

单周控制方法在电静液作动器无刷直流电机系统中的应用

郭 旭, 李先峰

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 电静液作动器(EHA)要求无刷直流电机能够频繁起动和制动,并具有较强的动态响应。针对常规 PID 控制在非线性系统中应用的不足,将单周控制方法用于 EHA 无刷直流电机系统中,采用单周控制器控制电机的力矩输出,以提高系统的抗干扰能力和动态性能,采用常规的 PI 控制器完成系统的位置和转速控制,系统结构简单且容易实现。仿真结果表明,电流环引入单周控制方法后,系统的快速性更好,稳态运行下电机转速、转矩波动更小。以 1 台转角功率为 28 kW 的 EHA 和 FPGA+DSP 结构的数字控制器为平台进行试验,试验结果验证了基于单周控制的 EHA 系统具有优良的稳态和动态性能。

关键词: 电静液作动器; 无刷直流电机; 单周控制

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)05-0032-06

Application of One-Cycle Control Method in Electro Hydraulic Actuator Brushless DC Motor System

GUO Xu, LI Xianfeng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

Abstract: The brushless DC motor in electro hydraulic actuator (EHA) was required to start and brake frequently, having a relatively fast dynamic response. One-cycle control method was employed in EHA brushless DC motors due to the disadvantages of the common PID control method in non-linear systems. The one-cycle controller was used to control the torque output of motors in order to improve the capability of resisting disturbance and enhance dynamic performance. Common PI controller was employed to accomplish the control of system position and rotate speed, making system structure simple and easy to realize. Simulation results showed that, after introducing one-cycle control method in current loop, the system had a better performance in stability and the fluctuation of the motor rotate speed and torque was smaller in steady state. An experiment was conducted on a platform including 28 kW angle power EHA and a digital controller based on "FPGA+DSP" structure, whose results verified that the EHA system based on the one-cycle control method had an excellent performance both in steady-state and dynamics.

Key words: electro hydraulic actuator (EHA); brushless DC motor (BLDCM); one-cycle control

0 引 言

电静液作动器(Electro Hydraulic Actuator, EHA)要求驱动电机频繁起动和制动,能够四象限运行,并具有快速的动态响应。由于无刷直流电机(Brushless DC Motor, BLDCM)具有功率密度

大、调速性能好、可靠性高等优点,因此 EHA 多用 BLDCM^[1]。

BLDCM 控制系统是一个多变量、强耦合的非线性系统,常规 PID 控制不具有参数自整定的功能,难以满足 EHA 对驱动系统调速范围和动态性能的要求。为克服这一弊端,许多专家

学者将现代控制和智能控制理论应用到 BLDCM 中,如模糊控制^[2]、神经网络控制^[3]、自适应控制^[4-5]等。这些控制方法虽可以改善系统的性能,但存在结构复杂、调节困难等弊端。单周控制(One-Cycle Control, OCC)理论是一种大信号、非线性的控制方法^[6-8],在脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)控制基础上发展起来,且动态响应快,抗干扰能力强。将单周控制方法与传统的 PID 控制方法结合起来,既具有传统的 PID 控制易于设计和工程实现的优点,又可以提高系统的动态性能。

本文介绍了“三相六状态”工作模式下,三相 Y 型联结的 BLDCM 的基本原理,将 OCC 方法用于 EHA BLDCM 系统中,在传统的位置、转速和电流三闭环 PID 控制系统的基础上,建立了基于 OCC 的 EHA 系统模型。在 MATLAB/Simulink 环境下,对比了 OCC 与常规 PID 控制方法下系统的性能,仿真结果表明 OCC 方法可以提高系统的快速性,减小系统稳态时的转速和转矩波动。最后,以 1 台转角功率为 28 kW 的 EHA 和 FPGA+DSP 结构的数字控制器为平台进行试验,验证了该方法在 BLDCM 系统控制中的有效性和可行性。

