

基于电磁转矩的永磁同步电机新型变结构 PI 控制方法^{*}

戴连盟, 卢秀和

(长春工业大学 电气与电子工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要: 针对永磁同步电机(PMSM), 在传统 PI 控制时易出现转速超调、冲击电流大、转速环抗负载扰动能力差等现象, 通过对 PMSM 数学模型的推导分析以及基于 PI 控制理论, 提出了一种基于电磁转矩的新型变结构 PI (VSPI) 控制方法。该方法是在传统 PI 控制 VSPI 的基础上, 通过融合微分前馈控制以及引入转矩反馈量等闭环控制策略, 较好地解决了转速超调以及系统的抗干扰性等问题, 并给出了电磁转矩的电压电流混合观测模型结构以及计算方法, 同时分析了开环增益变化给予系统稳定性的影响情况, 最后通过仿真试验验证了该新型方法的可行性和有效性。

关键词: 永磁同步电机; PI 控制; 变结构 PI 控制; 电磁转矩; 抗负载扰动能力

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)09-0022-07

doi: 10.12177/emca.2020.097

A New Variable Structure PI Controller of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Electromagnetic Torque^{*}

DAI Lianmeng, LU Xiuhe

(College of Electrical and Electronics Engineering, Changchun University of Technology,
Changchun 130012, China)

Abstract: In the traditional PI speed control of permanent magnet synchronous motor (PMSM), there exists speed overshoot, large impulse current and poor anti-load-disturbance ability of speed loop. To solve these problems, a new variable structure PI (VSPI) control method based on the electromagnetic torque is proposed by deducing the mathematical model of PMSM and analyzing the PI control theory. On the basis of traditional PI control and VSPI control, the problems of speed overshoot and anti-disturbance are well solved by closed-loop control strategies such as fusing differential feedforward control and introducing torque feedback closed-loop control strategies. A voltage-current hybrid observation model and the corresponding calculation method are proposed for electromagnetic torque. Meanwhile, the influence of open-loop gain variation on system stability is analyzed in detail. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed method are verified by simulation.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); PI control; variable structure PI control (VSPI); electromagnetic torque; anti-load-disturbance ability

0 引言

永磁同步电机(PMSM)具有体积小、效率高

和有一定的鲁棒性等优点, 大量运用于工业、航天航空、军工等一些领域, 在一些应用场合, 需要获得电机的速度环抗扰动能力和减少速度环超调的

收稿日期: 2020-05-12; 收到修改稿日期: 2020-07-09

^{*} 基金项目: 吉林省科技厅科技发展计划项目(20170204038SF)

作者简介: 戴连盟(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为数字传动与电力变换节能技术。

卢秀和(1962—), 男, 博士, 教授, 研究方向为数字传动与电力变换节能技术。(通信作者)

能力。

针对 PMSM 的控制系统,目前有多种复杂控制策略如非线性控制^[1-3]、滑模控制^[4-7]等调速装置,这些控制拥有较好的抗负载扰动能力,但均对硬件的要求很高,且存在抖振问题。因此,在传统工业应用中主要还是采用线性的 PI 控制。传统的 PI 控制往往存在速度超调,抗负载扰动能力差等问题。针对这些问题,文献[8]提出了一种基于神经网络的 PI 控制提升系统的抗扰动能力,但是存在对器件要求高的缺点。文献[9]提出一种变结构 PI(VSPI)控制,解决了速度超调问题,并且具有结构简单、对控制器要求低等优点,但是系统的抗干扰能力较差。

为了解决阶跃响应时的超调问题,提高 PMSM 在负载转矩扰动时的抗扰动能力,本文提出了一种基于电磁转矩的 VSPI 控制,通过在 VSPI 控制的基础上引入电磁转矩的反馈量进行控制,融合微分控制方法,采用扰动补偿的方式提高系统的抗扰动能力,旨在有效地减少速度超调,同时提高系统的抗负载转矩扰动能力。

1 PMSM 数学模型

以一种理想的 PMSM 为研究对象,在 dq 旋转坐标系可推导出同步电机的数学模型:

磁链方程为

$$\begin{cases} \Psi_d = L_d i_d + \Psi_f \\ \Psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (1)$$

