

基于 d 轴电流误差的永磁同步电机旋变误差角识别方法

徐鹏程

(中船重工海为郑州高科有限公司,河南 郑州 450000)

摘要: 由于位置传感器在安装到转子轴时带来的误差,使得参考坐标系转换的转子位置角和实际转子位置角不同,导致矢量控制的性能会由于 d, q 轴的耦合而下降。为了得到精确的转子位置角(位置传感器测得角度加上旋变误差角),需要得到精确的旋变误差角。首先给出了永磁同步电机的数学模型,然后在此基础上,提出一种基于 d 轴电流误差的永磁同步电机旋变误差角识别方法。该方法是通过保持 i_d 电流误差积分值为零,从而调节识别角至准确的旋变误差角。最后,对所提方法进行了仿真和试验验证,结果表明了所提方法的可行性和有效性。

关键词: 永磁同步电机;转子位置角;旋变误差角识别; d 轴电流误差

中图分类号: TM301 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd21787

Rotation Error Angle Identification Method of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on d -axis Current Error

XU Pengcheng

(CSIC Haiwei Zhengzhou High-tech Co., Ltd., Zhengzhou 450000, Henan, China)

Abstract: Due to the error caused by the position sensor when mounted to the rotor shaft, the rotor position angle and the actual rotor position angle used for the reference coordinate system conversion are different, it results in the decrease in the performance of the vector control due to the coupling of the d, q axis. In order to obtain an accurate rotor position angle (the angle measured by the position sensor plus the rotation error angle), it is necessary to obtain an accurate rotation error angle. The mathematic model of permanent magnet synchronous motor was given, and then a rotating angle identification method of permanent magnet synchronous motor based on d -axis current error was proposed. The method was to maintain the i_d current error by integrating the value of zero to adjust the identification angle to the exact rotation error angle. Finally, the proposed method was simulated and experimentally verified. The results show the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); rotor position angle; rotation error angle identification; d -axis current error

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)因其卓越的性能而得到了广泛的应用,对其调速性能的研究也是一直以来大家关注的重点,无位置传感器检测法和基于位置传感器检测法是现阶段研究的两种主流方法。无位置传感器检测法在电机处于静止状态或刚通电时无法检测转子位置信息;基于位置传感器检测法因位置传感器的安装误差使得检测结果不能真实地反应转子的实际位置,研究人员在位

置传感器检测法的基础上提出了很多方法,但每种方法都有一定的不足之处^[1-11]。本文提出了一种基于 d 轴电流误差的永磁同步电机旋变误差角识别方法。该方法是通过保持 i_d 电流误差积分值为零,从而调节初始旋变误差角至正确的旋变误差角。

1 永磁同步电机的数学模型

永磁同步电机(PMSM)可以等效为如图1所

示的三相平衡电路(每相包含一个电阻、一个电感和一个电动势),三相电动势瞬时电压之和为零,即 $e_{as}+e_{bs}+e_{cs}=0$, e_{as}, e_{bs}, e_{cs} 分别为三相静止坐标系下的三相反电动势。

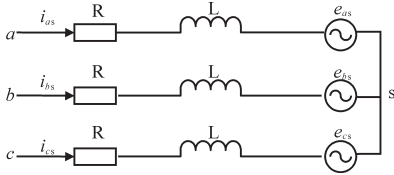


图1 永磁同步电机等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of PMSM

图1电路可以用以下公式描述:

$$\begin{cases} U_{as} = Ri_{as} + L \frac{di_{as}}{dt} + e_{as} \\ U_{bs} = Ri_{bs} + L \frac{di_{bs}}{dt} + e_{bs} \\ U_{cs} = Ri_{cs} + L \frac{di_{cs}}{dt} + e_{cs} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $U_{as}, U_{bs}, U_{cs}, i_{as}, i_{bs}, i_{cs}$ 分别为三相静止坐标系下的三相电压、三相电流; R 为定子电阻; L 为定子电感。

式(1)可以转化为两相静止坐标系下的方程,如下所示:

$$\begin{cases} U_{ds}^s = Ri_{ds}^s + L \frac{di_{ds}^s}{dt} + e_{ds}^s \\ U_{qs}^s = Ri_{qs}^s + L \frac{di_{qs}^s}{dt} + e_{qs}^s \end{cases} \quad (2)$$