1 EHA 用 BLDCM 原理分析

BLDCM 系统主要由功率变换器、电机本体、转子位置传感器、控制电路和驱动电路等组成。图 1 为功率变换器和电机本体等效电路^[9]。

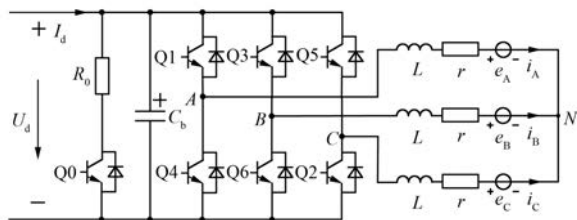


图 1 BLDCM 系统中逆变器、电机本体等效模型

在“三相六状态”模式下,在非换相期间, BLDCM 仅两相绕组导通,且这两相绕组的反电势与相电流大小相等。假设导通期间反电势和电流分别为 E_a 和 I_d ,结合图 1,则电压平衡方程为

$$U_d - 2\Delta U = 2rI_d + 2L \frac{dI_d}{dt} + 2E_a \quad (1)$$

式中: r ——相绕组电阻;

L ——线电感,即定子相绕组自感与两相互感之差;

ΔU ——逆变器功率开关导通压降, $\Delta U = r_0 I_d$ 。

电磁转矩 T_e 为

$$T_e = \frac{1}{n}(e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C) = \frac{2I_d E_a}{n} = K_T I_d \quad (2)$$

式中: e_A 、 e_B 、 e_C ——三相绕组反电势。

对 EHA 用大功率 BLDCM 控制系统,若希望电机在较宽工作范围内具有优良的调速性能,需对电机实现四象限控制^[10]。当电机工作在电动状态时,电机电磁转矩与转速乘积 $T_e \cdot n > 0$,电机向负载输出电磁功率;当电机工作在制动状态时,电机电磁转矩与转速乘积 $T_e \cdot n < 0$,电机从负载吸收电磁功率。图 1 中, R_0 和 Q_0 组成能量释放电路,实现能量回馈制动过程中母线电压 U_d 的控制,释放输入电容 C_b 上过多的能量^[11]。

2 OCC 在 EHA 系统中的应用

EHA 作为位置伺服系统,要求电机调速范围宽,负载转矩变化大,常采用位置、转速和电流三闭环控制方法,采用 PID 控制器难以满足系统动态性能和抗干扰能力的要求。OCC 方法可以在一个开关周期内自动消除稳态、瞬态误差,响应速度快、鲁棒性好,需设定参数数量少。将 OCC 方法与传统 PID 控制扬长避短地结合起来用于 EHA BLDCM 系统,电流环采用 OCC,避免电流环控制参数整定的问题,完成了恒频斩波驱动信号的调制,且当系统受到外部扰动时, OCC 能够快速调整电机的力矩输出,保证了系统的动态响应性能;位置环和转速环采用 PID 控制,设计方法简单且易于实现。

2.1 基于 PID 控制的 EHA 系统模型

基于 PID 控制的 EHA 系统结构框图如图 2 所示。位置环由位置调节器、位置反馈环节组成,其输出作为转速的给定值 n_{ref} ;转速环由转速调节器、转速反馈环节组成,其输出作为电流给定值 I_{ref} ;电流环作为系统的内环,由电流调节器、电机绕组电流反馈环节组成,电流调节器的输出可获

