

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2019.02.006

电动汽车 PMSM MTPA 控制系统 抗积分饱和和速度控制

于雪峰, 谭会生, 胡云飞, 李成伟

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 电动汽车电机驱动系统大多采用传统 PI 控制, 存在积分饱和现象, 系统易产生超调和振荡问题, 因此将抗积分饱和控制策略引入永磁同步电机最大转矩电流比控制调速系统中, 以提升系统的稳定性。采用反馈算法求解转矩电流高次方程, 解决了高次方程求解困难的问题, 实现了最大转矩电流比控制; 速度环和电流环均采用抗积分饱和 PI 控制, 有效地抑制了积分饱和, 减小了系统的超调量, 提高了电机控制精度。基于 Matlab/Simulink 搭建了系统模型并进行仿真, 仿真结果表明, 所设计的系统有效地抑制了积分饱和现象, 减少了速度的超调, 具有良好的动态和稳态性能, 可以较好地满足电动汽车电机驱动系统的要求。

关键词: 永磁同步电机; 抗积分饱和控制; 最大转矩电流比控制; Matlab; 电动汽车

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2019)02-0032-06

引用格式: 于雪峰, 谭会生, 胡云飞, 等. 电动汽车 PMSM MTPA 控制系统抗积分饱和和速度控制 [J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(2): 32-37.

An Anti-Windup Saturation Velocity Control of PMSM MTPA Control System for Electric Vehicles

YU Xuefeng, TAN Huisheng, HU Yunfei, LI Chengwei

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: The integral saturation found in the traditional PI control, which is mostly used in the motor drive system of electric vehicles, results in a liability of the system to overshoot and oscillation. Therefore, the anti-integral saturation control strategy has been introduced into the maximum torque-current ratio control speed regulation system of permanent magnet synchronous motor (PMSM) to improve the stability of the system. The feedback algorithm is adopted to solve the higher degree torque-current equation, which helps to solve the problem of solving the high-order equation and realizes the maximum control of the torque-current ratio. Both the speed loop and current loop adopt the anti-windup PI control, which effectively restrains the integral saturation, thus reducing the overshoot of the system, and improving the motor control accuracy. A system model has been built and simulated based on Matlab/Simulink, with simulation results verifying the efficiency of the designed system in suppressing the integral saturation. With a good dynamic and steady performance, it helps to reduce the overshoot of speed, thus meeting the requirements of electric vehicle motor drive systems very well.

收稿日期: 2018-05-11

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2016JJ6036)

作者简介: 于雪峰 (1993-), 男, 江苏盐城人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电动汽车电机调速, E-mail: 980436856@qq.com

通信作者: 谭会生 (1966-), 男, 湖南茶陵人, 湖南工业大学教授, 硕士生导师, 主要从事 EDA 技术, VLSI 数字信号处理, 嵌入式系统和电力电子技术方面的教学与研究, E-mail: huisheng21nd@163.com

Keywords: permanent magnet synchronous motor; anti-windup controller; maximum torque per ampere control; Matlab; electric vehicle

1 研究背景

永磁同步电机 (permanent magnet synchronous motor, PMSM) 以其效率高、功率密度大、转动惯量小、过载能力强等优点,在电动汽车电机驱动系统中得到了广泛的应用^[1]。在电动汽车电机驱动系统中,基速以下采用最大转矩电流比 (maximum torque per ampere, MTPA) 控制方式,可以充分利用电机磁阻转矩,提高电机单位电流的转矩输出能力和车辆的动力,使车辆在起步、加速、上下坡、频繁起停等复杂工况下稳定运行;同时,电动汽车的逆变器容量有限,采用最大转矩电流比控制,可减小输入的定子电流,从而增加续航里程,提高电机驱动系统运行效率^[2]。

