

基于磁场定向控制理论的无刷直流电机控制^{*}

张新荣¹, 林 莲², 张东升³, 张 军¹, 王赫乾¹

(1. 长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 湖北三江航天红峰控制有限公司, 湖北 孝感 432000;

3. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 磁场定向控制(FOC)理论是永磁同步电机(PMSM)最常用的控制方法之一。该方法需要电机转子瞬时精确位置, 因此限制了其在使用霍尔位置传感器的无刷直流电机(BLDCM)上的应用。为了能够在BLDCM上应用FOC理论, 又不增加电机成本, 在现有霍尔位置传感器的基础上, 提出了一种根据霍尔传感器的输出信号, 通过计算前一个扇区平均转速的方法估计转子精确位置。使用MATLAB/Simulink软件对该估算方法进行了仿真, 并搭建了以TI的TMS320F28069 DSP为核心的试验系统, 通过自动代码生成技术完成算法的编程, 可以较好地应用于BLDCM的控制, 在一些应用场合可以代替PMSM从而降低使用成本。

关键词: 无刷直流电机; 磁场定向控制; 转子位置估计; 仿真; 试验

中图分类号: TM 33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)11-0025-05

Brushless DC Motor Control Based on Field Oriented Control Theory^{*}

ZHANG Xinrong¹, LIN Lian², ZHANG Dongsheng³, ZHANG Jun¹, WANG Heqian¹

(1. Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment, Ministry of Education,

Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Hubei Sanjiang Aerospace Hongfeng Control Co., Ltd., Xiaogan 432000, China;

3. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Field oriented control (FOC) theory was the most common control method for permanent magnet synchronous motor (PMSM), which required instantaneous position of the rotor. This limited its application to brushless DC motor (BLDCM) using Hall position sensors. In order to apply the FOC theory to the control of BLDCM without increasing the cost of the motor, based on the existing Hall position sensor, an estimation method of the rotor precise position by calculating the average speed of the previous sector based on the output signal of the Hall sensor was proposed. This estimation method was simulated using MATLAB/Simulink software. The experimental system based on TMS320F28069 DSP was built. The algorithm was programmed by automatic code generation technology. Both simulation and experiment results showed that the method could be used well in the control of BLDCM, and it could replace PMSM in some low cost applications.

Key words: brushless DC motor (BLDCM); field oriented control (FOC); rotor position estimation; simulation; experiment

0 引 言

相比传统电流励磁电机, 永磁电机具有结构

简单、体积小、损耗低、质量轻等优点, 广泛运用于各领域, 且发展前景广阔^[1]。永磁电机中, 无刷直流电机(BLDCM)采用方波电流驱动, 只要保证准

^{*} 基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划基金项目(2016KTZDGY-02-03); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102258402, 300102258305)

作者简介: 张新荣(1968—), 男, 博士, 教授, 研究方向为机械系统动力学与控制 and 工程车辆电液控制。

确得到换相时刻的转子位置信息就可以正常工作,非换相时刻则不需要转子位置信息,因而对转子位置传感器的要求较低;永磁同步电机(PMSM)是采用正弦波电流驱动,电流的大小和方向由转子的瞬时位置决定,需要精确得到每一瞬时的转子位置,因而对传感器的要求较高。2种电机的工作原理存在一定的区别,导致PMSM成本高于BLDCM。

磁场定向控制(FOC)理论以矢量变换为基础,将定子电流经过数学变换分解为转矩电流分量和磁通电流分量,分别控制转矩和磁通,把复杂的交流电机控制方式转换为直流电机控制。这种控制方式具有输出转矩平稳、调速范围宽、动态性能好、电压利用率高等优点^[2],广泛应用于PMSM控制。但采用正弦电流驱动的FOC技术需要知道电机转子的瞬时位置,因此获得转子的位置信息是利用该控制技术的关键。

