吕家昊

学号： 210320111

同组人： 崔哲豪

实验名称： 交流伺服电机特性实验

实验日期： 2023 年 10 月 27 日

实验与创新实践教育中心

Education Center of Experiments and Innovations

一、 实验原理

交流伺服电机调压调速

使用矢量方法控制电机时，使用 Clark 和 Park 变换对矢量进行变换并加以控制。

交流伺服电机的磁场方向为正弦磁场。U、V、W 三相的电流分别为 i_a 、 i_b 、 i_c ，且电流幅值相等，相位相差 120° ，可得电机各相电流表达式：

$$\begin{cases} i_a = i_m \sin(\omega t) \\ i_b = i_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ i_c = i_m \sin(\omega t + \frac{4\pi}{3}) \end{cases}$$

其中 ω 表示电流角频率， i_m 表示电流幅值。

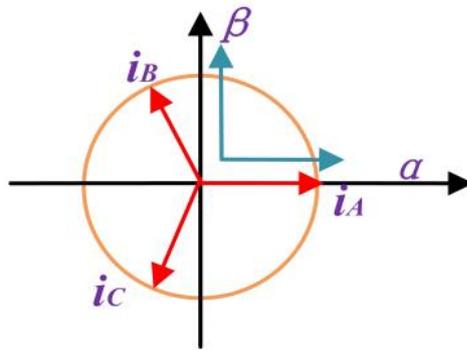


图 2-2-3 电流矢量变换原理图

将平面三电流矢量经 Clark 变换到静止的 $\alpha \beta$ 坐标系下，投影到坐标轴可得：

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, S_\alpha = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$$

为了进一步方便计算，把二维坐标系建在电机转子上，同时由于电机转子在实时转动，则需要一个转化规则，将上述二维坐标系转化为转子上的运动坐标系。随时间变化的绕组电流产生的磁场可等效为旋转磁场，则可以将绕组电流表达在旋转坐标系中。在二维坐标系进行旋转变换时，也就是进行 Park 变换（把 $\alpha \beta$ 坐标系变换到旋转 dq 坐标系下）。

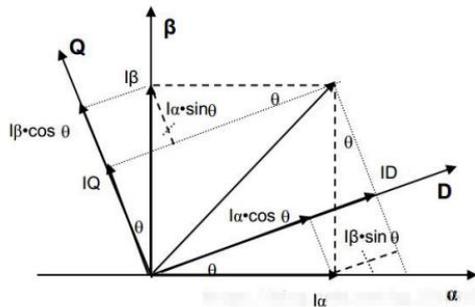


图 2-2-4 dq 变换

$$\begin{cases} i_D = i_\alpha \cos\theta + i_\beta \sin\theta \\ i_Q = -i_\alpha \sin\theta + i_\beta \cos\theta \end{cases}$$

电机为永磁同步电机，则 $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ ，积分得 $\theta = \omega t + \theta_1$ ，则

$$\begin{cases} i_D = i_m \cos(\theta_0 - \theta_1) \\ i_Q = i_m \sin(\theta_0 - \theta_1) \end{cases}$$

其中 θ_0 为线圈电流初始角度， θ_1 为线圈磁场初始角度。当电机经过初始上电寻相时，使得 $\theta_0 = \theta_1$ ，则 $i_Q = i_m, i_D = 0$ ，电流的励磁分量为 0，扭矩分量为 i_m 。

Q 轴等效电压 $U_Q = R_m \cdot I_Q + E_\Phi$ ，其中反电动势 $E_\Phi = BLv$ ，因此电压平衡方程可写成 $U_Q = R_m I_Q + K_a v$ 。

交流伺服电机调频调速

设电机转子角速度 $\omega_1 = \frac{d\theta}{dt}$ ，由上述过程有

$$\begin{cases} i_D = i_m \cos(\omega t - \omega_1 t + \theta_0 - \theta_1) \\ i_Q = i_m \sin(\omega t - \omega_1 t + \theta_0 - \theta_1) \end{cases}$$

电机中 i_D 是定子线圈电流的励磁分量，为保持定子线圈中电流产生的励磁磁场对转子的永磁磁场没有副作用，矢量控制中一般强制让 $i_D = 0$ ，则需要始终保持 $\omega = \omega_1, \theta_0 = \theta_1$ ，即转子角速度等于定子电流的角频率。

在转速不高的情况下，改变定子绕组的电流角频率相当于改变定子旋转磁场的转速，定子磁场和转子磁场相互作用，使得转子以相同的角频率旋转。

当转速过高时，由于机械响应特性的限制，转子的速度跟不上电流的角频率变化，就会出现转速差，电机抖动。

交流伺服电机负载特性

由 dq 变换， $U_Q = R_m I_Q + K_a \omega$ 。 U_q 为 q 轴电压 ($U_q \leq 48V$)， I_Q 为绕组线圈电流， K_a 为反电动势系数。上式可知，电机速度 ω 在一定范围内增大时 U_q 能保证电机加速所需要的扭矩（即提供足够 I_Q ）。

由电机力矩输出方程 $T = K_t I_Q$ ，一定范围内 U_q 能够保证电机加速所需要的扭矩（即提供足够的 I_Q ）。当电机速度超过某速度 ω_m 时由于电机的反电动势趋近于 U_q 的最大值，此时绕组线圈 q 轴电流不能保证，电机就不能以原有的加速度保持匀加速状态。