电压方程为

$$\begin{cases} U_d = L_d \frac{di_d}{dt} - \Omega_e L_q i_q + R_s i_d \\ U_q = L_q \frac{di_q}{dt} + \Omega_e L_d i_d + \Omega_e \Psi_f + R_s i_q \end{cases} \quad (2)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p i_q [i_d (L_d - L_q) + \Psi_f] \quad (3)$$

机械运动方程为

$$J \frac{d\Omega}{dt} = T_e - B\Omega - T_L \quad (4)$$

式中: i_q 、 i_d 、 L_q 、 L_d 分别为 q 轴和 d 轴的电流与电感; Ψ_f 为永磁体磁链; Ω_e 为电角速度; p 为极对数; J 为转动惯量; Ω 为机械角速度; B 为系统的黏滞摩擦系数; T_L 为负载转矩。

可以看出,同步电机的磁链是由定子磁链分量和转子磁链所决定。电磁转矩与定子电流的 dq 轴电流分量有关。转速的控制取决于转矩的变化量以及黏滞摩擦系数。

2 转速环 PI 控制分析

由式(4)可以得到机械角速度的状态方程为

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{T_e}{J} - \frac{B}{J}\Omega - \frac{T_L}{J} \quad (5)$$

根据式(3),对于表贴式(气隙均匀)PMSM, 有 $L_q = L_d = L$, 则电磁转矩方程可简化为

$$T_e = \frac{3p i_q \Psi_f}{2} = K_t i_q \quad (6)$$

式中: K_t 为转矩系数, $K_t = \frac{3p}{2} \Psi_f$ 。

可以看出,在转子磁链一定的情况下,电磁转矩与定子电流的交轴分量成正比,故一般速度环常设定成 PI 控制方式。为了提高系统的抗干扰性,借鉴文献[10]所提出的“有功阻尼”的概念,考虑转矩受黏滞摩擦系数的影响,对速度环引入一个有功阻尼 B_a 环节,并定义:

$$i_q = i'_q - B_a \Omega \quad (7)$$

式中: B_a 为有功阻尼参数; i'_q 为考虑黏滞摩擦补偿后的定子电流分量。

采用磁场定向控制策略,并假定电机在空载的情况下起动,则由式(5)和式(6)可得:

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1.5p \Psi_f}{J} (i'_q - B_a \Omega) - \frac{B}{J} \Omega \quad (8)$$

则:

$$\Omega(s) = \frac{1.5p \Psi_f}{s + \alpha} i'_q(s) \quad (9)$$

转速环的闭环带宽 α 表达式为

$$\alpha = \frac{1.5B_a p \Psi_f + B}{J} \quad (10)$$

则有:

$$B_a = \frac{\alpha J - B}{1.5p \Psi_f} \quad (11)$$

如果采用传统 PI 调节器,则转速环控制器的控制关系为

$$i_q^* = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (\Omega^* - \Omega) - B_a (\Omega^* - \Omega) \quad (12)$$

参数 K_p 和 K_i ^[11] 为

$$\begin{cases} K_p = \frac{\alpha J}{1.5p\Psi_f} \\ K_i = \alpha K_p \end{cases} \quad (13)$$

根据式 (12) 可搭建 PI 控制环节模型,如图 1 所示。进而可画出同步机转速闭环控制系统的结构图,如图 2 所示。

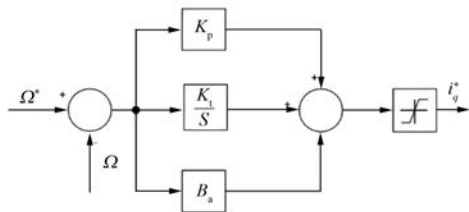


图 1 PI 速度环控制框图

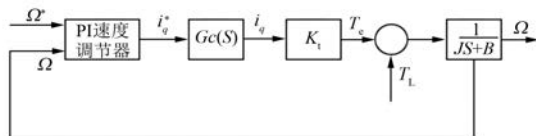


图 2 同步机转速闭环控制结构图

通过自控理论中对 PI 调节器输出调节特性的分析,基于该传统 PI 控制的调速系统,在阶跃速度给定时,会存在速度超调以及冲击电流较大等问题。

3 转速环 VSPI 控制分析

为了解决速度超调等问题,引入微分前馈以及改变调节器结构方式的方法,在传统的 PI 控制中引入微分前馈,并将误差比例环节与误差积分环节相并联的结构改成误差比例微分环节与积分环节相串联的结构形式^[9],如图 3 所示。

