

6-6-2020

Design of Anti -windup Controller for SRMDirect Instantaneous Torque System

Xiaofei Qin

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

Liu Jie

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

Li Feng

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Design of Anti -windup Controller for SRMDirect Instantaneous Torque System

Abstract

Abstract: In the direct instantaneous torque control system of switched reluctance motor, there is a nonlinear saturation in the speed outer loop controller. The integral control link of the controller will accumulate the error and increase the error gradually, resulting in the saturation effect of the controller and reducing the performance of the system. *In this regard, an anti-windup adaptive PID controller is proposed on the basis of the traditional speed controller. This method integrates the input saturation error of controller and adjusts the integral term of controller by adaptive coefficient, so that it can quickly desaturation when the system has saturation overshoot.* The simulation and test show that this method can suppress the saturation phenomenon, improve the motor response speed, reduce the ripple of speed, and achieve better system stability and robustness.

Keywords

switched reluctance motor, direct instantaneous torque, anti-windup, PID controller

Recommended Citation

Qin Xiaofei, Liu Jie, Li Feng. Design of Anti -windup Controller for SRMDirect Instantaneous Torque System[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(12): 3160-3167.

SRM 直接瞬时转矩系统抗饱和控制器设计

秦晓飞, 刘杰, 李峰

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 在开关磁阻电机直接瞬时转矩控制系统速度外环控制器中存在非线性饱和, 控制器的积分控制环节会对误差进行积累并逐渐使误差增大, 造成控制器的饱和效应, 降低系统的性能, 为此在传统速度控制器基础之上提出一种抗饱和自适应 PID 控制器, 该方法通过对控制器输入饱和误差进行积分, 并通过自适应系数调整控制器的积分项, 保证系统出现饱和和超调时, 使其快速退饱和, 仿真及试验表明该方法可以抑制饱和现象, 提高电机速度响应, 降低转速脉动, 系统稳定性和鲁棒性较好。

关键词: 开关磁阻电机; 直接瞬时转矩; 抗饱和; PID 控制器

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2017)12-3160-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201712029

Design of Anti-windup Controller for SRMDirect Instantaneous Torque System

Qin Xiaofei, Liu Jie, Li Feng

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In the direct instantaneous torque control system of switched reluctance motor, there is a nonlinear saturation in the speed outer loop controller. The integral control link of the controller will accumulate the error and increase the error gradually, resulting in the saturation effect of the controller and reducing the performance of the system. In this regard, an anti-windup adaptive PID controller is proposed on the basis of the traditional speed controller. This method integrates the input saturation error of controller and adjusts the integral term of controller by adaptive coefficient, so that it can quickly desaturation when the system has saturation overshoot. The simulation and test show that this method can suppress the saturation phenomenon, improve the motor response speed, reduce the ripple of speed, and achieve better system stability and robustness.

Keywords: switched reluctance motor; direct instantaneous torque; anti-windup; PID controller

引言

在一般控制系统中, 控制器的输出信号通常经由控制器传到受控系统当中, 从而驱动受控对象完成既定任务。由于物理上保护机制的限制, 控制器

所能传输的控制信号的大小在特定范围之内。当控制信号或外界干扰信号过大时, 由控制器输出到受控系统的信号将失真, 从而造成闭环系统性能急剧下降, 引起系统响应速度缓慢, 超调变大等一系列问题, 通常称这种现象称为控制器饱和, 也即 windup 现象^[1]。在开关磁阻电机直接瞬时转矩控制系统中, 内环是转矩环, 外环是转速环, 转速环通常是 PID 控制, 当有转矩限幅时, 在参考转速发生一个大的阶跃变化时, 转速误差将在一段时间内



收稿日期: 2017-02-20 修回日期: 2017-04-10;
基金项目: 上海高校青年教师培训(ZS115008);
作者简介: 秦晓飞(1982-), 男, 北京, 博士, 高工, 研究方向为电机驱动控制技术、机器视觉等; 刘杰(1989-), 男, 河南, 硕士生, 研究方向为开关磁阻电机驱动控制技术。

