

# 基于新型积分分离 PID 控制算法的 无刷直流电机控制系统

马晓阳<sup>1</sup>, 米珂<sup>2</sup>, 杜巍<sup>3</sup>, 杨沛豪<sup>2</sup>

(1. 国电宁夏石嘴山发电有限责任公司, 宁夏 石嘴山 753202;

2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

3. 宁夏电力有限公司检修公司, 宁夏 银川 750011)

**摘要:** 为了提高无刷直流电机(BLDCM)的控制性能,在传统 PID 控制方法的基础上提出了一种基于新型积分分离 PID 控制算法,并将其应用于 BLDCM 转速和电流闭环控制中。该控制方法不但具有较强的抗负载扰动能力,而且可有效解决传统 PID 控制引起的控制量超过被控对象而造成系统振荡的问题。新型积分分离 PID 控制算法结合了积分分离 PID 控制算法和带死区的 PID 控制算法的优点,既可以延长控制系统的使用寿命,又可以对系统偏差进行限制。通过 MATLAB/Simulink 仿真和试验验证了所提方法的有效性与实用性。

**关键词:** 无刷直流电机; 控制系统; 积分分离 PID 控制算法

中图分类号: TM 33 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)04-0030-05

doi: 10.12177/emca.2019.168

## Brushless DC Motor Control System Based on New Integral Separation PID Control Algorithm

MA Xiaoyang<sup>1</sup>, MI Ke<sup>2</sup>, DU Wei<sup>3</sup>, YANG Peihao<sup>2</sup>

(1. Guodian Ningxia Shizuishan Power Generation Co., Ltd., Shizuishan 753202, China;

2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

3. Maintenance Branch of Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750011, China)

**Abstract:** In order to improve the control performance of brushless DC motor (BLDCM), a new integral separation PID control algorithm based on traditional PID control method is proposed. The new integral separation PID control algorithm is applied to BLDCM speed and current closed-loop control. The control method not only has strong anti-load-disturbance ability, but also can effectively solve the problem existing in traditional PID control that system oscillation may occur when the control quantity of the system exceeds that of the controlled object. The new integral separation PID control algorithm combines the advantages of the integral separation PID control algorithm and the PID control algorithm with dead zone. It can not only prolong the service life of the control system, but also limit the system deviation. The effectiveness and practicability of the proposed method are verified by MATLAB/Simulink simulation and experiment.

**Key words:** brushless DC motor (BLDCM); control system; integral separation PID control algorithm

收稿日期: 2019-12-01; 收到修改稿日期: 2020-01-02

作者简介: 马晓阳(1969—),男,高级工程师,研究方向为电力电气。

## 0 引言

无刷直流电机(BLDCM)广泛应用于工业领域,速度调节响应快,带负载能力强。与传统有刷直流电机相比,BLDCM 不仅具备传统直流电机的诸多特点,并且由于不再利用碳刷进行转子与定子之间的电流传导,电机运行声音相应减少<sup>[1-2]</sup>。

在 BLDCM 控制系统中,一般采用基于 PID 算法的转速-电流双闭环控制。PID 控制具有模型简单、控制效果好等特点<sup>[3]</sup>,但是存在抗干扰能力弱、鲁棒性差等缺点。在 BLDCM 实际应用中,面临负载不断变化、输入电流不稳定等问题,当输入存在扰动或负载突变时,控制模型输出不准确,导致整个电机控制系统动态性能差<sup>[4]</sup>。为了解决此问题,需要对 PID 控制算法里的参数进行修正,这增加了整个控制系统的复杂性,导致控制效果不太理想<sup>[5-6]</sup>。

为了对传统 PID 控制系统进行改进,文献[7-8]制定算法选取相应参数,根据系统误差变化率实时调整 PID 参数。但控制模型不确定,导致实时调整的 PID 参数通常不能满足需求,故在实际中应用较少<sup>[9-11]</sup>。

本文提出一种新型积分分离 PID 控制的 BLDCM 控制方法,在传统积分分离 PID 控制基础上引入带死区的 PID 控制算法。通过 MATLAB 仿真和在电机平台上进行试验,对所提方法进行验证分析。

