

浅析永磁同步电机伺服控制系统仿真

郭廷德 王彦昊 李骏杰 赵倩 邓焯 郑蕾 尚穆杨

西安应用光学研究所

[摘要]与传统感应电机相比，永磁同步电机具有启动功率大、功率性能指标好、功率因数高等优点。随着“工业4.0”的到来，永磁同步电机伺服控制系统技术得到广泛应用。因此永磁同步电机伺服控制系统将是该领域发展的重要趋势。结合自适应模糊神经网络等永磁同步电机控制理论融入永磁同步电机（PMSM）控制系统很难获得准确地控制结果，本文基于Matlab/Simulink环境设计并建模了永磁同步电机伺服控制系统仿真。

[关键词]永磁同步电机；伺服控制系统；仿真

[DOI] 10.12252/j.issn.2096-6288.2021.11.752

引言

与传统的感应交流电机和电磁同步电机相比，永磁同步电机的优势主要体现在：结构中没有励磁旋转线圈，因此损耗相对较低，效率较高；整体结构简单，体积小，同等容量下功率小，密度高；变速器换挡控制比感应电机简单的同时可以获得出色的运动控制效果；动态响应速度很快，扭矩振荡系数也很小。在综合性能方面，PMSM几乎已经成为高性能驱动领域的首选之一。目前永磁同步电机主要应用于数控机床和工业机器人领域。PMSM伺服控制系统往往作为子系统嵌入到特定的机电伺服系统中，作为机电伺服系统驱动环节的重要组成部分发挥着至关重要的作用。

一、永磁同步电机伺服控制系统结构

大部分永磁同步电机伺服控制系统包括电流环、速度环和位置环三个闭环控制，由内而外形成伺服控制系统的三环闭环结构。图1为基于控制元件 $i_d=0$ 的永磁同步电机三环闭环伺服系统控制框图。

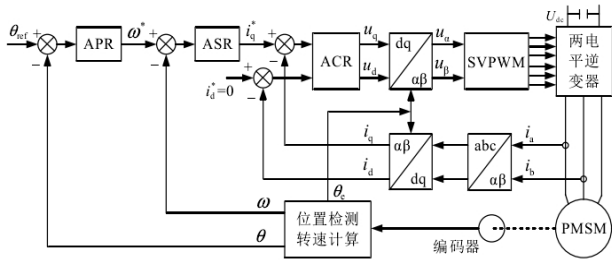


图1永磁同步电机伺服系统控制框图

从图1可以看出，三环闭环伺服系统的基本工作原理是：接收给定的位置信号 θ_{ref} ，编码器通过处理器得到位置反馈信号 θ ，两者的差值是位置调节器作为给定速度 ω^* 的输出，结合实际速度 ω ，误差信号由速度调节器作为给定电流设定输出。当 $i_d = 0$ 用于控制时，速度环给定的电流输出为转矩电流给定 i_q^* ，由内环电流调节器控制得到 u_d 和 u_q ，则空间矢量所需的参考电压通过Convert坐标调制得到。由于三个闭环都是负反馈的形式，执行器最终通过重复的控制过程遵循分配的位置信号。经过对图1的PMSM伺服三环闭环系统的分析可知，本设计的重点是确定三个闭环结构和三个调节器的设计。由于伺服系统功率较小，本文选用两电平电压型逆变器，其空间电压矢量调制（SVPWM）算法简

单、应用成熟。

三个闭环稳压器结构相似，但功能不同：

（1）电流环调节器ACR的作用是通过简化控制体的传动功能，达到提高转矩响应速度的目的，同时抑制电流波动，降低最大电流，保证电机安全运行。

（2）ASR调速环的作用主要是对负载变化起到抗湍流作用，可以防止转速波动，保证调速环具有良好稳定的动态性能。

（3）APR定位环调节器的作用是保证伺服系统的静态精度、刚性和动态跟踪性能，它直接反映了伺服系统的性能。

二、三环系统分析和调节器设计

闭环系统设计的三个原则：由内而外，即从内部电流环开始，向外延伸到速度环，最后到位置环。首先从电流环入手，根据变频器和电机型号确定电流调节器的结构，然后再简化电流环的结构。图2为电流和速度双闭环系统的动态结构框图，实际系统需要在映射信号的反馈通道和正向通道上增加滤波环节，对信号的交流分量进行滤波，以减少对控制系统的影响。其中： T_m 为机电时间常数； T_l 为电磁时间常数； T_s 为逆变器等效惯性结的时间常数； K_s 为逆变器的等效增益； K_e 为后端驱动力常数； R 为定子电阻； T_{on} 为恒定滤波时间的反馈速度； T_{oi} 是恒流反馈滤波时间。