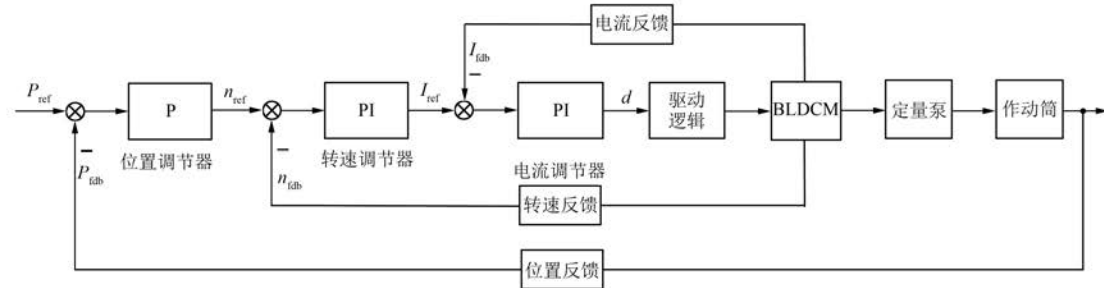


图2 基于PID控制的EHA系统结构框图

取占空比 d ，根据相应的驱动逻辑驱动各功率管，实现系统的位置伺服。

常规PID控制方法下，图2中电流控制器采用PI控制器，将电流环校正为I型系统；转速调节器采用PI控制器，将转速环校正为II型系统，实现转速的无差跟踪；位置调节器通常采用P控制器。再根据系统的静态误差、抗干扰能力、剪切频率和相角裕度等指标要求，假定系统为线性定常系统，采用经典控制理论在频域内进行控制参数的设计和系统性能分析。

2.2 OCC原理

OCC的基本思想是通过控制开关器件的导通或关断时间，保证每个开关周期内，开关量与参考量的平均值或峰值严格相等或成比例^[6]。图3(a)为输入信号，图3(b)为开关函数 $s(t)$ ，图3(c)为输出信号，输入信号 v_i 经斩波后形成输出信号 v_o ，满足

$$v_o = v_i \cdot s(t) \quad (3)$$

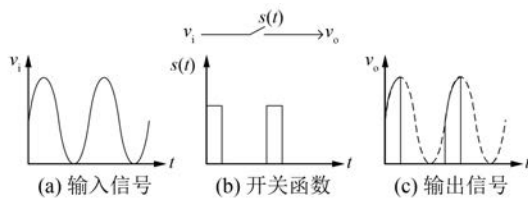


图3 OCC原理图

令开关器件工作频率为 $f_s = \frac{1}{T_s}$ ，导通的占空比为 d ，开关函数 $s(t)$ 可以表示为

$$s(t) = \begin{cases} 1 & 0 < t < T_s \\ 0 & dT_s < t < T_s \end{cases} \quad (4)$$

则输出信号的平均值为

$$v_o(t) = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} s(t) \cdot v_i(t) dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{dT_s} v_i(t) dt \quad (5)$$

若输入信号 v_i 的频率远低于 f_s ，则输入信号在一个开关周期内近似为常数，式(5)可改写为

$$v_o(t) = \frac{1}{T_s} \int_0^{dT_s} v_i(t) dt = d \cdot v_i(t) \quad (6)$$

由式(6)可知，改变开关器件的占空比，即可调节输出信号在一个开关周期内的平均值。

2.3 基于OCC的EHA系统模型

EHA系统中，位置调节器和转速调节器用来提高系统的刚度，电流调节器用来防止起动和大范围加减速时发生过流，增强系统的抗干扰能力。EHA系统要求在宽调速范围内的动态性能和抗干扰能力，因此电流环的调节性能非常重要。将OCC方法用于系统的电流环调节中，系统的位置和转速调节仍采用常规的PID控制，得到图4所示的基于OCC的EHA系统结构框图。

OCC方法实现电流的快速调节，在一个开关周期内实现电机相绕组反馈电流的平均值与给定电流相等。OCC控制器主要包括可复位积分器、比较器和R-S触发器等环节^[12]，其原理电路如图5所示。在每个开关周期内对电机相绕组电流 I_{fdb} 进行积分，将积分结果与给定电流 I_{ref} 相比较，比较结果经R-S触发器即可得功率管的驱动信号。为实现电机四象限工作的电流环调节，加入逻辑判断模块，单周控制器可以同时完成电流闭环控制和斩波驱动信号的调制。