式中: $U_{ds}^s, U_{qs}^s, i_{ds}^s, i_{qs}^s, e_{ds}^s, e_{qs}^s$ 分别为两相静止坐标系下的两相电压、两相电流、两相反电动势。

式(2)可以进一步转化为同步旋转坐标系下的方程,如下式所示:

$$\begin{cases} U_{ds}^e = Ri_{ds}^e + L \frac{di_{ds}^e}{dt} - \omega_e Li_{qs}^e + e_{ds}^e \\ U_{qs}^e = Ri_{qs}^e + L \frac{di_{qs}^e}{dt} + \omega_e Li_{ds}^e + e_{qs}^e \end{cases} \quad (3)$$

式中: $U_{ds}^e, U_{qs}^e, i_{ds}^e, i_{qs}^e, e_{ds}^e, e_{qs}^e$ 分别为两相同步旋转坐标系下的两相电压、两相电流、两相反电动势; ω_e 为旋转速度。

2 旋变误差角识别方法及实现

2.1 旋变误差角识别方法

图2为永磁同步电机的角度示意图,图2中, as 轴、 bs 轴、 cs 轴构成三相静止坐标系, d 轴和 q 轴构成实际同步旋转坐标系, d_r 轴和 q_r 轴构成观测的同步旋转坐标系, θ 为实际的转子位置角, θ_r 为位置传感器测的转子位置角, θ_{err} 为旋变误差角。

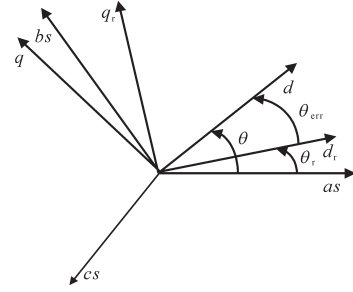


图2 永磁同步电机的角度示意图

Fig.2 Angle schematic of PMSM

式(3)中,设置 $e_{ds}^e=0, e_{qs}^e=\omega_e \Psi$, Ψ 为转子磁链。则式(3)可以转化为下式:

$$\begin{cases} U_{ds}^e = Ri_{ds}^e + L \frac{di_{ds}^e}{dt} - \omega_e Li_{qs}^e \\ U_{qs}^e = Ri_{qs}^e + L \frac{di_{qs}^e}{dt} + \omega_e Li_{ds}^e + \omega_e \Psi \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可知:当用于参考坐标系转换的转子位置角和实际转子位置角相同时,只有 q 轴有反电动势;当用于参考坐标系转换的转子位置角和实际转子位置角不同,出现如图2所示的误差角 θ_{err} 时,反电动势将会同时出现在 d 轴和 q 轴。 d 轴上的反电动势为

$$e_{ds-err} = \omega_e \Psi \sin(\theta_{err}) \quad (5)$$

式中: e_{ds-err} 为电流调节器在 d 轴上的输出反电动势。

由式(5)可知,通过调节识别角(初始值为0),使所用角度(位置传感器测得角度加上识别角)与实际转子位置角相同(即 θ_{err} 为0)时, e_{ds-err} (即 $k_i \int_0^t (i_d^* - i_d) dt$, dt 为积分计算的计算周期)为0。

具体调节规则如下:

- 1)当 $\omega_e > 0, e_{ds-err} > 0$ 时, $\theta_{err} < 0$,也就是所用角度小于实际角度,所以识别角应向上调节;
- 2)当 $\omega_e > 0, e_{ds-err} < 0$ 时, $\theta_{err} > 0$,也就是所用角度大于实际角度,所以识别角应向下调节;
- 3)当 $\omega_e < 0, e_{ds-err} > 0$ 时, $\theta_{err} > 0$,也就是所用角度大于实际角度,所以识别角应向下调节;
- 4)当 $\omega_e < 0, e_{ds-err} < 0$ 时, $\theta_{err} < 0$,也就是所用角度小于实际角度,所以识别角应向上调节。

2.2 实现方法

图3为识别角(初始值为0)开始调节标志判断流程图。首先电机开环启动,当采样到的电机转速大于45 r/min时,标志位置为1,否则为0。

图4为误差角识别过程。当 $FLAG$ 为1时,计算 $k_i \int_0^t (i_d^* - i_d) dt$ 即 e_{ds-err} 值。当 $e_{ds-err} > 0$ 时,由2.1节的规则1)可知,应增大识别角;当 $e_{ds-err} < 0$ 时,由