为了获得BLDCM转子的位置,除了可以采用霍尔传感器外,还可以采用其他算法^[3-6]。对于一些低精度位置传感器的电机转子位置进行精确估计,许多学者提出了各种不同的方法^[7-11]。本文提出在不改动电机结构的情况下,利用BLDCM本身的霍尔位置传感器和控制器的快速处理能力,通过定时计数的方式完成转子瞬时位置的获取,将常用于PMSM的FOC理论用于BLDCM。最后,利用MATLAB/Simulink建立仿真模型进行仿真分析,并通过搭建实验台完成了验证试验。仿真和试验结果均表明FOC理论成功地应用于BLDCM。

1 BLDCM 转子位置信息获取

1.1 根据霍尔传感器得到的转子位置信息

BLDCM控制中对转子位置信息的获取必不可少。开关型霍尔传感器常用于转子位置的检测,但在一个电周期内只能获得6个准确的转子位置信息,无法获得这6个转子位置之外的位置信息。因此,如何利用6个离散的霍尔位置信号得到高精度的转子位置是BLDCM应用FOC理论的关键。

1.2 转子实时位置的获取

利用霍尔传感器可以精确获得转子的6个电角度,如图1所示。若转子处于这6个位置之间

时,则电角度不能直接获得。可以采用瞬时估计法来间接得到此时转子的位置。

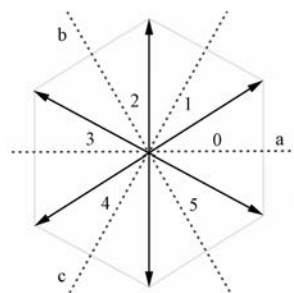


图1 霍尔传感器得到的6个转子位置

假设转子在第*i*扇区内某瞬时位置为 $\theta_i(t)$ 。当转子逆时针旋转时, $\theta_i(t) = \omega_{i-1}t_i$, ω_{i-1} 为转子在第*i*-1扇区时的平均转速, t_i 为转子进入第*i*扇区后经历的时间。根据图1, $\omega_{-1} = \omega_5$;当转子顺时针旋转时, $\theta_i(t) = \omega_{i+1}t_i$,其中 $\omega_6 = \omega_0$ 。

以上计算转子瞬时位置的方法实际上是一个迭代公式,完成迭代的关键是确定初始扇区的初始平均转速。在电机尚未启动时不存在上一个扇区的平均转速,可以假定转子处于扇区的中间位置,该情况下的最大误差为30°。电机启动即可估算转子的位置。由于机械惯性的存在,转子在相邻2个扇区内的转速可以认为相差很小,而且利用已知的6个精确位置信息,转子每转60°都会对估算结果进行一次校准,所以估算结果的偏差不会累积。

2 FOC 原理

2.1 磁场定向

FOC控制的思路是选择电机某一旋转磁场轴作为特定的同步旋转坐标轴。磁场定向轴的选择有3种:转子磁场定向、气隙磁场定向、定子磁场定向。气隙磁场定向和定子磁场定向在磁链关系中均存在耦合,使得矢量控制结构更加复杂;转子磁场定向是仿照直流电动机的控制方式,利用坐标变换将交流电动机的定子电流分解成磁场分量电流(相当于励磁电流)和转矩分量电流(相当于负载电流)并分别加以控制,即磁通电流分量和转矩电流分量二者完全解耦,从而获得类似于直流调速系统的动态性能。