图5中时钟源的周期为 T_s ，积分器时间常数为 τ ，根据式(6)可以推出，稳态时占空比 D 、给定电流 I_{ref} 、反馈电流 I_{fdb} 满足：

$$I_{ref} = \frac{T_s D}{\tau} \cdot I_{fdb} \quad (7)$$

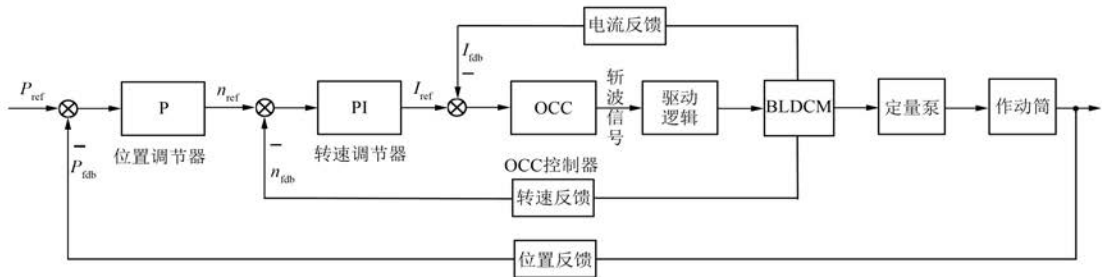


图 4 基于单周控制的 EHA 系统结构框图

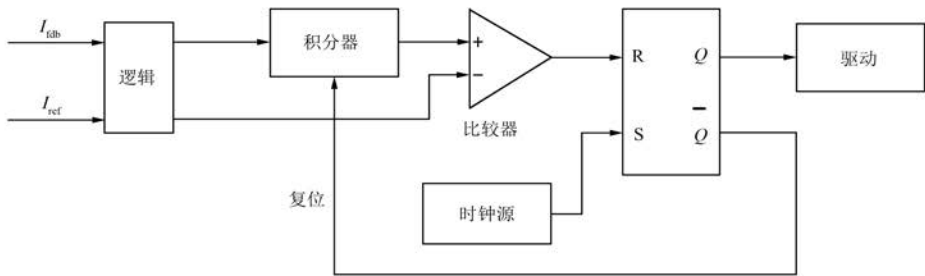


图 5 OCC 控制器原理电路

根据前述分析设计可知,可将基于 OCC 方法的电流环等效为一阶惯性环节,其时间常数为功率管的开关周期与电机电气时间常数之和。比例系数与电机参数和积分器时间常数、功率管开关周期有关,因此转速环和位置环调节器的设计时,可将系统等效为线性系统,与传统 PID 控制设计方法相同。

3 仿真和试验验证

3.1 仿真验证

为验证两种控制方法下电流环的性能,在

MATLAB/Simulink 环境下搭建了系统仿真平台,并在同样的性能指标下完成两种控制方法的电流、转速控制器设计。仿真参数如下:电机额定电压 270 V,额定电流 33 A,额定转速 6 000 r/min,额定负载转矩 10 N·m,电枢相绕组电阻 $r = 0.18 \Omega$,线电感 $L = 1.7 \text{ mH}$,电磁转矩系数 $K_T = 0.3 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{A}$,反电势系数 $k_e = 0.029 \text{ V}/(\text{r}/\text{min})$,转动惯量 $J = 8.8 \times 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$,极对数 $p = 2$,开关频率 $f_s = 16.7 \text{ kHz}$ 。

