

基于变比例-退饱和式 PI 调节器的 开关磁阻电机调速系统设计*

魏子涵, 赵 咪, 谷贵志, 付昶鑫

(石河子大学 机械电气工程学院, 新疆 石河子 832003)

摘 要: 开关磁阻电机调速系统的积分饱和现象导致了系统的控制性能较差, 针对这一问题, 提出了变比例-退饱和式 PI 调节器设计方法, 并给出了调节器参数整定方法。此外, 分别在恒速空载和变速带载情况下, 利用 MATLAB/Simulink 软件验证了传统 PI 调节器、抗饱和式 PI 调节器和变比例-退饱和式 PI 调节器的控制性能。结果表明: 变比例-退饱和式 PI 调节器具有更好的动态性能和抗扰性能。

关键词: 开关磁阻电机; 积分饱和; 变比例-退饱和式 PI 调节器; 调速系统

中图分类号: TM 352 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)09-0016-06

doi: 10.12177/emca.2020.078

Speed Regulation System Design of SRM Based on Variable-Proportion-Desaturation PI Regulator*

WEI Zihan, ZHAO Mi, GU Guizhi, FU Changxin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract: In order to solve the integral saturation problem in speed regulating system of switched reluctance motor (SRM), which leads to the poor control performance, a design method of variable-proportion-desaturation PI regulator is proposed, and its related parameter setting method is given. By utilizing the MATLAB/Simulink tool, the PI regulator performance of the traditional method, the anti-saturation method and the variable-proportion-desaturation method are verified under the conditions of constant speed with no-load and variable speed with load, respectively. The results indicate that the variable-proportion-desaturation PI regulator has better dynamic performance and anti-disturbance performance.

Key words: switched reluctance motor (SRM); integral saturation; variable-proportion-desaturation PI regulator; speed regulation system

0 引 言

开关磁阻电机 (SRM) 结构简单、调速范围宽、可靠性强、大规模生产成本低^[1-2]。因此, 基于 SRM 的调速系统也在工业领域得以广泛应用^[3-5]。但由于 SRM 本体双凸结构和磁路的严重饱和, 以及传统 PI 调节器易出现积分饱和的问

题^[6-8], 使得传统 SRM 调速系统难以实现理想的调速性能^[9]。王歆^[10]等提出变速积分式 PI 调节器的改进措施来减小 SRM 调速系统积分饱和现象。秦晓飞^[11]等基于 SRM 直接瞬时转矩控制策略提出一种抗饱和和自适应的转速 PI 调节器的改进措施, 抵抗系统积分饱和效应。党选举^[12]等基于 SRM 直接瞬时转矩控制系统引入模糊分数阶

收稿日期: 2020-05-16; 收到修改稿日期: 2020-06-12

* 基金项目: 国家自然科学基金地区基金项目 (61563045)

作者简介: 魏子涵 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为控制理论与电机控制。

赵 咪 (1980—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为控制理论与控制工程。(通信作者)

PID 的改进措施,以消除系统积分饱和现象。目前,一些学者针对 SRM 出现的积分饱和现象主要从抗饱和的思路去抑制饱和效应,尚未使积分能及时退出饱和状态。因此,本文对积分饱和现象深度分析,提出了变比例-退饱和式 PI 调节器的改进策略,以消除 PI 调节器积分饱和现象的同时提高系统响应速度,优化调速系统动态及稳态性能指标。

1 SRM 调速系统总体方案设计

SRM 调速系统^[13]主要包括转速调节器、直接转矩控制(DTC)控制器、SRM 本体及位置检测模块。SRM 调速系统结构框图如图 1 所示。

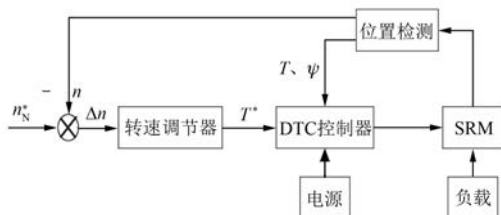


图 1 SRM 调速系统结构框图

其中,位置检测模块主要实现对 SRM 转速、转矩及磁链的检测。转速调节模块是调速系统的核心模块,主要实现对转速误差信号 Δn 的判断与处理,并产生系统参考转矩 T^* ,确保调速系统速度控制能力。DTC 控制器主要将速度调节器输出的转矩以及反馈的实际转矩和磁链信号进行处理,并产生触发信号驱动 SRM,确保系统转矩和磁链平稳变化^[14]。