2.2 控制原理

图2所示为FOC控制原理图。

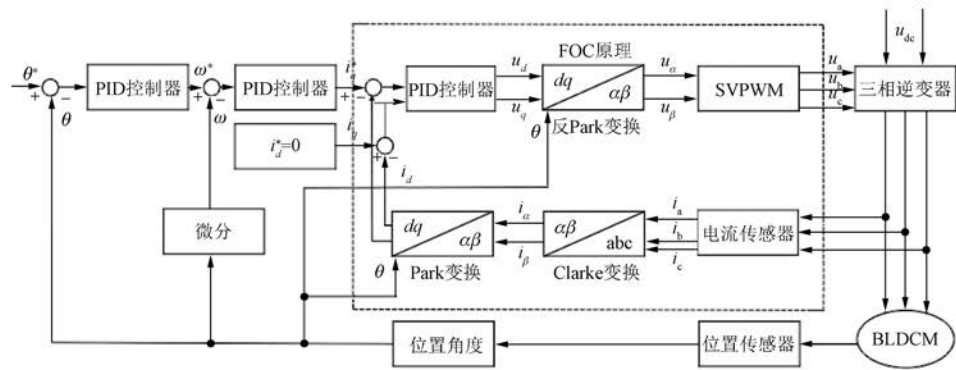


图2 FOC 控制原理图

电流传感器采集电机绕组相电流 i_a 、 i_b ，根据三相电流之和为零，可得 i_c 。经过 Clarke 坐标变换将三相电流变换为两相静止坐标系下电流值 i_α 、 i_β ，然后利用 Park 变换在转子电角度 θ 已知的情况下将其变换到旋转坐标系中，分别称为 d 轴电流分量 i_d 和 q 轴电流分量 i_q 。在旋转坐标系中，该电流分量与转子相对静止，可以采用直流电机控制原理进行控制。其中 i_q 产生的磁动势与转子磁场成 90° ，产生电磁转矩，而 i_d 产生的磁动势与转子磁场平行，不产生转矩，实际应用中可以令 i_d 的设定值 i_d^* 为零。

经过控制算法（如 PID 算法）计算所得的输出 u_d 、 u_q 为要施加到电机绕组上的电压。为了将其再变换为静止三相坐标系，需要经过反 Park 坐标变换生成静止两相正交电压值 u_α 、 u_β ，还需要转子实时电角度 θ ，然后通过空间矢量脉宽调制（SVPWM）生成施加到电机三相绕组的三相正弦交流电压，以实现电机的驱动。

3 仿真与试验

3.1 基于 Simulink 的转子位置估计仿真

3.1.1 仿真目的

将 FOC 方法用于 BLDCM 控制，可以减小控制成本，提高产品竞争力。根据前文的分析，可知转子电角度的准确获取是该方法得以应用的关键。利用 MATLAB/Simulink 软件完成上述算法的仿真，并分析转子位置估计的准确度及误差，为控制精度的分析提供参考仿真环境。

仿真软件采用 MATLAB2017b，BLDCM 及驱动桥均使用 Simulink 库中自带的模型，可以

输出转子瞬时电角度、霍尔传感器信号、相电流等。

表 1 所示为仿真电机参数。参数取值与试验用的电机参数基本一致。为了计算方便和比较转子位置估算误差，转子磁极对数取 1。

表 1 仿真电机参数

参数名称	参数值
磁极对数	1
相数	3
额定电压/V	24
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000
线电阻/ Ω	0.22
线电感/H	9.6×10^{-4}
转动惯量/(kg·m ²)	1.20×10^{-5}
反电动势波形	梯形
转矩系数/(N·m·A ⁻¹)	0.035

3.1.2 仿真及结果分析

利用 Simulink 搭建仿真模型，外部给电机加 $0.1 \text{ N}\cdot\text{m}$ 的负载使电机转动，分别记录电机转子的实际角度（根据模型计算出来的理论值）和利用本文方法估算的转子角度，只采集开始的 0.4 s 的数据。

图 3~图 6 所示分别为电机转子在外负载作用下逆时针和顺时针转动，实际转角和估算转角的比较和局部放大图。

从图 3~图 6 可以看出，电机启动时转子在第一、二扇区时估算转子位置误差较大，与上文分析结果一致。经过霍尔传感器校准后，转子在第二扇区的估算转角与实际转角已经很接近，经过第

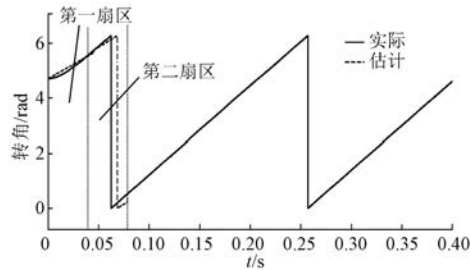


图3 电机转子实际位置与估计位置比较
(逆时针转动)

