

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.01.014

永磁同步电机无传感器单电流环 启动及闭环切换研究

朱万平, 孙耀程, 胡勤丰*, 薛文彬
(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

摘要:针对永磁同步电机无位置传感器的低速启动问题,对转速开环、电流闭环的单电流环启动法,即给定旋转电流矢量带动电机转子旋转启动进行了研究。采用单电流环启动的方法,开展了由单电流环模式切换到转速闭环模式运行的切换过程分析,提出了在启动及切换过程中增加 d 轴电流控制环节,即增大“转矩-功角自平衡”区域来优化启动与改进的切换方法,利用 DSP 构成的全数字交流控制系统对提出的方法在切换时电流冲击与功角差进行了测试。研究表明,所提出的启动与改进切换方法是可行的,能够使电机由零速平稳启动,在切换时电流与功角差变化大大减小,可以平滑地完成单电流环启动至转速闭环控制模式的切换,最终平顺地加速到额定运行状态。

关键词:无位置传感器;永磁同步电机;切换;启动

中图分类号:TH39;TM301.2

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)01-0074-04

Single current loop starting and closed loop transition of sensorless PMSM control

ZHU Wan-ping, SUN Yao-cheng, HU Qin-feng, XUE Wen-bin

(School of Automation, NanJing University of Aeronautics and Astronautics, NanJing 210016 China)

Abstract: Aiming at the problem of permanent magnet synchronous motor (PMSM) sensorless starting at low speed, the method of open-loop speed and closed current loop was researched, which drives motor by given current vector. After the analysis of the transition from single current loop to speed closed loop control based on the startup of single current loop control, a method that d -axis current control was brought to increase “torque-power angle balance” area was presented to optimize startup and transition. The current and power angle changes of transition in the proposed method were tested by digital AC control system using DSP. The results indicate that the proposed method is feasible to start and switch, the motor can start smoothly from zero speed. The current and power angle changes of transition are decreased rapidly, and the transition from single current loop to speed closed loop is smooth. Finally, the motor can be accelerated to normal operating mode.

Key words: sensorless; permanent magnet synchronous motor (PMSM); transition; startup

0 引言

永磁同步电动机 (PMSM) 因其具有调速性能好、转矩惯性好、功率密度大、动态响应快、过载能力强等优点,近年来在电动汽车、工业伺服、航空航天、家用电器等诸多领域获得了越来越广泛的应用。为了实现 PMSM 的高精度、高动态性能控制,需要知道转子的位置和速度。传统的方法是通过安装机械式传感器来实

现。但是传感器的存在增加了系统的成本和复杂性,也降低了系统对电磁噪声、机械振动以及温度的抗干扰能力,并且对永磁同步电动机在一些特殊场合的应用产生限制。

为了克服这样的缺陷,无位置传感器控制技术便成了电机控制技术领域中的一个研究热点。为此,很多学者致力于无位置传感器控制策略的研究并提出很多切实可行的方法。其中比较成熟的方法是通过电机

收稿日期:2014-09-22

作者简介:朱万平(1991-),男,安徽安庆人,主要从事无刷直流以及永磁同步电机控制方面的研究。E-mail:ping_zwp@126.com

通信联系人:胡勤丰,男,副教授,硕士生导师。E-mail:huqinfeng@nuaa.edu.cn

定子绕组的感应反电势和转子位置之间的关系来估算位置信号。但是该类方法不适用于零速与低速,因此电机也无法完成无位置传感器的启动。

对于该类无位置算法方法,低速或零速启动是驱动控制系统中的一个关键问题。有学者提出升频升压同步启动方式,这种方法由于没有电流闭环,启动过程中可能出现电流较大的情况^[1];也有文献提出高频信号注入法,但是这种方法对信号检测精度要求较高,且需要设计多个滤波器,且计算过程复杂,限制了其在实际场合的应用^[2-3]。

本研究采用一种无位置传感器自启动控制策略,其启动阶段采用单电流环控制方式。正常运行阶段以转速、电流双闭环控制,通过对电流的调节可以实现速度、角度的平顺切换^[4],以此来实现永磁同步电机的全速度范围内的无位置传感器控制。在中、高速段,本研究采用滑模观测器法来观测位置角信号,以此实现矢量控制^[5-10]。

