

# 永磁同步电机基于 MRAS 观测器的直接转矩控制系统下弱磁控制仿真研究

余雨婷<sup>1</sup> 褚衍廷<sup>2</sup> 黄杰<sup>1</sup>

(1. 湖南铁道职业技术学院, 湖南 株洲 412000;

2. 湖南铁路科技职业技术学院, 湖南 株洲 412000)

**摘要:** 永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 在弱磁控制时, 电机会采取一定的方式减弱电机磁场继而使得转速急速上升, 超过额定转速, 此时转速的上升可以看成是速度上的扰动。针对速度环, 采用 MRAS 速度观测器获取速度值。直接转矩控制系统本身容易产生转矩扰动, 采用 MATLAB 仿真软件搭建带有 MRAS 观测器的控制系统, 对速度环和转矩环的控制值进行反馈。

**关键词:** MRAS 观测器; 直接转矩控制; 弱磁控制

永磁同步电机结构紧凑、能效密度大, 在控制系统中通常用光电码盘来进行速度反馈, 然而对于精度要求很高的场合则需要提高光电码盘的线束, 提高线束会增加电机控制的成本。因此, 国内外的研究者提出了运用速度观测器来观测速度。速度观测器精度高、时效性强。本文主要运用 MRAS 速度观测器, 对电机弱磁控制过程进行速度观测, 并采用 MATLAB 软件仿真系统控制过程, 量化验证仿真结果。

## 一、电机模型

本文的电机模型建立在 d-q 坐标下, 所采用的仿真模型为面贴式永磁同步电机, 其数学模型如下:

电流方程:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L}(u_d - R_s i_d + pL\omega_r i_q) \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L}[u_q - R_s i_q - p\omega_r(Li_d + \psi_f)] \end{cases} \quad (1)$$

磁链方程:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

$$|\psi_s| = \sqrt{(L_d i_d + \psi_f)^2 + (L_q i_q)^2} \quad (3)$$

式中  $\psi_d$ 、 $\psi_q$  分别表示 dq 轴的磁链分量;  $R_s$  为定子电阻,  $L_d$ 、 $L_q$  分别为 dq 轴自感, 且  $L_d=L_q=L$ ,  $\psi_f$  为永磁体的磁链大小,  $i_d$ 、 $i_q$  为 dq 轴定子电流的分量。

在 PMSM 直接转矩控制系统中, 电机弱磁控制的实现是通过电机定子磁链的调节来完成的, 使电机超过基速时, 运行在弱磁状态中。当 PMSM 工作在恒转矩区且稳定运行时, 定子电阻  $R_s$  的大小可以忽略不计, 此时定子电压的峰值可以表示为:

$$\begin{aligned} |u_s| &= \omega_r |\psi_s| \\ &= \omega_r \sqrt{(\psi_f + L_d i_d)^2 + (L_q i_q)^2} \end{aligned} \quad (4)$$

## 二、基于 MRAS 的速度观测器设计

面贴式永磁同步电机在  $\alpha-\beta$  静止坐标系下的定子电压方程可以表示为

$$u_\alpha = R_s i_\alpha + L \frac{di_\alpha}{dt} + \omega \psi_f (-\sin \theta) \quad (5)$$

$$u_\beta = R_s i_\beta + L \frac{di_\beta}{dt} + \omega \psi_f (\cos \theta) \quad (6)$$

式(5)、(6)中  $u_\alpha$ 、 $u_\beta$ 、 $i_\alpha$ 、 $i_\beta$  分别为面贴式永磁同步电机在  $\alpha-\beta$  坐标系下的定子电压和定子电流。

根据面贴式电机在静止坐标系下的定子电压方程(5)、(6),

可得其在静止坐标系下的定子电流状态方程:

$$\frac{di_\alpha}{dt} = \frac{1}{L}u_\alpha - \frac{R_s}{L}i_\alpha - \frac{\omega}{L}\psi_f(-\sin \theta) \quad (7)$$

$$\frac{di_\beta}{dt} = \frac{1}{L}u_\beta - \frac{R_s}{L}i_\beta - \frac{\omega}{L}\psi_f(\cos \theta) \quad (8)$$