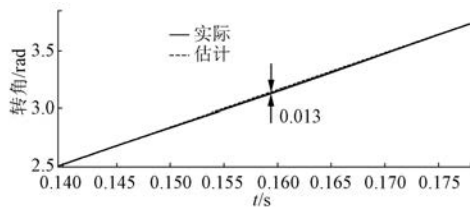


图4 电机转子实际位置与估计位置比较
(逆时针转动)局部放大图

2个霍尔传感器校准后,转子在第二扇区以后的估算转角与实际转角基本吻合。如果把1个扇区的角度(60°)看作满量程,取实际值和估算值的最大误差为绝对误差,则逆时针和顺时针转动时的最大相对误差均为1.24%。

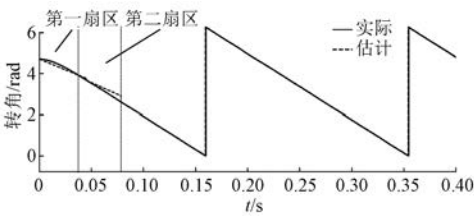


图5 电机转子实际位置与估算位置比较(顺时针转动)

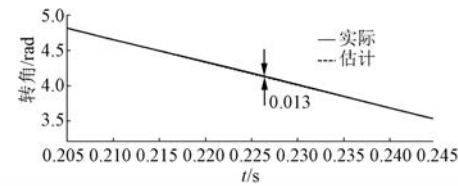


图6 电机转子实际位置与估算位置比较
(顺时针转动)局部放大图

3.2 基于FOC的BLDCM转速控制仿真

为了进一步验证估算方法的效果,根据FOC理论,针对BLDCM建立仿真系统。图7所示为基于FOC控制下的仿真模型框图。因为只验证该估算方法应用在FOC算法中的效果,所以采用开环形式。设置 d 轴电流为零,给定不同的 q 轴电流,以得到电机转速。

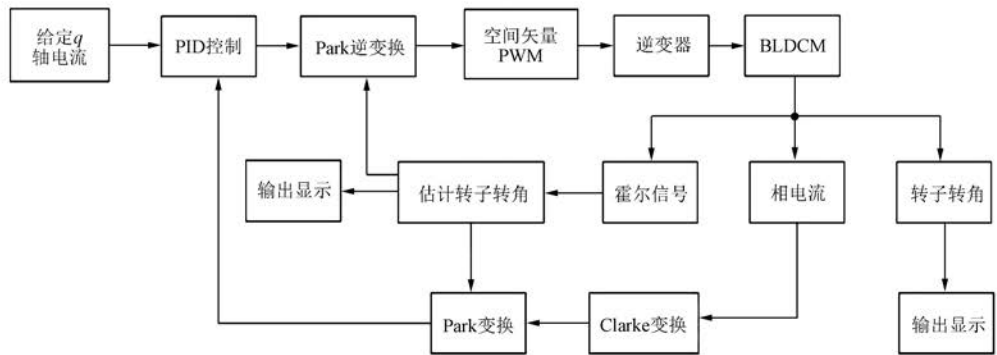


图7 基于FOC控制下的仿真模型建模框图

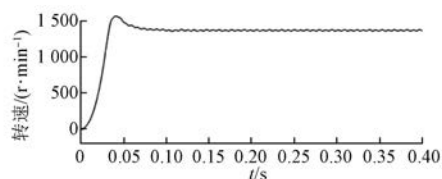
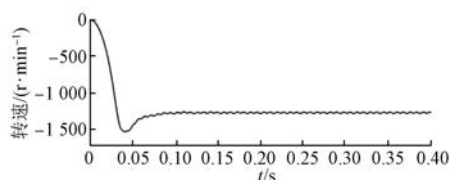
图8、图9所示分别为给定 q 轴电流(此给定值为未标定值)为-300和300时电机的转速曲线。不论是逆时针还是顺时针转动,电机转速在起始阶段均有一个较大的过冲。这主要是因为电机起动时的动态特性,且在开环控制中;另一个原因是起始阶段转子转角估计误差相对较大。约0.1s后电机转速趋于平稳,顺时针转速波动约为21 r/min,逆时针转速波动约为20 r/min。由仿真