近年来,大量学者对最大转矩电流比控制进行了研究^[3-5]。如文献[3]通过极值原理,推导出转矩与 d 、 q 轴电流之间的关系式,并给出了一种将转矩与 d 、 q 轴电流关系式线性化的工程近似求解方法,该方法实现简单,有利于工程实践,但是控制精度较低。文献[4]采用有限元法对 d 、 q 轴电感与电流进行拟合,该方法提高了转矩控制精度,但是计算过程较为复杂。文献[5]提出了一种将直接计算法和扰动观察法相结合的最大转矩电流比控制方法,该方法提高了系统的动态和稳态性能,鲁棒性较高,但不仅求解过程较为复杂而且运算时间较长。但若利用反馈算法求解转矩电流的高次方程,不仅可使高次方程求解简单化,实现最大转矩的电流比控制,而且该方法实现简单,便于工程应用。

传统的 PMSM MTPA 控制系统,其速度和电流调节器一般采用 PI 控制,为了避免永磁同步电机因电流过大而损坏,必须限制 PI 控制器的输出。但 PI 控制器不断地积累误差,会导致系统超调量变大、调节时间变长、稳定性变差,这类现象称之为饱和 (windup) 现象。为了减少饱和现象对系统性能的影响,有效解决其导致系统产生超调、转矩波动大、抗干扰能力差等问题,本文以电动汽车应用的 PMSM 为研究对象,将抗积分饱和控制策略引入永磁同步电机最大转矩电流比控制调速系统中,设计了一种抗积分饱和 (anti-windup) PI 控制器,对电机的速度环和电流环进行控制。并基于 Matlab/Simulink 搭建了系统模型且进行了系统仿真,仿真结果表明,该控制器可以有效地抑制积分饱和现象,缩短系统的稳定时间,减小系统的超调量,从而提高系统的稳定性,

可以满足电动汽车电机驱动系统的要求。

2 永磁同步电机数学模型

在建立 PMSM 的数学模型时,为了简化分析,常作以下假设^[6]:

- 1) 忽略磁饱和效应;
- 2) 不计涡流和磁滞损耗;
- 3) 转子上没有阻尼绕组;
- 4) 感应电动势波形为正弦波。

基于以上假设,可得同步旋转坐标系 d 、 q 轴下的 PMSM 的数学模型,其电压方程为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + \frac{d}{dt}\psi_d - \omega_e\psi_q, \\ u_q = Ri_q + \frac{d}{dt}\psi_q + \omega_e\psi_d; \end{cases} \quad (1)$$

定子磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f, \\ \psi_q = L_q i_q; \end{cases} \quad (2)$$

转矩方程为

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

运动方程为

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

式(1)~(4)中:

- u_d 、 u_q 分别为定子电压 d 、 q 轴分量;
- i_d 、 i_q 分别为定子电流 d 、 q 轴分量;
- R 为定子电阻;
- ψ_d 、 ψ_q 分别为定子磁链的 d 、 q 轴分量;
- ω_e 为电角速度;
- L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴电感分量;
- ψ_f 为永磁体磁链;
- p_n 为极对数;
- T_e 、 T_L 分别为电磁转矩、负载转矩;
- J 为转动惯量;
- B 为阻尼系数。

由式(3)可以看出,PMSM 的输出转矩由两部分构成:第一部分为永磁体产生的转矩,第二部分为转子不对称产生的磁阻转矩。对于 PMSM 来说, $L_q \neq L_d$,传统的 $i_d=0$ 控制只要控制 q 轴电流大小,即可改变电机的输出转矩,虽然控制简单,但因忽略了磁阻转矩,磁阻转矩利用率较低。在电动汽车电机驱

动系统中, 采用 MTPA 控制, 不但可以充分利用磁阻转矩, 还可以降低电机的损耗, 最大程度地提升系统性能。

3 最大转矩电流比控制

PMSM 的电磁转矩由永磁转矩和磁阻转矩构成, 通过合理控制 d 、 q 轴电流的大小, 可以得到一个最大的电磁转矩。MTPA 控制策略就是使电机在转矩给定情况下定子电流最小, 以减小电机损耗^[7-8]。最大转矩电流比实现框图如图 1 所示。