图 6(a)、图 6(b)分别为电机在额定工况下运行,电流环采用 PI 调节器和 OCC 控制器的仿

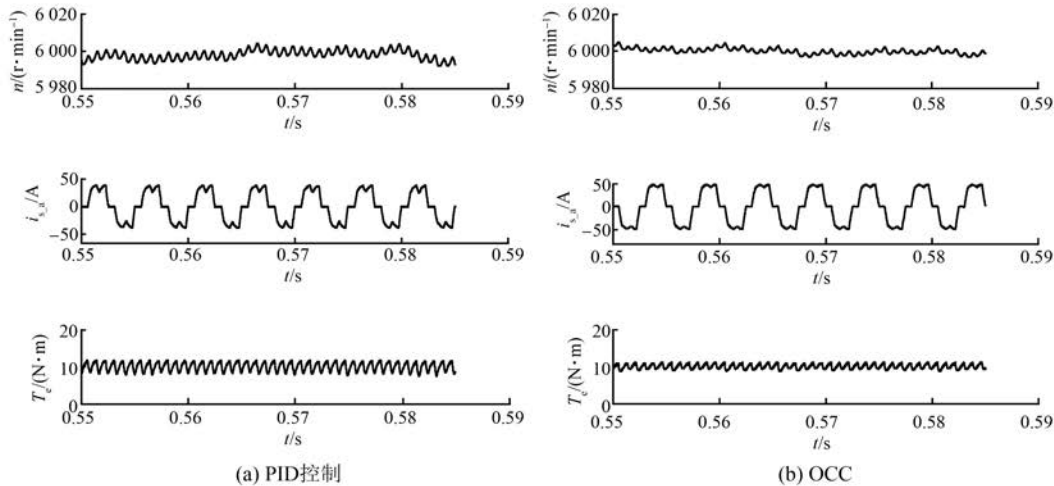


图 6 额定工况下,电机电动运行的仿真波形

真波形。两图从上至下的波形依次为实际转速 n 、A 相绕组电流 i_{s-a} 和电磁转矩 T_e 。从图 6 可以看出,两种控制方法在电机运行稳定后,转速在给定转速 6 000 r/min 附近波动,电磁转矩在 10 N·m 附近波动,由于换相时电机绕组电流不能突变,断流相均存在续流过程,因此相电流波形并不是理想的方波。对比图 6(a)、图 6(b) 波形可以看出,电流环采用 OCC 控制器时,转速波动峰峰值由 20 r/min 减小至 8 r/min,转矩波动峰峰值减小了约 20%,相绕组电流波形更理想,转速和转矩波动更小。