二、 实验内容

交流伺服电机调压调速

连接 CN2 与 CN6, CN3 与 CN7, USB1 与电脑 USB 口, 上电。拆卸转盘端电机皮带以去除负载, 编译程序。分别改变上位机 Voltage 模块值, 对应电机电压 0~48V, 记录不同电压下电机转速。改变方向, 重复以上步骤, 并记录转速。

交流伺服电机调频调速

编译程序, 改变 Frequency 模块值, 对应电频率 0~100Hz(实验最大为 70Hz), 记录电机转速。改变方向, 重复以上步骤。

交流伺服电机负载特性

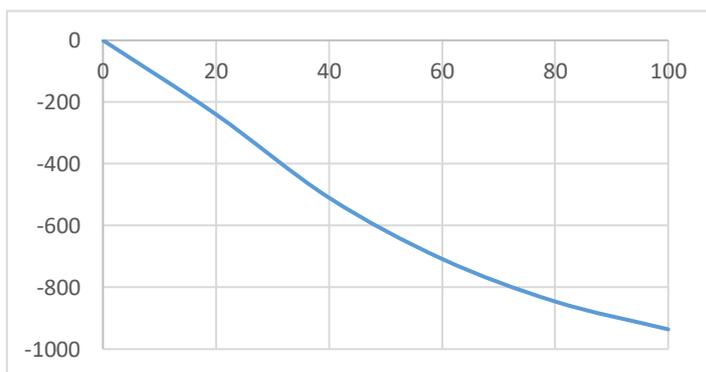
断开 USB1, 连接 USB2, 编译程序。安装电机同步带, 在负载挂钩上挂 200g 负载, 更改 model 模块为 1, 控制电机以恒定加速度运行, 使负载到达合适位置。更改 model 为 2, 滑块 speedcontrol 到任意位置, 负载向上运动 68cm, 记录电机在匀加速下达到最大速度。更换负载质量, 重复以上步骤。

三、 实验结果及分析

(实验原始数据、实验曲线及其分析)

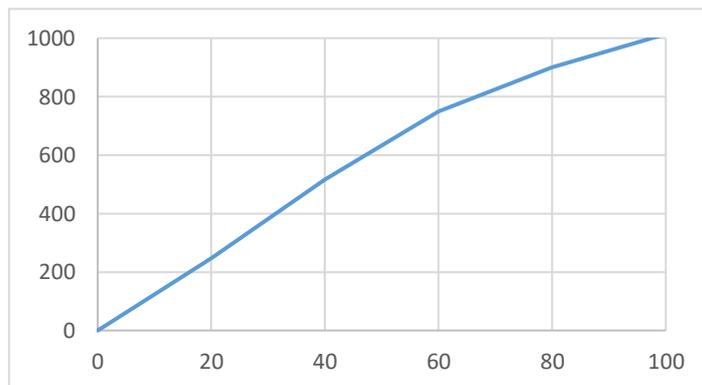
交流伺服电机调压调速

	Voltage 模块值	电机速度 (r/min)
1	0	0
2	20	-240
3	40	-510
4	60	-708
5	80	-846
6	100	-936



开关为 0 数据表

	Voltage 模块值	电机速度 (r/min)
1	0	0
2	20	246
3	40	516
4	60	750
5	80	900
6	100	1014



开关为 1 数据表

电压在一定范围内时，电机转速与电压近似成正比，所以“电压决定转速”。

更严密的说法是，电机负载与空载损耗转矩不变时，电机转速与电压成线性关系。

速度达到 1000r/min 时，空载损耗转矩可能发生变化（如存在阻尼转矩或空气阻力矩影响），导致转速与电压并不为完全的线性关系；也可能因为电机在转速过大时，机械或信号响应受限而对转速控制产生影响。

交流伺服电机调频调速

交流伺服电机通过产生旋转磁场使得转子旋转。由于

$$\begin{cases} i_D = i_m \cos(\omega t - \omega_1 + \theta_0 - \theta_1) \\ i_Q = i_m \sin(\omega - \omega_1 t + \theta_0 - \theta_1) \end{cases}$$

为保持定子线圈中电流产生的励磁磁场对转子的永磁磁场没有副作用，一般使 $I_D = 0$ ，此时需要保持转子角速度等于电流角频率。因此改变电流角频率时，旋转磁场转速对应改变，转子也以相同角频率旋转。

转速过高时，由于机械响应特性限制，转子速度跟不上电流角频率变化，会产生转速差导致抖动。

直流电机无法通过调频调速，交流伺服电机无法通过改变电枢回路电阻进行调速。

	Frequency 模块值	电机速度 (r/min)
1	0	0
2	20	-294
3	40	-594
4	60	-900
5	70	-1056

开关为 0 数据表

	Frequency 模块值	电机速度 (r/min)
1	0	0
2	20	294
3	40	600
4	60	900
5	70	1044

开关为 1 数据表

交流伺服电机负载特性

	负载(g)	电机最大速度(r/min)
1	200	952
2	600	952
3	1000	904
4	2000	816
5	3000	768

负载变大时，电机匀加速状态达到的最大速度降低。这是由于

$$U_Q = R_m I_Q + K_a \omega = \frac{R_m T}{K_t} + K_a \omega$$

则负载转矩增大，最大转速减小。