即:

$$\frac{di_s}{dt} = A i_s + B u_s + B e_s \quad (9)$$

式中:  $i_s = [i_\alpha \ i_\beta]^T$ ;  $B = (1/L_s) I$ ;

$$A = (-R_s/L_s) I; \quad u_s = [u_\alpha \ u_\beta]^T; \quad e_s = -\omega \psi_f [\sin \theta \ \cos \theta]^T$$

$= -[e_\alpha \ e_\beta]^T$  其中  $I$  为  $2 \times 2$  阶单位矩阵。

将式(9)作为模型参考自适应的可调模型, 实际的电机本体则作为参考模型。式(10)所示为参数可调的估计模型, 式中  $\hat{e}_s$  为估计模型中的可调参数。

$$\frac{d\hat{i}_s}{dt} = A \hat{i}_s + B u_s + B \hat{e}_s \quad (10)$$

状态误差量定义为:

$$e = \hat{i}_s - i_s \quad (11)$$

由式(10)减去式(9)得到如下式(12)所示的误差状态方程:

$$\frac{de}{dt} = A e + B(\hat{e}_s - e_s) \quad (12)$$

由 PI 自适应调节器进行反馈调节, 当  $e = [0 \ 0]^T$ 、 $de/dt = [0 \ 0]^T$  时, 有结果  $e_s = \hat{e}_s$ 。由波波夫 (Popov) 超稳定性的理论可以证明, 该反馈系统是稳定的。

## 三、电机弱磁控制系统设计

由式(4)可知, 在电机的运行中, 如果  $|\psi_s^*|$  的值始终保持恒定, 电机定子端电压与转速  $\omega_r$  成正比, 然而极限电压  $|u_{s\max}^*|$  的数值大小有约束, 转速  $\omega_r$  的大小有限制, 由此得出电机可以达到的最大转速为  $\omega_n$ , 称之为转折速度。此时, 若想得到更宽的速度, 即使得  $\omega_r > \omega_n$ , 就应当使定子磁链值  $|\psi_s^*|$  减弱, 即对电机采取弱磁控制策略。

当对直接转矩下的电机控制系统进行弱磁控制时, 可令该给定值  $|\psi_s^*|$  同转速  $\omega_r$  呈反比例减小, 即

$$|\psi_s^*| = k_r \frac{|u_{s\max}^*|}{\omega_r} \quad (13)$$

式(13)中应使系数  $k_r \leq 1$ 。如果  $k_r=1$ , 表明恰好在转速为转折速度  $\omega_n$  时开始进行弱磁; 当  $k_r < 1$ , 表明实际弱磁会提前开始,

即在电机速度还未达到转折速度  $\omega_{r1}$  之前开始弱磁运行。通常情况下，应该取  $k_t < 1$ 。

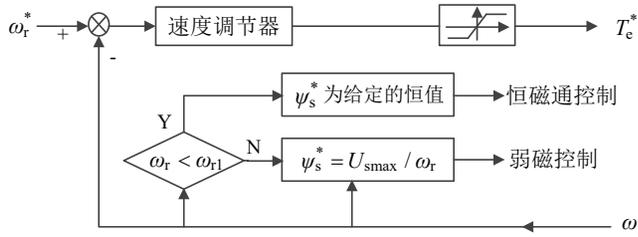


图1 PMSM的复合弱磁控制框图

四、仿真分析

采用 Matlab 进行了仿真研究，验证上述所提设计方法的有效性和正确性，搭建了基于弱磁升速的直接转矩系统下的仿真模型。

所用 PMSM 电机参数为：定子电阻  $R_s=2.875\Omega$ ，额定功率  $P_N=1.1kW$ ，额定转速  $\omega_n=3000r/min$ ，额定转矩  $T_n=3N \cdot m$ ，定子

等效电感  $L=0.0085H$ ，永磁体磁势  $\psi_s=0.175Wb$ ，转动惯量  $J=8 \times 10^{-4}kg \cdot m^2$ ，库仑摩擦转矩  $T_f=0N \cdot m$ ，粘滞摩擦系数  $B_m=0N \cdot m \cdot s$ ，极对数  $P=4$ 。