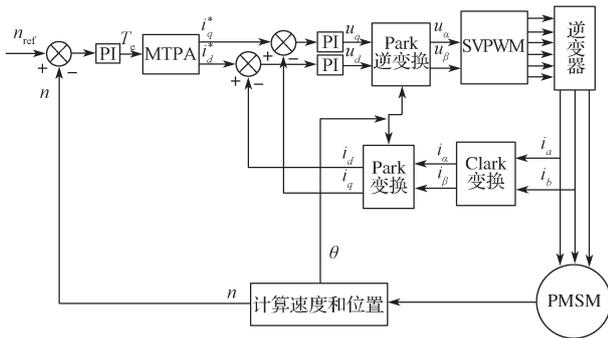


图 1 PMSM MTPA 控制结构框图

Fig. 1 PMSM MTPA control block diagram

设 γ 为电枢电流空间矢量与直轴位置的相位角, 可以得到

$$\begin{cases} i_d = i_s \cos \gamma, \\ i_q = i_s \sin \gamma; \end{cases} \quad (5)$$

式中 i_s 为定子电流幅值。

将式 (5) 代入式 (3), 可得到如下电磁转矩表达式:

$$T_e = \frac{3}{2} p_n \psi_f i_s \sin \gamma + \frac{3}{4} p_n (L_d - L_q) i_s^2 \sin 2\gamma. \quad (6)$$

最大转矩电流比控制即控制单位电流比下电磁转矩最大, 故可将式 (6) 改写为

$$f(\gamma) = \frac{T_e}{i_s} = \frac{3}{2} p_n \psi_f \sin \gamma + \frac{3}{4} p_n (L_d - L_q) i_s \sin 2\gamma. \quad (7)$$

假设电流 i_s 值不变, 单位电流电磁转矩取最大值时 $\frac{\partial f(\gamma)}{\partial \gamma} = 0$, 可得到

$$\cos \gamma = \frac{-\psi_f + \sqrt{\psi_f^2 + 8(L_d - L_q)^2 i_s^2}}{4(L_d - L_q) i_s}. \quad (8)$$

将式 (8) 代入式 (5), 可得到

$$i_d = \frac{-\psi_f + \sqrt{\psi_f^2 + 8(L_d - L_q)^2 i_s^2}}{4(L_d - L_q)}. \quad (9)$$

反馈算法的关键在于转矩 T_e 与交 / 直轴电流 i_q 、 i_d 关系的实现, 但必须反解出以 T_e 作为自变量, i_q 、

i_d 作为因变量的函数关系。

根据 i_d 和 i_q 的关系, 可得到:

$$i_d = \frac{-\psi_f + \sqrt{\psi_f^2 + 8(L_d - L_q)^2 i_q^2}}{2(L_d - L_q)}. \quad (10)$$

将式 (10) 代入式 (3), 可得到电磁转矩 T_e 与交轴电流 i_q 的关系式:

$$T_e = \frac{3}{4} p_n i_q \left[\sqrt{\psi_f^2 + 4(L_d - L_q)^2 i_q^2} + \psi_f \right]. \quad (11)$$

将式 (11) 中的电磁转矩 T_e 表示成 i_q 的一元四次方程:

$$\begin{aligned} \left(\frac{4T_e}{3p_n i_q} - \psi_f \right)^2 &= \psi_f^2 + 4(L_d - L_q)^2 i_q^2 \Rightarrow \\ 4(L_d - L_q)^2 i_q^4 + \frac{8T_e \psi_f}{3p_n} i_q - \frac{16T_e^2}{9p_n^2} &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

式 (12) 反解出了以电磁转矩 T_e 为自变量表示交轴电流 i_q 的关系式。在此采用反馈的思想来解决一元四次方程求解困难的问题, 根据式 (10) 和式 (12), 搭建了一个利用 i_q 的反馈得到 i_d 、 i_q 与 T_e 的表达式, 将 i_q 输出端引入前端, 构成了转矩 T_e 到 i_d 、 i_q 的通路 (如图 2 所示), 这样就可以确定最大转矩电流比中电磁转矩与交 / 直轴电流之间的关系。