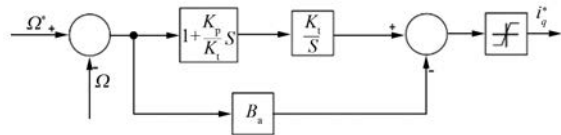


图 3 VSPI 速度环控制框图

根据图 3,速度环的传递关系为

$$i_q^* = \left(1 + s \frac{K_p}{K_i}\right) \cdot (\Omega^* - \Omega) \frac{K_i}{s} - B_a(\Omega^* - \Omega) \quad (14)$$

根据图 2 和图 3,假定 i_q 完全追踪,可以得到系统的传递函数为

$$\frac{\Omega}{T_L} = \frac{-s}{JS^2 + [B + (K_p - B_a)K_t]S + K_iK_t} \quad (15)$$

$$\frac{\Omega}{\Omega^*} = \frac{(K_p - B_a)K_tS + K_iK_t}{JS^2 + [B + (K_p - B_a)K_t]S + K_iK_t} \quad (16)$$

为了验证 VSPI 控制可有效解决常规 PI 控制的速度超调问题,进行对比仿真试验。仿真试验用电机参数如表 1 所示。

表 1 电机参数

参数名称	参数值
永磁体磁链 Ψ_f/Wb	0.182 7
绕组电阻 R/Ω	0.958
绕组电感 ($L_d=L_q$)/mH	5.25
极对数 p	4
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$	0.003
阻尼系数 $B/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s})$	0.008

选取速度环带宽为 7.9 r/s,控制器所有参数可根据式 (11) 和式 (13) 计算得到,需要注意的是经过计算得到的参数并不一定为最优参数,实际系统可在计算值的基础上进行适当的微调。仿真控制器参数如表 2 所示。

表 2 仿真控制器参数

参数名称	参数值
K_p	0.14
K_i	0.14×50
B_a	0.001 3

图 4、图 5 所示为空载情况下,常规 PI 控制以及 VSPI 控制时,在相同阶跃给定时的转速以及电流变化调节曲线。图 6 所示为加载 10 N·m 负载扰动时的转速响应曲线。

对比分析图 4、图 5 输出特性,可以看出常规 PI 控制时,转速超调现象明显,最大超调量达到 20%;而 VSPI 控制时的转速超调很小,并且 VSPI 控制时 q 轴冲击电流相比 PI 控制要小的多。

分析图 6 可以看出,2 种控制方式在 0.2 s 时刻,突加负载扰动后,均要产生转速的波动,波动的程度相差不是很明显。

通过上述分析可知,采用 VSPI 控制方法可以明显解决 PI 控制时的超调现象,进而减少冲击电

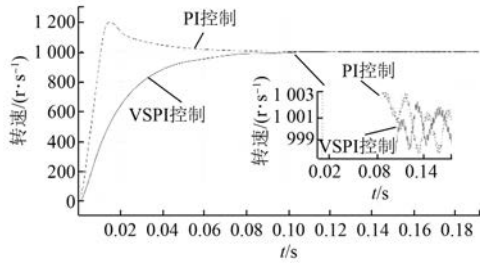


图4 PI及VSPI不同控制方式下的速度变化曲线

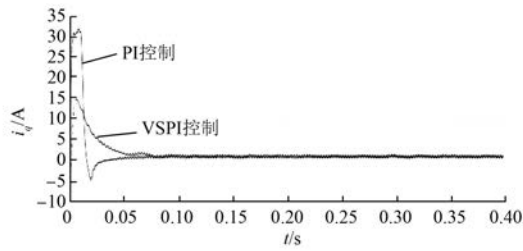


图5 PI及VSPI不同控制方式下的电流变化曲线

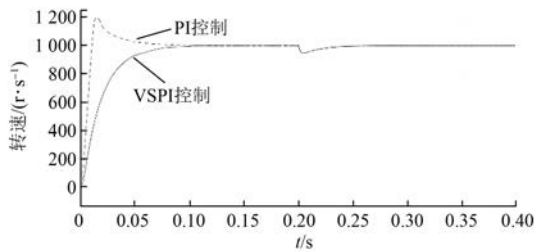


图6 负载扰动下的转速调节曲线

流,但对提高系统的抗扰动能力还不是很明显,故进一步引入基于电磁转矩的新型VSPI控制策略。

4 基于电磁转矩的新型VSPI控制分析

为了进一步提升VSPI控制系统的抗扰动能力,本文提出一种基于电磁转矩的新型VSPI控制策略,即在VSPI的基础上增加一个电磁转矩反馈量的微分控制环节,控制结构如图7所示。