## 1 BLDCM 数学模型

BLDCM 等效电路如图 1 所示。

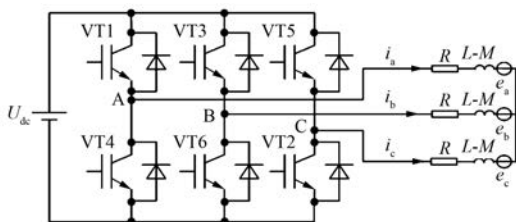


图 1 BLDCM 等效电路

为了得到 BLDCM 数学模型,假设其三相绕组对称,将 abc 三相采用 Clarke 变换转换到  $\alpha\beta$  静止两相坐标系下,BLDCM 数学模型可表示为

$$\begin{cases} \frac{di_{\alpha}}{dt} = -\frac{R}{L}i_{\alpha} + \frac{U_{\alpha}}{L} - \frac{e_{\alpha}}{L} \\ \frac{di_{\beta}}{dt} = -\frac{R}{L}i_{\beta} + \frac{U_{\beta}}{L} - \frac{e_{\beta}}{L} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i_{\alpha}$ 、 $i_{\beta}$  为 BLDCM 定子电流; $R$  为定子电阻; $L$  为定子电感; $U_{\alpha}$ 、 $U_{\beta}$  为 BLDCM 定子电压; $e_{\alpha}$ 、 $e_{\beta}$  为 BLDCM 反电动势, $e_{\alpha} = -\psi_f \omega \sin\theta$ , $e_{\beta} = \psi_f \omega \cos\theta$ ; $\psi_f$  为永磁体磁链; $\omega$  为转子角速度; $\theta$  为转子角度。

BLDCM 转矩为

$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{e_{\alpha}}{\omega} i_{\alpha} + \frac{e_{\beta}}{\omega} i_{\beta} \right) \quad (2)$$

## 2 新型积分分离 PID 电机控制系统

图 2 所示为传统 PID 控制系统原理图。图 2 中, $r(t)$  为控制系统参考指令, $u(t)$  为控制系统输出, $e(t)$  为控制系统参考指令和输出之间的偏差值, $y(t)$  为控制系统控制律。

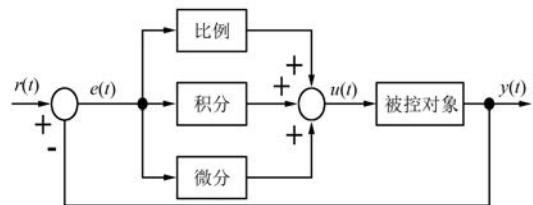


图 2 传统 PID 控制系统原理图

PID 控制算法的控制量  $u(k)$  可以写成:

$$u(k) = Ke(k) + g(k-1) \quad (3)$$

其中: $K = K_p \left( 1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_D}{T} \right)$ ; $g(k-1) = u(k-1) -$

$Be(k-1) + Ce(k-2)$ ; $B = K_p \left( 1 + 2\frac{T_D}{T} \right)$ ; $C = K_p \frac{T_D}{T}$ ; $T_D$

为微分时间常数; $T$  为采样周期。

在传统 PID 算法中,控制系统实际输出与参考指令的偏差作为控制输入,将被控对象存在的偏差信号的比例、积分、微分进行线性运算,控制算法单一,不适合实际运用工况。

### 2.1 新型积分分离 PID 控制

当 BLDCM 控制系统出现扰动时,输出量偏差变大,引起输出量偏差变化率变大。当系统输出量的偏差与系统输出量的偏差变化率乘积小于零时,表明实际输出与输出参考指令信号吻合,系统稳定,此时应减小控制器补偿环节比

系数  $K_p$ , 避免比例系数较大引起系统超调而产生振荡。比例系数  $K_p$  的调整准则如图 3 所示。

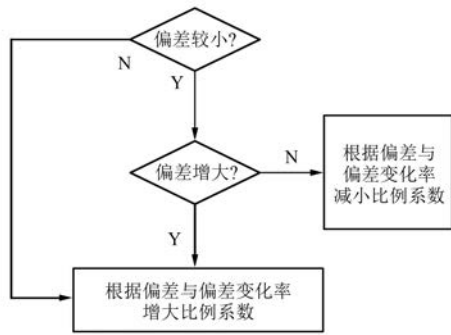


图 3 比例系数  $K_p$  调整准则

PID 控制器中的积分可以降低误差对系统的影响, 提高控制器的稳态性能。但在 BLDCM 起始阶段, 由于实际输出值与输出指令信号的偏差较大, 积分会使 PID 控制器在运算过程中积累, 造成系统稳定性下降。