结果可以看出,该估算方法可以很好地应用在基于FOC理论的BLDCM控制中。

3.3 试验

3.3.1 试验环境

为了进一步验证本文所提估算方法,搭建试验系统如图10所示。实物图如图11所示。试验系统采用TI公司设计的驱控一体TMS320F28069 DSP作为核心控制器。BLDCM型号为

图 8 q 轴电流标定值为-300 时的转速曲线图 9 q 轴电流标定值为 300 时的转速曲线

57BL75S10-230TF9-D10, 电压为 24 V, 额定转速为 3 000 r/min。

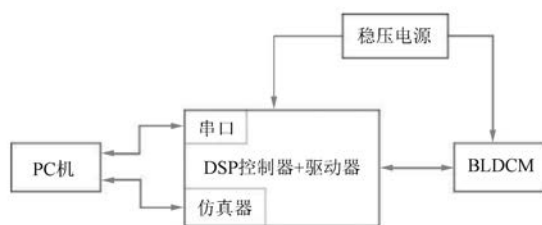


图 10 试验系统组成框图



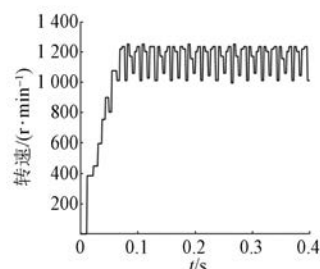
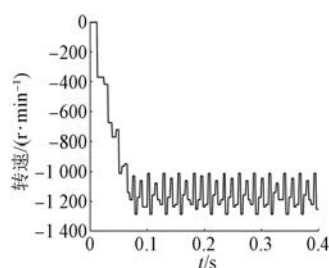
图 11 试验系统实物图

3.3.2 试验步骤及结果分析

试验系统所采用的软件是基于 Simulink 编写, 算法部分和前文仿真模块一致, 不同的是用实际电机代替仿真电机, 并通过代码自动生成技术把算法部分装载到 DSP 控制器中, 通过串口把电机的转速信息传回计算机进行处理。

给定 q 轴电流标定值为-300 时的电机转速曲线如图 12 所示。因为是串口传送, 传送速度较低, 所以显示的转速数值不连续。在电机开始启动后, 约 0.1 s 达到平稳状态, 此后电机的转速在

一定范围内波动。图 12 中, 最高转速为 1 286 r/min, 最低转速为 1 012 r/min。给定 q 轴电流标定值为+300 时转速曲线如图 13 所示。最高转速为 1 236 r/min, 最低转速为 1 011 r/min。图 12、图 13 中正负仅表示转动方向,

图 12 q 轴电流标定值为-300 时的转速曲线图 13 q 轴电流标定值为+300 时的转速曲线

与仿真结果相比, 试验中电机的转速波动较大, 也没有超调。这主要是因为实际电机的阻尼较大且不稳定和其他参数变化也较大等。但总体来说, 这种转子估算方法可以较好地应用在 BLDCM 的 FOC 控制中, 转速波动可以通过闭环控制来抑制。

4 结 语

(1) 通过理论分析、仿真和试验结果分析, 可知采用前扇区平均转速估算转子瞬时位置的方法具有实用性。

(2) 该转子位置估算方法的应用可以使 FOC 理论较好地应用在 BLDCM 的控制中。

(3) 该转子位置估算方法在电机启动时有较小误差。经过 2 个扇区之后, 误差基本消除。

(4) 将 FOC 理论应用于 BLDCM, 可以降低使用成本。

(下转第 81 页)