根据图7可以得到速度环的控制函数为

$$i_q^* = K_p(\Omega^* - \Omega) + KK_i T_e + \frac{K_i}{S}(\Omega^* - \Omega) - B_a(\Omega^* - \Omega) \quad (17)$$

对比式(17)与式(14)可以看出,该控制是在VSPI控制的基础上,通过引入了一个电磁转矩反

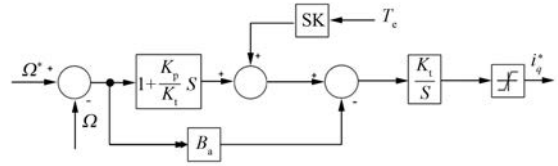


图7 基于电磁转矩的VSPI速度环控制图

馈量用于对电流控制量进行补偿,进而提高转速环的抗扰动能力。

结合图7,假设电流控制能完全追踪,即 $G_c(s) = 1$,可以得到系统的传递函数为

$$\frac{\Omega}{T_L} = \frac{-(1 - KK_i K_t)S}{(JS + B)S(1 - KK_i K_t) + (K_p - B_a)K_i S + K_i K_t} \quad (18)$$

$$\frac{\Omega}{\Omega^*} = \frac{(K_p - B_a)K_i S + K_i K_t}{(JS^2 + BS)(1 - KK_i K_t) + (K_p - B_a)K_i S + K_i K_t} \quad (19)$$

对比式(18)与式(15)可知,分子由 $-S$ 变成了 $-(1 - KK_i K_t)S$,因此可以通过增大 K 值来增大系统的抗扰动能力。

增加 K 值,会影响系统的稳定性,根据劳斯判据,确定 K 值的变化范围。

系统的特征方程为

$$J(1 - KK_i K_t)S^2 + [B - BKK_i K_t + (K_p - B_a)K_i]S + K_i K_t = 0 \quad (20)$$

根据劳斯稳定判据可以得到系统稳定的条件为

$$K < K_g \quad (21)$$

其中: $K_g = \frac{2}{3p\Psi_f K_i}$ 。

4.1 电磁转矩的观测方法

在基于电磁转矩的VSPI控制中,电机的电磁转矩的获得是该方法能否实现的关键所在。对此本文采用一种基于电压电流混合模型的新型磁链观测方法^[12],观测模型如图8所示。

结合图8,磁链的计算式可写为

$$\Psi = \Psi_{sc}(1 - H(S)) + \Psi_{sv}H(S) \quad (22)$$

其中,

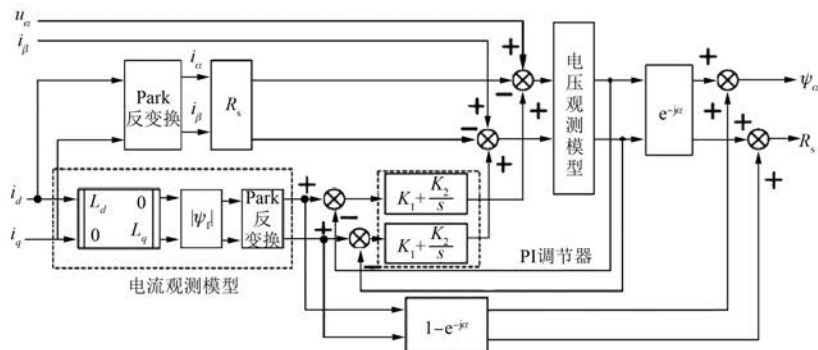


图 8 基于电压电流混合模型的磁链观测器

$$H(S) = \frac{\Omega_e^2}{\sqrt{(K_1 \Omega_e)^2 + (K_2 - \Omega_e^2)^2}} \quad (23)$$