<http://www.china-simulation.com>

• 3160 •

保持正值, 由于 PID 控制器积分环节的累加作用, 积分状态持续增大远远超出饱和和非线性的限幅值, 而当转速误差变差负值以后, 由于积分状态值很大而造成系统超调, 使电机转速响应时间变长, 整个控制系统的稳定性下降, 鲁棒性变差, 电机的转速响应性能降低。

目前关于饱和问题的研究在不同方面都有发展, 有人在永磁同步电机控制系统中设计了抗饱和的控制器^[2], 有学者在混沌系统中研究饱和问题^[3], 也有学者用积分法和反步计算法设计抗饱和和控制器^[4-8], 论文在总结各种算法基础之上, 针对开关磁阻电机直接瞬时转矩控制系统, 设计一种抗饱和和自适应的 PID 控制器, 文中阐述了该策略的原理与设计方法, 并在以 DSP28335 为核心控制板的试验平台上验证了该方法, 仿真和试验结果表明方法能有效抑制饱和, 提高电机速度响应性能, 具有较好的稳定性和鲁棒性。

1 开关磁阻电机直接瞬时转矩控制系统

1.1 开关磁阻电机的数学方程

开关磁阻电机是双凸极电机, 转子无绕组也无永磁体。遵循磁阻最小原理, 其基本方程包括电路方程、机械方程、机电联系方程^[9]。

由电路基本定律列写电路方程:

$$U_k = R_k i_k + \frac{d\psi_k}{dt} \quad (k=1,2,3) \quad (1)$$

$$\psi_k(\theta, i_k) = L_k(\theta, i_k) i_k \quad (2)$$

按照力学方程可列出机械方程:

$$T_e = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + T_l \quad (3)$$

(1)(2)(3)式中:

U_k — k 相绕组定子端电压

i_k — k 相绕组电流

R — 定子绕组电阻

ω — 转子机械角速度

ψ_k — k 相磁链

$L_k(\theta, i_k)$ — k 相绕组电感

θ — 转子位置角

T_e — 电磁转矩

T_l — 负载转矩

J — 转动惯量

D — 粘性摩擦系数

机电联系方程:

由电机原理可知, 由 k 相产生的瞬时转矩 $T_k(\theta, i_k)$ 等于磁共能 $W'(\theta, i_k)$ 对转子位置角的偏导数, 即

$$T_k(\theta, i_k) = \left. \frac{\partial W_k(\theta, i_k)}{\partial \theta} \right|_{i_k = \text{const}}, (k=1,2,3) \quad (4)$$

式中: $W'(\theta, i_k) = \int_0^{i_k} \psi_k(\theta, i_k) di_k$

结合前文对公式(1)所描述的电压方程变形, 其绕组电压方程可变为:

$$U = Ri + \frac{\partial \psi}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (5)$$

由公式(5)可得电流变化率的关系式:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U - Ri - \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt}}{\frac{\partial \psi}{\partial i}} = \frac{U - Ri - \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \omega}{L} \quad (6)$$

由上面公式可以看出, 当电机绕组的磁链发生变化时, 绕组的电流可认为是保持在一个恒定值, 当改变磁链的大小, 就可以达到改变转矩的目的, 而这个过程不需要考虑电流的大小, 通过对角度的约束, 综合以上公式我们可以得到简化的开关磁阻电机直接瞬时转矩控制结构框图, 如图 1 所示。

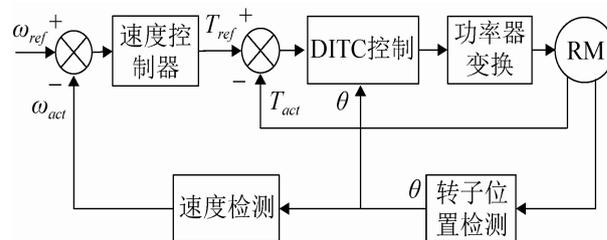


图 1 开关磁阻电机直接瞬时转矩控制系统结构框图

Fig.1 Structure diagram of direct torque control system for switched reluctance motor

在图 1 所示的结构框图中, 对于速度控制器通

常按照经典控制理论来设计，即 PID 控制设计，在这里我们取 $K_p = 1.04$ ， $K_i = 20$ ， $K_d = 1$ ，输出限幅为 $\pm 30N \cdot m$ ，电机负载设为空载，给定转速分别为 500 r/min 和 1 000 r/min，得到的转速响应如图 2 和图 3 所示。