1 基于假定坐标系的启动过程

电机在单电流环运行模式下需要位置角信号用于坐标变换,而这个位置角信号就是“假定旋转坐标系”,本研究所设计的启动过程的给定位置角信号由转速斜坡函数经过积分得到,电流闭环模式也可以有效地控制启动过程中电机的电流。

基于假定,旋转坐标系的启动过程分3个步骤:

①转子预定位;②加速启动;③控制方式切换。

1.1 转子预定位阶段

本研究建立假定坐标系 dq^* ,定位阶段将空间电流矢量定位在假定坐标系的交轴 q^* 的位置,所以空载时转子会被定位在超前假定坐标系 90° 的位置。

定位过程如图1所示,在定位前转子位置随机。通过施加恒定的定子电压矢量,在定转子磁场的相互作用下,转子就能够定位到超前假定旋转坐标系 90° 的位置。

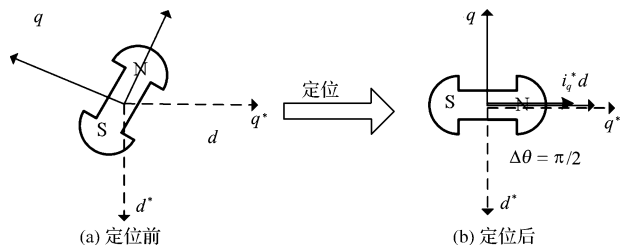


图1 转子预定位过程示意图

1.2 加速启动阶段

转子定位完毕后开始加速启动过程,转速给定为斜坡信号,经过积分产生假定旋转坐标系的给定位置角,经过系统运算实时更新电压矢量,从而驱动电机加速旋转,牵引转子平滑启动,启动过程 dq^* 与 dq 坐标

系的矢量图如图2所示。

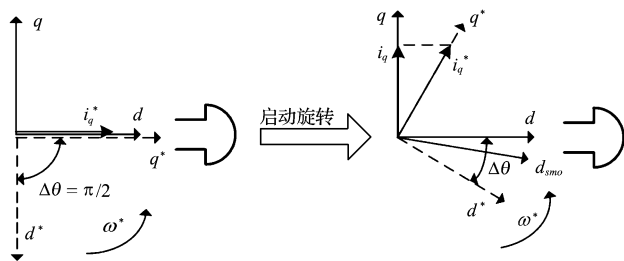


图2 启动过程 dq^* 与 dq 坐标系的矢量图

在实际坐标系和假定坐标系之间存在这一个角度差 $\Delta\theta$,而且这个角度差随着负载的变化而不断地变化。

对于表贴式永磁同步电机,此时的转矩关系为:

$$T_e = \frac{3}{2} p_n i_q \psi_d = \frac{3}{2} p_n i_q^* \times \cos \Delta\theta \times \psi_f \quad (1)$$

由于这个角度差的存在,在定子电流大小相同时,它的功角小于标准矢量控制的功角。本质上来讲,该控制过程中实际上是通过调整功角来控制转矩和转速的目的,也即为功角控制。根据文献[3]的分析,该控制具有“转矩-功角自平衡”的特性,因此具有一定的抗负载扰动的能力。

1.3 控制方法切换阶段

电机转速上升后,滑模位置观测器能够较为精确地观测转子位置与转速,电机的控制方式将由单电流环运行模式向基于滑模观测器的无位置双闭环运行进行切换。但是给定坐标系和实际坐标系之间还存在着一个角度差 $\Delta\theta$,需要将 $\Delta\theta$ 消除后才能平顺可靠地切换。

文献[3]提出基于电流幅值变化的切换过渡方案,即通过减小 i_q^* 大小的方式来调整 $\Delta\theta$ 的大小,使它缩小到0,理论上,电机在 i_q^* 减小的过程中为了达到新的转矩平衡, $\Delta\theta$ 在其功角调整过程中会不断缩小,当 i_q^* 递减到与实际 i_q 相等的时候, $\Delta\theta$ 将缩小到零。该自调整过程的示意图如图3所示。