式中: Ψ 为定子磁链; Ψ_{sc} 为电流模型的磁链; Ψ_{sv} 为电压模型的磁链; Ω_e 为电机的同步电角速度。

通过式(6)即可算出转矩的反馈量。

4.2 系统整体控制结构

基于上述分析可以画出基于电磁转矩的VSPi控制系统结构图,如图9所示,其中新型VSPi控制的速度环结构如图10所示。

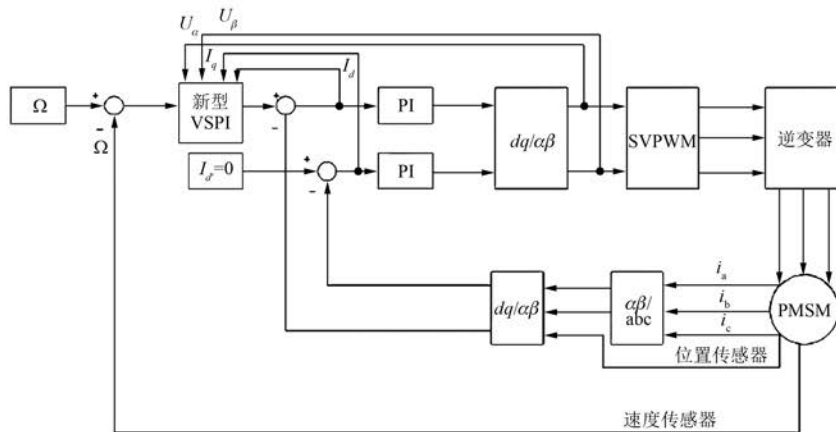


图9 基于电磁转矩的新型 VSPI 控制结构图

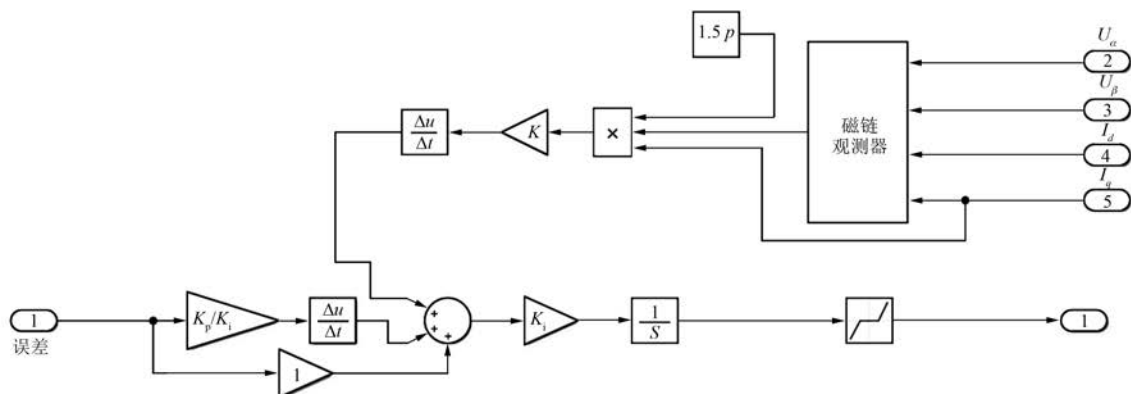


图 10 新型 VSPI 的速度环结构

5 仿真试验分析

为了验证基于电磁转矩的新型 VSPI 控制的性能,在 MATLAB/Simulink 的环境下进行仿真试验。仿真用电机数据如表 1 所示。控制器参数如表 2 所示。系统给定的机械转速为 1 000 r/s,图 11 为选取速度环带宽 α 值分别为 7.9、12.7、25.5 r/s 时的系统空载响应曲线。图 12 分别为在 0.3 s 时负载转矩为 10 N·m 和在 0.5 s 时负载转矩为 -20 N·m 时的转速调节响应曲线。图 13 是对应的加入电磁转矩新型 VSPI 响应。图 14 和图 15 分别为系统在 0.5 s 给定相同的 10 N·m 负载转矩,未加入电磁转矩与加入电磁转矩的 d 轴电流图。图 16 和图 17 为未加入电磁转矩与加入电磁转矩的 q 轴电流图。