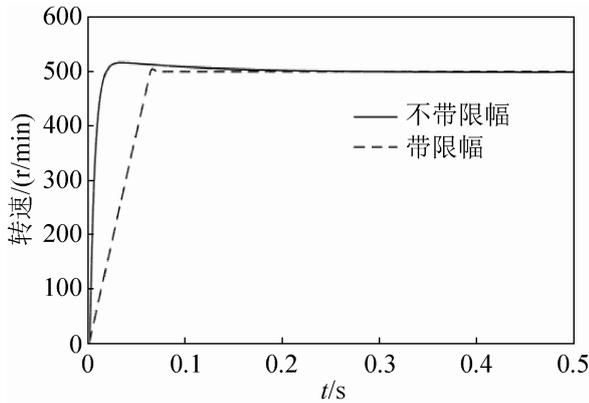


图 2 转速为 500 r/min 的响应
Fig.2 Speed of 500 r/min response

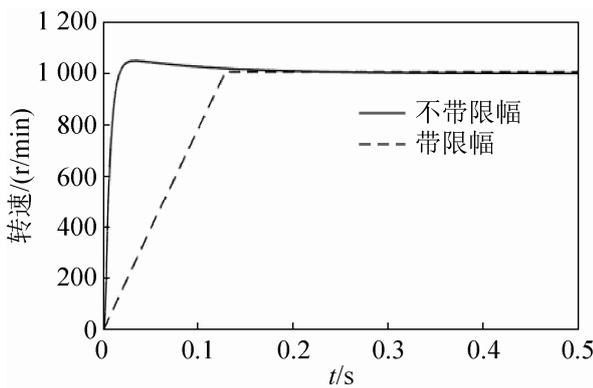


图 3 转速为 1 000 r/min 的响应
Fig.3 Speed of 1 000 r/min response

图 2 和图 3 对比我们可以发现，在采用不带限幅的控制器时，电机在低速和中速的速度响应快，可以很快达到稳定状态，当设置有限幅时，在转速 500 r/min 时，电机转速在 0.08s 时可以达到稳定，在转速 1 000 r/min 时，电机转速在 0.12s 时可以达到稳定，随着转速的提高，控制器的饱和现象也越来越严重，对系统的性能影响也逐渐加强。在实际的应用中，许多控制系统的控制器是带有限幅的，因此对饱和现象的抑制是必要的。

1.2 饱和现象分析

由前一节分析我们可知，控制器饱和和转速影响较大，下面分析其原因，由于 SRD 一般为稳速系统，在速度给定情况下，工作在某个确定的受控速度点，我们可以在某一控制方式下，利用小信号扰动法对非线性的 SRD 进行局部线性化，从而运用线性理论简化 SRD 闭环系统的分析与综合问题。

基于线性模型的 SRD 的平均转矩表达式为：

$$T_{av} = \frac{3N_r U_s^2}{2\pi \omega_r^2} (\theta_{off} - \theta_r) \left(\frac{\theta_r - \theta_{on}}{L_{min}} - \frac{1}{2} \frac{\theta_{off} - \theta_r}{L_{max} - L_{min}} \right) \quad (7)$$

由式(7)表明：在电机结构、电磁参数一定时，转矩受控的参数为 U_s 、 θ_{on} 、 θ_{off} 及 ω_r ，由微分原理可知，转矩的 T_{av} 的全微分方程为：

$$dT_{av} = \frac{\partial T_{av}}{\partial U_s} dU_s + \frac{\partial T_{av}}{\partial \theta_{on}} d\theta_{on} + \frac{\partial T_{av}}{\partial \theta_{off}} d\theta_{off} + \frac{\partial T_{av}}{\partial \omega_r} d\omega_r \quad (8)$$

将式(8)中微分变量进行替换得到开关磁阻电机的小信号线性化的转矩方程为：

$$\Delta T_{av} = K_u \Delta U_s + K_{on} \Delta \theta_{on} + K_{off} \Delta \theta_{off} - K_\omega \Delta \omega_r \quad (9)$$