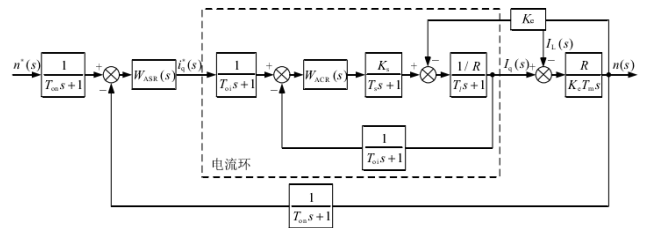


图2双闭环调速系统动态结构框图

从图2可以看出，旋转速度带来的反电动势与电流回路形成交叉运动，给电流回路的设计带来了一定的困难。由于电流环控制周期很小，反电动势在单个电流环周期内被视为一个恒定值；而一般电机的机电时间常数远大于电磁时间常数，此时电流回路中反电动势的影响可以忽略^[2]。

三、基于扰动转矩观测器的低速稳定性研究和设计

为了实现最大的定位精度，PMSM伺服系统需要保证其在

低速时的稳定性。PMSM伺服系统通常使用位置传感器来获取转子的位置，通过计算位置差来获得反馈速度，这种方法不能同时保证电机在运行时速度测量的准确性和动态响应的速度。方法M和方法T都不能避免这个问题。如果不能保证反馈速度的准确性和稳定性，调速环产生的转矩和电流可能不准确，导致电机的实际电流小于或超过克服扰动触发所需的电流值转矩，使系统产生脉冲低速转矩，导致伺服系统的低速性能严重恶化。

四、PMSM 伺服控制系统的仿真实验

(一) 矢量控制原理

矢量控制算法是基于永磁同步电机的数学模型，矢量控制理论的基本思想是将交流电机的数学模型通过坐标变换转换为直流电机模型，并将模型分离系统与交流电机耦合，然后通过直流电机控制策略进行控制，最后再次通过逆坐标变换回到相同的交流电机模型。根据永磁同步电机在两相d-q转子坐标系中的数学模型，永磁同步电机的控制是分别控制 i_d 和电流 i_q 分量。由于永磁体的磁通量不变， $I_p^*=0$ 的控制策略可以使控制变得非常简单。从电磁转矩公式可以看出，永磁同步电机的电磁转矩 T_e 只与 i_q 电流分量有关，因此可以通过控制 i_q 来控制转矩。

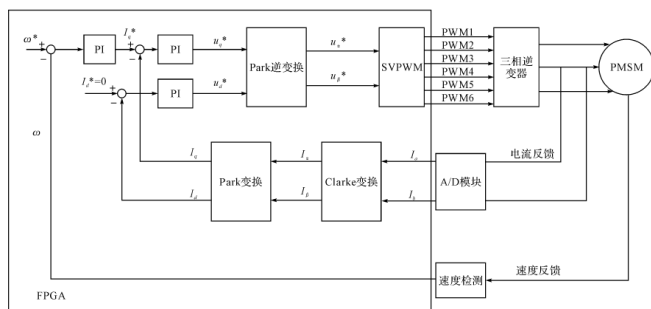


图3永磁同步电机矢量控制原理框图

基于电流和速度双闭环控制方法，永磁同步电机传动控制系统内环为电流环，外环为速度环，可以提高控制精度，减少干扰误差。电流环作为永磁同步电机传动控制系统的内环，具有抑制相应的启动和停止电流过程和加速电流的功能。同时，闭合电流环还可以变换电机对象模型，实现励磁分量和转矩分量的分离。对于等效直流电机模型，由于双闭环控制系统的外环，速度环将电机实际检测到的速度 ω 与给定指令 ω^* 进行比较，得到两者的误差，然后通过PI速度控制器进行调整，输出结果用作q轴。当前命令标志是 i_q^* ，d轴的命令标志是 $i_d^* = 0$ 。