针对输出指令与实际输出偏差较大的问题, 本文提出一种积分分离 PID 电机控制方法。当被控对象向平衡位置运动时积分环节作用, 被控对象靠惯性向平衡位置运动, 采用 PD 控制来保证控制系统的控制精度, 控制算法为

$$u(k) = Ge(k) - f(k-1) \quad (4)$$

其中:  $G = K_p \left( 1 + \frac{T_D}{T} \right)$ ;  $f(k-1) = B'e(k-1)$ ;  $B' = B$ 。

采用新型积分分离 PID 控制算法的被控对象误差曲线如图 4 所示。

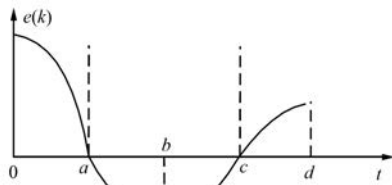


图 4 被控对象误差曲线

当满足  $\begin{cases} de(t)/dt > 0, e(t) > 0 \\ de(t)/dt < 0, e(t) < 0 \end{cases}$  时, BLDCM 控制系统采用 PID 控制; 当满足  $\begin{cases} de(t)/dt < 0, e(t) > 0 \\ de(t)/dt > 0, e(t) < 0 \end{cases}$  时, 则采用 PD 控制。

### 2.2 含有死区的新型积分分离 PID 控制

为了避免振荡, 使控制器在一定的范围内输出恒定, 本文在 BLDCM 控制系统中引入死区参数。具体是引入一个参数  $e_0$ , 当设定值和输出值偏差的绝对值小于  $e_0$  时, 忽略偏差的存在使控制器保持上一周期的输出值, 即当  $|e(k)| \leq |e_0|$  时,  $u(k) = u(k-1)$ 。基于新型积分分离的 PID 控制策略框图如图 5 所示。

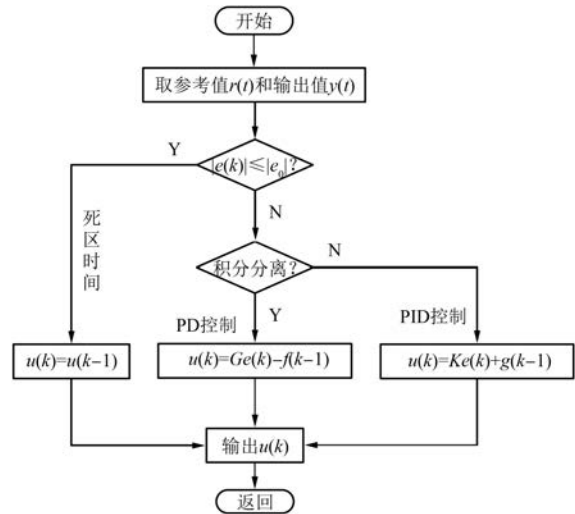


图 5 基于新型积分分离的 PID 控制策略框图

### 3 系统模型建立及仿真验证

根据上述方法, 设计基于新型积分分离的 BLDCM 控制系统, 整个控制系统外环为速度闭环, 内环为电流闭环。BLDCM 双闭环控制系统结构框图如图 6 所示。

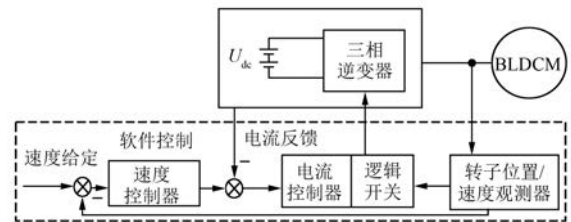


图 6 BLDCM 双闭环控制系统结构框图

本文建立了基于 MATLAB/Simulink 的仿真模型。BLDCM 参数如表 1 所示。

在 BLDCM 双闭环控制系统中, 外环转速闭环  $K_{P1} = 0.14$ 、 $K_{I1} = 2.98$ 、 $K_{D1} = 22.76$ ; 内环电流闭环  $K_{P2} = 0.02$ 、 $K_{I2} = 2.13$ 、 $K_{D2} = 25.68$ 。

表 1 BLDCM 参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
定子额定电压/V	220	额定输出转矩/(N·m)	10
极对数	4	转子转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	0.091
定子阻抗/Ω	0.62	转子额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	1 500
定子电感/mH	3.3	额定输出功率/kW	2.32