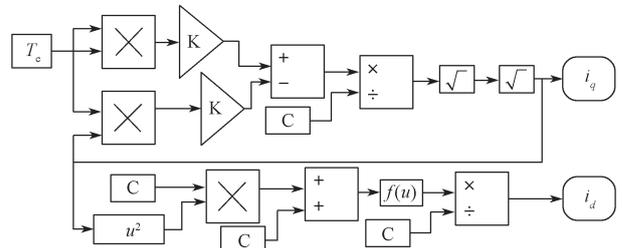


图 2 基于 i_q 反馈计算的 MTPA 控制框图

Fig. 2 MTPA control block diagram based on i_q feedback calculations

传统 MTPA 算法求解转矩电流高次方程, 通常采用最优化求解近似解或曲线拟合法, 计算较为繁琐, 控制精度较低, 对系统的实时运算能力要求较高, 使得系统变得更为复杂, 而采用反馈算法, 解决了传统转矩电流高次方程求解困难的问题, 计算量较小, 并且系统可以得到精度较高的控制曲线。同时, 采用反馈算法的 MTPA 系统, 无需对系统进行辨识, 只需要知道电机的交直流电感和励磁常数, 就可以实时进行 MTPA 控制。

4 抗积分饱和和 PI 控制器设计

传统的 PI 控制算法是按照经典控制理论设计的, 忽略了现实中存在的饱和和非线性问题, 从而出现 windup 现象^[9-11]。饱和和非线性问题严重影响了系统

的性能,但在测试系统的过程中,设计者通常以小信号进行测试,从而易忽视它的存在。对于 PMSM 来说,电机频繁起停、突加负载、加速或者减速,都容易使系统进入饱和状态,从而导致电机的性能恶化,无法达到系统设计时的需求。为了提高系统的动态性能,引入 anti-windup 技术抑制控制器的 windup 现象,使控制器快速地从非线性工作区过渡到线性工作区,保持系统的最佳性能。

抗饱和控制主要有条件积分法和反计算法。条件积分法从积分环节中的 windup 现象本质入手,直接明了,易于实现,但通用性较差,参数选取固定,难以移植。反计算法通过反馈计算消除限幅引起的误差,结构简单,工程实用性较强,但存在滞后性,不利于电机的宽调速。

为了充分利用两种方法的优点,克服它们的不足,本文设计了一种将条件积分法和反计算方法相结合的抗积分饱和速度控制器,其控制框图如图 3 所示。控制器的积分项系数 η 由式 (13) 决定。

$$\eta = \begin{cases} k_i e - k_c (u_n - u_s), & u_n \neq u_s \text{ 且 } e(u_n - \bar{u}) > 0; \\ k_i e, & u_n = u_s \end{cases} \quad (13)$$

式 (13) 中: e 为输入的偏差;

k_c 为积分反馈增益系数,且 $k_c > 0$;

k_i 为积分系数;

u_n 、 u_s 分别为积分饱和限幅前和限幅后的值;

$\bar{u} = (u_{\max} + u_{\min}) / 2$, 其中 u_{\max} 、 u_{\min} 分别为积分饱和限幅的上下限值。

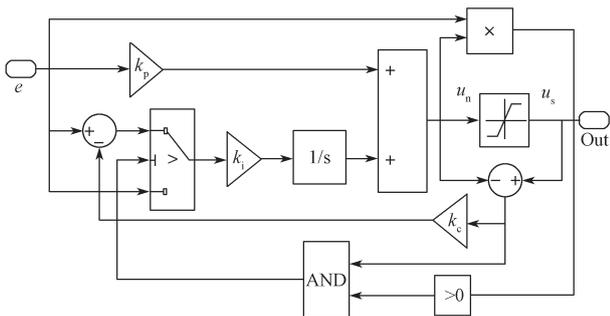


图 3 抗积分饱和速度控制器

Fig. 3 Anti-Windup speed controller

电流环控制器所采用的抗饱和设计算法与速度控制器具有相同的结构,故在此不再赘述。

5 仿真结果与分析

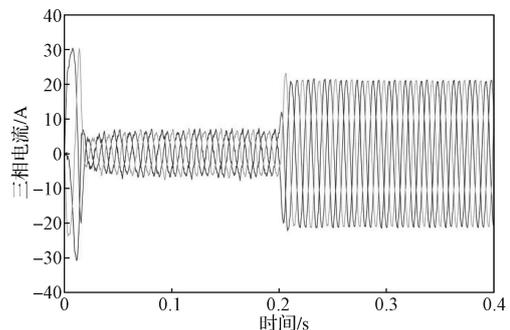
根据图 1 所示的系统框图,用抗积分饱和 PI 控制器代替系统中速度环和电流环中的 PI 控制器,在 Matlab 中建立了系统仿真模型。仿真所用的 PMSM 主要技术参数如表 1 所示。