式中， $K_u = \frac{\partial T_{av}}{\partial U_s}$ ； $K_{on} = \frac{\partial T_{av}}{\partial \theta_{on}}$ ；

$$K_{off} = \frac{\partial T_{av}}{\partial \theta_{off}}；K_\omega = \frac{\partial T_{av}}{\partial \omega_r}$$

对式(3)作小信号处理得到其增量形式为：

$$\Delta T_{av} = J \frac{d \Delta \omega_r}{dt} + D \Delta \omega_r + \Delta T_l \quad (10)$$

考虑到开关磁阻电机的角度影响，并假设角度控制输入的的变量为 $\Delta \theta_{on}$ 、 $\Delta \theta_{off}$ ，可以得到：

$$\begin{cases} \theta_{on} = \Delta \theta_{on}(t - \tau) \\ \theta_{off} = \Delta \theta_{off}(t - \tau) \end{cases} \quad (11)$$

式中： τ 为电机响应角度控制令时间延迟平均值，一般取几毫秒。

将式(9)(10)(11)分别取拉普拉斯变换得到开关磁阻电机的复域小信号模型，即

$$\begin{cases} \Delta T_{av}(s) = K_u \Delta U_s(s) + K_{on} \theta_{on}(s) + K_{off} \theta_{off}(s) - K_\omega \Delta \omega_r(s) \\ \Delta T_{av}(s) = Js \Delta \omega_r(s) + D \Delta \omega_r(s) + \Delta T_l(s) \\ \theta_{on}(s) = \Delta \theta_{on}(s) e^{-\tau s} \\ \theta_{off}(s) = \Delta \theta_{off}(s) e^{-\tau s} \end{cases} \quad (12)$$

在得到小信号时域模型之后我们可以设计传递函数结构框图, 对于信号输入端可以设计复域小信号模型为:

$$\Delta\omega_g(s) = K_c \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \Delta\omega_{ASR}(s) \quad (13)$$

式中: T 为周期。

速度调节器一般采用传统的 PID 调节器, 其模型为:

$$G_{ASR}(s) = K_p \left[1 + T_D s + \frac{1}{T_I s} \right] \quad (14)$$

式中: K_p 、 T_D 、 T_I 分别为比例、微分、积分系数。

对于速度反馈一般采用 M/T 法, 通常用小惯性环节来表示, 即

$$G_\omega(s) = \frac{K_n}{1 + T_\omega s} \quad (15)$$

式中: K_n 为速度反馈系数, T_ω 为测速时间常数。

根据前面的分析, 可以画出开关磁阻电机的调速系统对应的复频域小信号动态结构框图, 如图 4 所示。

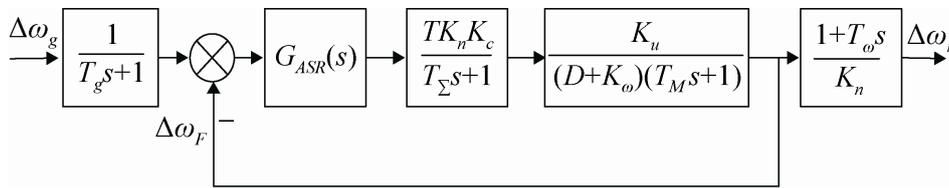


图 5 简化传递函数结构图
Fig.5 Simplified transfer function diagram

由图 5 可知, SRD 速度调节器的调节对象可近似为两个参数不同的惯性环节, 可得传递函数表达式为:

$$\Delta\omega_r = \frac{K_n K_u K_c T}{(D + K_\omega)(T_M s + 1)(T_\Sigma s + 1)} \Delta\omega_k(s) \quad (17)$$

式中: K_n 为速度反馈系数; K_c 为放大倍数, $T_\Sigma = T + T_\omega$, $T_M = J / (D + K_\omega)$; T_ω 为测速时间常数, T_M 为电动机机电时间常数。

当速度调节器为输出带限幅的调节器时, 在电机系统启动过程中, 调节器输出上升迅速, 很快进入饱和, 这时反馈不起作用, 系统相当于开环, 输出量可表示为:

在图 4 的结构图中, 为了保证输入信号不受干扰, 在输入给定速度时加上速度滤波器。为了方便分析, 开关磁阻电机在稳定状态下可以将速度环视为一个整体环节, 将速度反馈转化为单位反馈形式, 并且根据等效小惯性环节群理论, 小惯性群 T 、 T_ω 等效为一个惯性环节:

$$\frac{K_\Sigma}{1 + T_\Sigma s} \quad (16)$$

式中: $K_\Sigma = TK_n K_c = K_m K_n$; $T_\Sigma = T + T_\omega$, 由此可以得到简化的系统传递函数结构框图。如图 5 所示。

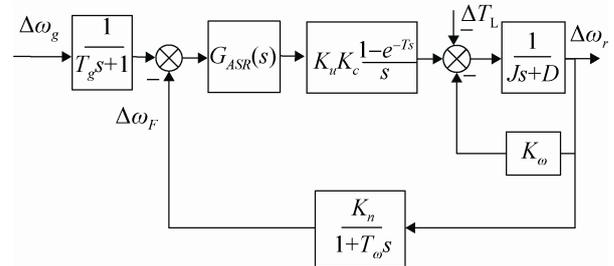


图 4 开关磁阻电机调速系统小信号动态结构框图
Fig.4 Key words of small signal dynamic structure of switched reluctance motor speed regulation system

$$\Delta\omega_r = \frac{K_n K_u K_c T}{(D + K_\omega)(T_M s + 1)(T_\Sigma s + 1)} \Delta\omega_k(s) \approx \frac{K_n K_u K_c T}{(D + K_\omega)(T_\Sigma s + 1) T_M s} \Delta\omega_k(s) \quad (18)$$

忽略饱和和起始时间, 并设 $\Delta\omega_k(s) = 1$, 代入式 (18), 并两边同时取拉普拉斯变换,

$$\Delta\omega_k(t) = \frac{K_n K_u k_c T}{(D + K_\omega) T_M} - \frac{K_n K_u k_c T}{(D + K_\omega) T_M} e^{-t/T_\Sigma} \approx \frac{K_n K_u k_c T}{(D + K_\omega) T_M} \quad (19)$$

式(19)表明, 在转速调节器饱和期间, SRM 的转速将随时间近似的按线性规律增长。当电机转速增加到给定值时, 误差 $e = 0$, 速度调节器的输出

量要从限幅值开始下降，但是由于 PID 调节器中的积分作用，使得输出量不会突然下降，所以转速将继续增加，使得当 $e < 0$ 时，由于积分状态值很大，积分器反向积分使积分状态减小从而退出饱和区需要很长的时间，从而造成输出的超调量增大，调节时间加长，进而导致电机的转速响应变慢。

综上所述，导致系统饱和和超调的原因关键在于积分器的引入，并且实际的 SRD 存在严重的非线性、时变特征，传统的 PID 调节器不能完全消除饱和和超调，所以要设计新的抗饱和控制器。

2 抗饱和控制器

2.1 抗饱和模型

对于控制系统，如果来自控制器的信号不同于进入设备的信号，则采用校正反馈动作以减少差异，对此我们设控制输入目标为 u ，于是可得：

$$u = u_c(t) + u_{aw}(t) \tag{20}$$

式中： $u_c(t)$ 为控制输入， $u_{aw}(t)$ 为抗饱和输入，且：

$$u_{aw}(t) = k_b (w(t) - u_c(t)) \tag{21}$$

式中： k_b 为积分补偿系数，而 $w(t)$ 表示抗饱和信号，其表达式为：

$$w(t) = \begin{cases} u_{\max} & u \geq u_{\max} \\ u(t) & u_{\min} < u < u_{\max} \\ u_{\min} & u \leq u_{\min} \end{cases} \tag{22}$$

式中： u_{\max} 为饱和限幅器的最大值； u_{\min} 为饱和限幅器的最小值，对于一般电机控制系统，我们认为其抗饱和信号的变化是有界的，此时对于积分补偿系数是常数。

2.2 抗饱和控制器设计

由前面的分析可知，积分环节的引入使得控制器出现饱和和超调，针对此问题，条件积分法通过对限幅控制器的输入输出是否相等来判断是否停止和限制积分作用，它的最优控制方式为：

$$\dot{\eta} = \begin{cases} 0 & \text{if } u_s \neq u_n, u_n \cdot e > 0 \\ K_a e & \text{if } u_s = u_n \end{cases}$$

