

# 永磁同步电机电流环解耦控制策略

## 1、永磁同步电机在 dq 坐标系下的数学模型

PMSM 在 dq 坐标系下的数学模型如下所示：

电磁方程：

$$\begin{aligned}u_d &= Ri_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q \\u_q &= Ri_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_e \psi_d \\\psi_d &= L_d i_d + \psi_f \\\psi_q &= L_q i_q \\\Rightarrow u_d &= Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \\\Rightarrow u_q &= Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e (L_d i_d + \psi_f)\end{aligned}$$

转矩方程：

$$\begin{aligned}T_e &= \frac{3}{2} n_{pp} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) = \frac{3}{2} n_{pp} i_q (L_d i_d + \psi_f - L_q i_d) \\\Rightarrow T_e &= \frac{3}{2} n_{pp} i_q (\psi_f + (L_d - L_q) i_d)\end{aligned}$$

运动方程：

$$T_e = T_{load} + \frac{J}{n_{pp}} \frac{d\omega_e}{dt}$$

上面式子由三部分组成：（1）定子电阻压降；（2）定子磁链产生的电动势；（3）转子转动感应出来的反电动势。

数学模型转换为图 1 来表示，可以看出 PMSM 同步电机 d 轴电压和 q 轴电压存在耦合关系， $U_q$  和  $U_d$  无法实现独立同步控制。由公式可以看出电机转速越大，耦合项越大，对电机的控制器性能的影响就越大。

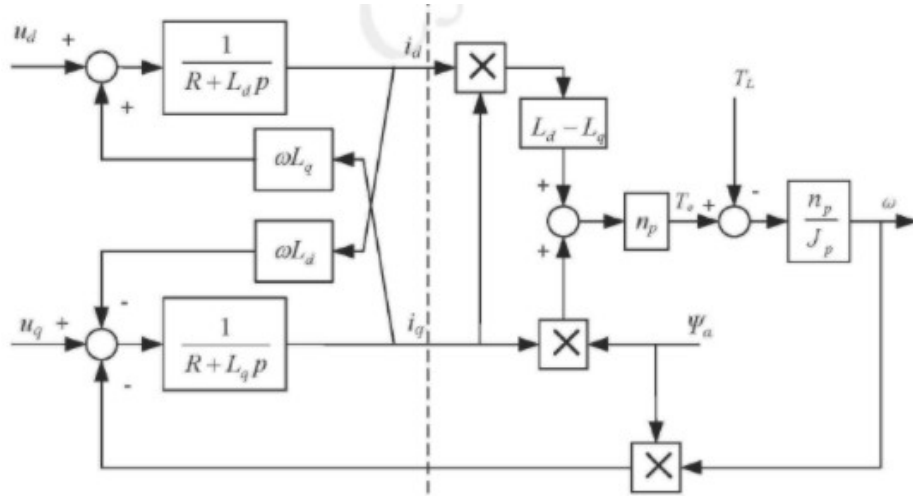


图 1

## 2、解耦的策略

### 2.1 $i_d=0$ 的控制

矢量控制  $i_d = 0$  控制的本质是实现 dq 轴的电流静态解耦。d 轴的阻尼绕组会产生磁通的，与永磁体的磁通共同构成电机的磁场。 $i_d$  变换的同时，总的磁通变化，这是一层耦合。

$i_d = 0$  时，磁通完全由永磁体来提供。直轴的电流为 0，直轴不贡献转矩。电机的所与电流全部用来产生电磁转矩，等效于他励直流电机，只用控制  $i_q$  的值就可以控制电机转矩，降低了铜耗。此时电机的电压方程：

$$u_d = -\omega_e L_q i_q$$

$$u_q = R i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e \psi_f$$

$$T_e = \frac{3}{2} n_{pp} i_q \psi_f$$

### 2.2 电流前馈解耦对解耦的贡献

PMSM 耦合的影响可以通过前馈补偿的方式抵消掉，在 d 轴控制器和 q 轴控制器的输出端，分别引入与永磁同步电机 dq 轴电压方程中耦合项相等的信号作为耦合项，即可实现电流控制器的解耦控制。也称为电压前馈解耦。

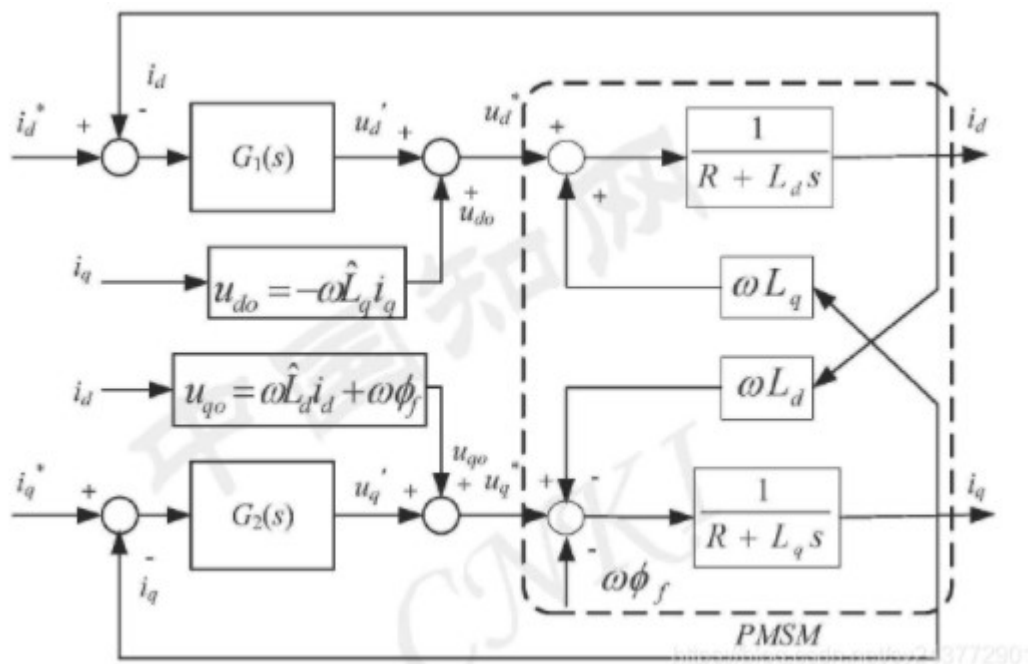


图 2

反应到公式上表示出来就是如下式所示，图中  $G(s)$  为电流环 PI 控制器。

$$u_d = u_d^* - \omega_e L_q i_q$$

$$u_q = u_q^* + \omega_e (L_d i_d + \psi_f)$$

### 3、两种解耦策略的优劣分析

解耦后  $i_q$  比解耦前的响应速度要快，且平稳度要更好，这将意味着电磁转矩也更加稳定，所以电机的阶跃响应的速度提升。

电机启动阶段， $i_d$  的复制明显得到了反馈的校正，幅值明显比解耦前要小，尤其在高速阶段。

总结：永磁同步电机在运行过程中，交直轴电压之间存在耦合现象，即 d 轴的参数变化会引起 q 轴的参数变化，这将不利于控制。电流前馈解耦就是从点击模型出发，使电压在经过 PI 控制器整定之后的输出，得到一个跟耦合量相同的前馈补偿，补偿将耦合项抵消，从而实现解耦。

从实验效果来看，解耦后的电机阶跃响应的速度更快，且电流的波形更加稳定，有利于提升整个系统的性能。