表 1 PMSM 主要参数

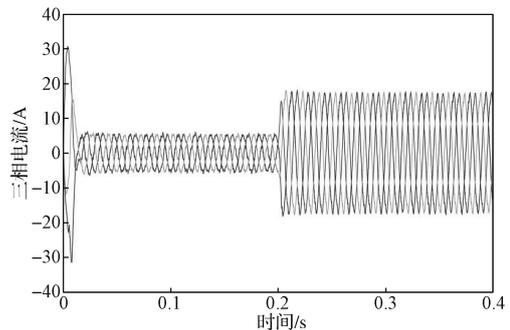
Table 1 Main technical parameters of PMSM

参数名称	参数值
极对数 p	2
定子电阻 / Ω	0.958
d 轴电感 /mH	0.005 25
q 轴电感 /mH	0.012
永磁体磁链 /Wb	0.182 7
转动惯量 / ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	0.008

仿真条件设置如下:直流侧电压 $U_{dc}=311\text{ V}$;参考转速 $n_{\text{ref}}=1\ 000\text{ r/min}$;初始时刻负载转矩 $T_L=5\text{ N}\cdot\text{m}$;在 $t=0.2\text{ s}$ 时,负载转矩 $T_L=20\text{ N}\cdot\text{m}$ 。仿真时间为 0.4 s 时得到的系统仿真结果如图 4~7 所示。



a) $i_d=0$ 控制

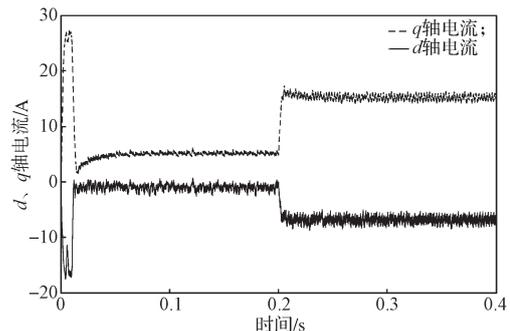


b) MTPA 控制

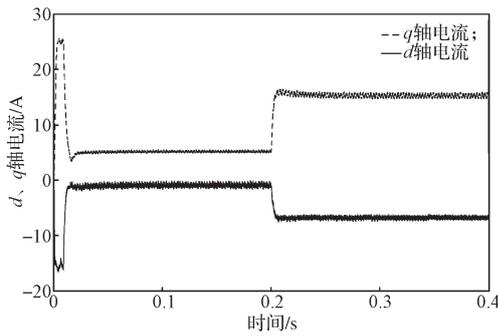
图 4 两种控制方法下的定子电流变化曲线

Fig. 4 Current variation curves under two control methods

从图 4 所示的定子三相电流变化曲线可以看出,在相同的电磁转矩下,MTPA 控制下的定子三相电流幅值均比 $i_d=0$ 控制的要小。可见,采用 MTPA 控制,可以减小输入的定子电流,从而可以减少电机损耗,提高系统运行效率,改善系统的性能。