这种方法对一般的系统抗饱和简单有效，但是当系统参数变化时，控制器需要重新构造并且鲁棒性不好。

在开关磁阻电机直接瞬时转矩控制系统中，当转速越大时，对控制器的抗饱和要求就越高，为了提高系统的性能，在综合积分法的优缺点之上，提出一种抗饱和的自适应 PID 控制器，通过对控制器输入输出饱和误差 $u_n - u_s$ 进行积分，并且通过自适应系数调整将其加到 PID 控制器中的积分项中，自适应调整变化律为：

$$\dot{\eta} = \begin{cases} k_b(u_n - u_s), & \text{if } u_n \neq u_s, e(u_n - u_{av}) > 0 \\ e, & \text{if } u_n = u_s \end{cases}$$

式中： $u_{av} = (u_{\min} + u_{\max})/2$ ， k_b 为积分补偿系数， u_{\min} 、 u_{\max} 分别为输入信号的最小值和最大值。通过控制器的开关变化模式以及饱和和误差的反馈作用，使得控制器的输出可以保持在饱和和限幅区域附近，该控制器可以抑制饱和现象，系统稳定性及鲁棒性较好。所设计的抗饱和和自适应 PID 控制器结构如图 6 所示。

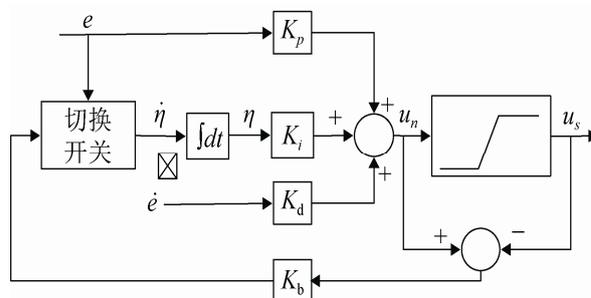


图 6 抗饱和和自适应 PID 结构图
Fig.6 Anti-windup adaptive PID structure

3 仿真与试验分析

3.1 系统仿真

通过前面的分析，我们找到了饱和的原因以及设计了抗饱和的控制器，为了验证所设计的抗饱和和控制器的有效性，我们在 matlab/simulink 下搭建了开关磁阻电机直接瞬时转矩控制系统的仿真模型，验证抗饱和控制器，仿真时的电机参数为：三相 6/4 极，额定功率 $P_n = 0.22 \text{ kW}$ ，额定电压

$U_n = 48 \text{ V}$, 额定转速 $N_n = 1500 \text{ r/min}$, 定子电阻 $R_s = 1.2 \Omega$, 转子电阻 $R_r = 0.8 \Omega$, 互感 $L_m = 0.53 \text{ H}$, 转动惯量 $J = 0.008 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 粘性摩擦系数 $D = 0.002 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$ 。整个搭建的开关磁阻电机直接瞬时转矩控制系统的抗饱和 PID 的结构图如图 7

所示, 其中 PID 的参数通过试验反复调整得: $K_p = 1.04$, $K_i = 10$, $K_d = 1$, 转矩输入限幅为 $\pm 30 \text{ N} \cdot \text{m}$, 电机给定转速为 $\omega = 500 \text{ r/min}$, 负载转矩为 $T_l = 10 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

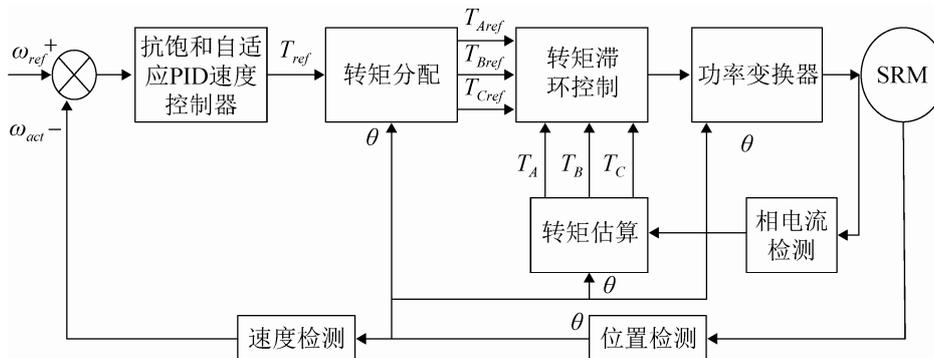


图 7 抗饱和和 PID 的开关磁阻电机直接瞬时转矩控制系统框图

Fig.7 Block diagram of direct instantaneous torque control system for switched reluctance motor with anti-windup PID