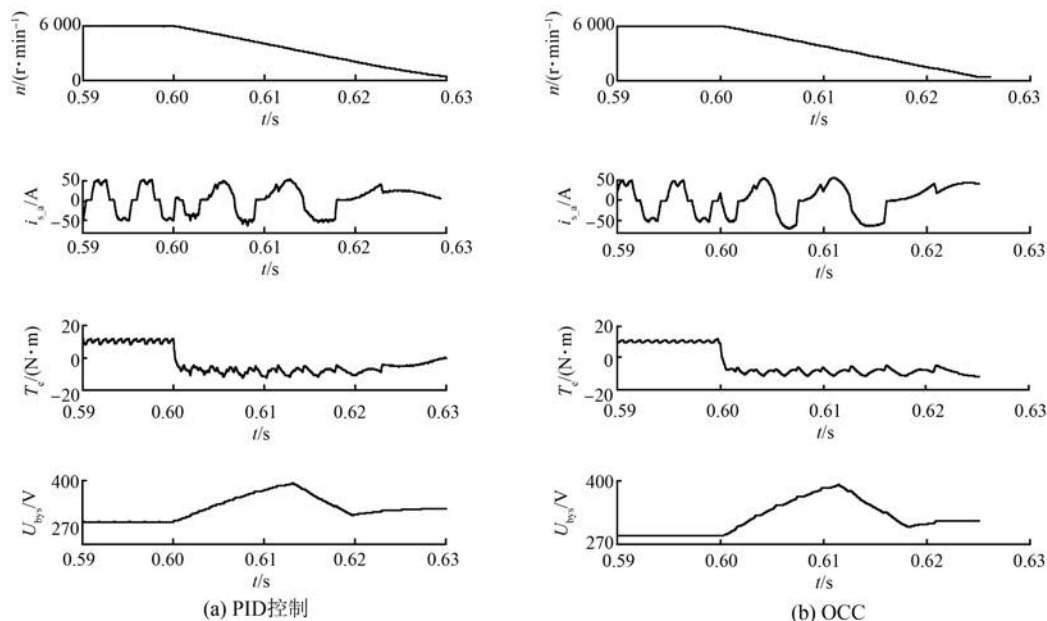


图 7 额定负载下,电机制动运行的仿真波形

由此可以看出,系统四象限运行时,基于 OCC 方法的系统动态响应更快,且稳态运行时转矩和转速的波动更小,稳态性能更好。

3.2 试验验证

以 1 台转角功率为 28 kW 的 EHA 为平台,采用 FPGA+DSP 结构数字控制器,参数与仿真参数一致,对本文提出的 OCC 方法进行试验验证,分别测试系统电流、转速和位置闭环的调节性能。

给定电流为峰峰值 $I_{pp} = 14$ A,偏置 9 A,频率为 20 Hz 的方波信号时,相绕组电流相应波形如图 8 所示。图 8 中从上到下的波形依次为给定电流和相绕组电流。由于测试原因,相绕组电流存在一定的直流偏置,可以利用峰峰值分析稳态跟踪

当负载转矩为 10 N·m、给定转速在 0.6 s 由 6 000 r/min 阶跃为 0 r/min 时,电机处于正向制动工作模式。两种控制方法下,电机转速、相电流、电磁转矩和输入电容 C_b 端电压的仿真波形分别如图 7(a)、图 7(b) 所示。从图 7 可以看出,电机制动时,相电流和电磁转矩为负,能量回馈使 C_b 端电压上升,当该电压超过滞环上限时,功率器件 Q0 开通,刹车电阻 R_0 消耗能量, C_b 端电压下降。对比图 7(a) 和图 7(b) 可知,电流环采用 OCC 控制器时,能量回馈更迅速,转速下降斜率更快,电机制动时间由 0.3 s 减小至 0.26 s,系统动态性能更好。

特性。当给定电流为 16 A 时,相绕组电流峰峰值约为 1.25 V,即 31.25 A,误差为 2.3%;当给定电流为 2 A 时,相绕组电流峰峰值为 3.75 A,误差为 6.25%;当给定电流发生阶跃变化时,如图 8 中虚线位置,相绕组电流快速跟踪给定电流值,由此可以看出,电流环的稳态和动态性能良好。

令给定转速为峰峰值 $n_{pp} = 12\ 000$ r/min,偏置 0 r/min,频率为 0.5 Hz 的方波信号时,系统的相应波形如图 9 所示。图 9 中,波形 2 为给定转速,波形 4 为实际转速,波形 1 为母线电流,波形 3 为母线电压。从图 9 可以看出,给定转速可以准确跟踪实际转速,当给定转速由 6 000 r/min 阶跃为 -6 000 r/min 时,电机工作状态经历了正向

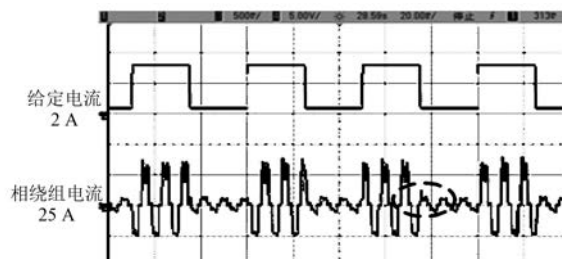


图8 电流环响应波形

电动-正向制动-反向电动的过程。电机制动时,母线电流为负,母线电压上升,能量回馈给输入电容 C_b ; 电机起动时,母线电流较大,令电机以最大加速度起动。当电机稳定运行在某一转速时,母线电流波动很小,母线电压约 270 V (测量结果存在直流偏置); 当给定转速反向阶跃时,调速系统响应波形与正向阶跃时相似。