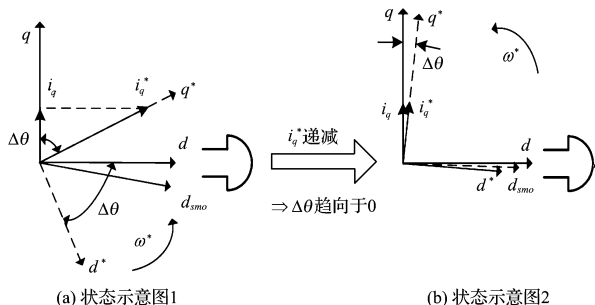


图3 切换调整过程示意图

基于电流幅值变化的切换方法,实际上是根据单电流环运行过程中“转矩-功角自平衡”原理迫使给定坐标系向实际坐标系靠近。但是这个“转矩-功角自平衡”有一个运行稳定的范围,即 $\Delta\theta$ 在 $(-\pi/2, \pi/2)$ 的

范围内,超出这个范围,电机将失衡。

2 切换方法改进

基于电流幅值变化的切换过渡方案虽然能够完成控制方式的切换,但是该方法也存在一些缺陷。首先,在切换的时刻会将系统的运行状态置于“转矩-功角自平衡”区域的边缘状态,而且切换调整过程中电机转速在不断减小,即 $\Delta\theta$ 在缩小,若 $\Delta\theta$ 变为负值,电机会有失步的风险。其次,这种方法为了保持电机运行在“准稳态”的运行状态,需要较长的电流调节过程,所以实用性和可靠性并不是十分理想。

为了完善以上的不足,这里改变启动过程中的电流指令,启动时假定直轴和交轴的电流都给定一个正值,定位与启动过程与之前一样。切换过程仍然通过减小 i_q^* 大小的方式来调整 $\Delta\theta$ 的大小,使它缩小到 0,然后进行切换,完成切换之后再将 i_d^* 减小到零,成为标准的矢量控制模式。具体过程如图 4 所示。

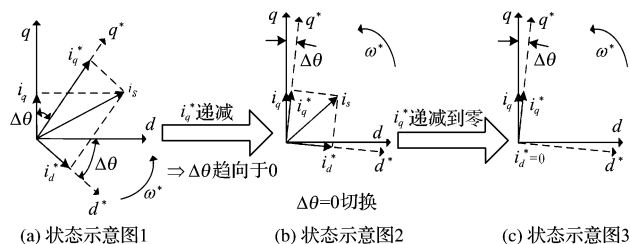


图 4 改进的切换调整过程示意图

启动过程增加一个 d 轴电流的分量是为了来改变“转矩-功角自平衡”区域的范围(如图 5 所示),其中 $\theta_c = \arctan(i_d^*/i_q^*)$,这样可以使得电流调整过程中,系统不会处于自平衡的边缘状态。即 $\Delta\theta = 0$ 时,功角 $< \pi/2$ 。这样交轴电流可以实现较快的调节,而 i_d^* 则保持不变,当 i_q^* 递减到与 i_q 相等的时候,3 个坐标轴重合。若此时由于观测误差,坐标轴未完全重合, i_d^* 在 d 轴位置将会产生一个转矩分量,而此转矩分量“有助于”给定坐标系和实际坐标系的重合,将实际坐标系“锁定”在给定坐标的位置。切换信号同样以 $\Delta\theta'$ 过零点为准,切换之后将 i_d^* 逐渐减小到零,恢复到 $i_d = 0$ 的矢量控制模式。

