1 永磁同步电机数学模型

在忽略电机参数变化及外部扰动的条件下建立永磁同步电机的数学模型，可得电压方程如下：

 (1)

式中：*u*d，*i*d，*L*d为d轴上的电压、电流、电感；*u*q，*i*q，*L*q为q轴上的电压、电流、电感；R为定子绕组电阻；*ω*m为电角速度；为磁链；p为极对数。

又因为表面式永磁同步电机有*L*d=*L*q，*T*e为目标转矩,则转矩方程如下：

 (2)

其中PMSM运动方程下：

 (3)

式中：B为粘性摩擦系数；*J*为转动惯量；*T*L为负载转矩。

考虑系统参数及转矩变化得



 (4)

式中：Δα1，Δα2，Δα3表示电机的参数变化值，*β*表示负载转矩及参数带来的扰动值。且

 (5)

2 控制器的设计

2.1 滑模控制器设计

综上所述，取PMSM状态变量为

 (6)

式中:ω*ref*为目标转速，*ω*m为电机输出转速。结合式（5），并对式（6）求导得

 (7)

定义系统滑模面函数为

 (8)

对滑模面函数求导，并将式（6）代入得

 (9)

在电机实际控制时，滑模控制方法存在高频抖振问题，则需要选取合适的指数趋近率可以有效的减弱滑模抖振。因此，为了提高系统的性能，将引入改进的新型趋近率，其改进的趋近率为

 (10)

式中:ε，k表示常数，且ε>0，k>0等速趋近项为-ε|1|sgn(*s*)，指数趋近项为k*s*。当误差增大时，等速趋近项使系统状态变量接近滑模面；同时，指数趋近项使系统状态变量减少至0。

定义D=，结合式（9），（10）得控制器的输出方程为：

 (11)

选取Lyapunov函数

 (12)

根据Lyapunov稳定性定理，只需证明<0，则系统渐进稳定，由式（10），（12）可得

 (13)

式中：ε>0，k>0，且sgn(*s*)*s*>0；由此可得，因此，系统误差能在有限的时间收敛趋近于0，使系统稳定。同时，采用饱和函sat(*s*,*δ*)代替sgn(*s*)，能有效的抑制抖振，并进一步提高系统的鲁棒性。选取饱和函数sat(*s*,*δ*)方程如下：

  (14)

2.2 扩张观测器设计

由式（11）看出来，利用滑模面设计出来的控制率含有电机参数变化及负载转矩扰动项，而扰动值无法测量，因此本文设计扰动观测器进行估计。

在实际的电机调速系统中，PMSM系统参数扰动变化缓慢，扰动的一阶导数可近似0，则由式（4）建立系统状态空间方程可得

 (15)

以ωm，为观测对象，建立转速估计误差*e*1的增益反馈，其中。由式（15）的基础上设计扩张扰动观测器为

 (16)

式中：，分别为电角速度估计值和负载参数摄动估计值；，，为正实数；为了实现高增益，取值要很小。利用该观测器不仅可以估计出电机参数变化及负载转矩的扰动项作为滑模控制的前馈补偿，同时可以实现趋近于，趋近于ωm。

由式（15），（16）得扩张观测器的误差方程如下

 (17)

式中：表示转速估计误差，表示系统参数及负载转矩估计误差。

因此，可将扩张观测器的误差状态方程表示为

 (18)

式中: ，，。

由此可知，通过配置，位于左半平面，便可让误差***e***渐进趋近于0，则使得系统误差趋近于0。

将观测的扰动及负载转矩的摄动值带入到式（11）可得

 (19)

由式（19）看出，以参数变化及负载的扰动作为前馈补偿，当负载及电机参数发生变化时，控制器能克服负载及参数扰动对系统的影响，有效的抑制系统的抖振现象，同时引入饱和函数，进一步的提高系统的鲁棒性。

3 仿真验证

3.1 仿真模型

为了验证本文提出的滑模控制与扰动观测器结合的可行性，搭建PMSM的矢量控制（Field-Oriented Control）系统，为了快速响应速度环的持续输出设计了滑模电流控制器，并对所设计的速度控制器及观测器进行验证和分析。实验所用的PMSM的参数见表1，系统框图如图1所示。



图1 PMSM调速系统控制框图

表1 PMSM参数

|  |  |
| --- | --- |
| 参数 | 数值 |
| *dq*轴电感L/mH | 8.5 |
| 定子电阻R/Ω | 0.875 |
| 磁极对数p | 4 |
| 永磁磁链/Wb | 0.175 |
| 转动惯量*J*/() | 0.003 |
| 粘性摩擦系数/N.m.s | 0 |

本文所设计的滑模控制器及扩张观测器参数配置为，，k=400，=15，=9，。其中最优滑模参数配置为c=10，，k=300；PI参数配置为=0.14,=7；传统滑模参数配置为c=30，，k=300；

3.2 仿真结果分析

设定目标转速为1000r/min，直流侧电压为311v，初始负载为1N.m。图2表示在0.4s突加10N.m的负载时系统在本文的控制算法、最优滑模、PI及传统滑模的速度响应曲线。其中表2，表3显示控制方法的动态性能及抗干扰能力。



（a）系统响应

(b)起动对比



（c）突加负载转速变化曲线

图2 转速变化曲线

表2 动态性能对比

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 超调量 | 峰值时间（t/s） | 调节时间（t/s） |
| PI控制 | 18.5% | 0.017 | 0.06 |
| 传统滑模 | 13.2% | 0.019 | 0.1 |
| 最优滑模 | 0 | 0.02 | 0.02 |
| 本文方法 | 0 | 0.0118 | 0.012 |