2 转速调节器设计

2.1 转速 PI 调节器积分饱和现象

转速 PI 调节器是由比例调节和积分调节两部分线性拟合而成,同时兼具比例控制系统响应快和积分控制系统无静差的优点,满足控制规律:

$$u(t) = K_p e + K_i \int e dt \quad (1)$$

式中: K_p 为比例系数; K_i 为积分系数。

在实际应用中,若 PI 调节器积分累计时间过长将导致调节器输出值达到上限值并保持不变,该现象称为积分饱和现象。积分饱和现象将会导致调节器输入与输出不再满足调节器的控制规

律,系统超调较大。

为了削弱 SRM 调速系统积分饱和现象的影响,一些学者提出抗饱和式 PI 调节器的改进措施,通过判断转速偏差信号 Δn 的大小,对系统有选择性的施加积分环节。抗饱和式 PI 调节器通过 PI 与 P 的切换,在一定程度上可以提高系统控制能力,但并没有从源头消除积分饱和现象^[6-8]。

2.2 变比例-退饱和式转速 PI 调节器设计

为了使调速系统能彻底消除积分饱和现象的影响,本文提出一种基于退饱和式 PI 调节器的优化方法。当积分出现饱和(即 $e > \varphi$)时,退饱和式 PI 调节器通过引入反向补偿系数 γ ,使系统积分饱和时能迅速退饱和,调节器一直处于不饱和工作状态,从而能及时控制系统超调量,提高系统动态性能。

退饱和式 PI 调节器控制算法结构图如图 2 所示。

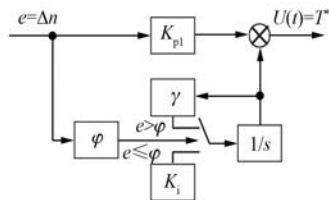


图 2 退饱和式 PI 调节器控制算法结构图

图 2 中, φ 为设定阈值,通常 $\varphi = (0.1 \sim 0.2)n_N^*$; K_{p1} 、 K_i 分别为退饱和比例系数、积分系数。

此外,为了提高 SRM 调速系统动态响应速度,本文对 PI 调节器 P 环节进行深度优化,提出变比例-退饱和式 PI 调节器的改进方法,使系统在能够及时消除积分饱和现象,减小系统超调量的同时,具有更快的响应速度。变比例-退饱和式 PI 调节器控制算法流程如图 3 所示。

其中, K_{p2} (K_{p1}) 为变比例-退饱和式基本比例系数, K_{p3} 为增强比例系数,本文选取 $K_{p3} = 10K_{p2}$ 。

根据图 3 可知,当转速偏差信号 e 超过设定阈值 c (通常 $c > \varphi$) 时,调节器在保证系统稳态性能的同时,可以通过比例系数的改变,控制系统动态响应时间。具体控制规律如下:

(1) 调节器未饱和状态。即当 $e > c$ 时,调节器为传统 PI 控制方式,比例系数为基本系数 K_{p2} ,调节器输出 $u(t) = K_{p2}e + K_i \int e dt$ 。

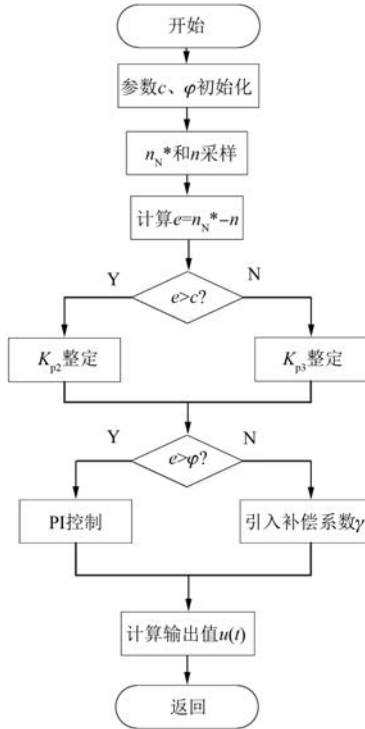


图3 变比例-退饱和式PI调节器控制算法流程

(2) 调节器临界饱和状态。即当 $\varphi < e \leq c$ 时, 调节器仍为传统PI控制方式, 但积分即将饱和, 为了更好地提高系统动态相应性能, 比例调节作用在此阶段开始加强, 比例系数为 K_{p3} , 调节器输出为 $u(t) = K_{p3}e + K_i \int edt$ 。