在空载情况下,传统 PID 控制和所提新型积分分离 PID 控制的 BLDCM 转速波形如图 7 所示。

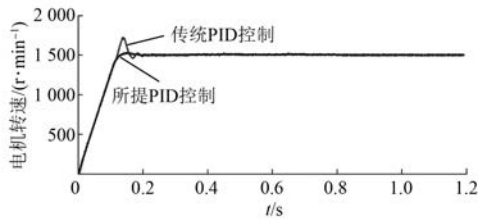


图 7 空载情况下 2 种控制方法转速波形

由图 7 可知,在 BLDCM 起动过程中,传统 PID 控制输出转速在 0.15 s 存在超调量,引起转速波动,新型积分分离 PID 控制得到的转速可以较好地跟踪目标转速,不存在超调和波动。

当电机起动完成后,在 0.4 s 突加负载至 8 N·m,在 0.6 s 将负载从 8 N·m 突变为 5 N·m,传统 PID 控制和所提新型积分分离 PID 控制的 BLDCM 转速波形如图 8 所示。

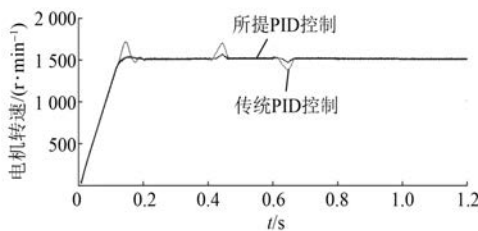


图 8 负载存在较大突变时 2 种控制方法转速波形

由图 8 可知,在 0.4 s BLDCM 负载从空载状态突变为 8 N·m 时,传统 PID 控制输出转速存在较大超调量,转速最大值达到 1 700 r/min,超调量达到 11.3%,且会造成系统振荡。同理,在 0.6 s BLDCM 负载从 8 N·m 突变为 5 N·m 时,传统 PID 控制输出转速也存在较大超调量。基于积分分离的 PID 控制可以有效减少超调,调节时间比传统 PID 控制短,使整个调节过渡过程更为平稳。

当电机起动完成后,在 0.45 s 将负载从额定

负载 10 N·m 突变为 9.4 N·m,在 0.95 s 将负载从 9.4 N·m 突变为 10 N·m,其他参数不改变,传统 PID 控制和所提新型积分分离 PID 控制的 BLDCM 转速波形如图 9 所示。

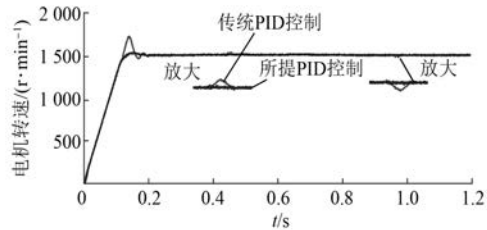


图 9 负载存在较小突变时 2 种控制方法转速波形

由图 9 可知,在 0.45 s BLDCM 负载从额定负载 10 N·m 突变为 9.4 N·m 时,传统 PID 控制算法进行调节,输出转速响应系统偏差,调节时间持续 0.013 s。同理,在 0.95 s BLDCM 负载从 9.4 N·m 突变为额定负载 10 N·m 时,传统 PID 控制输出转速也响应系统偏差。新型积分分离 PID 控制因为引入死区参数,不响应小范围波动转速,起到避免控制系统频繁动作的作用。

为了验证在内环(电流闭环)中引入新型积分分离的 PID 控制方法的有效性,在满载即负载为额定负载 10 N·m 情况下,仿真 BLDCM 从起动至平稳运行过程中的定子电流波形,如图 10 所示。

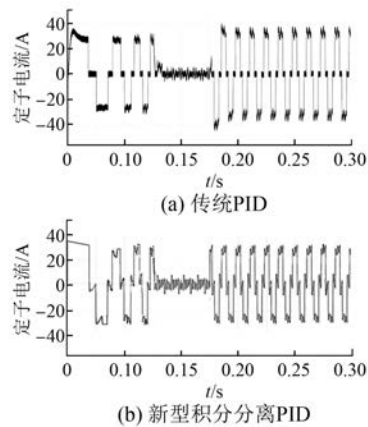


图 10 2 种控制算法输出定子电流波形

由图 10(a) 可知,传统 PID 控制算法输出定子电流在起动阶段由于转速的持续升高,存在超调量和系统振荡;在平稳运行阶段,由于电机驱动电路中元器件频繁开断,存在输入电流不稳定,定子电流波形“毛刺”较多,使整个 BLDCM 控制系