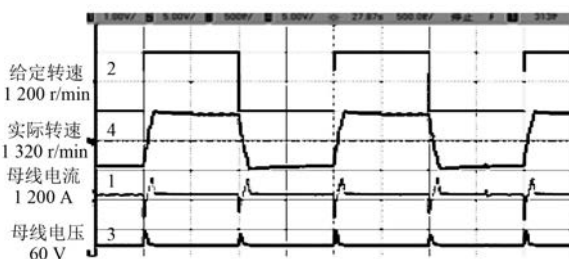


图9 转速环响应波形

采用工程方法在时域内测试 EHA 系统的带宽,令给定位置为正弦波,其峰峰值为 4% 最大行程,位置跟踪的幅度衰减和相位滞后随着给定位置信号频率的增加而变大。当频率达到 3 Hz 时, EHA 伺服系统响应波形如图 10 所示。从图 10 可以看出,实际位置与给定位置相比,相位滞后近似为 90° , 给定信号峰峰值为 798 mV, 实际位移峰峰值为 265 mV, 位置解调比例为 2.15。由此可以计算出当前状态下,位置跟踪幅度衰减为 $265 \times 2.15 / 798 = 0.714$ 。因此, EHA 系统的带宽近似为 3 Hz。

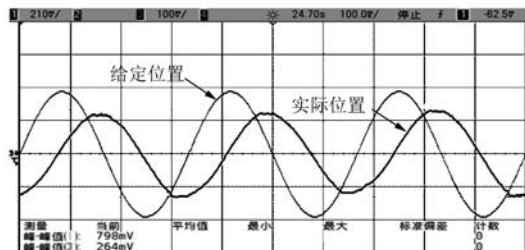


图10 EHA 系统响应波形

4 结 语

本文提出将 OCC 方法和传统 PID 控制方法结合,用于 EHA BLDCM 系统中,建立了基于 OCC 的位置、转速和电流三环控制系统模型,并通过仿真和试验进行原理验证。可得到如下结论:

(1) 通过仿真验证了电流环采用 OCC 方法与传统 PI 调节相比性能更好,系统的动态响应更快,稳态时系统的转速和转矩波动更小;

(2) 试验验证了该方法的可行性及工作性能, EHA 系统位置环带宽可近似达到 3 Hz。

【参考文献】

- [1] 康荣杰,焦宗夏,王少萍.电动静液作动器框图建模与控制[J].北京航空航天大学学报,2009,35(3): 338-341.
- [2] 王霞,朱景伟.基于模糊 PI 控制的无刷直流电机调速系统[J].电气传动,2014,44(1): 63-67.
- [3] 董正良.无刷直流电机 BP 神经网络控制的研究[D].西安:西安电子科技大学,2010.
- [4] XIU J, WANG S Y, XIU Y. Fuzzy adaptive single neuron NN control of brushless DC motor[J]. Neural Comput & Applic, 2013(22): 607-613.
- [5] USHAKUMARI S, SANKARAN R. Adaptive neuro-fuzzy controller for improved performance of a permanent magnet brushless DC motor[C] // The 2001 IEEE International Conference on Fuzzy Systems Melbourne, Vic: IEEE, 2001: 493-496.
- [6] SMEDLEY K M, CUK S. One-cycle control of switching converters [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1995, 10(6): 625-633.
- [7] SANTI E, CUK S. Modeling of one-cycle controlled switching converters [C] // Telecommunications Energy Conference, INTELEC'92, 14th International Washington, DC: IEEE, 1992: 131-138.
- [8] SMEDLEY K M, CUK S. Dynamics of one-cycle controlled Cuk converters [J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 1995, 10(6): 634-639.
- [9] 李金飞.全数字高性能无刷直流电动机控制系统的研究[D].南京:南京航空航天大学,2009.
- [10] 谭博,马瑞卿,刘卫国.一种永磁无刷直流电动舵机四象限控制[J].电工技术学报,2011,26(9): 73-79.
- [11] 宋哲.新型电动车用无刷直流电机回馈制动技术研究[J].电机与控制应用,2015,42(12): 79-84.
- [12] 纪文东.单周控制三相四桥臂并联型 APF 的研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2014.

收稿日期: 2016-10-12