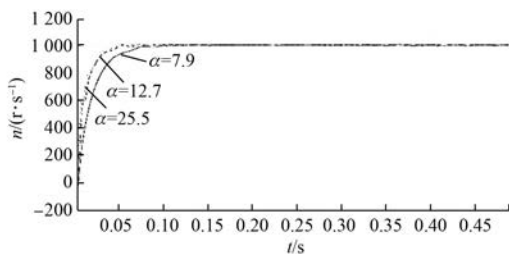


图 11 不同带宽 α 的阶跃响应曲线

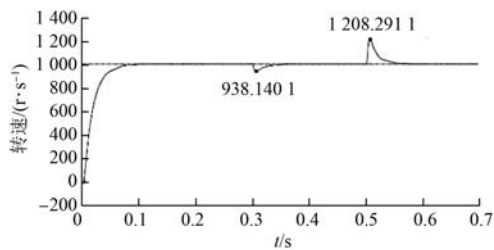


图 12 未加入电磁反馈控制 VSPI 响应曲线

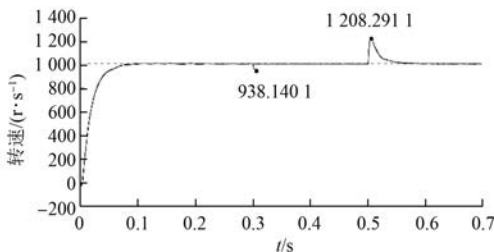


图 13 加入电磁反馈的转速 VSPI 响应图

仿真结果分析如下：

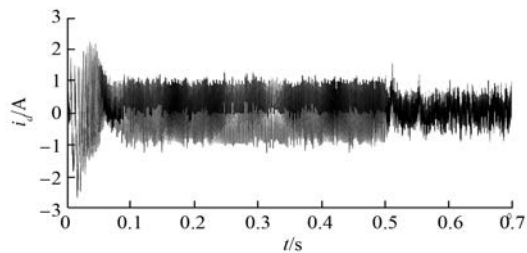


图 14 未加入电磁转矩的 d 轴电流图

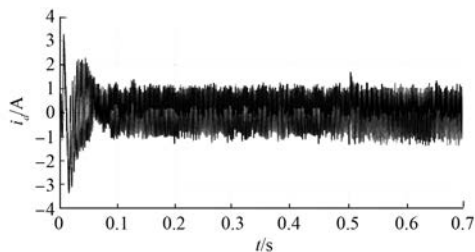


图 15 加入电磁转矩的 d 轴电流图

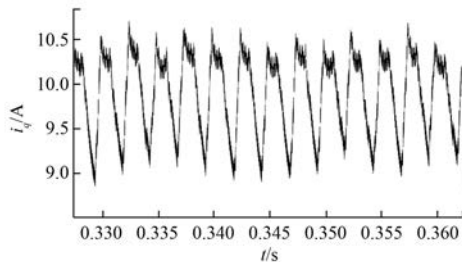


图 16 未加入电磁转矩的 q 轴电流图

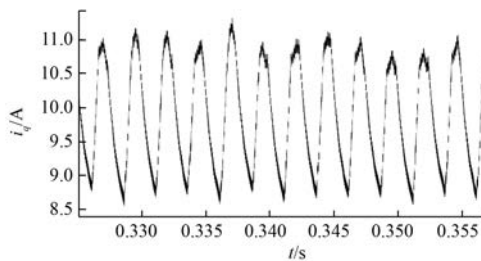


图 17 加入电磁转矩的 q 轴电流图

(1) 分析图 11 可以得到新型 VSPI 的速度环带宽 α 值越大,系统的响应速度越快,跟踪性能越好。

(2) 分析图 12 与图 13 可以得到系统未加入电磁转矩的 VSPI 控制系统在 0.3 s 和 0.5 s 的转速波动约为 -62 r/s 和 208 r/s。在加入电磁转矩后,系统在对应时间的转速波动为 -37 r/s 和 161 r/s。

系统的抗干扰性能相比未补偿前提高了约 40%。

(3) 分析图 14 和图 15 可知, 0.5 s 时负载转矩由 0 阶跃到 $10 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的时候, 加入电磁转矩后的 VSPI 控制 d 轴电流基本不变, 未加入电磁转矩的 d 轴电流存在较大的波动, 新型 VSPI 在一定程度上提高了 d 轴电流抗负载扰动能力。