通过仿真我们得到如图 8 所示的电机转速图, 在使用条件积分法时会使电机的转速低于给定转速, 电机大概在 0.16 s 稳定, 电机达到稳定状态时间较长, 电机转速达不到给定的转速, 虽然可以退饱和, 但由此反而降低电机的转速, 论文使用的抗饱和和自适应方法不仅能够去饱和而且电机转速可以达到给定转速, 电机转速大概在 0.12 s 稳定, 电机达到稳定状态时间缩短了 25%, 稳定运行, 保持电机良好性能。

用条件积分法会使开关磁阻电机的转矩在退饱和时在 0.13 s 从 $30 \text{ N} \cdot \text{m}$ 直接变成 $11 \text{ N} \cdot \text{m}$, 产生阶跃变化, 从而引起电机较大的振动, 论文使用的方法能使电机转矩在 0.9 s 从 $30 \text{ N} \cdot \text{m}$ 逐渐平滑过渡到 $11 \text{ N} \cdot \text{m}$, 转矩变化较为平缓, 从而降低电机的振动。

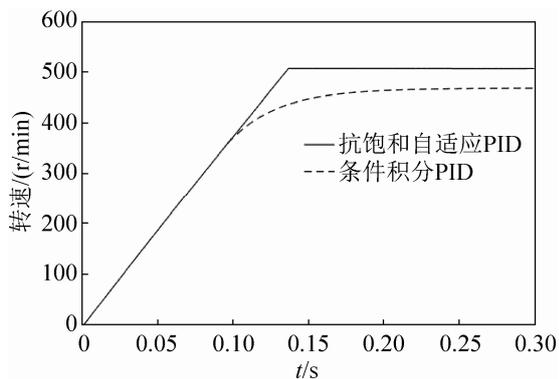


图 8 电机转速
Fig.8 Motor speed

仿真的电机转矩如图 9 所示, 虽然电机转矩在一段时间以后都到相同, 趋于稳定, 但是, 使

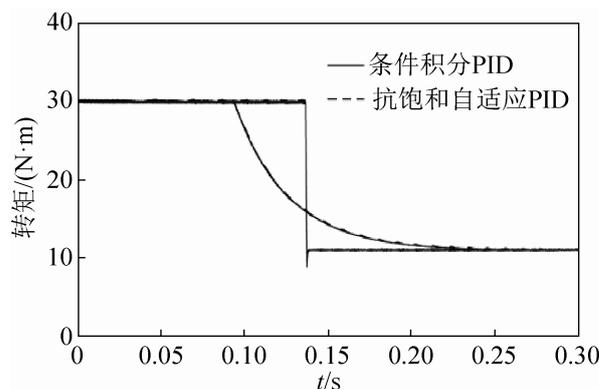


图 9 电机转矩
Fig.9 Motor torque

3.2 试验分析

为了验证仿真的有效性, 本系统搭建的试验硬件平台如图 10 所示, 系统控制芯片采用 TI 公司的 DSP28335, 功率板电路采用三相不对称电路, 功

率开关管采用 MOSFET 管, 选用 IRFP140 型号, 电压电流信号由霍尔传感器检测, 利用光电码盘测电机转速。试验时电机的参数与仿真时基本相同, 电机带负载启动, 电路主输入电源采用 305W/48V 开关电源, 编写程序, 反复试验。图 11 和图 12 为试验测试结果。