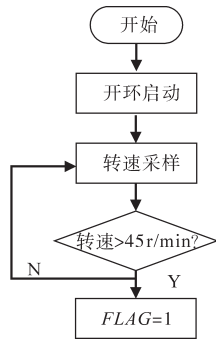


图3 识别角开始调节标志判断

Fig.3 Marker judgment when recognition angle starts to adjust

2.1节的规则2)可知,应减小识别角。然后判断 e_{ds-err} 是否小于判断用阈值 δ ,如果小于 δ ,延时20个计算周期,继续判断 e_{ds-err} 是否小于 δ ,否则返回继续进行积分计算,如果延时后,判断 $e_{ds-err} < \delta$,则停机保存识别角为旋变误差角,否则返回继续进行积分计算。

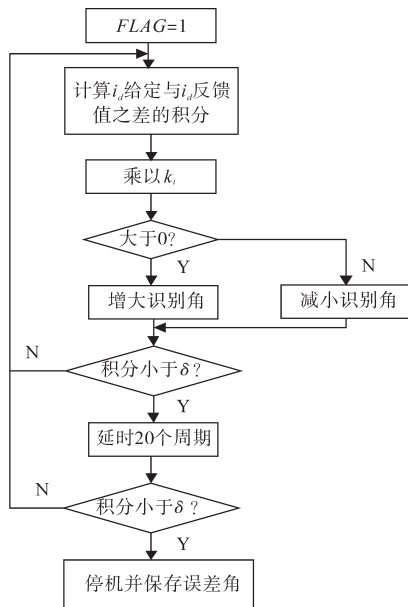


图4 误差角识别过程

Fig.4 Error angle identification process

3 仿真和试验验证

3.1 仿真实验

建立如图5所示的仿真模型。

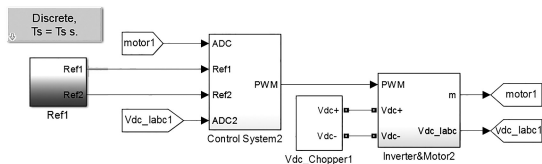


图5 永磁同步电机控制系统的仿真模型

Fig.5 Simulation model of PMSM control system

永磁同步电机仿真参数如下:定子电阻33 mΩ,

直轴电感2.67 mH,交轴电感3.91 mH,极对数4,永磁体磁链0.869 4 Wb,额定电压1 000 V,额定电流116.4 A,额定频率133.3 Hz,额定功率180 kW,直流母线电压1 500 V。

通过修改永磁同步电机的初始角来模拟旋变误差角。模拟旋变误差角识别方法采用2.1节的方法。分别设置电机初始角为4 rad,3.3 rad,仿真时间为0.2 s。仿真结果分别如图6、图7,上图为识别角度 θ_{rec} 波形,中图为设置的初始角 θ_{init} 波形,下图为识别角度与设置初始角的偏差 θ_{err} 波形。从仿真结果可以看出,经过不到0.1 s时间后,识别出的角度基本等于初始角,识别角度与设置初始角的偏差小于0.04 rad。

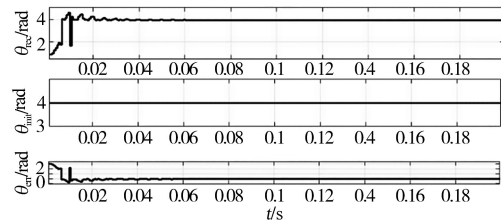


图6 仿真结果(初始角为4 rad)

Fig.6 Simulation results (initial angle is 4 rad)

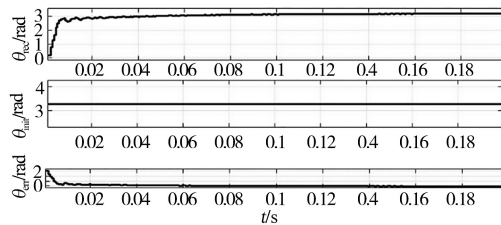


图7 仿真结果(初始角为3.3 rad)

Fig.7 Simulation results (initial angle is 3.3 rad)