a) PI 控制

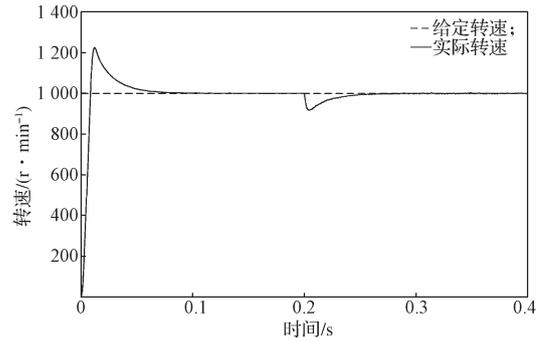


b) 抗积分饱和 PI 控制

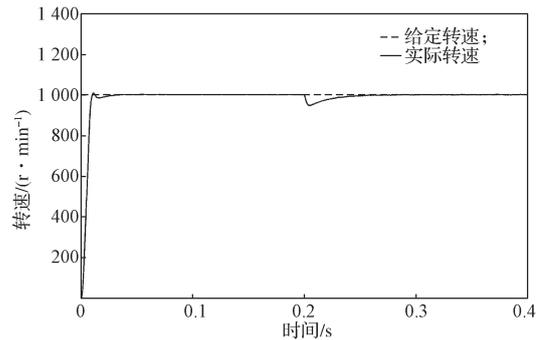
图 5 两种控制方法下的 d 、 q 轴电流变化曲线

Fig. 5 Current variation curves of dq axis under two control methods

从图 5 所示的 d 、 q 轴电流变化曲线可以看出，采用抗积分饱和 PI 控制的 d 、 q 轴电流较传统 PI 控制的脉动更小，稳定性更强。



a) PI 控制



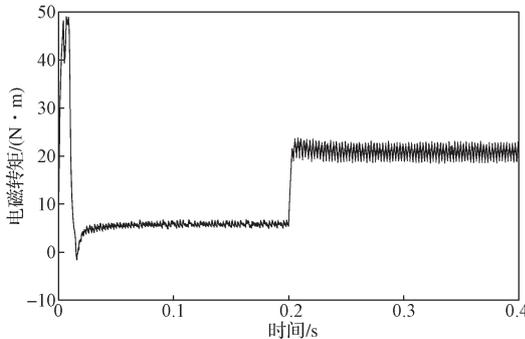
b) 抗积分饱和 PI 控制

图 7 两种控制方法下的转速变化曲线

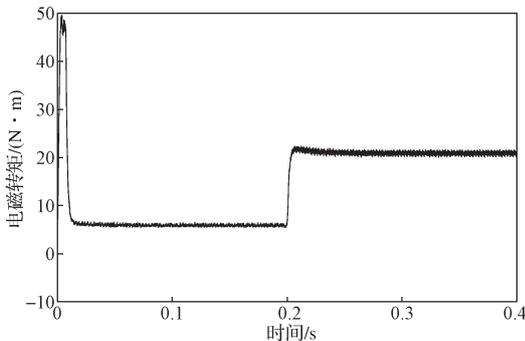
Fig. 7 Curves of speed under two control methods

从图 7 所示的转速变化曲线可以看出，当电机转速从 0 上升至 1 000 r/min 时，采用抗积分饱和 PI 控制器的转速响应速度较快，超调量较小，而采用传统 PI 控制的转速超调量较大，且达到给定转速的时间比较长。在 $t=0.2$ s 时，负载转矩增加到 20 N·m，采用抗积分饱和控制的转速偏差较小，而且恢复到给定转速的时间也相比于传统 PI 控制的短。

综合以上分析，相较传统 PI 控制系统，采用抗积分饱和 PI 控制的最大转矩电流比控制系统，其动态响应更快，抗干扰能力更强，稳定性更高。



a) PI 控制



b) 抗积分饱和 PI 控制

图 6 两种控制方法下的电磁转矩曲线

Fig. 6 Electromagnetic torque curves under two control methods

对比图 6 所示两种控制方法下的电磁转矩曲线可以看出，当仿真开始时，初始负载转矩为 5 N·m，采用抗积分饱和 PI 控制的电机转矩运行得比较平稳，脉动相对较小。在 $t=0.2$ s 时，负载转矩增加到 20 N·m，采用抗积分饱和 PI 控制的电机转矩较传统 PI 控制的脉动更小，稳定性更强。可见，该控制方法可以明显降低电动汽车运行时永磁同步电机振动产生的噪声。

6 结论

为了满足电动汽车电机驱动系统高转矩和高抗干扰性等要求，同时抑制传统 PI 控制产生的积分饱和和现象，将抗积分饱和策略引入永磁同步电机最大转矩电流比控制系统中，研究表明：