(3) 调节器饱和状态。即当 $e \leq \varphi$ 时, 调节器引入退饱和补偿系数 γ , 同时为了改善退饱和和补偿系数 γ 对系统动态响应性能的影响, 比例调节作用持续加强, 比例系数为 K_{p3} , 调节器输出 $u(t) = K_{p3}e + \gamma K_i \int edt$ 。

根据控制规律可得变比例-退饱和PI调节器通用计算式为

$$u(t) = \rho(K_{p3} - K_{p2})e + K_{p2}e + \gamma K_i \int edt \quad (2)$$

式中: ρ 为选择系数, 若 $e > c$ 时, 则 $\rho = 0$, 否则 $\rho = 1$ 。

综上, 变比例-退饱和式PI调节器通过比例选择系数 ρ 和饱和补偿系数 γ 的引入, 使调节器在积分饱和现象发生前能提前增强比例控制效果, 提高调节器响应速度; 饱和现象发生时能及时使系统退饱和, 减小系统稳态偏差, 该调节器能够

同时满足了系统动态性能及稳态性能的要求。

2.3 变比例-退饱和式PI调节器参数整定

忽略磁滞损耗、涡流损耗以及电机绕组间的耦合关系, 从能量转化角度看: 输入SRM系统的能量在其内部转化后主要通过动能及内部储能两部分消耗。输入能量 W_i 、内部储能能量 $W_{f_{\text{储}}}$ 和动能 W_0 的关系式为

$$W_0 = W_i - W_{f_{\text{储}}} = \int T_e d\theta = \int L(\theta, i) di \quad (3)$$

式中: T_e 为电机转矩; L 为绕组电感; i 为绕组相电流。

根据式(3)可知, 当电流给定及电感等效为线性模型时^[16-17], 转矩转化为关于位置角的单变量函数。电感等效模型及转矩简化模型为

$$\begin{cases} L(\theta) = \psi_m [a + b \sin(N_r \theta)] \\ T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} = \frac{1}{2} i^2 [b N_r \psi_m \cos(N_r \theta)] \end{cases} \quad (4)$$

式中: θ 为位置角; ψ_m 为磁链饱和值; a 、 b 为待定系数(由电机参数方程联立求出); N_r 为转子极数。

忽略系统黏滞系数, 根据SRM系统的输入输出关系, 可得其运动方程:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - T_L) = \frac{1}{J} \left\{ \frac{1}{2} i^2 [b N_r \psi_m \cos(N_r \theta)] - T_L \right\} \quad (5)$$

式中: ω 为电机旋转角速度; J 为转动惯量; T_L 为负载转矩。

根据电系统满足的KVL方程及磁链与位置角及电流的关系可得SRM电压方程:

$$u - iR_s = L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (6)$$

式中: u 为直流电压; R_s 为定子电阻。

将式(4)与式(6)结合可得单相绕组电流与时间的关系:

$$\frac{di}{dt} = \frac{u - Ri - i\omega b N_r \psi_m \cos(N_r \theta)}{\psi_m [a + b \sin(N_r \theta)]} \quad (7)$$

当转速恒定时, 式(7)简化为

$$i = \frac{u}{\omega b N_r \psi_m \frac{\int_0^T \cos(N_r \theta) dt}{T}} \quad (8)$$

将式(8)代入式(5)得:

3.1 调速系统恒速空载状态仿真分析

当调速系统恒速空载,且按表 2 进行参数配置时,可得 3 种 PI 调节器转速控制效果波形如图 5 所示。稳态值放大波形如图 6 所示。

表 2 3 种 PI 调节器参数配置表

n_N^* ($r \cdot \min^{-1}$)	γ	$K_{p1}(K_{p2})$	K_{p3}	K_i	c	φ
1 000	-2	0.1	1	0.1	230	100