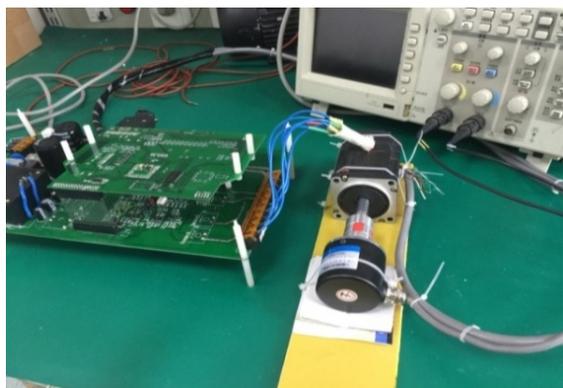


图 10 试验硬件平台
Fig.10 Test hardware platform

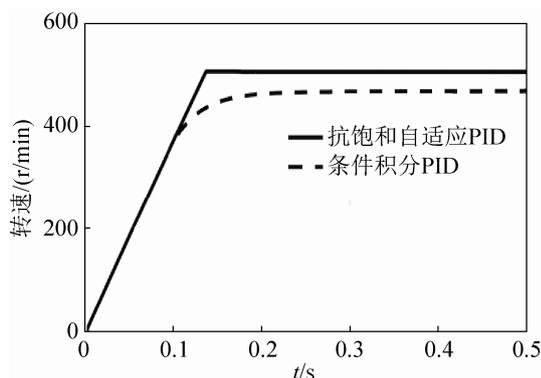


图 11 试验测得电机转速响应
Fig.11 Test the motor speed response

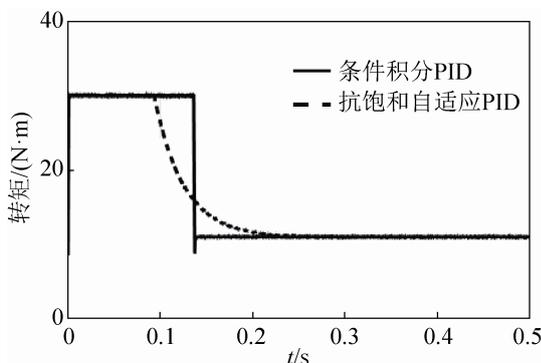


图 12 试验测得电机转矩
Fig.12 Test the motor torque

由试验结果发现条件积分法和抗饱和自适应法都能退饱和, 使用条件积分法的电机转速达到稳定状态的时间为 0.19 s, 电机转速低于给定转速, 使用抗饱和自适应方法的电机转速达到稳定状态的时间为 0.14 s, 时间缩短 26%, 电机转速可以达到给定转速并保持稳定, 使用条件积分法的电机转矩在 0.13 s 出现阶跃变化, 从而引起电机较大振动, 而使用抗饱和自适应方法的电机转矩依然保持平滑过渡, 减少电机振动, 试验测得结果与仿真效果基本相同。仿真和试验结果都表明, 抗饱和自适应 PID 方法可以有效抑制饱和现象, 减少饱和超调时间, 提高电机速度响应, 降低电机振动, 保持系统稳定性, 具有良好的鲁棒性。

4 结论

针对开关磁阻电机直接瞬时转矩控制系统的积分饱和问题, 分析其对控制系统的影响, 并从理论上分析控制系统出现饱和的原因, 针对条件积分法的缺点, 提出一种抗饱和自适应的策略, 文中阐述了该策略的原理与设计方法, 仿真和试验都表明该方法合理有效, 能够提高系统性能, 具有较好的稳定性和鲁棒性, 方便在工程中实现。

参考文献:

- [1] 王乃洲. 饱和非线性系统控制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014: 11-15.
Wang naizhou. Research on Saturation Nonlinear System Control[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014: 11-15.
- [2] 于艳君, 柴凤, 高宏伟, 等. 基于 Anti-Windup 控制器的永磁同步电机控制系统设计[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4):66-70.
Yu Yanjun, Cai Feng, Gao Hongwei, et al. Design of Permanent Magnet Synchronous Motor Control System Based on Anti-Windup Controller[J]. Journal of Electrotechnical Society (S1000-6753), 2009, 24(4): 66-70.
- [3] Tahoun A H. Anti-windup adaptive PID control design for a class of uncertain chaotic systems with input saturation[J]. ISA Transactions (S0019-0578), 2016, 10(2): 486-495.

(下转第 3175 页)