(二) PMSM矢量控制系统模型搭建与仿真结果

根据矢量控制原理和SVPWM调制技术，利用Matlab/Simulink PI控制建立了永磁同步电机交流调速系统的仿真模型。通过不断的整改，最终达到稳定运行，从而检验采用PI控制的系统效果。永磁同步电机仿真模型由永磁同步电机本体单元、速度控制器、传动控制器、电压协调转换单元等组成。整个系统的仿真模型如图 4 所示。

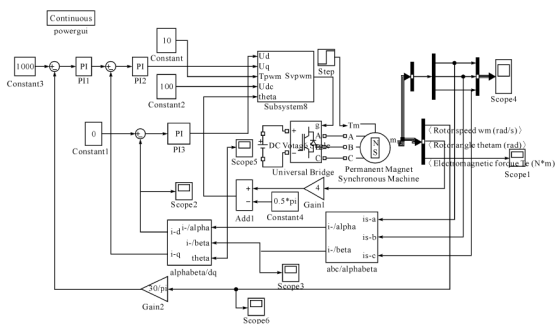


图4 PMSM矢量控制仿真模型

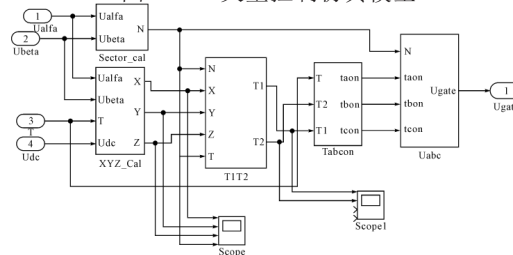


图5Matlab/Simulink系统中SVPWM模型

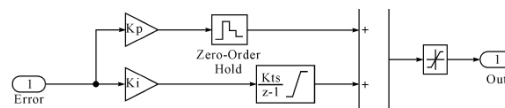


图6 PI控制器

仿真模型中永磁同步电机参数设置如下： $R_s = 2.75 \Omega$ ， $L_d = L_q = 0.008H$ ，转子永磁磁链 $\Psi_f = 0.273Wb$ ，转动惯量 $J = 8.15 \times 10^{-4} kg \cdot m^2$ ，额定转速为1000rad/min，额定转矩为 $4N \cdot m$ ，额定电流为3.3A，极对数 $p=4$ 。

本实验的目的是在改变转矩阶数的同时监测电机每个输出的动态和静态响应。从仿真结果可以看出，电机启动后，转矩迅速达到最大转矩，然后在短时间内恢复到恒定值并保持恒定。在给定的 1000 rad/min 参考速度下，系统响应迅速，可以快速达到稳定状态。通过比较给定速度 1000 rad/min 和 200 rad/min 的仿真结果，发现给定速度 200 rad/min 对稳定运行状态的响应时间更短。

PMSM矢量控制系统响应快速稳定，电机转速和转矩超调量较小，相电流比较完善，系统启动后转矩保持恒定。Simulink 的响应曲线在稳定时也与实际计算结果吻合较好，因此得到实验结论：永磁同步电机传动控制系统具有良好的动态响应特性和调速特性，具有良好的控制效果。

结语

在MATLAB/Simulink中搭建电流和速度双闭环矢量控制系统并进行仿真实验。实验结果表明，同步电机永磁伺服控制系统速度响应快、可调范围宽、抗干扰能力强。电流和转矩波动小，适用于工程实践，也为以后的实践奠定了理论基础。

参考文献：

[1]赵鹏飞. 永磁同步电机伺服控制系统研究与设计[D]. 宁波大学, 2014.
 [2]方环. 永磁同步电机伺服控制系统开发平台的设计及研究[D]. 东华大学, 2014.