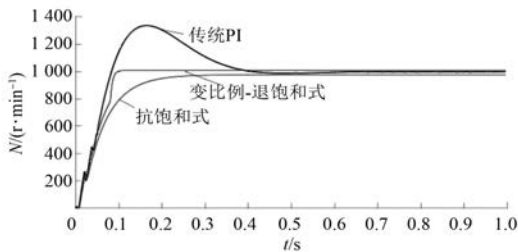


图 5 恒速空载时 3 种 PI 调节器转速控制效果波形

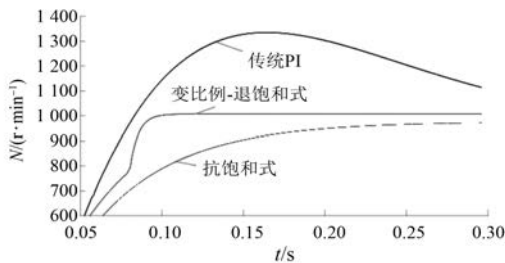


图 6 恒速空载时 3 种 PI 调节器稳态值放大波形

根据调速系统仿真结果,可得 3 种 PI 调节器在恒速空载下的性能指标如表 3 所示。

表 3 3 种 PI 调节器恒速空载下性能指标

调节器	上升时间 t_r/s	峰值时间 t_p/s	调节时间 t_s/s ($\Delta=5\%$)	超调量 $\delta/\%$	稳态误差 $\Delta H/$ ($r \cdot \min^{-1}$)
传统 PI	0.080	0.160	0.350	38	0
抗饱和式	0.525	0.525	0.203	0	24
变比例-退饱和式	0.100	0.100	0.095	0	0

根据表 3 可知,传统 PI 调节器虽然能够最终达到稳态,但积分饱和现象会导致系统调节时间较长,且超调量较大。而抗饱和式 PI 调节器能够在一定程度上抵抗饱和现象,系统超调有所减小,但当饱和现象过于严重时,系统响应变慢且存在一定的误差。而变比例-退饱和式 PI 调节器在确保调速系统稳态性能的前提下,响应快速且无超

调,更好地实现系统的无差调速。

3.2 调速系统变速带载状态仿真分析

当系统无外界扰动,系统转速恒定且空载时,系统仿真已验证变比例-退饱和式 PI 调节器的优越性。但实际系统中往往转速不恒定且带负载运行,因此当调速系统按表 2 配置参数,但在 $t = 0.6\text{ s}$ 时转速由 $1\ 000\text{ r/min}$ 突变至 $1\ 200\text{ r/min}$, $t = 1\text{ s}$ 时负载由 0 突变至 $10\text{ N} \cdot \text{m}$ 对 3 种调节器控制性能进行仿真验证,得到 3 种 PI 调节器转速控制效果波形如图 7 所示。转速突变瞬间 3 种调节器控制效果放大波形如图 8 所示。负载突变瞬间 3 种调节器控制效果放大波形如图 9 所示。根据调速系统仿真结果,得到 3 种 PI 调节器在变转速和变负载时的性能指标分别如表 4 和表 5 所示。

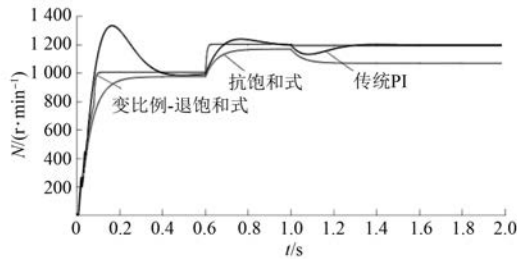


图 7 变速变载时 3 种 PI 调节器转速控制波形

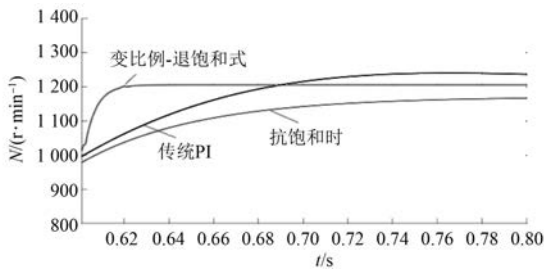


图 8 变转速时 3 种 PI 调节器转速控制效果放大波形

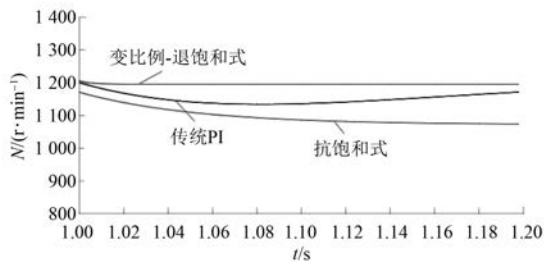


图 9 变负载时 3 种 PI 调节器转速控制效果放大波形

表 4 3 种 PI 调节器变速性能指标

控制类型	上升时间 t_r/s	峰值时间 t_p/s	调节时间 t_s/s ($\Delta=5\%$)	超调量 $\delta/\%$	稳态误差 $\Delta H/(r\cdot\min^{-1})$
传统 PI	0.688	0.750	0.650	3.3	0
抗饱和式	0.935	0.935	0.695	0	29
变比例-退饱和式	0.620	0.620	0.608	0	0