3.2 试验验证

小功率试验验证平台如图8所示,包括永磁同步电机、直流电机和飞轮,直流电机用于提供稳态负载,飞轮用来模拟大惯性负载。

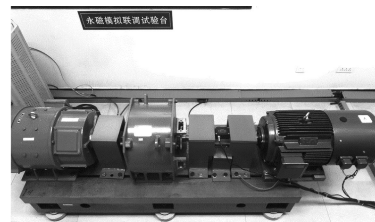


图8 小功率永磁模拟联调试验台

Fig.8 Low-power permanent magnet simulator

永磁同步电机的试验参数如下:定子电阻415 mΩ,直轴电感10.99 mH,交轴电感17.84 mH,极对数4,永磁体磁链0.657 5 Wb。

通过比较光DA输出的AB相线电压(程序计算的AB相线电压,通过光DA输出到录波仪上)

和电压传感器测得AB相线电压的相位差。具体是电机开环启动,旋转到40 r/min 停机,通过录波仪记录光DA输出的AB相线电压和电压传感器测的AB相线电压,通过比较两个电压相位,可以得到实际的旋变误差角为3.09 rad。然后电机开环启动,到45 r/min 时,开始采用第2节的方法进行辨识,当辨识结束标志为1时,停机,通过上位机记录旋变误差角。重复10次试验,结果如表1所示。

表1 试验结果
Tab.1 Experimental results

识别的旋变误差角/rad	偏差(绝对值)/rad
3.06	0.03
3.07	0.02
3.11	0.02
3.08	0.01
3.05	0.04
3.10	0.01
3.06	0.03
3.12	0.03
3.11	0.02
3.07	0.02

从表1可以看出,识别出的旋变误差角和实际的旋变误差角最大偏差的绝对值为0.04 rad。

4 结论

本文首先得到永磁同步电机的数学模型,然后在此基础上,提出一种基于d轴电流误差的永磁同步电机旋变误差角识别方法。该方法是通过保持 i_d 电流误差积分值为零,从而调节初始旋变误差角至正确的旋变误差角。最后,对所提方法进行了仿真和试验验证,结果表明了所提方法的可行性和有效性。

在数字调速系统中,通过软件编程在控制器内部建立该识别方法实际的控制算法,控制器实时检测实际反馈的电流值并同给定目标转速下对应的电流值做比较,经过控制器内部运算后进而调整输出电流的大小和抱闸的动作,进而控制系统进入理想转速。

参考文献

- [1] 张子良,胡存刚,张云雷.一种改进的PMSM转子初始位置检测方法[J].电气传动,2020,50(3):12-15.
- [2] 彭思齐,李洞湘.一种基于脉振高频电压注入法的转子位置检测方法[J].电气传动,2020,50(3):3-7,11.
- [3] 杜昭平,景晖,魏鹏英,等.基于SOGI-PLL的永磁同步电机转子位置估计方法[J].电气传动,2019,49(6):3-7.
- [4] 徐欣.定子磁链自校正PMSM无位置传感器控制新方法[J].电气传动,2018,48(12):3-6.
- [5] 陈荣.基于增量式光电编码盘的永磁同步电机转子位置初始定位[J].电机与控制应用,2007,34(3):32-34.
- [6] Jeong Yu-seok, Lorenz Robert D, Jahns Thomas M, et al. Initial rotor position estimation of an interior permanent-magnet synchronous machine using carrier-frequency injection methods[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2005, 41(1): 38-45.
- [7] 石坚,汤宁平,谭超.永磁同步电机无位置传感器控制系统[J].电工与控制学报,2007,11(1):126-133.
- [8] 梁艳,李永东.无传感器永磁同步电机矢量控制中转子初始位置的估算方法[J].电工技术,2003,22(2):10-13.
- [9] 万山明,吴芳,黄声华.基于高频电压信号注入的永磁同步电机转子初始位置估计[J].中国电机工程学报,2008,28(33):82-86.
- [10] 黎永华,皮佑国.基于磁定位原理的永磁同步电机转子初始位置定位研究[J].电气传动,2010,40(3):28-31.
- [11] 梁艳,李永东.一种新颖的永磁同步电机转子初始位置检测方法[J].中国电机工程学报,2013,33(3):75-82.

收稿日期:2020-04-16

修改稿日期:2020-05-14