(4) 由图 16 和图 17 可知, 加入电磁转矩的 q 轴电流比未加入的幅值大, 这是由于在速度环加入电磁转矩反馈, q 轴电流相比未加入电磁转矩控制多了一个电磁转矩补偿电流。

为了进一步分析系统动态性能与 K 值的变化关系, 对新型 VSPI 控制系统进行了在给定相同负载转矩下, 取不同 K 值的系统响应以及稳定性的情况, 由于图片空间有限, 分别是只选取试验中的 4 种不同 K 值的曲线, 如图 18、图 19 所示。

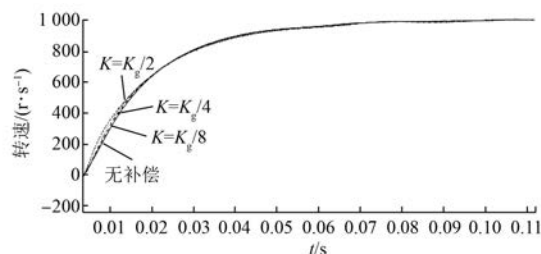


图 18 不同 K 值的转速阶跃响应图

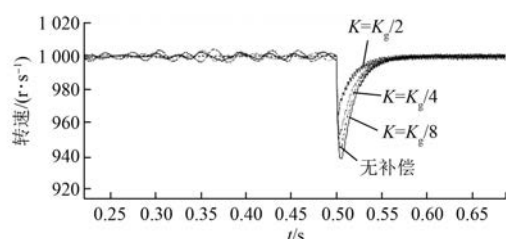


图 19 不同 K 值的扰动响应图

分析图 18、图 19 可知, 在 K 值满足系统的稳定性的条件下, K 值与 K_g 值越接近, 系统的抗扰动能力越强, 且系统的上升时间并没有随着 K 值的变化而改变。

6 结 语

针对 VSPI 控制的抗干扰能力差的现象, 本文提出了一种基于电磁转矩的新型 VSPI 控制, 与传

统 PI 控制相比, 解决了速度超调问题, 减少了 q 轴冲击电流, 提高了系统的抗扰动能力。

仿真试验表明: 在新型 VSPI 控制下, 系统的超调基本为零, 给定相同负载转矩时, 在保证稳定条件的前提下, K 与 K_g 越接近, 系统的抗负载扰动能力越好。

【参 考 文 献】

- [1] 李玮. 永磁同步电机逆变器非线性补偿控制[J]. 电气传动, 2019, 49(12): 3.
- [2] 江尚, 钟再敏, 周水华. 基于定子电流定向的永磁同步电机非线性控制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(增刊1): 80.
- [3] 沈绍博, 李涛, 祖晖, 等. 带扰动观测器的永磁同步电机非线性预测跟踪控制[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(3): 367.
- [4] 王毅波, 曹宽, 李彪. 一种改进型指数趋近律的永磁同步电机滑模控制[J]. 微电机, 2019, 52(12): 81.
- [5] LIU J, LI H, DENG Y. Torque ripple minimization of PMSM based on robust ILC via adaptive sliding mode control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(4): 3655.
- [6] HAN Y, CHOI J, KIM Y. Sensorless PMSM drive with a sliding mode control based adaptive speed and stator resistance estimator[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(5): 3588.
- [7] 彭超洋. 永磁同步电机鲁棒滑模控制算法研究[J]. 自动化技术与应用, 2019, 38(12): 1.
- [8] 李亚敏, 杨松. 基于神经网络的永磁同步直线电机 PI 速度控制[J]. 江西化工, 2018(5): 123.
- [9] 符慧, 左月飞, 刘闯, 等. 永磁同步电机转速环的一种变结构 PI 控制器[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 237.
- [10] HARNEFORS L, PIETILAINEN K, GERTMAR L. Torque-maximizing field-weakening control: design, analysis, and parameter selection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001, 48(1): 161.
- [11] 袁雷, 沈建清, 肖飞, 等. 插入式永磁低速同步电机非奇异终端滑模观测器设计[J]. 物理学报, 2013, 62(3): 45.
- [12] 时维国, 桑尧尧. 基于电压电流混合模型的新型磁链观测器[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(7): 14.