1) 系统采用反馈算法求解转矩电流高次方程，解决了高次方程难以求解的问题，且可实时解算出电磁转矩与交/直轴电流之间的关系，该方法实现简单，便于工程应用。

2) 速度环和电流环均采用抗积分饱和 PI 控制，该控制方法结构简单，能有效抑制积分饱和现象，减小转速超调，具有更好的调速效果和更快的动态响应

速度。

3) 仿真结果验证了该系统的可行性和优越性, 可以满足电动汽车电机驱动系统的要求。

参考文献:

- [1] 康劲松, 张亚洲. 电动汽车 IPMSM 单电流调节器弱磁控制技术 [J]. 电源学报, 2014, 12(4): 41-46.
KANG Jinsong, ZHANG Yazhou. Flux-Weakening Control Based on Single Current Regulator for IPMSM of Electric Vehicle[J]. Journal of Power Supply, 2014, 12(4): 41-46.
- [2] 李星星, 邓福军. 永磁同步电动机矢量控制研究 [J]. 大连交通大学学报, 2015, 36(4): 97-100.
LI Xingxing, DENG Fujun. Research on Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2015, 36(4): 97-100.
- [3] 田以涛, 王英. 基于最大转矩电流比的永磁同步电动机矢量控制 [J]. 电机与控制应用, 2013, 40(5): 25-28, 58.
TIAN Yitao, WANG Ying. Vector Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Maximum Torque Per Ampere[J]. Electric Machines & Control Application, 2013, 40(5): 25-28, 58.
- [4] 李旭东, 王硕, 康劲松. 计及磁饱和的车用永磁同步电机 MTPA 控制技术 [J]. 电源学报, 2017, 15(2): 94-100.
LI Xudong, WANG Shuo, KANG Jinsong. MTPA Control Technology of Permanent Magnet Synchronous Motor Used in Electric Vehicle Considering Magnetic Saturation[J]. Journal of Power Supply, 2017, 15(2): 94-100.
- [5] 陈吉, 商红桃, 王剑锋. 一种改进的永磁同步电机最大转矩电流比控制方法 [J]. 微特电机, 2016, 44(12): 53-57.
CHEN Ji, SHANG Hongtao, WANG Jianfeng. An Improved Maximum Torque per Ampere Control Method for Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Small & Special Electrical Machines, 2016, 44(12): 53-57.
- [6] 袁登科, 陶生桂. 交流永磁电机变频调速系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 31-34.
YUAN Dengke, TAO Shenggui. AC Permanent Magnet Motor Variable Frequency Speed Control System[M]. Beijing: Machine Industry Press, 2011: 31-34.
- [7] 陈起旭, 王庆元, 徐俊, 等. 电动汽车用内置式 PMSM 的 MTPA 控制算法对比研究 [J]. 微电机, 2017, 50(4): 32-35, 42.
CHEN Qixu, WANG Qingyuan, XU Jun, et al. Comparative Research of MTPA Control for Interior PMSM Used in Electric Vehicles[J]. Micromotors, 2017, 50(4): 32-35, 42.
- [8] 张凯, 秦斌, 王欣, 等. 基于电压前馈解耦的地铁永磁同步电机矢量控制研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2016, 30(5): 22-26.
ZHANG Kai, QIN Bin, WANG Xin, et al. Research on Vector Control of Metro Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Voltage Feed-Forward Decoupling[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2016, 30(5): 22-26.
- [9] 李启蒙. 基于新型抗积分饱和控制器的感应电机直接转矩控制系统的仿真研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2014.
LI Qimeng. Simulation of Induction Motor DTC System Using the New Anti-Windup Controller[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2014.
- [10] 王磊. 基于抗积分饱和和 PID 算法的地暖控制方法研究 [J]. 电子设计工程, 2017, 25(4): 181-184.
WANG Lei. Research of Controlling Radiant Floor Heating Based on PID Algorithm of Anti-Integral Saturation[J]. Electronic Design Engineering, 2017, 25(4): 181-184.
- [11] 廖雄志, 文定都, 湛政, 等. 基于模糊 PID 的永磁同步电机调速系统 [J]. 湖南工业大学学报, 2018, 32(2): 26-30.
LIAO Xiongzhi, WEN Dingdou, ZHAN Zheng, et al. A Permanent Magnet Synchronous Motor Speed Control System Based on Fuzzy PID[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2018, 32(2): 26-30.

(责任编辑: 廖友媛)