- 理想电压条件下电力弹簧控制策略[J].电力系统自动化,2018,42(22): 165.
- [4] CHEN X, HOU Y, TAN S C. Mitigating voltage and frequency fluctuation in microgrids using electric springs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 508.
- [5] 尹发根,王淳,王巍璋.计及系统线路阻抗的电力弹簧电压电流同时补偿控制策略[J/OL].电网技术, 2019. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.0041>.
- [6] 吴捷,王宝华.基于最优比例积分的电力弹簧控制器设计[J].新能源发电控制技术,2017,39(4): 39.
- [7] MA G, XU G, CHEN Y, et al. Voltage stability control method of electric springs based on adaptive PI controller [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2018, 95: 202.
- [8] TAN S C, LEE C K, HUI S Y. General steady-state analysis and control principle of electric springs with active and reactive power compensations [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(8): 3958.
- [9] SONI J, SEN B, KANAKESH V K, et al. Performance analysis and evaluation of reactive power compensating electric spring with linear loads [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2018, 101: 116.
- [10] YAN S, WANG M H, YANG T B, et al. Achieving multiple functions of 3-phase electric springs in unbalanced 3-phase power systems using the instantaneous power theory[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(7): 5784.
- [11] 王青松.电力弹簧若干关键技术研究[D].南京:东南大学,2016.
- [12] LEE C K, CHAUDHURI B, HUI S Y. Hardware and control implementation of electric springs for stabilizing future smart grid with intermittent renewable energy sources [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2013, 1(1): 18.
- [13] 程益生,陆振纲,汪可友,等.电力弹簧稳态运行范围及越限失灵机理分析[J].电力系统自动化, 2017, 41(14): 147.
- [14] 吴长元,吴杰康,翁子豪,等.新能源配电网多类型有功无功电源容量协同优化[J].广东电力, 2018, 31(3): 98.
- [15] ZHENG Z, LI J, DUAN P. Optimal chiller loading by improved artificial fish swarm algorithm for energy saving [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2018, 155: 227.

收稿日期: 2019-08-26

(上接第 29 页)

【参考文献】

- [1] 张勇,程小华.无刷直流电机与永磁同步电机的比较研究[J].微电机,2014,47(4): 86.
- [2] 韩伟.不同驱动方式下的无刷直流电机性能比较[J].城市轨道交通研究,2017,20(2): 38.
- [3] 王高林,杨荣峰,于泳,等.内置式永磁同步电机转子初始位置估计方法[J].电机与控制学报,2010, 14(6): 56.
- [4] 金光哲,徐殿国,高强,等.高频注入电压预估同步电机转子位置检测方法[J].中国电机工程学报, 2014, 34(9): 1376.
- [5] 张新荣,张理伟,刘红平,等.无刷直流电机基于线间反电动势的转子位置估计[J].长安大学学报(自然科学版),2016,36(1): 105.
- [6] 王欣,梁辉,秦斌.基于 OSELM 的无刷直流电机无位置传感器控制[J].电机与控制学报,2018,22(11): 82.
- [7] ZHANG X, ZHANG W. An improved rotor position estimation in PMSM with low-resolution Hall-effect sensors[C]//2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Hangzhou, 2014.
- [8] 刘丙友,竺长安,郭兴众,等.基于改进型 ADRC 的永磁同步电机转子位置角控制方法[J].电机与控制学报,2017,21(12): 24.
- [9] LIU Y, ZHAO J, XIA M, et al. Model reference adaptive control-based speed control of brushless DC motors with low-resolution Hall-effect sensors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1514.
- [10] 张洪帅,王平,韩邦成.基于模糊 PI 模型参考自适应的高速永磁同步电机转子位置检测[J].中国电机工程学报,2014,34(12): 1889.
- [11] 倪启南,杨明,徐殿国,等.低分辨率位置传感器永磁同步电机精确位置估计方法综述[J].电工技术学报,2017,32(22): 70.

收稿日期: 2019-08-03