表3 抗干扰性能对比

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  | 下降转速（r/min） | 恢复稳态所需时间（t/s） |
| PI控制 | 突加负载 | 60 | 0.06 |
| 传统滑模 | 突加负载 | 82 | 0.14 |
| 最优滑模 | 突加负载 | 95 | 0.06 |
| 本文方法 | 突加负载 | 16 | 0.018 |

由图2、表2及表3可知，所提出的积分变结构与扰动观测器复合的滑模控制方法在改善调速系统的动态性能及抗干扰性能优于传统的控制方法。该方法能够使系统实现无超调，响应速度快，调节时间短，且抗干扰能力强。

为了验证设计的扩张滑模观测器对系统有较好的鲁棒性，在0.4s时转矩突加10N.m，0.6s将10N.m的转矩卸掉。其中，图3显示了扩张观测器对突加及突卸负载时转矩变化实时估计。图4显示了扩张观测器对转速的跟随。



图3 突加及突卸负载转矩实际值与观测值



图4 转速实际值与观测值

常规的滑模控制、传统的PI等控制方法在突加和突卸负载时，系统会产生较大的抖振。但从图3，图4可以看出，本文的控制方法所得的转速观测值与实际值存在的误差在-0.1~0.1rpm之间；在转矩突变时，估计转矩能比实际转矩更平滑。因此，将扩张观测器观测到的估计电机参数变化及负载转矩的扰动值引入滑模控制器中能很好的削弱抖振；

为了验证所设计的观测器将观测的电机参数变化及负载转矩的扰动引入滑模控制器中作为前馈补偿，进一步减弱滑模控制抖振。如图5表示的是引入扩张观测器前馈补偿与没有观测器前馈补偿在突加负载及突卸负载时转速变化；表4列出本文设计的滑模控制方法在有无扩张观测器将观测值作为前馈补偿的抗干扰性能。



图5 引入观测器前馈补偿对比

表4 有无观测器前馈补偿性能

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  | 转速变化（r/min） | 扰动调节时间（t/s） |
| 引入观测器前馈补偿 | 突加负载 | 17 | 0.018 |
| 突卸负载 | 15 | 0.02 |
| 无观测器前馈补偿 | 突加负载 | 19 | 0.02 |
| 突卸负载 | 18 | 0.025 |

由图5，表4可知，设计扩张观测器能观测到不可测量的电机参数变化及负载转矩的扰动作为前馈补偿对抑制滑模控制的抖振起到很好的作用；在突加及突卸负载转矩时，转速受到的扰动影响较小，且扰动调节时间短，显示出了较强的鲁棒性，能有效的抑制抖振。

[参考文献]

1. 孙强,程明,周鹗,胡敏强.新型双凸极永磁电机调速系统的变参数PI控制[J].中国电机工程学报,2003(06):117-122.
2. 孙运旺．现代永磁电动机及交流伺服系统的发展和应用［J］微特电机,2010,38(3):71.
3. DU Bochao，WU Shaopeng，HAN Shouliang，et al. Application of linear active disturbance rejection controller for sensorless control of internal permanent-magnet synchronous motor [J].IEEE Transactions on Industrial Electronics，2016，63（5）：3019-3027.
4. 史婷娜，张典林，夏长亮，等.基于遗传整定的永磁交流伺服系统模糊免疫 PID 控制器［J］. 电工技术学报，2008，23（7）：45-50.
5. ZHOU Zhanqing，XIA Changliang，YAN Yan，et al. Torque ripple minimization of predictive torque control for PMSM with extended control set［J］.IEEE Transactions on Industrial Electronics，2017，64（9）：6930-6939.
6. 童克文,张兴,张昱,谢震,曹仁贤.基于新型趋近律的永磁同步电动机滑模变结构控制[J].中国电机工程学报,2008(21):102-106.
7. MOZAYAN S M，SAAD M，VAHEDI H，et al. Sliding mode control of PMSG wind turbine based on enhanced exponential reaching law［J］.IEEE Transactions on Industrial Electronics，2016，63（10）6148-6159
8. 王要强,朱亚昌,冯玉涛,田兵.永磁同步电机新型趋近律滑模控制策略[J].电力自动化设备2021,41(01):192-198.
9. 段方宾,谭光兴,冯楚楚,田军南.永磁同步电机最优滑模控制[J].电机与控制应用,2019,46(02):6-9+19.
10. 淡宁,袁宇浩,冯进.基于快速STA与扰动观测器的PMSM滑模控制[J].计算机仿真,2020,37(10):173-178.
11. 李政,胡广大,崔家瑞,刘广一.永磁同步电机调速系统的积分型滑模变结构控制[J].中国电机工程学报,2014,34(03):431-437.
12. ZHANG Xiaoguang，HOU Benshuai，MEI Yang. Deadbeat predictive current control of permanent-magnet synchronous motors with stator current and disturbance observer［J］. IEEE Transactions on PowerElectronics，2017，32（5）：3818-3834.
13. QUAN Z，LIN F Q，JIAN S K. Adaptive enhanced sliding mode control for permanent magnet synchronous motor drives[J].International Journal of Adaptive Control & Signal Processing，2016，29( 12) : 1484．
14. 侯利民,任一夫,王怀震,李蕴倬,李秀菊.永磁同步电机调速系统的滑模自抗扰控制[J].控制工程,2019,26(08):1460-1465.
15. 祝新阳,曾国辉,黄勃,刘瑾,韦钰.改进滑模观测器的永磁同步电机矢量控制[J].信息与控制,2020,49(06):708-713+721.
16. 曹晓月,张旭秀.改进定子电阻辨识的滑模观测器PMSM无传感器控制[J].组合机床与自动化加工技术,2021(03):74-79.
17. 白天宇,刘军,许志明,唐文俏.基于幂次趋近律滑模观测器的永磁同步电机控制[J].组合机床与自动化加工技术,2021(01):122-125.