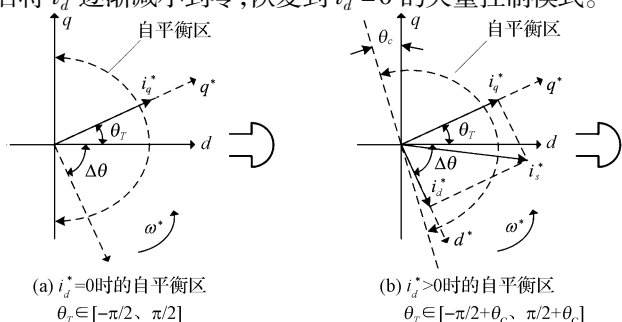


图 5 “转矩-功角自平衡”区域的调整

对于 i_d^* 值选取,如果太大会增强 d 轴磁场的饱和,且降低电流的利用率,如果取得太小则体现不出改进效果,所以需要根据具体情况适当选取。

系统控制框图如图 6 所示。

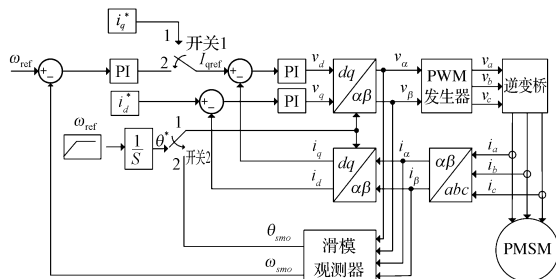


图 6 控制原理示意图

3 实验分析

本研究采用以 DSP2812 为控制芯片的 PMSM 控制系统进行实验,分别做了两组启动与切换实验,并进行了对比:

第一组启动时交轴电流给定值为 $i_q^* = 2$ A,直轴电流给定值为 $i_d^* = 0$ A,给定转速为斜坡信号,由 0 上升到 600 r/min,给定转速上升时间为 1 s,电机完成启动之后开始进行控制状态的切换过程, i_q^* 开始递减,递减斜率为 1 A/s;

第二组实验启动时交轴电流给定值为 $i_q^* = 1.8$ A,直轴电流给定值为 $i_d^* = 0.9$ A,同样给定转速为斜坡信号,1 s 内由 0 上升到 600 r/min,控制状态的切换过程中, i_q^* 递减,递减斜率为 1 A/s, i_d^* 保持不变,同样以滑模观测角和给定位置角的差值的过零点作为切换信号,切换后开始递减 i_d^* ,递减斜率同样为 1 A/s。

启动过程的实验波形分别如图 7 所示。

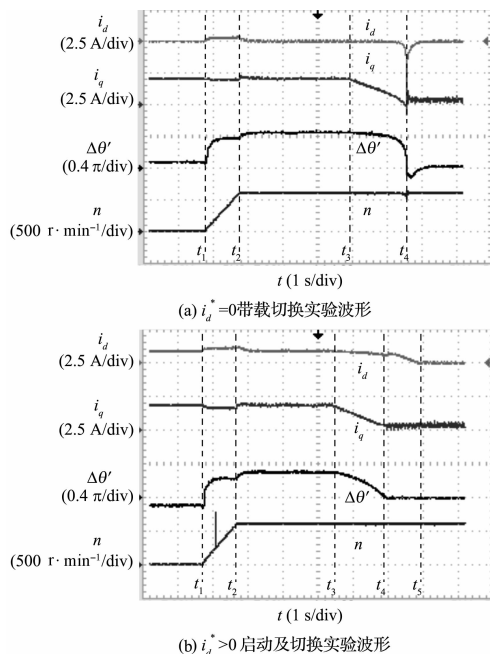


图 7 无位置启动及切换实验波形

图7(a)中, t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 分别为加速开始时刻、加速停止时刻、 i_q^* 递减时刻以及控制方式切换时刻, 所以 $t_1 \sim t_2$ 时间段为加速阶段, $t_3 \sim t_4$ 时间段为切换调整阶段, t_5 为 i_d^* 递减到0的时刻。

首先,从图7中可以看出,电机的转速在单电流环运行下能够按照给定的斜坡信号完成匀加速启动,并且加速过程平稳。第一种切换方法在切换时刻电流的冲击较大,并伴有明显的振荡过程,切换时刻前后电机的转速也有明显的抖动(约 ± 100 r/min)。而改进后的启动与切换过程如图7(b)所示。与图7(a)相比,电机的加速过程一致,但是在切换时刻电机的电流的冲击大大减小,几乎被消除,同时转速也更加稳定,没有明显的升降,改进之后的切换过程几乎是平滑的切换,消除了之前切换过程不够稳定的弊端,显著地提高了由单电流环运行模式向转速闭环模式切换的可靠性。