统动态性能较差。与传统 PID 控制算法相比,采用新型积分分离的 PID 控制方法得到的定子电流波形明显“毛刺”较少。在 BLDCM 起动阶段由于积分分离 PID 算法的作用,不但有效减少了超调量,且避免了系统振荡;在 BLDCM 平稳运行阶段,由于引入死区参数,不响应波动范围较小的定子给定电流,避免了控制系统频繁动作而造成的不稳定,增强了控制系统的抗干扰能力,提高了控制系统的鲁棒性。

#### 4 试验分析

为了进一步验证理论分析及仿真的正确性,搭建基于 TI 公司 DSP 芯片 TMS320F28335 的 BLDCM 控制系统试验平台,对本文所提控制算法进行试验分析。BLDCM 参数见表 1。

图 11 所示为 BLDCM 在额定转速、转矩下,采用传统 PID 控制和新型积分分离的 PID 控制得到的转速与 A 相电流波形。

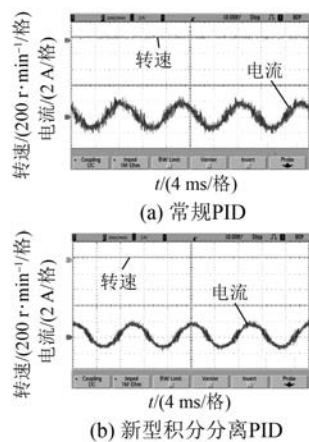


图 11 2 种 PID 控制下的转速与 A 相电流波形

通过对比图 11(a)、图 11(b)可知,基于新型积分分离的 PID 控制得到的转速波形更为平滑,且定子电流波形“毛刺”较少。整个控制系统几乎无超调量,不响应波动范围较小的输入量。

#### 5 结 语

本文通过建立 BLDCM 数学模型,提出了一种新型积分分离 PID 控制算法的 BLDCM 控制系统。

仿真和试验结果表明:基于新型积分分离的 PID 控制算法能够减少超调量,不响应波动范围较小的输入量,避免了由于 PID 控制频繁动作引起的系统振荡。整个控制系统动态性能良好,具有较强的稳定性与鲁棒性,而且算法简单,计算量小,使 BLDCM 控制系统性能得到了较大的改善。

#### 【参考文献】

- [ 1 ] 杨沛豪.无刷直流电机无位置传感器控制系统研究[D].兰州:兰州理工大学,2018.
- [ 2 ] JU Z, LV X, WU B, et al. Advanced model predictive control for three-phase inverter circuit based on disturbance observer[C]//2019 IEEE 10th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2019.
- [ 3 ] YANG P, GUO X, WANG X, et al. A new adaptive sliding mode observer based PLSM sensorless control motors[C]//2018 Chinese Automation Congress (CAC), 2018: 2044.
- [ 4 ] 丁娱乐,杨沛豪,刘向辰,等.无位置传感器 BLDCM 双控制系统及双驱动单元研究[J].电气传动, 2019, 49(7): 9.
- [ 5 ] 王小辉,刘向辰,寇水潮,等.基于两步模型预测控制的 ACIM 电流控制方法[J].电力电子技术, 2019, 53(8): 52.
- [ 6 ] 杨沛豪,王晓兰,刘向辰,等.基于新型自适应滑模观测器的 BLDC 控制[J].电气传动, 2019, 49(4): 6.
- [ 7 ] 寻志伟,王鑫明,刘向辰,等.基于优化型滑模观测器的 PMSM 换相控制研究[J].微特电机, 2019, 47(10): 52.
- [ 8 ] 赵启明,徐国祥,王煜伟,等.基于模糊自适应 PI 策略的并网逆变器死区补偿[J].电机与控制应用, 2019, 46(7): 94.
- [ 9 ] 孙钢虎,王恩南,贺婷,等.基于自适应暂态下垂控制的光伏频率快速响应方案[J].热力发电, 2019, 48(8): 94.
- [ 10 ] 何文,王恩南,杨沛豪,等.基于扰动观测器的三相逆变电路改进型模型预测控制[J].电机与控制应用, 2019, 46(6): 55.
- [ 11 ] 李耀贵.基于积分分离+死区 PID 的逆变电路控制系统研究[J].电机与控制应用, 2019, 46(7): 100.