仿真中系统三相交流输入电压为 220V、频率为 50Hz，采样周期为  $10\mu s$ ，仿真时间 0.2s，启动给定转速为 3000r/min，0.05s 后速度上升为 5000r/min，PMSM 空载启动。0.1s 后负载由空载变为  $2N \cdot m$ ，PI 速度调节器的参数为  $k_p=0.55$ ， $k_i=0.4$ ，负载和转速具体变化见表 1 所示。

表1 系统负载和转速发生变化时的仿真方案

仿真方案	负载	转速
①系统抗负载变化能力比较	0.1s 时，由 $0N \cdot m$ 变 $2N \cdot m$	不变
②系统跟踪给定转速变化的能力比较	不变	0.05s 时，由 3000r/min 突升至 5000r/min；

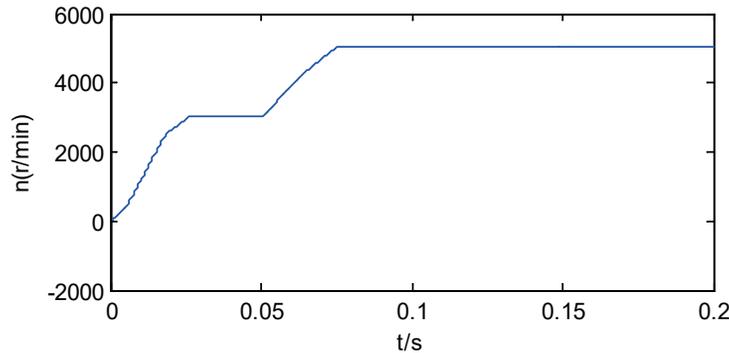


图2 DTC 下的弱磁速度响应曲线

运用 MRAS 速度观测器观测直接转矩系统下的 PMSM 弱磁系统在 0~0.05s 的速度环响应，可以看出在启动时会产生一定的抖动

且在 0.05s 转速发生变化时速度的响应过程迟缓。

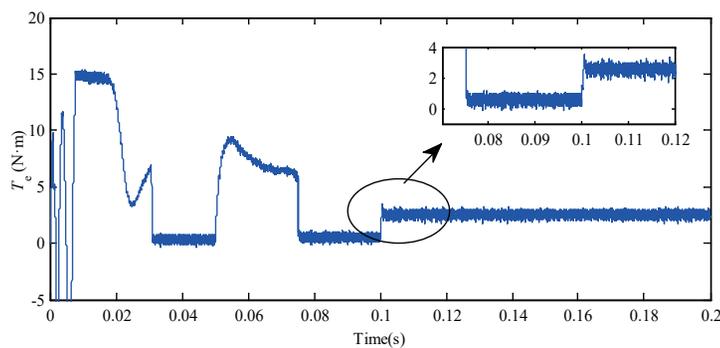


图3 DTC 下弱磁转矩响应曲线

可以看出在启动和在 0.1s 后负载突变的过程中，PMSM 弱磁系统的转矩响应也随着启动和负载的突变而产生振荡，且在整个控制过程中，转矩的脉动都较大。

五、结语

通过 MATLAB 仿真分析结果（图 2 与图 3）可知，PMSM 在直接转矩下的弱磁控制系统运用 MRAS 速度观测器能准确跟踪观测速度值，但是随着速度和负载的变化，系统的抗扰动能力不强，造成的转矩脉动大，有待改进。

参考文献：

[1] 易伯瑜，康龙云，陶思念，等. 基于两段卡尔曼滤波器的

内置式永磁电机观测器设计 [J]. 电工技术学报, 2014, 29 (9) : 9.

[2] 缪仲翠，王志浩，李东亮，等. 基于 FOSM-MRAS 观测器的永磁同步电机 MPTC 系统 [J]. 电机与控制学报, 2020, 24(4) : 10.

[3] 林立，黄研，王翔，石赛美. 车用内置式永磁同步电机电压补偿弱磁控制策略研究 [J]. 电气传动自动化, 2020, 42 (3) : 3.

本文系：湖南省教育厅科学研究项目 20C1214《弱磁控制状态下的永磁同步电机模型预测控制系统研究》。