电机在带载 $0.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 负载的切换波形如图8所示,由于实验所用的测功加载设备为电涡流测功机,在静止和低速时无法精确加载,所以这里在空载情况下,完成加速启动后,再进行加载,检验带载时的切换过程。从实验结果可以看出,单电流环控制能够在

$0.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 负载下稳定运行,并且能够完成控制方法的切换,通过对比图8(a)、8(b)可以看出,在带载情况下,改进后的切换方式更加平滑、可靠。

4 结束语

本研究提出了一种全速度范围内实现无位置传感器控制的策略。针对无位置传感器开环启动与闭环运行的切换问题,提出了改进方案,提高了切换过程的可靠性与平滑性。然后又进行了无位置传感器下电机单电流环启动、并在高速切换到双闭环矢量控制的实验验证。

实验结果证实,这种启动和切换方法可行,可以有效避免电机启动和切换时发生的冲击和振荡,最终比较平顺地加速到额定运行状态。

参考文献(References):

- [1] 刘 军. 永磁电动机控制系统若干问题的研究[D]. 上海:华东理工大学信息科学与工程学院,2010.
- [2] 谷善茂,何凤有,谭国俊,等. 永磁同步电动机无传感器控制技术现状与发展[J]. 电工技术学报,2009,24(11):15-20.
- [3] 林 东,彭 惠. 永磁同步电机开环 V/F 稳定控制方法[J]. 机电工程技术,2012(10):33-35,52.
- [4] 王子辉. 永磁同步电机全速度范围无位置传感器控制策略研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2012.
- [5] 储剑波. 驱动空调压缩机的永磁同步电动机的控制技术[D]. 南京:南京航空航天大学自动化学院,2010.
- [6] 李 冉. 永磁同步电机无位置传感器运行控制技术研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2006.
- [7] HAN Y, CHOI J, KIM Y. Sensorless PMSM drive with a sliding mode control based adaptive speed and stator resistance estimator[J]. IEEE Transactions On Magnetics, 2000,36(51):3588-3591.
- [8] 王子辉,叶云岳. 反电势算法的永磁同步电机无位置传感器自启动过程[J]. 电机与控制学报,2011,15(10):36-42.
- [9] 王成元,夏家宽,杨俊友,等. 现代电机控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [10] 王丰尧. 滑模变结构控制[M]. 北京:机械工业出版社,1995.

[编辑:洪炜娜]

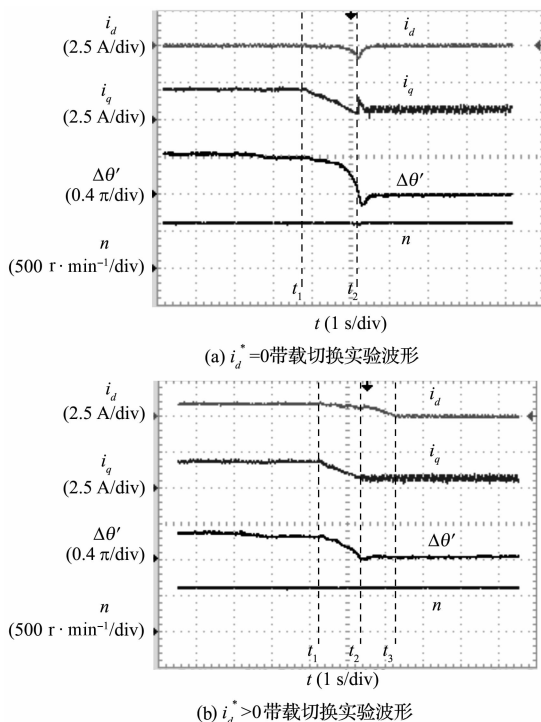


图8 无位置带载切换实验波形

本文引用格式:

朱万平,孙耀程,胡勤丰,等. 永磁同步电机无传感器单电流环启动及闭环切换研究[J]. 机电工程,2015,32(1):74-77.

ZHU Wan-ping, SUN Yao-cheng, HU Qin-feng, et al. Single current loop starting and closed loop transition of sensorless PMSM control[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015,32(1):74-77.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>