表 5 3 种 PI 调节器带载性能指标

控制类型	传统 PI	抗饱和式	变比例-退饱和式
动态降落 $\Delta C_{max}/(r\cdot\min^{-1})$	65	99	5
恢复时间 t_r/s ($\Delta=5\%$)	1.21	>2	1

变速变载时基于变比例-退饱和式 PI 调节器的调速系统内环转矩、磁链和电流控制效果波形如图 10 所示。

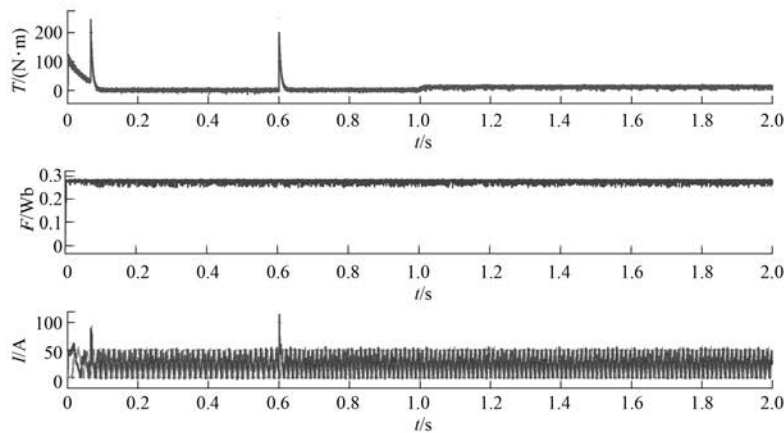


图 10 调速系统转矩、磁链和电流控制效果波形

根据上述仿真结果可知,基于变比例-退饱和式 PI 调节器的调速系统能将转矩、磁链和电流稳定控制在额定范围内,此外与其他 2 种调节器相比,当系统转速突变时,变比例-退饱和式 PI 调节器能瞬间跟踪到新的稳态值,其他 2 种调节器需要一定调节时间才能达到新的稳态值。当系统负载突变时,变比例-退饱和式 PI 调节器动态降落和恢复时间远远小于其他 2 种调节器,具有较强的抗负载扰动的能力。因此,变比例-退饱和式 PI 调节器具有更好地跟随性和抗扰性。

4 结 语

本文基于变比例-退饱和式控制策略设计了 SRM 的速度 PI 调节器。与传统 PI 调节器和抗饱和式 PI 调节器相比,在确保调速系统内环转矩、磁链和电流准确控制的基础上,变比例-退饱和式 PI 调节器减小了系统超调量和稳态误差,同时提高了系统响应速度。此外,变比例-退饱和式 PI 调节器提高了调速系统转速突变时的控制能力和抗负载扰动能力。

【参 考 文 献】

[1] 吴红星. 开关磁阻电机系统理论与控制技术[M]. 北京:中国电力出版社,2010.

[2] 王刚,程勇. 开关磁阻电机调速系统综述[J]. 工业仪表与自动化装置,2014(4): 16.

[3] SUN Q, WU J, GAN C, et al. Cascaded multiport converter for SRM-based hybrid electrical vehicle applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2019,4(12): 11940.

[4] SASIDHARAN S, ISHA T B. Geometric modification of a switched reluctance motor for minimization of torque ripple using finite element analysis for electric vehicle application[J]. Journal of Engineering Science and Technology Review,2019,12(2): 81.

[5] 蔡骏,向程,刘泽远,等. 低压电动车开关磁阻电机隔离驱动技术[J]. 电机与控制应用,2019,46(2): 109.

[6] 王慎航,王云宽,胡建华,等. 基于干扰抑制和非线性摩擦力补偿的速度环 PI 控制器抗饱和设计[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015,46(9): 3224.

(下转第 65 页)